RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté Égalité Fraternité

Université de Toulouse

Doctorat de l'Université de Toulouse

préparé à l'Université Toulouse - Jean Jaurès

Cartographie et morphologie des karsts d'Afrique australe à travers l'analyse des données satellites et des données de terrain. Application à la recherche de potentiels karsts fossilifères à Hominines en Afrique australe

---

Thèse présentée et soutenue, le 17 décembre 2025 par

Bastien CHADELLE

École doctorale
TESC - Temps, Espaces, Sociétés, Cultures

Spécialité
Préhistoire

Unité de recherche
TRACES - Travaux et Recherches Archéologiques sur les Cultures, les Espaces et les Sociétés

Thèse dirigée par
Laurent BRUXELLES et Nicolas POIRIER

Composition du jury
M. Jacques JAUBERT, Président, Université de Bordeaux
M. Olivier DAUTEUIL, Rapporteur, Université de Rennes
Mme Carole NEHME, Examinatrice, Université de Rouen Normandie
M. Richard MAIRE, Examinateur, Université Bordeaux Montaigne
M. Laurent BRUXELLES, Directeur de thèse, CNRS Occitanie Ouest
M. Nicolas POIRIER, Co-directeur de thèse, Université Toulouse - Jean Jaurès

Membres invités
M. Marc JARRY, Université Toulouse - Jean Jaurès
M. Hubert CAMUS, Université Toulouse - Jean Jaurès

Cette thèse a débuté en mars 2020 et a bénéficié du soutien financier du CNRS à travers le programme 80|Prime.

Ce travail doctoral s'inscrit dans le projet HOMINI'KARST, dirigé par Laurent Bruxelles, qui a débuté en 2015.

Nous avons eu l'opportunité d'effectuer plusieurs missions de terrain pendant cette thèse :

- trois mois en Afrique du Sud pour étudier le *Cradle of Humankind*, rendus possibles grâce à un financement de l'Université de Toulouse dans le cadre du programme de mobilité internationale ERASMUS+ avec l'Université de Witwatersrand en Afrique du Sud.

- quatre semaines pour traverser aller-retour le Mozambique et le Malawi (Maputo-Karonga-Maputo)

- quatre missions d'un mois chacune au Botswana en 2021, 2022, 2024, 2025 et une mission de deux semaines en mars 2026 et financées par le projet HOMINI'KARST.

L'autre partie du temps a été consacrée au travail sur deux écrans de 27 pouces, avec simultanément ouverts des logiciels de SIG (ArcGIS, ArcScene pour la 2.5D, Global Mapper), des logiciels d'infographie (Illustrator) ainsi que le manuscrit de thèse.

Remerciements

Merci à Laurent Bruxelles de m'avoir permis de découvrir le continent africain et ses karsts fossilifères si originaux.
Merci à Nicolas Poirier de m'avoir accueilli au sein du laboratoire TRACES.
Merci à Philippe Vernant et Marc Jarry d'avoir accepté de faire partie du CSI.

Merci au CNRS.

Je remercie Laurent Bruxelles et le CNRS pour le financement Miti80 qui m'a permis de me consacrer à ces recherches doctorales. Je remercie aussi Christophe Giraud pour la prolongation de 6 mois de mon contrat en raison du retard causé par la pandémie du Covid-19, qui a rendu impossibles les missions prévues au cours des deux premières années. Je remercie le FSD du CNRS, et celui de l'UT2J, de m'avoir accordé leur confiance pour partir trois mois en Afrique du Sud, de juin 2021 à septembre 2021, alors que le pays, en pleine troisième vague de pandémie, avait ses frontières fermées. Cet ordre de mission, ainsi que la dérogation accordée aux échanges universitaires, m'ont permis de partir, d'étudier le *« Cradle of Humankind »* et de rencontrer le club spéléologique sud-africain, le *SASA* (*Spelaeological Association of South Africa)*, qui m'a fourni des informations de première importance (l'accès à leur intranet et à l'ensemble de leurs bulletins spéléologiques).

Merci à l'Université Toulouse Jean-Jaurès (UT2J)

Je remercie l'École Doctorale TESC qui a accepté ma candidature en doctorat et m'a fait confiance. Merci au laboratoire TRACES et au Pôle Afrique. Un gros merci à Camille Bourdier et au Service International de l'Université qui ont rendu possibles ce séjour de trois mois en Afrique du Sud en 2021, sur mon principal terrain de thèse.
Merci à l'université et à Hugues Barcet pour la licence d'ARCGIS mise à ma disposition.
Merci à la bibliothèque de l'université, notamment pour la bibliothèque numérique accessible via l'ENT, qui permet de télécharger gratuitement des articles payants.
Merci à Hugues Samyn pour l'achat du Springer sur la géomorphologie du Botswana.

Thank you to Witwatersrand University in South Africa

Thank you to Dominic Stratford and Alison Simons for welcoming me.

Merci aux membres de l'équipe HOMINI'KARST

Encore une fois merci à Laurent Bruxelles pour m'avoir transmis l'ensemble de ces données de terrain et, au-delà, pour m'avoir permis d'en acquérir avec lui pendant cinq années de fouilles archéologiques au Botswana.
Merci à sa femme Carole et aux autres membres de l'équipe : Jacques et Amel Jaillet, Francis Duranthon, Marc Jarry, Gregory Dandurand, Jean-Baptiste Fourvel, Camille Thabard, Kim Genuite, Pierre Linchamps, Raphaël Hanon et One Tshukudu.
Merci à Laurent, Gregory, Jean-Baptiste et Camille qui m'ont accompagné lors de la grande traversée du Mozambique et du Malawi pendant quatre semaines.
Et sans oublier l'ensemble des fouilleurs de Gcwihaba, qu'il s'agisse des membres du *Muséum* de Gaborone ou des habitants de Xai-xai qui nous accompagnent chaque année sur le terrain : Philipp Segadika, Mighty Mmolawa, Milton Tapela, Ledimo Oaitse, Jobe Marenga, Foster Motshola, Babutsi Mosarwa, Mathe Lebonetse, Tswioo Mathogonolo, Sabokone Tsholofelo, Gaegane Lucky, Thato Moahi, etc.

Merci aux rapporteurs et aux examinateurs de ce manuscrit de thèse

Je tiens tout d'abord, à remercier très chaleureusement, le Professeur Jacques Jaubert d'avoir accepté de rapporter ce volumineux manuscrit et d'y avoir apporté de précieuses corrections orthographiques, annotées directement au crayon à papier sur le manuscrit. Je suis fier d'être sa 99e soutenance de thèse. Je remercie Olivier Dauteuil, fin connaisseur du delta de l'Okavango, qu'il étudie depuis plus de vingt ans. J'adresse des remerciements tout particuliers à Richard Maire, qui a accepté de relire ce manuscrit et de consacrer sa réflexion à ces karsts remarquables d'Afrique australe. Enfin, je remercie très sincèrement Carole Nehme d'avoir accepté de faire partie de mon jury et pour la pertinence de ses remarques.

Et enfin les mercis en vrac, mais non des moindres

Merci à l'IFAS et à Jean-Pascal Torreton, directeur du bureau CNRS-IRD-CIRAD à Pretoria, pour leur accueil en Afrique du Sud.
Merci Léa Feyfant pour les conseils avant mon départ et pour m'avoir partagé sa base de données archéologiques d'Afrique australe.
Merci Benjamin Lans pour les MNS de Sterkfontein et celui d'Otavi.
Merci au service DYNAMIS pour l'accès aux données Pléiades.
Merci à Gavin Selfe (*GRS Consulting*) et Howard Briand Selfe pour nous avoir fourni leurs relevés topographiques et gravimétriques des collines de Gcwihaba et Koanaka, au Botswana, qu'ils ont patiemment réalisés au GPS différentiel pendant deux mois et demi dans le bush. Leurs aventures dans le bush sont à lire sur ce blog (https://hselfe.pythonanywhere.com/blog/318/).

Merci au site internet (https://www.madmappers.com/) géré par Maurizio De Felice et Jose Clara † pour les cartes du Mozambique et pour avoir partagé leurs expériences du terrain.

Un remerciement particulier à Cardoso Bande, le géologue mozambicain qui nous a accompagnés pendant la mission au Mozambique et Malawi.

Merci au *Falcon College* et à Bridget Accordi de m'avoir mis à disposition le magazine relatant les expéditions menées en 1969 et 1970 par les élèves du *Falcon College* dans les grottes du Botswana.

Pour les cartes géologiques

Je tiens à exprimer ma gratitude envers François Guillocheau de l'Université de Rennes (pour les cartes géologiques du Mozambique au 1 / 250 000).
Merci au *Council for Geoscience* (Molefe Letsoalo et Karabo) de m'avoir envoyé les rapports géologiques.
Merci au Service géologique du Malawi à Zomba pour notre visite impromptue et l'achat des cartes.
Merci aux autres services géologiques : *NGI* d'Afrique du Sud et le *BGI* du Botswana pour les données transmises.
Nos remerciements vont aussi à Pascal Marteau, ancien ingénieur géologue du BRGM, pour nos échanges au sujet des cartes du Malawi rééditées récemment par le BRGM.
Merci plus particulièrement à Thomas Fullgraf du BRGM qui nous a fourni l'information sur les grottes à *Kirk Range* que nous avons pu prospecter. Pour continuer avec le BRGM, merci à Alexandre Burgeron pour la carte hydrogéologique d'Afrique.
Merci à Camille François et au CCGM-CGMW pour les cartes géologiques à l'échelle du continent africain que nous avons pu nous procurer facilement.

Merci aux spéléologues

Merci au *SEC Caving* (*Speleological Exploration Club*) et au *SASA (South African Speleological Association)* pour les données spéléologiques qu'ils ont mises à notre disposition sur l'Afrique du Sud, le Botswana, le Zimbabwe, *Chimanimani Mountain*, etc.). Ils ont été des sources d'information primordiales pour nos recherches. Qu'ils soient remerciés ici pour nous avoir donné un accès libre à leurs données bibliographiques (bulletins spéléologiques SASA) et à leurs bases de données des cavités sous Google Earth (Merci plus particulièrement à Thilo Muler, Steven Tucker, Annette Kruger, John et Selena Dickie et Sharron Reynolds pour les sorties de terrain. Pour préserver cette confidentialité, ces données ne figureront pas dans l'inventaire des cavités de l'Afrique subsaharienne que j'ai compilé.
Merci à Daniel Kloser (ingénieur hydrologue à Blantyre et spéléologue) pour les données sur les grottes du Malawi que nous avons pu prospecter.
Merci à John Hargreaves pour les échanges concernant les grottes de Lobatse. Mais où est la grotte n°2 ?
Merci à Tom Baillieul, qui a levé la carte géologique de Gcwihaba en 1975, pour les échanges par mail.

Et quelques derniers remerciements

Merci au *CMCK (Cultural & Museum Centre Karonga)* au Malawi pour nous avoir accueillis sur le gisement de Malema.
Merci à Friedemann Schrenk, Ottmar Kullmer, Clément Zanolli, Christine Hemm, Oliver Sandrock, Herbert Focking pour leur accueil chaleureux et la visite de ces gisements majeurs du Malawi.
Merci *à l'Harvard University* et Lorna Marshall pour les photographies de la grotte de Gcwihaba de 1950.
Merci à la famille Tardy pour les livres et notamment la collection complète des bulletins de l'ORSTOM (ex-IRD).
Merci à la Famille Ronel de Krugersdorp pour les trois mois passés chez eux près du *Cradle of Humankind*.
Merci à Michel Izard et David Salmon pour ces super reportages sur TF1 notamment celui sur ma thèse.
Merci à Anthony Binst, Yoann Perie et Frédéric Swierczynski pour ce beau documentaire sur Arte.
Merci à ce petit village des Eyzies où j'ai grandi, à ces grottes où je me suis faufilé, à cette école et à mon instituteur.
Merci au musée de Préhistoire des Eyzies où j'ai pu travailler pendant les vacances, durant mon adolescence.

Je dédie ce manuscrit à mes parents, Jean-Pierre, archéologue, dont j'ai choisi d'emboîter le pas, et Marie-Paule, pour leur soutien indéfectible et leur présence à mes côtés.
Merci à mes frères, Guillaume et Jean-Baptiste, avec qui j'ai prospecté tous les trous des alentours.
Merci à Fiona et à sa famille et, bien sûr, un grand merci à Hubert Camus, l'ami de la famille, à qui je dédie ce travail.

Sommaire des chapitres

1. CHAPITRE 1 : METHODOLOGIE DE LA CREATION DU SIG DES KARSTS D'AFRIQUE AUSTRALE ET PRODUCTION DE CARTES INEDITES..... 19

2. CHAPITRE 2 : CONTEXTE GEOLOGIQUE ET MORPHOKARSTIQUE DES GROTTES FOSSILIFERES D'AFRIQUE DU SUD (*CRADLE OF HUMANKIND*, MAKAPANSGAT ET TAUNG) 158

3. CHAPITRE 3 : LE *CRADLE OF HUMANKIND* : ETABLISSEMENT D'UN REFERENTIEL MORPHOKARSTIQUE POUR ETUDIER LES KARSTS EN AFRIQUE AUSTRALE..... 268

4. CHAPITRE 4 : LE KARST DU NORD-OUEST DU BOTSWANA : UN NOUVEAU BERCEAU DE L'HUMANITE ?..... 473

5. CHAPITRE 5 : SYNTHESE ZONEOGRAPHIQUE DES KARSTS D'AFRIQUE AUSTRALE 899

Sommaire complet

0. INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE : POURQUOI RECHERCHER DES GROTTES EN AFRIQUE AUSTRALE ET POURQUOI POURRAIENT-ELLES CONTENIR DES FOSSILES D'HOMININES ? 1

0.1. LES REGIONS A FOSSILES D'HOMININES EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE 4

0.1.1. Le Rift est-africain : un berceau de l'Humanité en Afrique de l'Est 4

0.1.2. Les karsts fossilifères sud-africains : le *Cradle of Humankind, Makapansgat et Ghaap* 6

0.1.2.1. Cradle of Humankind 7

0.1.2.1.1. Classement UNESCO et délimitation administrative du CoH 7

0.1.2.1.2. Travaux de terrain et cartographie du karst du Cradle of Humankind 9

0.1.2.2. Plateau karstique de Ghaap 11

0.1.2.3. Karst de Makapansgat 11

0.1.3. Contexte géologique et perspective pour la recherche de karsts fossilifères 12

0.2. PROBLEMATIQUE DE LA THESE 14

0.3. PLAN DE LA THESE 15

1. CHAPITRE 1 : METHODOLOGIE DE LA CREATION DU SIG DES KARSTS D'AFRIQUE AUSTRALE ET PRODUCTION DE CARTES INEDITES. 19

1.1. COMMENT ELABORER LE SIG DES KARSTS DE L'AFRIQUE AUSTRALE ? 23

1.1.1. Étape 1 : Identifier des formations carbonatées à l'affleurement 23

1.1.2. Étape 2 : Analyser l'état de karstification des formations carbonatées identifiées 25

1.1.3. Étape 3 : Contraindre l'évolution des paysages karstiques et la période pendant laquelle les grottes ont pu fonctionner comme des pièges à sédiments 28

1.1.4. Étape 4 : Intégration des données spéléologiques et acquisition de nouvelles données de terrain pour confirmer la présence de grottes et éventuellement de fossiles afin d'améliorer le modèle 29

1.2. QUELLES DONNEES CARTOGRAPHIQUES A INTEGRER DANS LE SIG DES KARSTS D'AFRIQUE AUSTRALE ? 30

1.2.1. Inventaire des données cartographiques compilées dans le SIG..... 30

1.2.1.1. Différents types de cartes 31

1.2.1.2. Différents types de projection..... 32

1.2.2. Cartes géologiques compilées dans le SIG 32

1.2.3. Cartes topographiques interrogées 34

1.2.3.1. Serveurs wms des données géographiques pour l'Afrique du Sud 34

1.2.3.2. Cadastre pour l'Afrique du Sud..... 35

1.2.4. Acquisition des données sur les reliefs (SRTM, MNT et MNS)..... 36

1.2.4.1. Téléchargement des MNT ALOS (JAXA) 38

1.2.4.2. Résolution et qualité des données ALOS (JAXA)..... 40

1.2.4.3. Tableau récapitulatif des MNT disponibles 40

1.2.4.4. Autres moyens d'acquisition des reliefs (MNT, MNS)..... 44

1.2.4.4.1. Paramètres 44

1.2.4.4.2. Exemple pour le Cradle of Humankind..... 45

1.2.4.5. NASA 45

1.2.4.6. TanDEM-X 45

1.2.4.7. Modélisation 3D par photogrammétrie à partir de photographies prises par drone 46

1.2.4.8. Estimation des altitudes et approximation des mesures par navette spatiale (SRTM), par satellite (MNT, MNS) et comparaison avec les données DRONE et les données GPS ou DGPS sur le terrain 48

1.2.4.8.1. Comparaisons des mesures d'altitudes des collines de Gcwihaba et de Koanaka au Botswana par GPS, GPS différentiel et MNS par drone 48

1.2.4.8.2. Mauvaise estimation des profondeurs des dépressions du plateau karstique de Buchane au Mozambique avec le MNT Jaxa 49

1.2.4.8.3. Artefacts sur le MNT JAXA qui créent une butte à Koanaka au Botswana 51

1.2.5. Images satellites 52

1.2.6. Réseaux hydrographiques 53

1.3. METHODOLOGIE DU TRAITEMENT DES MNT POUR LE DIAGNOSTIC KARSTOLOGIQUE DES CARBONATES 54

1.3.1. Type de traitement des MNT 56

1.3.1.1. Modèle Numérique de Terrain *56*
1.3.1.2. Hypsométrie *60*
1.3.1.3. Méthode de classement hypsométrique pour mettre en valeur l'érosion des carbonates du West Rand (Bassin du Transvaal, Afrique du Sud) afin d'y rechercher des vallées peu incisées dans la classe d'altitudes de la vallée de la Bloubank du Cradle of Humankind *64*
1.3.1.3.1. Equal Interval 64
1.3.1.3.2. Quantile 64
1.3.1.3.3. Natural Breaks (Jenks) 65
1.3.1.3.4. Geometrical Interval 65
1.3.1.3.5. Standard Deviation 65
1.3.1.4. Calcul d'un Modèle Ombré *66*
1.3.1.5. Calcul des pentes *69*
1.3.1.6. Topographic Openness *73*
1.3.1.6.1. Topographic openness positive 75
1.3.1.6.2. Topographic openness negative 75
1.3.1.7. Méthode du Red Relief Image Map (RRIM) pour visualiser les reliefs karstiques à partir des MNT. *76*
1.3.1.7.1. Méthode RRIM appliquée au Cradle of Humankind 78
1.3.1.8. Représentation des réseaux hydrographiques et des limites de bassins-versants par calcul automatique des talwegs à partir du MNT *80*
1.3.1.9. Calcul des courbes de niveaux *82*
1.3.1.10. Détection automatique des dolines *84*
1.3.1.11. D'autres méthodes à essayer : courbures, profils Swath et TPI *84*
1.3.2. Exemples de reliefs karstiques en creux et en bosse sur les MNT 85
1.3.2.1. Les canyons *89*
1.3.2.2. Les reliefs carbonatés karstifiés et fantômisés *89*
1.3.2.3. Les poljés *90*
1.3.2.4. Détection des buttes sur un MNT *91*
1.3.3. Analyse des images satellites 92
1.3.4. Visualisation 2,5D 92
1.4. CORPUS DE THESE : INVENTAIRE DES DONNEES DE TERRAIN ET CONSTRUCTION D'UNE BASE DE DONNEES DES CAVITES D'AFRIQUE SUBSAHARIENNE 93
1.4.1. Les données concernant le Cradle of Humankind (Afrique du Sud) : le karst de référence de cette thèse 95

1.4.1.1. Données de terrain d'une mission de trois mois dans le Cradle of Humankind 95

1.4.1.2. L'Habilitation à Diriger des Recherches de Laurent Bruxelles..... 95

1.4.1.3. Base de données spéléologiques du SEC Caving et SASA..... 96

1.4.2. Les données bibliographiques 97

1.4.2.1. Publications et les rapports scientifiques..... 97

1.4.2.2. Bases de données spéléologiques 99

1.4.2.3. Recherche sur internet et sur les réseaux sociaux 99

1.4.2.4. Les missions HOMINI'KARST et les karsts prospectés depuis 2015..... 100

1.4.2.4.1. Liste des missions HOMINI'KARST 100

1. Mozambique / Malawi 100

2. Botswana / Namibie 102

3. Zimbabwe 104

4. Zambie 104

1.4.2.5. Chronologie des missions de terrain HOMINI'KARST..... 105

1.4.3. Résultats de l'inventaire des données spéléologiques 107

1.4.3.1. Données ponctuelles : les entrées des cavités 108

1.4.3.1.1. Inventaires spéléologiques par pays 108

1.4.3.1.2. Tableau de synthèse des données géologiques des karsts du Mozambique..... 113

1.4.3.2. Données vectorisées : les plans topographiques des cavités..... 114

1.4.3.2.1. Report en surface des réseaux 114

1.4.3.2.2. Précisions et erreurs concernant les données vectorisées (reports des réseaux karstiques en surface) 116

1.4.3.3. Calcul de la déclinaison magnétique lors d'un levé de terrain..... 117

1.4.3.4. Tableau des déclinaisons 118

1.5. ANCIENNES CARTOGRAPHIES DES KARSTS D'AFRIQUE AUSTRALE..... 121

1.5.1. Tableau des anciennes cartes des karsts du monde ou de l'Afrique .. 122

1.5.2. Quelques exemples des anciennes cartes des karsts pour l'Afrique .. 125

1.5.2.1. Carte des affleurements carbonatés majeurs dans le monde (Ford et Williams,1989). 127

1.5.2.2. Carte des karsts africains (Pickford, Mein et Senut, 1994) 128

1.5.2.3. Carte des principales zones karstiques d'Afrique subsaharienne de Gunn 2004 129

1.5.2.4. Carte mondiale des affleurements carbonatés (Salomon et Pulina, 2005) 130

1.5.2.5. Carte de la distribution des affleurements majeurs de roches carbonatées en Afrique (Williams et Ford, 2006, 2007)..... 131

1.5.2.6. Carte des formations carbonatées protérozoïques à l'affleurement et des pans (Dandurand et al., 2019, fig.1A, p.285)..... 132

1.5.2.7. Carte de la distribution des karsts à l'échelle du continent africain (KROW) (Hollingsworth, 2006)..... 134

1.5.2.8. Carte WHYMAP et projet WOKAM (2017)..... 135

1.5.2.9. Portail internet du GEODAN NL SADC GMI (Groundwater Management Institute)..... 137

1.6. PREMIERS RESULTATS DU SIG : OU RECHERCHER DES KARSTS ET DES KARSTS POTENTIELS EN AFRIQUE AUSTRALE ? 138

1.6.1. Premières cartes inédites pour répondre à nos problématiques de recherche.....139

1.6.1.1. Rappel de la carte initiale..... 141

1.6.1.2. Carte des formations carbonatées potentiellement karstifiées et des karsts et contexte hydrographique..... 142

1.6.1.3. Carte synthétique des karsts et karsts potentiels et contexte hydrographique..... 146

1.6.2. Liste des karsts ou des formations carbonatées étudiées et références bibliographiques.....148

1.6.3. Intérêts du SIG.....150

1.6.3.1. Accessibilité du modèle SIG des karsts d'Afrique australe avec Google Earth Engine intégré sur un site internet..... 150

1.6.3.2. Préparation des cartes de prospection pour les missions de terrain HOMINI'KARST..... 152

1.6.3.3. L'étude préalable du Mozambique et du Malawi montre l'importance de cette nouvelle méthodologie de cartographie des formations carbonatées potentiellement karstifiées sous SIG..... 153

1.7. CONCLUSION..... 156

2. CHAPITRE 2 : CONTEXTE GEOLOGIQUE ET MORPHOKARSTIQUE DES GROTTES FOSSILIFERES D'AFRIQUE DU SUD (*CRADLE OF HUMANKIND*, MAKAPANSGAT ET TAUNG) 158

2.1. HISTOIRE GEOLOGIQUE DE L'AFRIQUE AUSTRALE 159

2.2. SURFACES D'EROSION SUR LE CONTINENT 161

2.2.1. Nouvelles données pour étudier et déterminer l'âge des paléosurfaces 165

2.2.1.1. Les mesures de relief par satellite 165

2.2.1.2. L'étude stratigraphique séquentielle des deltas 165

2.2.1.3. Pour le Plateau sud-africain et le Cradle of Humankind 170

2.2.1.4. Âges des paléosurfaces 170

2.2.2. Différents modèles des surfaces d'érosion en Afrique australe 171

2.2.2.1. Modèle de King (à partir des années 1959) 171

2.2.2.2. Modèle de Lister (1967, 1987) 171

2.2.2.3. Modèle de Ponte (2018) 172

2.2.2.4. Synthèse cartographique de Ponte (2018) pour le nord de l'Afrique du Sud, le Zimbabwe, le Mozambique, le Malawi, la Zambie 173

2.2.2.5. Modèle de Tardy et Rouquin (1998) 178

2.2.2.6. Modèle de Burke et Gunnell (2008) 178

2.2.2.7. Modèle de Baby (2017) 179

2.2.2.8. Modèle de Guillocheau et al. (2012) 180

2.2.2.9. Modèle de Guillocheau (2016) 180

2.2.2.10. Modèle de Partridge (1969, 1973) 181

2.2.2.10.1. Pour le Cradle of Humankind 181

2.2.2.10.2. Surface africaine à Makapansgat (Partridge, 1973) 187

2.2.2.11. Surfaces Africaines de Partridge et Maud, 1987 188

2.2.2.12. Modèle de Moore et al. (2009b) 191

2.2.3. Grands profils morphologiques à travers le continent sud-africain ... 193

2.2.4. Notre synthèse cartographique concernant la Surface Africaine 193

2.2.5. Les données issues de la carte des sols (FOA/UNESCO) pour recherche la Surface Africaine 196

2.3. SYNTHESE GEOLOGIQUE ET LOCALISATION DES KARSTS DE L'AFRIQUE AUSTRALE 197

2.3.1. Carte géologique synthétique de l'Afrique subsaharienne 197

2.3.2. Carte géologique synthétique de l'Afrique australe 199

2.3.3. Le Bassin géologique du Transvaal : un bassin sédimentaire carbonaté karstifié 202

2.3.4. Carte géologique inédite et log stratigraphique 203

2.4. KARSTIFICATION ET SPELEOGENESE DES KARSTS FOSSILIFERES SUD-AFRICAINS 206

2.4.1. Définitions 206

2.4.2. La karstogenèse par crypto-altération 207

2.4.2.1. Exemple d'un crypto-karst au toit des dolomies de Malmani entre Johannesburg et Pretoria lors des travaux du projet de la ligne Gautrain 209

2.4.2.2. Exemple d'un crypto-lapiaz près de la carrière de Centurion CBD..... 211

2.4.2.3. Autres exemples de crypto-karst 212

2.4.3. La karstogenèse par fantômisation mise en évidence dans le CoH..... 214

2.4.3.1. Description du fantôme de roche de dolomies dans le CoH..... 215

2.4.3.2. Coupe de Quinif (1999) 217

2.4.3.3. Schéma de Dupont et al. (2018)..... 218

2.4.3.4. Schéma de la karstogenèse par fantômisation Bruxelles et Dandurand in FFS (2024) 219

2.4.4. Karstogenèse du Cradle of Humankind : crypto-altération et fantômisation comme processus dominant 220

2.4.4.1. La formation de la brèche karstique 222

2.4.4.1.1. Les brèches du Type-site de Sterkfontein 224

2.4.4.2. Le problème de datations des spéléothèmes intra-bréchiques 227

2.4.4.3. Schéma montrant la formation des spéléothèmes intra-bréchiques dans la grotte de Sterkfontein dans la vallée de la Bloubank dans le CoH. ... 228

2.4.4.4. Présentation du karst du Cradle of Humankind..... 230

2.4.4.5. Exemple de la grotte de Sterkfontein et intérêt de la datation de Little Foot..... 233

2.4.5. Le karst à poljés de Makapansgat 236

2.4.5.1. Définition d'un poljé..... 242

2.4.6. Un plateau karstifié incisé par des vallées : le Plateau de Ghaap..... 244

2.4.6.1. La carrière de travertins abandonnée de Norlim à Buxton et le crâne de Taung..... 244

2.4.6.2. Les cavités du Plateau de Ghaap et la grotte de Wonderwerk..... 247

2.4.7. Exemples de karstification et observations de terrain issues de la bibliographie..... 249

2.4.7.1. Exemple de la mine de Ryedale 249
2.4.7.2. Altération latéritique des dolomies de Malmani à Ventersdorp (De Wit) 253
2.4.7.3. Altération des dolomies de Malmani à Lichtenburg (De Wit) 254
2.4.7.4. Remplissage Karoo dans la grotte de Blue Lagoon à Ventersdorp selon Martini (1998) 255
2.4.7.5. Modèle de karstification de Dirks et Berger (2013) et surface 257
2.4.7.5.1. Présentation de la coupe stratigraphique régionale 257
2.4.7.6. Modèle de karstification de Catuneanu et Eriksson (2002) : Rooihoogte (Chert conglomerates) et Chert Breccia 259
2.4.7.6.1. Vues 2.5 D de localisation des différents faciès de la formation de Rooihoogte dans le Westrand 262
2.4.7.7. Modèle de Van Niekerk et al. (1999) 263
2.4.7.8. Réévaluation des tilles et diamictites de Dwyka à la lumière de la karstification par crypto-altération et fantômisation 265
2.4.7.8.1. Exemple Klein et Beukes, 2013 265
2.4.8. Conclusion 266

3. CHAPITRE 3 : LE *CRADLE OF HUMANKIND* : ETABLISSEMENT D'UN REFERENTIEL MORPHOKARSTIQUE POUR ETUDIER LES KARSTS EN AFRIQUE AUSTRALE 268

3.1. CONTEXTE MORPHOKARSTIQUE DU CRADLE OF HUMANKIND 272

3.1.1. Source des données altimétriques et détermination des altitudes 275
3.1.2. Liste des cavités fossilifères du Cradle of Humankind 281
3.1.2.1. Bolt's Farm Caves 281
3.1.2.2. Rising Star Cave 282
3.1.2.3. Swartkrans Cave 282
3.1.2.4. Minnaar's 283
3.1.2.5. Sterkfontein Cave, Lincoln Fault Cave et Fault Cave 283
3.1.2.6. Cooper's A, Cooper's B, Cooper's C et Cooper's D 284
3.1.2.7. Kromdraai A, B, C 285
3.1.2.8. Plover's lake 285
3.1.2.9. Wonder cave 285
3.1.2.10. Drimolen 285
3.1.2.11. Motsetse Cave (Motsetsi) 286

3.1.2.12. Malapa *286*
3.1.2.13. Gladysvale Cave *286*
3.1.2.14. Haasgat *286*
3.1.2.15. Lucheche *287*
3.1.2.16. Gondolin (1992) *287*

3.2. IDENTIFICATION DES PALEOSURFACES DANS LE CRADLE OF HUMANKIND **.. 288**

3.2.1. Analyse des paysages du Cradle of Humankind par panorama photographique 290

3.2.2. Statistiques des altitudes des paléosurfaces et statistiques sur l'altitude des entrées de grottes 296

3.2.3. Typologie des paléosurfaces 298

3.2.3.1. La Surface Africaine à 1560 m d'altitude sur le West Rand et le Central Rand *298*

3.2.3.1.1. Observations sur le terrain : caractérisations sédimentaires des altérites du plateau 299

1. *Arrêt n°1* *301*
2. *Argiles à chailles de Tarlton (Arrêt n°2)* *302*
3. *Formation de Rooihoogte au niveau de l'Upper Riet (Arrêt n°3)* *304*
4. *Hutton soil et croûtes de fer à Eljeese (Arrêt n°4)* *305*
5. *Hutton soil et croûtes de fer à Steilte (Arrêt n°5)* *311*

3.2.3.1.2. Âges des altérites sur la Surface Africaine et âges de la karstification des dolomies dans le CoH 312

1. *Remarque sur la formation Rooihoogte* *312*
2. *Remarque sur l'âge pré-Pretoria de la formation Rooihoogte et sur l'âge pré-Pretoria de la karstification des dolomies du CoH* *313*
3. *Âge de la karstification des dolomies dans le CoH* *313*
4. *Informations apportées par les diamants alluviaux* *314*
5. *Cartographies du Central Rand et du Farwest Rand* *316*
6. *Carte de la profondeur du toit des dolomie entre Carletonville et Fochville* *320*

3.2.3.2. Brèches siliceuses au sommet d'Oaktree (1554 m) *322*

3.2.3.3. Les reliefs au-dessus de la Surface Africaine *326*

3.2.3.3.1. Relief de Krugersdorp (quartzites de Witwatersrand) (1700 m) 326

3.2.3.3.2. Crêts formés par la chaîne de reliefs de Magaliesberg (1700 m d'altitude) et de Witwatersberg (1600 m) en quartzites du groupe de Pretoria et entonnoir de percée cataclinal d'Hekpoortspruit 327

1. *Analyse des surfaces du panorama vers le nord depuis Weltevreden* *327*

3.2.3.3.3. Percée cataclinale d'Hekpoortspruit 331

3.2.3.3.4. Crêt de la formation de Klapperkop Quartzite à Weldevreden 332

3.2.3.3.5. Surface Gondwana, Surface antérieure « S0 », Surface Pré-Karoo, 1700 m 333

1. Dôme de Johannesburg, à 1700 m 333

3.2.3.3.6. Paléokarst sur la surface à 1700 m à Krugersdorp et stone-line 333

3.2.3.3.7. Surface à 1580 m au pied de Protea Ridge et sur les roches mafiques et ultramafiques de l'Archéen 337

3.2.3.4. La Surface Post-Africaine 1 : S2 à 1500 m 339

3.2.3.4.1. À 1500 m sur les roches mafiques et ultramafiques de l'Archéen 339

3.2.3.4.2. Surface à 1500 m sur les dolomies (lapiaz dolomitique) 340

3.2.3.4.3. Dalles silicifiées en cours de démantèlement au-dessus des dolomies (à 1500 m au-dessus du gisement de Swartkrans) 341

1. Schémas hypothétiques de la mise en place des altérations en surface des dolomies (1485 m) 344

3.2.3.5. La Surface Post-Africaine 2 : S3 – 1470 m 345

3.2.3.5.1. Lapiaz dolomitique au-dessus des gisements de Cooper (altitude 1477 m.) 346

3.2.3.5.2. Description d'un bloc d'altérite 346

3.2.3.6. Surface S4 - 1450 et en-dessous 347

3.2.3.6.1. Paléo-poljé de la Bloubank 348

3.2.3.6.2. Les alluvions datées à 3.55 Ma à l'ancienne mine d'Or de Kromdraai (rivière Honingklip) 354

3.2.3.6.3. Une surface d'aplanissement à 1440 m 355

3.2.3.6.4. Surface structurale du Black Reef : Pisolites et vallée sur la surface S4 à 1450 m calée sur le Black Reef en rive gauche 357

3.2.3.6.5. Surface à 1430 m sur les alluvions de la Bloubank 360

3.2.3.6.6. Surface à 1410 à 1430 m sur les roches de Ventersdorp 361

3.2.3.6.7. Surface à 1430 m sur les granito-gneiss à Len's Den 362

3.2.4. Remarques sur les brèches silicifiées au-dessus du gisement karstique fossilifère de Cooper's 363

3.2.5. Remarque sur le vallon à l'est de la grotte de Sterkfontein dont la limite ouest est une faille bréchifiée et silicifiée 365

3.2.5.1. Brèche de type n°5 identifiée sur le terrain entre la grotte de Sterkfontein et le gisement de Kromdraai 370

3.3. STRUCTURATION GEOLOGIQUE DU TRANSVAAL ET MISE EN EVIDENCE DE L'EROSION REGIONALE ET DES PALEOSURFACES D'EROSION 374

3.3.1. Géologie du Cradle of Humankind et réalisation d'une nouvelle cartographie 374

3.3.1.1. Carte géologique inédite du Cradle of Humankind 374

3.3.1.1.1. Historiographie succincte du Cradle of Humankind 374

3.3.1.2. Absence de carte géologique au 1/50 000 dans le secteur de Sterkfontein et la nécessité de réaliser de nouvelles cartes 376

3.3.1.3. Carte géologique inédite du Cradle of Humankind 379

3.3.1.4. Carte géologique de la vallée de la Bloubank au sud du Cradle of Humankind 381

3.3.1.5. Carte géologique du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai 383

3.3.2. Description des dolomies du Cradle of Humankind 384

3.3.2.1. Datations des dolomies paléoprotérozoïques 386

3.3.2.2. Cinq formations composent les dolomies de Malmani dans le Bassin du Transvaal et la formation supérieure est absente dans le « Cradle of Humankind » 387

3.3.2.2.1. Formation d'Oaktree (200 m. d'épaisseur) 388

3.3.2.2.2. Formation de Monte Christo (700 m. d'épaisseur) 388

1. Présence d'un horizon remarquable au toit de la formation de Monte-Christo et à la base de la formation de Lyttelton (Button, 1973 ; Ingram, Obbes et Van Tonder, 2010 ; Dirks et Berger, 2013) 388

3.3.2.2.3. Formation de Lyttelton (150 m. d'épaisseur) 389

3.3.2.2.4. Formation d'Eccles (380 m. d'épaisseur) 389

3.3.2.2.5. Formation de Frisco (absente dans le CoH) 390

3.3.3. Mise en évidence de l'érosion du Cradle of Humankind par une coupe géologique 393

3.3.4. Mise en évidence de l'érosion du *Cradle of Humankind* par l'analyse des paysages sur le terrain 398

3.4. INCISION DES VALLEES QUI EXHUMENT LES FANTOMES DE ROCHE ET OUVRE LES PREMIERES GROTTES ET PERMET LA FOSSILISATION DES REMPLISSAGES KARSTIQUES 400

3.4.1. Cartographie régionale du CoH, la Surface Africaine et des surfaces emboîtées.....401

3.4.1.1. Profil n°1 406

3.4.1.2. Profil n°2 409

3.4.1.3. Profil n°3 410

3.4.1.4. Profil n°4 411

3.4.1.5. Cartographies synthétiques du CoH 412

3.4.2. Définition de la fantômisation (formation des cavités et intérêt pour la formation des sites fossilifères en général) et manière dont elle a été mise en évidence dans le Cradle of Humankind 414

3.4.2.1. La spéléogenèse par fantômisation explique la présence des gisements karstiques fossilifères dans le Cradle of Humankind 415

3.4.2.1.1. Présence de fantôme de roche dans la grotte de Sterkfontein et dans les autres grottes du CoH.....416

3.4.2.1.2. Evacuation du fantôme per ascensum dans la grotte de Sterkfontein 421

3.4.2.1.3. Profils topographiques des galeries et niveau de base 422

3.4.2.2. Exemple de Bolt's farm : les couloirs de fantôme de la carrière..... 424

3.4.2.2.1. Analyse des fantômes visibles sur les fronts de taille de la carrière 425

3.4.2.2.2. Analyse d'un couloir fantômisé 426

3.4.2.2.3. Analyse des pseudo-endokarsts 426

3.4.2.2.4. Accumulations de blocs de silex (clastes de chert) 428

3.4.2.2.5. Cartographie du secteur de la carrière de Bolt's cave.....429

3.4.2.3. Du fantôme en surface comme à Minaar's 431

3.4.2.4. Identifier sur les images satellites des réseaux de couloirs fantômisés en surface des formations carbonatées, indicatrices de réseaux spéléologiques souterrains : exemples des paléokarsts de Malapa..... 432

3.4.2.4.1. Carte géologique régionale de Malapa (Dirks et Berger, 2013) 433

3.4.2.4.2. Carte géologique de Malapa (Dirks et Berger, 2013) 435

3.4.2.4.3. Carte des réseaux de paléokarsts de Malapa (Dirks et al. 2010).....436

3.4.2.4.4. Cartographie du réseau de fractures à l'ouest de Malapa en lien avec la karstification.....437

3.4.2.4.5. Cartographie des analogies de formes entre les couloirs fantômisés et les paléokarsts fossilifères de Malapa et les vallons.....438

3.4.3. Schémas de la fantômisation, du creusement des vallées et de la fossilisation 439

3.4.3.1. Étape 1 441

1. 1. 1. Étape 2 442

3.4.3.2. Étape 3 442

3.4.3.3. Étape 4 443

3.4.3.4. Étape 5 443

3.4.3.5. Étape 6 444

3.4.3.6. Étape 7 444

3.4.3.7. Application dans la grotte de Sterkfontein. 445

3.4.4. Rôle de *knickpoint* du relief de Swartkop qui a ralenti l'érosion régressive de la vallée de la Bloubank en amont du relief et permis de préserver des paysages anciens 446

3.4.4.1. Mise en évidence du knickpoint sur un profil topographique le long de la rivière Bloubank 446

3.4.4.2. Incision des quartzites du relief de Swartkop et érosion régressive de la rivière Bloubank en amont 448

3.4.4.3. Panorama du knickpoint 449

3.4.4.4. Cartes topographiques et géologiques du Knickpoint de Swartkop sur la Bloubank 451

3.5. SYNTHESE DE L'ANALYSE MORPHOKARSTIQUE DU *CRADLE OF HUMANKIND* 453

3.5.1. La Surface Africaine au Crétacé 455

3.5.2. Un axe de drainage commence à s'organiser : la rivière Magalies 456

3.5.3. La Magalies supérieure érode la Surface Africaine du West Rand et du Central Rand 457

3.5.4. La Krokodil érode les granites de Johannesburg 458

3.5.5. Creusement du poljé de la Bloubank par une vague d'érosion régressive 3.65 Ma 459

3.5.6. Honingklip 3.55 Ma 461

3.5.7. Riet 462

3.5.8. Creusement des cuvettes de Skeerpoort 2.4 Ma 463

3.5.9. Creusement des cuvettes d'Hekpoort et Dorings 464

3.6. SYNTHESE SUR LA SURFACE AFRICAINE ET LES PALEOSURFACES DANS LE CRADLE OF HUMANKIND AU NIVEAU DE STERKFONTEIN, SWARTKRANS ET KROMDRAAI 465

3.7. CONCLUSION 470

4. CHAPITRE 4 : LE KARST DU NORD-OUEST DU BOTSWANA : UN NOUVEAU BERCEAU DE L'HUMANITE ? 473

4.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA REGION DU NORD-OUEST DU BOTSWANA ET DU RIFT DE L'OKAVANGO 476

4.1.1. Résumé de l'histoire géologique du nord-ouest du Botswana 481

4.1.2. Réalisation des atlas cartographiques inédits et des cartes géologiques 482

4.1.2.1. ATLAS n°1 : géologie et hydrologie des karsts de l'Afrique australe .. 483

4.1.2.2. ATLAS n°2 : géologie du nord-ouest du Botswana 485

4.1.2.3. ATLAS n°2 : géologie pré-Kalahari du nord-ouest du Botswana et explication de la présence du Rift de l'Okavango au niveau d'anciens bassins permiens 488

4.1.2.4. ATLAS n°3 : géologie du horst occidental du Rift de l'Okavango 491

4.1.2.4.1. Carte géologique du horst occidental du Rift de l'Okavango 491

4.1.2.4.2. Carte géologique pré-Kalahari du horst occidental du Rift de l'Okavango 493

1. Discussion sur la présence de dolomies au sein du Complexe de Chihabadum : le cas de Blue Cave à Koanaka Hills 494

4.1.2.5. ATLAS n°4 : secteurs prospectés 497

4.1.3. Les formations géologiques et leurs formes 499

4.1.3.1. Les dolomies 502

4.1.3.1.1. Descriptions des dolomies 502

4.1.3.1.2. Âge des dolomies 503

4.1.3.1.3. Faciès des dolomies dans le nord-ouest du Botswana et à l'est de la Namibie 504

4.1.3.2. Le groupe du Kalahari 507

4.1.3.2.1. Formes : des champs de paléodunes 509

4.1.3.2.2. Formation : plusieurs types de sables forment les Sables du Kalahari 512

1. Des sables rouges indiquant la présence des dolomies 513

4.1.3.2.3. Les croûtes dures : calcrètes, silcrètes 516

1. Calcrètes 516

2. Silcrètes 519

4.1.3.3. Brèches pédologiques : modèle géométrique et sédimentaire 521

4.1.3.3.1. Formation d'une brèche pédologique supergène de la surface jusqu'à l'intérieur des grottes : exemple de la grotte de Buchane au Mozambique 522

4.1.3.3.2. Développement des brèches pédologiques sous les sables du Kalahari : exemples du Botswana 524

4.1.3.3.3. Modèle géométrique et sédimentaire des brèches pédologiques et typologie 525

4.1.3.3.4. Crypto-corrosion des planchers stalagmitiques fossilifères sous les sables, au pied du versant est de la colline K2 de Koanaka 528

4.2. DESCRIPTION MORPHOKARSTIQUE DES PAYSAGES ET DES GROTTES 529

4.2.1. Missions sur le terrain, prospections et acquisition des données.....534
4.2.2. Aha Hills.....541
4.2.2.1. La grotte Waxhou North.....543
4.2.2.2. La grotte Waxhou South.....546
4.2.2.3. La grotte Small Cave à Waxhou South.....548
4.2.3. Gcwihaba Hills.....554
4.2.3.1. Cartographies des Gcwihaba Hills.....556
4.2.3.1.1. La première carte de Gcwihaba Hills de 1990.....556
4.2.3.1.2. Données topographiques récentes et actualisation de la carte des Gcwihaba Hills.....557
1. Levé au GPS différentiel de la région de Gcwihaba par Gavin Selfe et le GRS Consulting.....559
2. Détail sur les réseaux karstiques de la région de Gcwihaba.....561
4.2.3.2. La grotte de Gcwihaba sur la colline A.....563
4.2.3.2.1. Cartographie de la surface de colline où se situe la grotte de Gcwihaba.....564
4.2.3.2.2. Brèches fossilifères de l'aven du versant ouest de la colline de Gcwihaba.....566
4.2.3.2.3. Les remplissages fossilifères sableux du corridor de l'entrée sud de la grotte de Gcwihaba.....568
4.2.3.2.4. Petite galerie impénétrable au sud.....575
4.2.3.2.1. Evolution des techniques de levés spéléologiques de la grotte de Gcwihaba de 1969 à aujourd'hui.....575
4.2.3.3. La grotte de Dimapo sur la colline B à Gcwihaba.....577
4.2.3.4. La grotte de Wadoum sur la colline D à Gcwihaba.....578
4.2.3.4.1. Détection de l'extension potentielle de la grotte de Wadoum : la grotte de Motswantsweng.....582
4.2.3.5. Les gisements paléontologiques de la Colline C à Gcwihaba.....583
4.2.3.5.1. Découverte paléontologique majeure de 1971.....583
4.2.3.5.2. Prospection de février 1988.....583
4.2.3.5.3. Premier plan de Pickford, relevé gravimétrique de Selfe / GRS Consulting de 2013 et proposition d'une nouvelle synthèse cartographique.....584
4.2.3.5.4. Les prospections des brèches fossilifères de la colline C.....587
4.2.3.5.5. Prospections de la colline de Wadoum et de la colline C.....588
4.2.3.5.6. Un lapiaz dolomitique au pied de la colline C.....589
4.2.3.5.7. Des calcrètes résiduelles sur la colline C à 1004 m d'altitude ?.....590
4.2.3.5.8. Cuttings d'un forage sur le sommet de la colline C.....590
4.2.3.6. La doline au niveau d'une dune de sable à 6 km du campement.....591
4.2.4. Koanaka Hills.....594

4.2.4.1. Cartographies de la région de Koanaka..... 595

4.2.4.1.1. Premier plan de Koanaka (Pickford, 1990) 595

4.2.4.1.2. De nouvelles données altimétriques à évaluer 596

1. Évaluation des altitudes mesurées au GPS différentiel, par satellite ou sur les modèles 3D photogrammétriques par drone 596

4.2.4.1.3. Nouvelles cartographies de la région des Koanaka Hills 599

1. Analyse de l'image satellite (Bing Maps) et discussion sur les sols sombres 601

2. Analyse de l'image satellite ESRI Arcgis.....606

3. Gravimétrie et paléovallée, détection des réseaux karstiques et forages 608

4.2.4.2. La Colline K1 de Koanaka et le plus grand réseau karstique du Botswana..... 610

4.2.4.2.1. Le plus grand réseau karstique du Botswana : Gecko Chamber, Nqumtshaa Cave, Diviner's Cave, Fossil Cave and Mongongo Cave est situé dans la colline K1 de Koanaka Hills 611

4.2.4.2.2. La grotte pénétrable de Fossil Cave 614

4.2.4.2.3. La grotte hypothétique entre Diviner's Cave et Mongongo Cave 616

4.2.4.2.4. La fouille débutée en 2023, en extérieur, au sud de la colline K1 : la suite de la grotte de Mongongo trépanée par la surface topographique....617

4.2.4.2.5. La grotte de Mongongo 620

4.2.4.3. La Colline K2 de Koanaka..... 622

4.2.4.3.1. Découverte de molaires de cercopithèque dans des brèches karstiques sur le versant nord de la colline K2 à Koanaka. 624

4.2.4.3.2. Découverte de fossiles de primates (Papio) dans la grotte de Bone Cave en 1997 624

4.2.4.3.3. Grotte de Bone Cave sur la colline K2 à Koanaka 625

4. Premier plan et première coupe de Pickford (1990) montrant l'entrée de Bone Cave.....626

5. Première topographie de Bone Cave (1995).....627

6. Nouvelle synthèse cartographique de la colline K2 630

7. Acquisitions photogrammétriques de la colline de K2 et des fouilles archéologiques 637

8. Réalisation du relevé topographique de Bone Cave 640

9. Réalisation du scan 3D de la cavité de Bone Cave et du modèle 3D....641

10. Cartographie sur le terrain des parties de cavités aujourd'hui à l'air libre, tronquées par les versants 642

4.2.4.3.4. La fouille sur le versant sud-est de la colline K2 à Koanaka 645

4.2.4.3.5. La fouille sur le versant nord de K2 647

4.2.4.3.6. La grotte Small cave de Koanaka (K2) 648

4.2.4.4. Le pan de K1..... 648

4.2.4.5. La colline de K3 (!Ncumxee) et la grotte de Blue Cave 649

4.2.4.5.1. Blue Cave sur K3 à Koanaka.....651

4.2.4.5.2. Le pan de Seretse 653

4.2.5. Synthèse de l'étagement (altitude) des réseaux karstiques.....654
4.2.5.1. Réalisation d'un profil morphokarstique inédit 654
4.2.5.1.1. Aha Hills 655
4.2.5.1.2. Gcwihaba Hills 655
1. En rive gauche de la vallée de Gewidum 655
2. En rive droite de la vallée de Gewidum 655
4.2.5.1.3. Koanaka Hills 657
1. Colline K1 657
2. Colline K2 658
3. Colline K3 658
4.2.5.2. Tableau de synthèse de l'étagement vertical (altitude) des réseaux karstiques dans le nord-ouest du Botswana 659

4.3. SYNTHESE DES DONNEES GEOLOGIQUES : PROSPECTIONS GEOPHYSIQUES, VALIDEES PAR DES FORAGES 661

4.3.1. Utilisation de la gravimétrie à Gcwihaba pour détecter des dolomies sous les sables.....662
4.3.1.1. Dix zones (blocs) potentielles 665
4.3.1.1.1. Zone 1 665
4.3.1.1.2. Zone 2 666
4.3.1.1.3. Zone 3 666
4.3.1.1.4. Zone 4 666
4.3.1.1.5. Zone 5 666
4.3.1.1.6. Zone 6 666
4.3.1.1.7. Zone 7 666
4.3.1.1.8. Zones 8, 9 et 10 666
4.3.1.2. Interprétations des levées géophysiques et résultats 667
4.3.1.3. Résultats 669
4.3.2. Gravimétrie (anomalie de champ de gravité de Bougher) 670
4.3.3. Anomalies aéromagnétiques 674
4.3.4. Forages géologiques.....675
4.3.4.1. Tableau récapitulatif des forages dans la zone d'étude 675
4.3.4.2. Carte de localisation des forages 679
4.3.4.3. Cartes des forages et des lignes de corrélations près des grottes étudiées 683
4.3.4.4. Un paléokarst rencontré par le forage BH9697 687
4.3.4.5. Ligne de corrélation des forages n°6 passant au nord de Gcwihaba .. 689
4.3.4.5.1. Forage n°9895 692

4.3.4.5.2. Forage n°9894 693
4.3.4.5.3. Forage n°9893 694
4.3.4.5.4. Forage n°9931 696
4.3.4.5.5. Forage n°9892 697
4.3.4.5.6. Forage n°9867 698
4.3.4.5.7. Forage JB1 699
4.3.4.5.8. Forage JB2 699
4.3.4.5.9. Forage JB3 700
4.3.4.5.10. Forage JB4 701
4.3.4.5.11. Forage JEB1 701
4.3.4.5.12. Forage JEB2 702
4.3.4.5.13. Forage JEB3 702
4.3.4.6. Ligne de corrélation des forages n°7 passant au sud des grottes 703
4.3.5. Niveau de l'aquifère actuel révélé par les forages 706
4.3.5.1. Les deux forages pour l'eau potable à Gcwihaba 706
4.3.5.1.1. Forage Waterbore hole 1 708
4.3.5.1.2. Forage Waterbore hole 2 708
4.3.5.2. Les forages cités dans Water Surveys Botswana et Aqualogic (2003) 709
4.3.5.2.1. Forage BH9893 709
4.3.5.2.2. Forage BH 9892 709
4.3.5.2.3. Forage BH 9896 709
4.3.5.2.4. Forage BH 9864 709
4.3.5.2.5. Forage BH 9863 709
4.3.5.2.6. Forage BH 9862 709
4.3.5.2.7. Forage BH 9932 709
4.3.5.3. Les forages de Koanaka Hills 710
4.3.5.4. Les autres forages interrogés. 710
4.3.5.4.1. Forage Z14305 710
4.3.5.4.2. Forage du pan de K1 à Koanaka Hills 710
4.3.5.4.3. Forage du pan de Seretse vers K3 à Koanaka Hills 710
4.3.5.4.4. Forage BH9893 711
4.3.5.4.5. Forage à Xhabe 711
4.3.5.5. Niveau de base à Xai-Xai 711
4.3.6. Cartes synthétiques 712
4.4. MISE EN EVIDENCE DE PALEOENVIRONNEMENTS LACUSTRES 714

4.4.1. Mise en évidence d'un paléoenvironnement lacustre à Gcwihaba à 995 m d'altitude 716

4.4.1.1. Par les formations 717

4.4.1.1.1. La vallée de Gewidum à Gcwihaba est creusée dans des calcrètes subhorizontales 717

1. Carte géologique de Baillieul de 1974 et 1975 719
2. Les calcrètes 1 et 2 720
3. Discussion sur l'origine des brèches des calcrètes 1 et 2 722
4. Les calcrètes 3 723
5. Les calcrètes 4 725
6. Calcaires coquilliers de la vallée de Gewidum (calcrètes 4 de Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975) ?) 726
7. Silicification des calcrètes : les silcrètes 727
8. Paléoenvironnement et âge des calcrètes 728

4.4.1.1.2. Les calcrètes du pan de la Colline E à Gcwihaba 730

1. Les calcrètes, les sables blancs et les trottoirs dolomitiques autour de la colline E 733
2. Prospection future de la Colline F à Gcwihaba 735

4.4.1.1.3. Synthèse des données de terrain sur une coupe géologique schématique du canyon de Gewidum et de la colline de Gcwihaba et la colline C. . 736

4.4.1.2. Par les formes 737

4.4.1.2.1. Profils topographiques et analyses cartographiques 738

4.4.1.2.2. Caractérisation des reliefs de Gcwihaba : pans, paléopans, « straats », dunes discontinues et vallées sèches 742

1. Les pans 742
2. Les dépressions interdunaires : « straats » 745

4.4.1.2.3. Problématique de l'âge des dunes discontinues 746

1. Hypothèses concernant l'âge des dunes 746
2. Les vallées sèches (mekgacha) 749

4.4.1.3. Par les forages 750

4.4.1.3.1. Le forage n°11471A indique à Gcwihaba l'altitude de la base des collines karstiques de Gcwihaba et présence de calcrètes en profondeur 752

3. Des calcrètes en profondeur 755
4. Erreur d'interprétation des niveaux rencontrés par le forage n°11471A 756

4.4.1.3.2. Coupe géologique de Gcwihaba tenant compte du forage n°11471A . 758

5. Vallée incisée ou jeu de failles ? 762

4.4.1.3.3. Tableau des autres forages près des grottes de Gcwihaba 763

4.4.1.3.4. Synthèses cartographiques des calcrètes de Gcwihaba 764

4.4.1.3.5. Descriptions des forages apportant des informations sur la présence de calcrètes, de calcaires lacustres et de zone karstifiée en profondeur à Gcwihaba 765

4.4.1.4. Synthèse cartographique et analyse géomorphologique des paysages de Gcwihaba 768

4.4.2. Mise en évidence d'un paléoenvironnement lacustre à Koanaka à 1030 m 782

4.4.2.1. Les données de terrain 783

4.4.2.1.1. À K1, découverte d'un affleurement de calcaires bioclastiques sombres (calcrètes 4 de Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975) ?) 786

4.4.2.1.2. À K2, des calcrètes à gastéropodes 793

4.4.2.1.3. Calcrètes corrodées et exhumées 794

4.4.2.1.4. Plaquage de calcrètes 1 et 2 au pied du versant ouest de la colline K1 (Koanaka) à 1040 m d'altitude 796

4.4.2.1.5. Les brèches à gros clastes du versant nord de K2 799

4.4.2.2. Les forages à Koanaka Hills 801

4.4.2.3. Synthèse cartographique et analyse géomorphologique des paysages des Koanaka 808

4.4.3. Un paléoenvironnement lacustre déjà mis en évidence à Tsodilo 816

4.4.4. Un paléoenvironnement lacustre déjà mis en évidence à Ngami 817

4.4.5. Des paléolacs identifiés dans le graben du Rift de l'Okavango (bassin de Makgadikgadi) 818

4.5. RECONSTITUTION CARTOGRAPHIQUE SYNTHETIQUE DES PAYSAGES ET DES PALEODRAINAGES DU KALAHARI DEPUIS LE CRETACE (D'APRES LA BIBLIOGRAPHIE) ET ETABLISSEMENT DE LACS DANS LE RIFT DE L'OKAVANGO AU PLIO-PLEISTOCENE 820

4.5.1. Chronologie 820

4.5.1.1. Un système de drainage unique au Mésozoïque. 820

4.5.1.2. Des surrections à partir de la fin du Crétacé 822

4.5.1.3. La mise en place du Rift de l'Okavango 823

4.5.1.3.1. Au nord de Tsodilo Hills le site OGN permet de dater la base du groupe du Kalahari à 3.75 Ma 827

4.5.1.3.2. Dans le Rift de l'Okavango, à l'est de la faille de Gumare 828

6. Site OGS (Vainer et al., 2021, 2024) 828

4.5.1.4. Mise en place des lacs dans le Rift de l'Okavango 829

4.5.1.5. La mise en place du Delta de l'Okavango 832

4.5.2. Reconstitutions cartographiques des paléodrainages en Afrique australe à partir du Jurassique 833

4.5.2.1. Crétacé 833

4.5.2.2. Paléogène 834

4.5.2.3. Oligocène *835*
4.5.2.4. Miocène *835*
4.5.2.5. Pliocène *836*
4.5.2.6. Pléistocène inférieur *837*
4.5.2.6.1. Lac Deception 837
4.5.2.7. Pléistocène moyen *839*
4.5.2.7.1. Lac Makgadikgadi 839
4.5.2.8. Actuel *842*
4.5.3. Conclusion sur les paléodrainages et les paléolacs du Kalahari 843
4.6. DES DATATIONS PROBLEMATIQUES CONCERNANT L'EDIFICATION DES PAYSAGES ET L'AGE DES PALEOLACS 846
4.6.1. Des datations controversées 849
4.6.1.1. Des âges récents *851*
4.6.1.1.1. Critiques des datations récentes 854
7. Par Nash *854*
8. Par Moore et al., 2012 ..... *854*
9. Par Linol et al., 2015 ..... *855*
10. Par Vainer *855*
4.6.1.2. Des âges anciens fournis par la géoécodymanique : datations moléculaires des temps de divergences des espèces et signatures phylogéographiques *856*
4.6.1.2.1. Âge moléculaire de la divergence des poissons-chats du genre Synodontis du Zambèze 857
4.6.1.2.2. Âge moléculaire de la divergence des poissons-tigres Hydrocynus dans le bassin versant du Congo-Zambèze 858
4.6.1.2.3. Âge moléculaire de la divergence des crocodiles Crocodylus niloticus des fleuves Kafue, Okavango et Zambèze 860
4.6.1.2.4. Autres âges moléculaires inédits 860
4.6.2. Chronologie de la mise en place des paysages selon les âges anciens 860
4.6.2.1. Discussion sur l'âge du champ de dunes linéaires fossiles *861*
4.7. QUELLES REPONSES APPORTEES PAR L'INDUSTRIE LITHIQUE ANCIENNE ? . 862
4.7.1. Nos découvertes inédites 862
4.7.1.1. Koanaka K2 ..... *862*
4.7.1.2. Waxhou North *863*
4.7.2. Les découvertes lithiques publiées 866
4.7.2.1. Orapa (Makgadikgadi) *870*

4.7.2.2. Gweta (Makgadikgadi) *872*
4.7.2.3. Gisement MSA de Gi *873*
4.7.2.4. Les chutes de N'gonye *875*
4.7.2.5. A Okwa *875*

4.8. SYNTHESE ET CONCLUSION DE L'ETUDE DES KARSTS DU NORD-OUEST DU BOTSWANA 877

4.8.1. Profils morphokarstiques du Rift de l'Okavango 881
4.8.2. Modèles géométriques et sédimentaires des brèches 886
4.8.2.1. Modèle prenant en compte la karstification *886*
4.8.2.2. Modèle prenant en compte les paléoenvironnements *890*
4.8.3. Analyse des données profondes au niveau du lac Ngami 893
4.8.4. Comment interpréter les niveaux lacustres basculés dans le Rift ? ... 895

4.9. CONCLUSION 897

5. CHAPITRE 5 : SYNTHESE ZONEOGRAPHIQUE DES KARSTS D'AFRIQUE AUSTRALE 899

5.1. PRESENTATION (BLOCS 2.5D) 901

5.2. GRANDS PROFILS MORPHOKARSTIQUES DES KARSTS ETUDIES EN AFRIQUE AUSTRALE 903

5.3. LOCALISATION DES KARSTS ET KARSTS POTENTIELS ETUDIES ET DES PROFILS MORPHOKARSTIQUES 905

5.4. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS ENTRE LE CRADLE OF HUMANKIND (N°1 SUR LA CARTE) ET LE RIFT EST-AFRICAIN 906

5.4.1. Liste des karsts ou des formations carbonatées étudiées 907

5.5. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS DANS LES FORMATIONS CARBONATEES DU BASSIN DU TRANSVAAL ENTRE L'ORANGE ET LE LIMPOPO (AFRIQUE DU SUD ET BOTSWANA) 908

5.5.1. Karst à buttes fossilifères de Vlakplaats et Hoogland (Secteur B de la Figure 916 p.910) à 40 km à l'est du Cradle of Humankind 912

5.5.1.1. Suivi des paléosurfaces identifiées dans le « Cradle of Humankind » jusqu'au karst de Vlakplaats et d'Hoogland *913*
5.5.1.2. Analyse géomorphologique du karst à buttes de Vlakplaats et Hoogland, vue de l'est *921*
5.5.1.3. Analyse géomorphologique des paysages depuis la butte karstique d'Hoogland *922*
5.5.1.4. Analyse géomorphologique du karst à buttes de Vlakplaats et Hoogland *924*
5.5.1.5. Analyse géomorphologique depuis le Lion & Safari Park, à l'ouest *925*
5.5.2. Karst de Lobatse dans les dolomies de Malmani au Botswana (Secteur 1 de la Figure 916 p.910). 926
5.5.2.1. Cartes régionales géologiques de Lobatse et carte hypsométrique *927*
5.5.2.2. Inventaires des cavités et données spéléologiques *928*
5.5.2.2.1. Données spéléologiques, descriptions et cartes de King (1951) 928
5.5.2.3. Expédition de Baillieul de 1973 ..... *929*
5.5.2.4. Expédition de Cooke et article de 1975 ..... *929*
5.5.2.5. Description de Martini et Kavaleries, 1976 ..... *930*
5.5.2.6. Rapport de reconnaissance de 2006 de Mother Lode Grotto of the National Speleological Society *930*
5.5.2.7. SASA, SEC Caving et SEC Cave Register *930*
5.5.2.1. Inventaire dans l'ouvrage édité chez Springer de Stephens et al., 2022 ..... *931*
5.5.2.2. Carte synthétique des cavités de Lobatse *933*
5.5.2.3. Description succincte des cavités de Lobatse *938*
11. Cavité de Lobatse n°1 ..... *938*
12. Cavité de Lobatse n°2 ..... *942*
13. Cavité de Lobatse n°3 ..... *944*
14. Cavité de Lobatse n°4 (Mohu) *945*
15. Dépression à côté de la grotte n°4 avec des nids de guêpes. *945*
5.5.2.4. Intérêt de la grotte d'Abjaterskop *946*
5.5.3. Karst de Ramotswa (Selaolo, 1985) (Secteur J de la Figure 916 p.910) 947
5.5.4. Karst d'Ottoshoop (secteur D de la Figure 916 p.910) 947
5.5.4.1. Identification de couloirs fantômisés *949*
5.5.5. Karst de Kaapsekoor (Secteur E et F de la Figure 916 p.910) 951
5.5.6. Karst de *Pilgrim's Rest* (Secteur G de la Figure 916 p.910) 953
5.5.7. Karst de Wolkberg (Secteur H de la Figure 916 p.910) 954

5.5.8. Karst de Makapansgat, en Afrique du Sud (Secteur A de la Figure 916 p.910) 955
5.5.9. Karst de Thabazimbi (Secteur I de la Figure 916 p.910) 960
5.5.10. Karst de Marble Hall (Secteur 3 de la Figure 916 p.910) 960
5.5.11. Région carbonatée d'Assen (Krokodil River Fragment) (Secteur 2 de la Figure 916 p.910) 965

5.6. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS DANS LES DOLOMIES PALEOPROTEROZOÏQUES EN DEHORS DU BASSIN GEOLOGIQUE DU TRANSVAAL 968

5.6.1. Plateau de Ghaap 968
5.6.2. Kroonstad 977

5.7. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS EN NAMIBIE 981

5.7.1. Harasib et Otavi 983

5.8. BASSIN CARBONATE DU KANYE (BOTSWANA) 985

5.9. BASSIN CARBONATE DE PALAPYE (BOTSWANA) 986

5.10. BASSIN CARBONATE D'OKWA (BOTSWANA) 987

5.11. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS AU ZIMBABWE 989

5.11.1. Lomagundi 992
5.11.2. Chimanimani 994

5.12. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS EN ZAMBIE 995

5.12.1. Au niveau du bassin versant du Zambèze 997
5.12.2. Région karstique de Lusaka 1000
5.12.3. Karst de Chipongwe 1001

5.13. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS AU MOZAMBIQUE 1003

5.13.1. Présentation de la mission 1004
5.13.1.1. Cartographie des cibles 1005
5.13.1.2. Itinéraire envisagé pour prospecter les cibles 1006
5.13.1.3. Calendrier envisagé 1007
5.13.1.4. Cibles principales envisagées 1008

5.13.2. Cibles principales.....1009
5.13.2.1. Région de Buchane..... 1009
5.13.2.2. Région de Tete, secteur de Fingoe 1009
5.13.2.2.1. Secteur de Fingeo..... 1013
5.13.3. Cibles secondaires.....1016
5.13.3.1. Grotte de Ngalue à Nyassa (rive est du lac Malawi)..... 1016
5.13.3.2. Cataxa (près de Tete - Mozambique)..... 1017
5.13.3.3. Mphende et la butte témoin de Jurassique (Serra do Combio)..... 1017
5.13.3.4. Bassins houillers permiens près de Tete – Mozambique 1018
5.13.3.5. Monte Pitao (entre Chimoio et Tete – frontière Zimbabwe)..... 1019
5.13.3.6. Dacata (frontière Zimbabwe – entre Maphinhane et Chimoio) 1020
5.13.4. Résultats de la mission au Mozambique.....1021
5.13.4.1. Découverte du paléokarst de Pitao..... 1021
5.13.4.2. Résultats de la prospection au Mozambique..... 1025
5.13.4.2.1. Concernant les brèches pédologiques de Buchane 1025
16. Observations des brèches pédologiques comblant les fissures de la grotte de Buchane 1025
17. Brèches pédologiques aussi en surface 1025
5.13.4.2.2. Mauvaise localisation de la grotte d'Inhaluele dans l'inventaire de Laumanns (1998, p.112)..... 1028
5.13.4.2.3. Visite de la Caverna Cagi 1029
5.13.4.2.4. Surestimation de la profondeur des dépressions sur le MNT Jaxa .. 1031
5.14. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS AU MALAWI 1033
5.14.1. Carte des cibles 1033
5.14.2. Cibles principales.....1035
5.14.2.1. Région de Kirk Range (à la frontière entre le Mozambique et le Malawi) 1035
5.14.2.2. Région de Karonga (au nord du Malawi)..... 1039
5.14.2.3. Région de Zomba et grotte de Changalumi 1040
5.14.3. Cibles secondaires.....1041
5.14.3.1. Ngalue au Mozambique..... 1041
5.14.3.2. Chingwe Hole du Mont Zomba 1041
5.14.3.3. Cavité du Mont Mulanje 1041
5.14.4. Intérêt du secteur de Karonga 1042
5.14.4.1. Itinéraire de la mission au Malawi dans la région de Karonga..... 1042

5.14.4.2. Analyse des sites paléontologiques à Hominines de Karonga et prospection de la région 1043
5.14.4.2.1. Bassin permien carbonaté lacustre non karstifié 1044
5.14.4.2.2. Site de Malema : discordance des dépôts fossilifères pliocènes 1047
5.14.4.2.3. Les Chiwongo beds en discordance sur les calcaires permiens 1048
5.14.4.2.4. Carrière de Mpatha (brèche et choppers). 1048
5.14.5. Résultats des prospections au Mozambique et Malawi 1049
5.14.5.1. Calendrier de la mission 1049
5.14.5.2. Sur la karstification au Mozambique et au Malawi 1051
5.14.5.3. Apports du gisement fossilifère plio-pléistocène de Malema (surface d'érosion) pour comprendre le modèle de bassin de rift où s'installe le lac Malawi 1051
5.14.5.4. Visite du Service géologique du Malawi à Zomba 1051
5.15. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS DANS LA REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO 1052
5.15.1. Bibliographie 1055
5.15.2. Source des cartes géologiques 1055
6. CONCLUSION : PERSPECTIVES DE RECHERCHES DE KARSTS AUTOUR DU RIFT EST-AFRICAIN 1057
6.1. RECAPITULATIF DES RESULTATS TECHNIQUES DU SIG 1058
6.1.1. Liste des résultats techniques 1058
6.2. RESULTATS SCIENTIFIQUES 1062
6.2.1. À l'issue des cartographies SIG des Premiers résultats scientifiques : 1062
6.2.2. Résultats de terrain 1063
6.2.2.1. Cradle Of Humankind : un modèle morphodynamique exoréique avec des knickpoints et des vagues d'érosion régressive 1064
6.2.2.2. Okavango : un modèle morphodynamique endoréique avec la présence de paléolacs, sans lien avec les niveaux de base des océans 1067
6.2.3. Récapitulation de l'évolution 1070
6.3. PERSPECTIVES 1072

7. ANNEXES DU CHAPITRE N°1..... 1073

7.1. ANNEXE N°1 DU CHAPITRE N°1 : CODE DE GOOGLE EARTH ENGINE 1074

7.2. ANNEXE N°2 DU CHAPITRE N°1 : TABLEAU DES SOURCES DES DONNEES GEOLOGIQUES POUR LOCALISER LES CARBONATES ET LES KARSTS POTENTIELS 1076

7.3. ANNEXE N°3 DU CHAPITRE N°1 : TABLEAU DES CAVITES RECENSEES 1090

7.4. ANNEXE N°4 DU CHAPITRE N°1: TABLEAU DES DECLINAISONS MAGNETIQUES DES PLANS TOPOGRAPHIQUES UTILISEES. 1106

8. FICHES METHODOLOGIQUES SIG 1108

8.1. FICHE METHODOLOGIQUE N°1 : INTERROGER LA CARTE TOPOGRAPHIQUE OU L'IMAGE SATELLITE DE L'AFRIQUE DU SUD PAR FLUX WMS..... 1109

8.2. FICHE METHODOLOGIQUE N°2 : CONSTRUIRE UNE HYPSOMETRIE AVEC ARCMAP A PARTIR D'UN MNT..... 1110

8.3. FICHE METHODOLOGIQUE N°3 : REUNIR DES DALLES ASCI POUR FAIRE UN MNT AVEC ARCMAP (ARCGIS™) 1111

8.4. FICHE METHODOLOGIQUE N°4 : TRAITEMENT RRIM. 1112

8.5. FICHE METHODOLOGIQUE N°5 : DEFINIR LE BASSIN VERSANT D'UNE RIVIERE ET LES SOUS-BASSINS VERSANTS DE SES AFFLUENTS A PARTIR D'UN MNT 1124

8.6. FICHE METHODOLOGIQUE N°6 : CALCUL DES COURBES DE NIVEAU A PARTIR DU MNS AVEC QGIS 1125

8.7. FICHE METHODOLOGIQUE N°7 : DETECTION AUTOMATIQUE DES DOLINES PAR CALCUL DU MNT AVEC QGIS..... 1128

8.8. FICHE METHODOLOGIQUE N°8 : BASE DE DONNEES DE CAVITES DE GROTTOCENTER..... 1129

8.9. FICHE METHODOLOGIQUE N°9 : CONVERTIR DES DONNEES GPS POUR UN SIG 1130

8.10. FICHE METHODOLOGIQUE N°10 : EXPORTER LES POINTS GPS PRIS SUR LE TERRAIN (EXEMPLE DE LA MISSION NAMIBIE 2018) DANS UN FICHIER EXCEL. 1131

8.11. FICHE METHODOLOGIQUE N°11 : CONVERTIR DES DONNEES COMPEGPS 1133

8.12. FICHE METHODOLOGIQUE N°12 : CALCUL DE LA DECLINAISON POUR LA TOPOGRAPHIE DE LA GROTTE DE GROBER 1134

***8.13.* FICHE METHODOLOGIQUE N°13 : TELECHARGER LES CARTES GEOLOGIQUES DU *CRADLE OF HUMANKIND* 1135**

8.14. FICHE METHODOLOGIQUE N°14 : ROGNER LES CARTES (RASTER) AVEC PHOTOSHOP 1136

8.15. FICHE METHODOLOGIQUE N°15 : GEOREFERENCER DES IMAGES RASTER DE CARTES GEOLOGIQUES DANS ARCMAP (ARCGIS™). 1137

8.16. FICHE METHODOLOGIQUE N°16 : AFFICHER LES CARTES GEOLOGIQUES RASTERS GEOREFERENCEES (GEOTIFF OU TIFF) DANS GLOBALMAPPER 1146

8.17. FICHE METHODOLOGIQUE N°17 : UTILISER DES TAB DE LA CARTE GEOLOGIQUE VECTORISEE AU 1M AVEC MAPINFO 1147

8.18. FICHE METHODOLOGIQUE N°18 : UTILISER DES DONNEES TAB DANS ARCMAP (ARCGIS™) 1147

8.19. FICHE METHODOLOGIQUE N°19 : CONVERSION DES FORMATS DE STYLE ENTRE ARCGIS™ ET QGIS 1149

8.20. FICHE METHODOLOGIQUE N°20 : CONVERSION DES FORMATS DE STYLE ENTRE ARCGIS™ ET GLOBALMAPPER 1150

8.21. FICHE METHODOLOGIQUE N°21 : SEPARER DES SHAPES SELON LES ATTRIBUTS 1151

8.22. FICHE METHODOLOGIQUE N°22 : DECOUPER UN MNT POUR FAIRE UNE ANALYSE RRIM OU AUTRES AVEC ARCMAP (ARCGIS™) 1152

8.23. FICHE METHODOLOGIQUE N°23 : RANGEMENT DES FICHIERS LOURDS SUR ARCMAP (ARCGIS) POUR EXPORTATION OU LORS D'UN CHANGEMENT D'ORDINATEUR 1152

9. ANNEXES DU CHAPITRE N°2 1155

9.1. ANNEXE N°1 DU CHAPITRE N°2 : ECHELLE DES TEMPS GEOLOGIQUES SYNTHETIQUES 1156

9.2. ANNEXE N°2 DU CHAPITRE N°2 : DATATIONS DES FORMATIONS GEOLOGIQUES DU BASSIN DU TRANSVAAL 1159

9.3. ANNEXE N°3 DU CHAPITRE N°2 : EQUIVALENCE STRATIGRAPHIQUE DES DOLOMIES ENTRE LES DIFFERENTS BASSINS 1160

9.4. ANNEXE N°4 DU CHAPITRE N°2 : DEFINITION DES DOLOLITHITES ET DOLOCLAST. 1160

9.5. ANNEXE N°5 DU CHAPITRE N°2 : MODELES DE KARSTIFICATIONS DE BUTTON (1973) 1161

9.6. ANNEXE N°5 DU CHAPITRE N°2 : MODELE DE KARSTIFICATION DES DOLOMIES DE MALMANI PAR MARTINI (1976) 1162

9.7. ANNEXE N°6 DU CHAPITRE N°2 : MODELE DE KARSTIFICATION DES DOLOMIES A L'EST DU BASSIN DU TRANSVAAL (MARTINI, 1987) 1163

9.8. ANNEXE N°7 DU CHAPITRE N°2 : MODELE DE KARSTIFICATION DE FOSTER (1988) 1168

9.9. ANNEXE N°8 DU CHAPITRE N°2 :MODELE DE KARSTIFICATION DE TROLLIP (2006) 1169

10. ATLAS CARTOGRAPHIQUES DU CHAPITRE N°3 1171

10.1. ATLAS CARTOGRAPHIQUE DU *CRADLE OF HUMANKIND*... 1172

10.1.1. Localisation des atlas 1172

10.1.2. Liste des données cartographiques utilisées pour synthétiser l'Atlas cartographie du « Berceau de l'Humanité » 1173

10.1.3. Atlas cartographique n°1 du Cradle of Humankind 1174
10.1.3.1. A1 Carte des cavités du Cradle of Humankind..... 1174
10.1.3.2. A1 Carte géologique du Cradle of Humankind 1175
10.1.3.3. A1 Carte géologique détaillée (distinction des formations du groupe géologique de Pretoria) du Cradle of Humankind..... 1176
10.1.3.4. A1 Carte géologique détaillée (distinction des formations des dolomies de Malmani) du Cradle of Humankind 1177
10.1.3.5. A1 Carte géologique détaillée (distinction des altérites au-dessus des dolomies de Malmani) du Cradle of Humankind..... 1178
10.1.3.6. A1 Carte hypsométrique du Cradle of Humankind et lithologie 1179
10.1.3.7. A1 Carte orohydrographique du Cradle of Humankind 1180
10.1.3.8. A1 Carte des anomalies hydrologiques du Cradle of Humankind... 1181
10.1.3.9. A1 Carte des bassins-versants hydrographiques du Cradle of Humankind et lithologie 1182
10.1.3.10. A1 Carte hydrologique du Cradle of Humankind et optimisation des reliefs (Méthode RRIM) 1183
10.1.3.11. A1 Carte morphokarstique du Cradle of Humankind..... 1184
10.1.4. Atlas cartographique n°2..... 1186
10.1.4.1. A2 Géologie..... 1186
10.1.4.2. A2 Hypsométrie par classe d'altitude 1187
10.1.5. Atlas cartographique n°3 du bassin versant de la Bloubank en amont du Swartkop..... 1188
10.1.5.1. A3 Carte des bassins versants en amont de Swartkop et lithologie 1188
10.1.5.2. A3 Carte géologique des roches intrusives du bassin versant de la Bloubank en amont du Swartkop..... 1189
10.1.5.3. A3 Carte géologique des formations des dolomies de Malmani (au nord) et sans les roches intrusives - du bassin versant de la Bloubank en amont du Swartkop..... 1191
10.1.5.4. A3 Carte des compartiments hydrogéologiques du bassin versant de la Bloubank en amont du Swartkop, et la lithologie 1193
10.1.5.5. A3 Carte hypsométrique, limites des compartiments hydrogéologiques (et lithologie) du bassin versant de la Bloubank en amont du Swartkop 1194
10.1.5.6. A3 Carte morphokarstique du bassin versant de la Bloubank en amont du Swartkop et lithologie 1195
10.1.6. Atlas cartographique n°4 de la Bloubank en amont de la confluence avec la Honingklip..... 1197

10.1.6.1. A4 Carte topographique (source NGI) du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai..... 1198

10.1.6.2. A4 Carte satellite du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai 1199

10.1.6.3. A4 Carte hypsométrique (teinte) du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai..... 1200

10.1.6.4. A4 Réalisation de la carte géologique du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai..... 1201

10.1.6.5. A4 Carte géologique du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai..... 1202

10.1.6.6. A4 Carte lithologique et structurale du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai..... 1203

10.1.6.7. A4 Carte hypsométrique et lithologique du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai..... 1204

10.1.6.8. A4 Carte des surfaces morphologiques du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai et lithologie 1205

10.1.6.9. A4 Carte des surfaces morphologiques et de l'optimisation de la visualisation des reliefs par la Méthode RRIM appliquée au MNT..... 1206

10.1.7. Atlas cartographique n°5 du secteur des gisements fossilifères de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai.....1207

10.1.8. Atlas cartographique n°5 1208

10.1.8.1. A5 Carte satellite (Google Maps) du secteur des gisements fossilifères de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai..... 1209

10.1.8.2. A5 Carte des surfaces des gisements fossilifères de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai..... 1210

10.1.9. Atlas cartographique n°6 du secteur de Sterkfontein 1211

10.2. ATLAS CARTOGRAPHIQUE DE LA GROTTE DE STERKFONTEIN DANS LE CRADLE OF HUMANKIND EN AFRIQUE DU SUD.... 1214

10.3. ATLAS CARTOGRAPHIQUE DES GROTTES VERS RISING STAR DANS LE CRADLE OF HUMANKIND EN AFRIQUE DU SUD.... 1225

10.4. ATLAS CARTOGRAPHIQUE DES GROTTES DE NICO DANS LE CRADLE OF HUMANKIND EN AFRIQUE DU SUD 1228

11. ANNEXES DU CHAPITRE N°3..... 1231

11.1. ANNEXE N°1 DU CHAPITRE N°3 : SCHEMA DE SYNTHESE ET RAPPEL DES FORMATIONS DISCORDANTES SUR LES CARBONATES DU CRADLE OF HUMANKIND ET CONCEPT DE FANTOMISATION 1232

11.2. ANNEXE N°2 DU CHAPITRE N°3 LOG STRATIGRAPHIQUE SYNTHETIQUE 1233

12. ANNEXES DU CHAPITRE N°4 1237

12.1. ANNEXE N°1 DU CHAPITRE N°4 : DONNEES GROTTE DU NORD-OUEST DU BOTSWANA 1238

12.2. ANNEXE N°2 DU CHAPITRE N°4 : CARTE DE LA REGION FOURNIE PAR LE *MUSEUM DE GABORONE* EN 2021. 1243

12.3. ANNEXE N°3 DU CHAPITRE N°4 : CARTE DES PISTES FOURNIE PAR LE MUSEUM. 1244

12.4. ANNEXE N°4 DU CHAPITRE N°4 : CARTOGRAPHIE DES PALEODRAINAGES 1245

12.5. ANNEXE N°5 DU CHAPITRE N°4 : TRADUCTION DES TABLEAUX CHRONOLOGIQUES DES EVENEMENTS TECTONIQUES ET DES CHANGEMENTS HYDROLOGIQUES (MOORE, COTTERILL ET ECKARDT, 2012) 1261

12.6. ANNEXE N°6 DU CHAPITRE N°4 : LEVES AEROMAGNETIQUES DU NORD-OUEST DU BOTSWANA. 1275

12.7. ANNEXE N°7 CORRELATION ENTRE OTAVI HILLS, AHA HILLS, GCWIHABA HILLS ET KOANAKA HILLS 1278

12.8. ANNEXE N°7 DU CHAPITRE N°4 : DIFFERENTES CARTES GEOLOGIQUES DU NORD-OUEST DU BOTSWANA. 1279

12.8.1. Explication sur la réalisation des cartes géologiques à partir des levés magnétiques 1279

12.8.2. Carte géologique interprétée par Rankin (2015) à partir des levés aéromagnétiques 1281

12.8.3. Carte géologique du Water Surveys Botswana et Aqualogic (2001, Fig.2) 1284

12.8.4. Carte géologique du Water Surveys Botswana et Aqualogic (2003, Fig.5) 1285

12.8.5. Cartes géologiques de Mondillon (2020). 1286

12.8.6. Carte géologique de Rankin (2015).....1287

12.9. ANNEXE N°8 DU CHAPITRE N°4: NOUVELLE CARTOGRAPHIQUE DES AFFLEUREMENTS CARBONATES DU NORD-OUEST DU BOTSWANA..... 1297

12.10. ANNEXE N°8 DU CHAPITRE N°4 : CARTES GEOLOGIQUES DE GCWIHABA 1302

12.11. ANNEXE N°9 DU CHAPITRE N°4 : IMAGE SATELLITE DU NORD-OUEST DU BOTSWANA 1303

12.12. ANNEXE N°10 DU CHAPITRE N°4 : DONNEES MNT POUR GCWIHABA ET KOANAKA HILLS POUR ETUDIER DES RELIEFS 1304

12.13. ANNEXE N°11 DU CHAPITRE N°4 : CHRONOLOGIE DES DECOUVERTES SPELEOLOGIQUES, ARCHEOLOGIQUES ET PALEONTOLOGIQUE AU NORD-OUEST DU BOTSWANA..... 1309

12.14. ANNEXE N°12 DU CHAPITRE N°4 : TOPOGRAPHIES SUPPLEMENTAIRES DE WADOUM A GCWIHABA 1363

12.15. ANNEXE N°13 DU CHAPITRE N°4 : TOPOGRAPHIES SUPPLEMENTAIRES DE K1 A KOANAKA 1366

***12.16.* ANNEXE N°14 DU CHAPITRE N°4 : NOTES SUR LA VISITE DE LA GROTTE DE WADOUM (GCWIHABA) 1384**

12.17. ANNEXE N°16 DU CHAPITRE N°4 : IDENTIFICATION DE LA VEGETATION APRES LES EPISODES DE PLUIE SUR LES IMAGES SATELLITES 1386

12.18. ANNEXE N°17 DU CHAPITRE N°4 : CARTES DE XAI-XAI (BOTSWANA) 1389

12.18.1. Zoom sur la plaine du village de Xai-Xai.....1392

12.19. ANNEXE N°18 DU CHAPITRE N°4 : MOLLUSQUES ET CALCRETES 1393

12.19.1. Les dépôts lacustres, les calcaires bioclastiques.....1393

12.19.2. Les calcrètes décrits par Watts (1980) 1394
12.19.2.1. Les calcrètes sur les surfaces planes entre les dunes de sables du Kalahari 1396
12.19.2.2. Les silcrètes sur les surfaces planes entre les dunes de sables du Kalahari 1396
12.19.3. Les coquilles décrites lors de la désobstruction de Wadum par Ritter et Garner (1994b) 1396
12.19.4. Les coquilles décrites à Dimapo (G2) 1396
12.19.5. Sur K2..... 1396
12.19.6. Les coquilles de Xerocerastus (mollusques non marins) dans les sables du Corridor de Gcwihaba datés de -26 000 ans 1397
12.19.7. Comparaison avec les coquilles de Xerocerastus dans les calcrètes et les calcaires du Paléolac Etosha en Namibie..... 1399
12.19.8. Des mollusques 1403
12.20. ANNEXE N°20 DU CHAPITRE N°4 : PHOTOGRAPHIES D'UN ORAGE A KOANAKA HILLS 1404
12.21. ANNEXE N°23 DU CHAPITRE N°4 : PARES-FEUX SUR LES IMAGES SATELLITES A GCWIHABA 1405
12.22. ANNEXE N°24 DU CHAPITRE N°4 : IMAGE SATELLITE TERRA COLOR RENDANT COMPTE DES PALEODRAINAGES SUR LE HORST DE L'OKAVANGO 1407
12.23. ANNEXE N°27 DU CHAPITRE N°4 : ANALYSE GEOMORPHOLOGIQUE GCWIHABA ET KOANAKA..... 1408
13. ANNEXE DU CHAPITRE N°5..... 1413
13.1. ANNEXE N°1 DU CHAPITRE N°5 : REPORT DES RESEAUX KARSTIQUES DE CODZO RIVER ET NINGA MIRIANGO AU MOZAMBIQUE..... 1413
14. BIBLIOGRAPHIE..... 1418
15. LISTE DES SITES INTERNETS CONSULTES..... 1507
16. LISTE DES ILLUSTRATIONS..... 1529

17. LISTE DES TABLEAUX..... 1605

18. RESUME..... 1611

ABSTRACT 1615

0. INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE : POURQUOI RECHERCHER DES GROTTES EN AFRIQUE AUSTRALE ET POURQUOI POURRAIENT-ELLES CONTENIR DES FOSSILES D'HOMININES ?

En Afrique subsaharienne, deux grandes régions fossilifères, considérées comme des berceaux de l'Humanité, ont préservé des indices de la présence et de la circulation des Hominines, parmi lesquels figurent nos ancêtres.

Ces régions sont :

- Le **Rift est-africain** en Afrique de l'Est (en orange sur la Figure 1), où les fossiles sont préservés au sein d'anciens dépôts lacustres, indiqués par des carrés noirs, et datés de -6 à -1 million d'années (Ma).

- Les **karsts* sud-africains** *(voir la définition ci-dessous)***,** en bleu sur la Figure 1, où les fossiles sont conservés à l'intérieur des grottes, tandis que les dépôts de surface ont été en partie érodés. Trois aires karstiques fossilifères sont situées en Afrique du Sud et sont indiquées par des cercles rouges : le ***Cradle of Humankind (CoH)***, **Makapansgat** et **Taung**. Les âges de ces dépôts karstiques se situent entre -4 et -1 Ma.

***Définition de karst :**

Le terme "karst" désigne une région calcaire façonnée par la dissolution de la roche, entraînant la formation de **grottes** et de reliefs caractéristiques. En surface, on observe des dolines, des poljés (définition p.243), des lapiaz et des canyons qui sont des morphologies karstiques typiques. Ce terme provient du plateau de Kras, en Slovénie (***Karst*** en slovène), où ces **formes de relief** ont été décrites pour la première fois.
On parle de **karstification** et de karstogenèse pour désigner les processus de formation de ces formes de surface et de profondeur. Le terme **spéléogenèse** s'applique spécifiquement au creusement des grottes et des conduits karstiques.

Nous présenterons brièvement ces deux régions fossilifères dans cette introduction, ensuite les karsts sud-africains seront abordés plus en détail dans le Chapitre n°2 (p.230) tandis que le *CoH* aura le Chapitre n°3 (p.268) qui lui sera entièrement consacré.

Remarque : Il est important de souligner que seules les cavités creusées dans des roches carbonatées, favorables à la préservation des os fossiles composés de phosphate de calcium, sont prises en compte dans cette étude. Sont donc exclues les cavités situées dans les roches granitiques (pseudokarst), les roches évaporitiques et les tubes de laves.

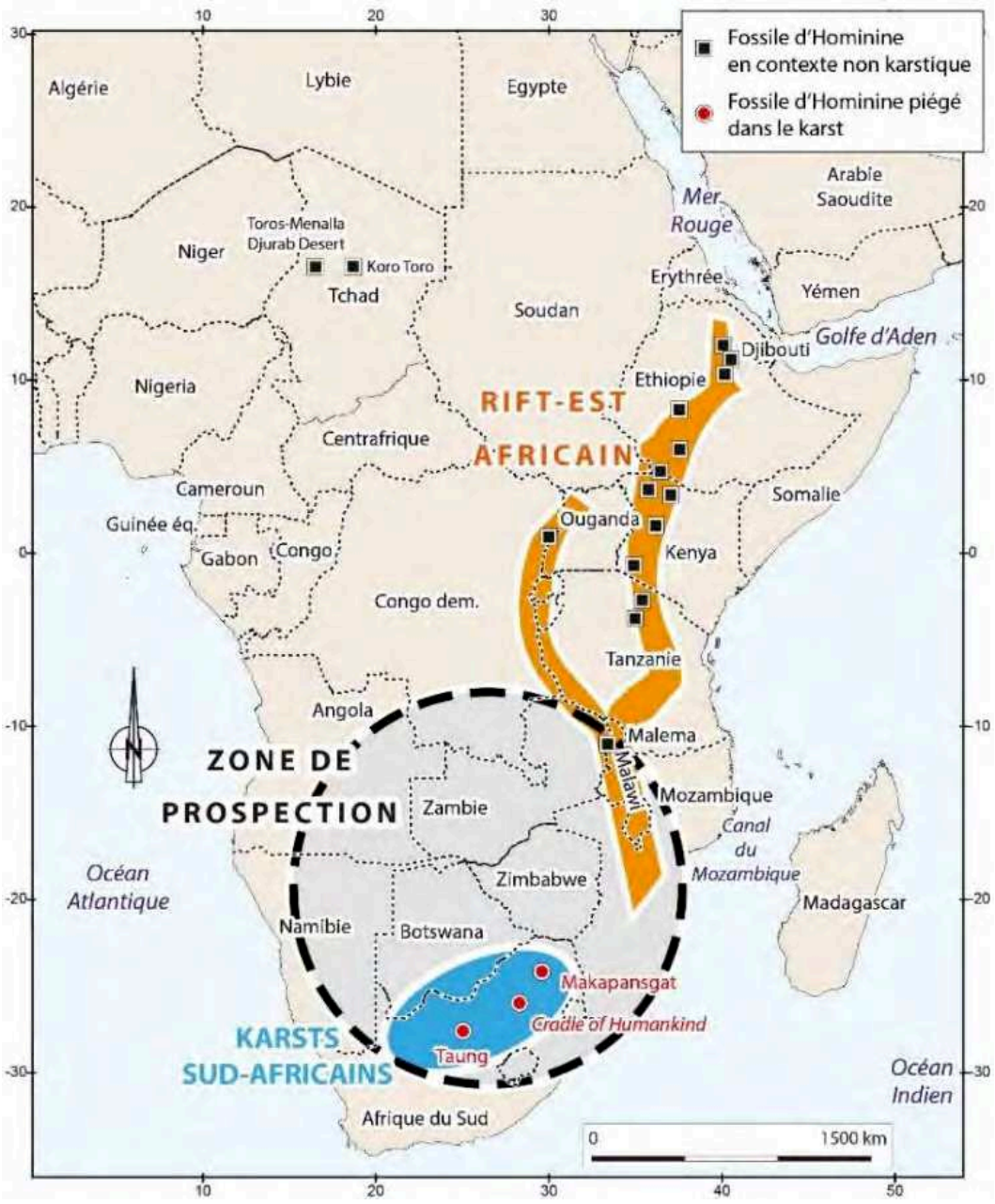


Figure 1 Les principales régions ayant livré des vestiges d'hominines en Afrique subsaharienne sont indiquées en couleur, tandis que la zone de prospection de la thèse et du projet HOMININ'KARST est représentée en gris.

Remarque : Sur cette carte, nous avons également indiqué les « sites à Hominidés anciens du Djourab » au Tchad, datant de 7 à 3 Ma (Brunet *et al.*, 1995, 1996), où le déplacement continu des dunes de sable met à l'affleurement des niveaux sédimentaires de plus en plus anciens, notamment ceux ayant livré les fossiles *Toumaï et Abel*. Notre étude se limitera à la zone située entre le Rift est-africain et les karsts de l'Afrique du Sud, représentée en gris.

0.1. LES REGIONS A FOSSILES D'HOMININES EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE

Nous présentons ici brièvement ces deux régions fossilifères où les archéologues ont découvert des fossiles d'Hominines : (A) le Rift est-africain et (B) les karsts sud-africains.

0.1.1. Le Rift est-africain : un berceau de l'Humanité en Afrique de l'Est

Le Rift[1] est-africain est un vaste fossé d'effondrement (Figure 2), résultant de la séparation des plaques tectoniques nubienne et somalienne. Ce phénomène, amorcé à partir de la seconde moitié du Tertiaire, il y a 27 millions d'années (Tiercelin et Lazzar, 2002 ; Molnar et Stock, 2009 ; Michon *et al.*, 2022), est causé par la dérive des continents (Wegener, 1915) et la tectonique des plaques (Le Pichon, 1968).

Ce Rift s'étend sur plus de 5000 km, depuis Djibouti jusqu'au Mozambique, en traversant l'Ethiopie, le Kenya, la Tanzanie et le Malawi. Il présente une largeur moyenne de 50 km et est illustré en orange sur la Figure 2.

Les cartes (p.198 et p.478 et celles citées) montrent l'extension du **Rift est-africain** au niveau des secteurs que nous étudierons :

- les grabens de la Shire et d'Urema au Mozambique (Dixey, 1957, Fig.1, p.3 ; Taieb et Tiercelin, 1979, Fig.1, p.244) ;
- le lac Malawi (Sepulcre *et al.*, 2006) ;
- l'Okavango, au nord-ouest du Botswana (Tiercelin *et al.*, 1988, Fig.1, p.242).

Au nord-ouest du Botswana, le fonctionnement du système de rift est plus récent, entre -5 et -2.4 Ma (Du Toit, 1933 ; Tiercelin & Lezzar, 2020 in Ringrose et al., 2005). Nous montrerons dans le Chapitre n°4 (p.473) que la mise en place du graben de l'Okavango a provoqué l'abaissement régional du niveau de base au sein des formations carbonatées fantômisées situées sur le horst, ce qui est à l'origine de la formation des grottes comme nous le décrirons dans le Chapitre n°2 (p.206).

[1] Rift est un mot anglais qui désigne une faille, une crevasse.

Dans ces fossés, l'apparition de grands lacs (Turkana, Albert, Édouard, Kivu, Tanganyika, Nyassa, etc.) et de corridors humides a favorisé le développement et la circulation de la faune et permis les migrations et les contacts entre les populations d'Hominines (Bailey et Reynolds, 2011) et leur préservation dans les sédiments lacustres, indiqués par des carrés noirs sur la Figure 1, et ont valu à ces régions une notoriété scientifique, soulignée par les travaux de nombreux archéologues notamment Weinert, 1950 ; Senyürek, 1955 ; Leakey, 1959 ; Arambourg et Coppens, 1967 ; Johanson *et al.*, 1978 ; White Tet *et al.,* 1994 ; Leakey *et al.,* 1995 ; Brunet *et al.,* 1996 ; Asfaw *et al.,* 1999 ; Leakey *et al.,* 2001 *in* Coppens et Picq, 2001, p.211, et synthétisée plus récemment dans Brown *et al.*, 2013).



Figure 2 Les gorges verdoyantes et arborées d'Ol Njorowa, au Kenya, font partie de la branche orientale du Rift est-africain. Bien que cette région n'ait pas révélé de fossiles d'Hominines, elle illustre parfaitement le rôle de corridor vert et d'axe de circulation préférentiel. (Source : Anup SHAH, Nature Picture Library – National Geographic).

0.1.2. Les karsts fossilifères sud-africains : le *Cradle of Humankind, Makapansgat et Ghaap*

La seconde région où des fossiles d'Hominines sont préservés correspond aux **karsts sud-africains**. C'est-à-dire que les découvertes de fossiles d'Hominines et/ou de faunes plio-pléistocènes ont été faites dans des remplissages karstiques à l'intérieur de grottes, ou en extérieur lorsque la surface topographique est venue éroder le toit de la cavité et que les remplissages se sont retrouvés à l'air libre. C'est le cas du *Type site* de la grotte de Sterkfontein, des gisements de Cooper, de Kromdraai, de *Minaar's* et de Malapa dans le *CoH*. Le contexte géologique et géomorphologique de ces régions fossilifères est donc très différent de celui du **Rift est-africain**.

La majorité des fossiles d'Hominines a été découverte dans le ***Cradle of Humankind*** *(CoH)*, au nord-ouest de la ville de Johannesburg, en Afrique du Sud. Cependant, d'autres découvertes d'Hominines ont été faites en dehors du périmètre strict du *CoH* (indiquées par les étoiles rouges sur la Figure 3, ci-dessous). Il s'agit du **karst de Makapansgat** et du **Plateau de Ghaap**, que nous allons à présent décrire brièvement, avant d'y revenir plus en détail ultérieurement. Nous détaillerons la position géomorphologique particulière du *CoH* dans le Chapitre n°3 (p.268).



Figure 3 Localisation des karsts fossilifères sud-africains (en rouge), exhumés des couvertures sédimentaires du Karoo (en violet et en vert) et du Kalahari (en jaune) par l'érosion des fleuves Orange et Limpopo (Légende Figure 7).

0.1.2.1. Cradle of Humankind

0.1.2.1.1. Classement UNESCO et délimitation administrative du CoH

En 1998, le *Cradle of Humankind* (« Berceau de l'Humanité » en français) est classé au patrimoine mondial de l'Humanité (*DACEL*, 1998 ; *COHWHS*, 2008a, b, c). Conformément à cette appellation, nous utiliserons le terme *Cradle of Humankind* et l'acronyme *CoH,* bien que d'autres régions d'Afrique aient également livré des fossiles documentant l'apparition du genre *Homo*. Qualifié de *« berceau à roulette » par Breuil* (Pales, 1962), il est en fait constitué de plusieurs fragments que l'on interprète comme le berceau au gré des datations. La désignation officielle de l'UNESCO pour le « *Cradle of Humankind »* est en français « Sites des hominidés fossiles de Sterkfontein, Swartkrans, Kromdraai et les environs ».

Initialement dans le *CoH*, seules trois grottes ont été identifiées comme majeures car elles avaient livré des fossiles d'Hominines : *Sterkfontein Cave, Swartkrans Cave* et Kromdraai (*DACEL*, 1998, p.15-16). Aujourd'hui, neuf autres grottes ont été répertoriées en plus dont cinq ayant révélé des fossiles d'Hominines : Drimolen, *Cooper's B*, Gondolin, *Rising Star* et Malapa. D'autres, telles que Gladysvale, *Bolt's Farm*, *Minnaar's Cave*, *Plover's Lake, Motsetsi* et Haasgat, n'ont fourni que des fossiles de faune plio-pléistocène, sans reste d'Hominines à ce jour, mais elles pourraient en contenir. Enfin, *Wonder cave* n'a révélé aucun fossile paléontologique. Ces grottes ont tout de même été intégrées à la liste des cavités à protéger.

Outre les restes d'hominines, ces sites ont fourni des milliers d'outils en pierre (attribuant des industries à l'Oldowaïen et à l'Acheuléen), des centaines d'outils en os (à Swartkrans et à Kromdraai), des milliers de restes d'animaux, des centaines de fragments de bois fossilisés, de probables indices de la domestication du feu avec des os brûlés dans le membre 3 de Swartkrans, et des restes d'*Homo* (à Sterkfontein et à Swartkrans).

Aujourd'hui, nous pouvons dire que le *CoH « contient un tiers de tous les fossiles hominines anciens connus et couvre une période clé entre -4 et -1 Ma, encadrant la période où apparait le genre Homo »* (Bruxelles, comm. orale). Ceci ne prenant en compte que les karsts fossilifères identifiés, sachant que plusieurs centaines de cavités sont connues dans le *CoH* (cf. inventaire sud-africain des grottes : le *SASA Cave Register*), indiquées par des points verts sur la Figure 198 (p.272).

La zone protégée du *CoH* (*World Heritage Site*), en jaune sur la Figure 171, s'étend sur environ 35 km en longitude et 30 km en latitude, couvrant une superficie d'environ 550 km². Le terme *CoH* et sa délimitation administrative ne sont pas d'ordre scientifique, mais plutôt politico-économique et peut susciter des débats et des évolutions (Figure 4). D'après les cartes fournies par l'UNESCO et dans les publications scientifiques (Dirks & Berger, 2013, Figure 1, p.111) l'extension géographique du CoH, et de sa zone tampon, a évolué au fil du temps (*DACEL*, 1998, p.322) (Figure 4) en fonction des études hydrogéologiques (*WRC*, 2010 ; Hobbs *et al.*, 2011 ; Hobbs *et al.*, 2022), qui évaluent l'impact des mines d'or sur la qualité de l'eau. Dans le futur, cette zone pourrait encore s'agrandir (Figure 4) (Sutherland, 2019).

Il est important de souligner que les auteurs utilisent ces emprises de manière interchangeable, et il n'est pas rare de trouver deux emprises différentes dans le même rapport (*WRC*, 2010, Figure 6.1, p.126, Figure 9.2, p.179). De plus, ces emprises ne correspondent pas exactement aux bassins versants des rivières, aux limites orographiques ni à la géologie du secteur, comme nous le verrons sur les cartes que nous avons produites du *CoH* en annexe (p.1174). *DACEL* (1998, 915bis p.15) indique que « *la délimitation a été définie en fonction de la topographie, de manière à inclure à la fois de nouveaux sites fossilifères et à préserver la qualité visuelle du paysage de toute modification incompatible ou indésirable* ».

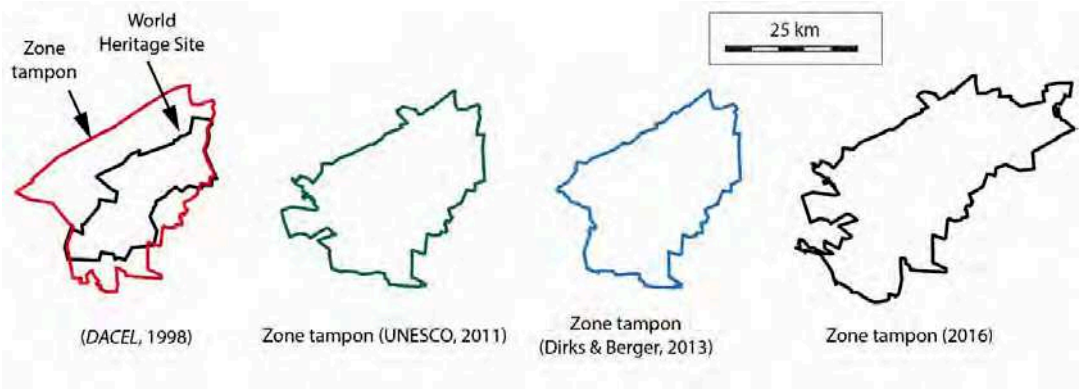


Figure 4 Évolution de la délimitation administrative du Cradle of Humankind.

0.1.2.1.2. Travaux de terrain et cartographie du karst du Cradle of Humankind

Cette thèse s'est concentrée sur l'étude des karsts de l'Afrique australe et plus précisément sur le *Cradle of Humankind* en Afrique du Sud. Dans un premier temps, lors d'un séjour de trois mois, du 18/06/2021 au 16/09/2021, dans le cadre d'un échange ERASMUS+ entre l'Université Jean-Jaurès de Toulouse et l'Université de Witwatersrand de Johannesburg, nous avons été chargés d'analyser les paléosurfaces du *CoH*. L'objectif était de déterminer s'il existait une corrélation entre l'altitude des remplissages fossilifères karstiques et leurs âges. À cette fin, nous avons levé une carte haute résolution inédite du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai, en utilisant un modèle de terrain numérique (cf. Chapitre n°1, p.36) de haute résolution fourni par Matthew V. CARUANA.

Le secteur cartographié s'étend principalement autour de la grotte de Sterkfontein, de Swartkrans et de Kromdraai, secteur qui appartient à l'Université de Witwatersrand et que nous avons pu prospecter à notre guise, alors que la prospection des propriétés privées, des parcs animaliers ou des zones de réserve n'a pas été possible. Aussi, certains éléments n'ont pas pu être vérifiés sur le terrain et l'identification de certaines formations n'a pas été complète. Par exemple, les grès du Karoo piégés dans le karst et cartographiés par Dirks et Berger (2013) autour du paléokarst de Malapa n'ont pas pu être observés directement. Par contre, nous avons pu vérifier les éléments cartographiés au-dessus de la grotte de *Rising Star* par Dirks *et al.* (2010).

Ensuite, nous avons longuement visité le secteur de la grotte de Sterkfontein ainsi qu'une vingtaine de cavités environnantes (Cooper's ; Kromdraai, Swartkrans) avec Laurent Bruxelles. Puis, ensuite, avec le club spéléologique local, le *SEC Caving (Speleological Exploration Club)*, nous avons exploré les grottes et les gisements de *Bolt's farm* (*Bolt's cave, Baboon, Milo B, Cork-screw*, etc.) ainsi que les grottes de la carrière de *Bolt's farm* (*Heartbreak*, *Quarrymaster*, etc.) (p.429). Ensuite, nous avons pu étudier les grottes d'Hoogland (merci à la spéléologue et propriétaire Annette Kruger, membre du *SEC Caving*) et le célèbre *Sinkhole* à Carletonville, près d'*Armaggedon Cave*, qui s'ouvre au milieu des *Hutton Soil* et fait 85 m de profondeur.

Ce travail de terrain a permis d'expertiser le karst du *CoH* et de caractériser ce mode de karstification original, dont les résultats sont détaillés dans le Chapitre n°3 (p.268).

Ce karst, qui renferme des remplissages fossilifères paléontologiques d'Hominines du Plio-Pléistocène, s'est formé dans ces carbonates très anciens du Paléoprotérozoïque, vieux de 2588 millions d'années.

Les karsts que nous étudions sont beaucoup plus récents que l'âge du Bassin du Transvaal, mais il est important de bien connaître le contexte géologique du karst du *CoH*, qui fera l'objet du Chapitre n°3 (p.268). Il sera nécessaire de bien préciser les conditions géologiques qui ont permis de karstifier ces anciens carbonates pour rechercher d'autres karsts ailleurs. Bien comprendre les mécanismes de karstification des grottes dans lesquelles des Hominines et des faunes du Plio-pléistocène ont été piégés et se sont conservés, est donc primordial.

Ce travail de recherche est donc basé sur la cartographie, la photo-interprétation mais aussi sur un travail de terrain. Cependant, une partie du travail sur les karsts de l'Afrique australe a été effectuée à distance, depuis l'Université de Toulouse.

Dernière remarque, la période la plus propice pour effectuer de bonnes observations de terrain en Afrique australe correspond au printemps austral, et plus particulièrement au mois d'août, après que les feux d'écobuage de juillet ont brûlé l'épaisse prairie qui masque les dolomies, les brèches et les entrées d'avens.



Figure 5 Ecobuage près des grottes de Sterkfontein, le 17 juillet 2021, qui a facilité l'identification des structures géologiques en brûlant les hautes herbes qui les dissimulaient.

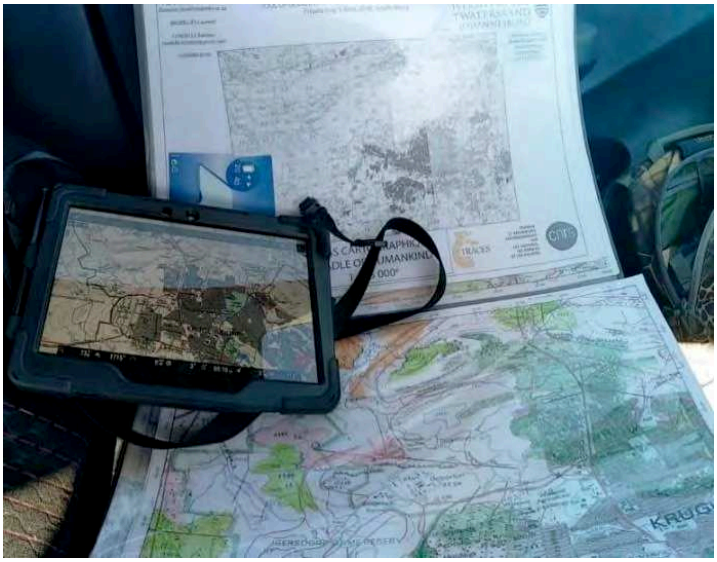


Figure 6 Le matériel de terrain comprend une tablette captant le signal GPS (pour la géolocalisation) et intégrant des fonds de cartes géoréférencées (cartes topographiques, modèle ombré, images satellites, etc.) et classeur de minutes de terrain, en papier.

0.1.2.2. Plateau karstique de Ghaap

Au niveau de la bordure orientale du **Plateau karstique de Ghaap** (Figure 3), à plus de 600 km au sud-ouest du *CoH*, les grottes et les travertins de la carrière *Norlim*, à l'ouest de la ville de **Taung**, ont livré de nombreux fossiles, dont le célèbre crâne d'un *Australopithecus africanus*, découvert par Raymond Dart (Dart, 1925b ; 1948, Peabody, 1957).

0.1.2.3. Karst de Makapansgat

À 200 km au nord-est du *CoH*, (Figure 3) dans les grottes du karst de Makapansgat, plusieurs vestiges d'Hominines ont été mis au jour (Dart, 1925b), et sont datés d'environ 3 Ma (*Australopithecus prometheus,* Dart, 1925a, 1948 a et b ; *Australopithecus africanus*). Ce karst a fait l'objet d'une étude approfondie dans le cadre d'une mission menée en juin 2024. Cette mission, dirigée par Jean-Baptiste Fourvel et Dominic Stratford avec le soutien de l'IFAS, et par Kim Genuite (projet AFRIHKARST) implique également Laurent Bruxelles, Clément Zanolli. Nous avons contribué à cette étude en réalisant des cartes de prospection, visibles plus loin (p.236).

Nous décrirons brièvement ces régions fossilifères dans le 2 :

- le *Cradle of Humankind* (p.230);
- le karst de Makapansgat (p. 236) ;
- le Plateau karstique de Ghaap (p. 244).

Nous y reviendrons ensuite plus en détail dans le 5 :

- le karst de Makapansgat (p.954);
- le Plateau karstique de Ghaap (p.968).

Quant au *Cradle of Humankind*, qui constitue le karst de référence de cette thèse, il fera l'objet d'une étude approfondie dans le Chapitre n°3 (p.268).

0.1.3. Contexte géologique et perspective pour la recherche de karsts fossilifères

Les karsts fossilifères situés en dehors du *CoH*, que nous venons de décrire, montrent qu'il existe d'autres karsts potentiels susceptibles d'avoir piégé des fossiles d'Hominines et qu'il est pertinent de les rechercher.

En Afrique australe, les karsts inventoriés sont exclusivement cantonnés aux affleurements dolomitiques (bleu ciel sur la Figure 3 et la Figure 7), appartenant à un ancien bassin marin paléoprotérozoïque (daté de 2 588 millions d'années), dont le **Bassin sédimentaire géologique du Transvaal** et le **Plateau karstique de Ghaap** (ce dernier faisant partie du bassin sédimentaire occidental de Griqualand) constituent des fragments ayant échappé à l'érosion des rivières et fleuves majeurs (Molopo, Vaal, Orange, Crocodil, Limpopo, Olifant). Ces bassins ont été partiellement recouverts par des dépôts sédimentaires du Karoo (en violet sur la Figure 7) et du Kalahari (en jaune).

Les cavités karstiques, une fois décapées de leur couverture sédimentaire altérée et de leurs toits carbonatés, affleurent en surface et peuvent piéger des sédiments et des fossiles. Ces derniers se conservent dans des grottes formées par un processus de **spéléogenèse par fantômisation** (Dandurand et Bruxelles, 2022), que nous décrirons dans le Chapitre n°2 (p.214) et qui a été confirmé dans le *CoH* par les travaux de Laurent Bruxelles (2019), comme nous le verrons dans le Chapitre n°3 (p. 414).

Une analyse géologique des bassins sédimentaires et des discordances stratigraphiques est nécessaire pour identifier les phases de karstification ayant affecté les dolomies du bassin paléoprotérozoïque et d'autres bassins carbonatés (Chapitre n°2, p.158), afin de localiser de nouveaux karsts fossilifères potentiels que nous décrirons dans le Chapitre n°5 (p.899).

Des études de reliefs à Makapansgat, Taung et dans le *CoH* (Bailey et al., 2011 ; Eckardt et al., 2012) illustrent l'intérêt de cette approche pour la prospection.

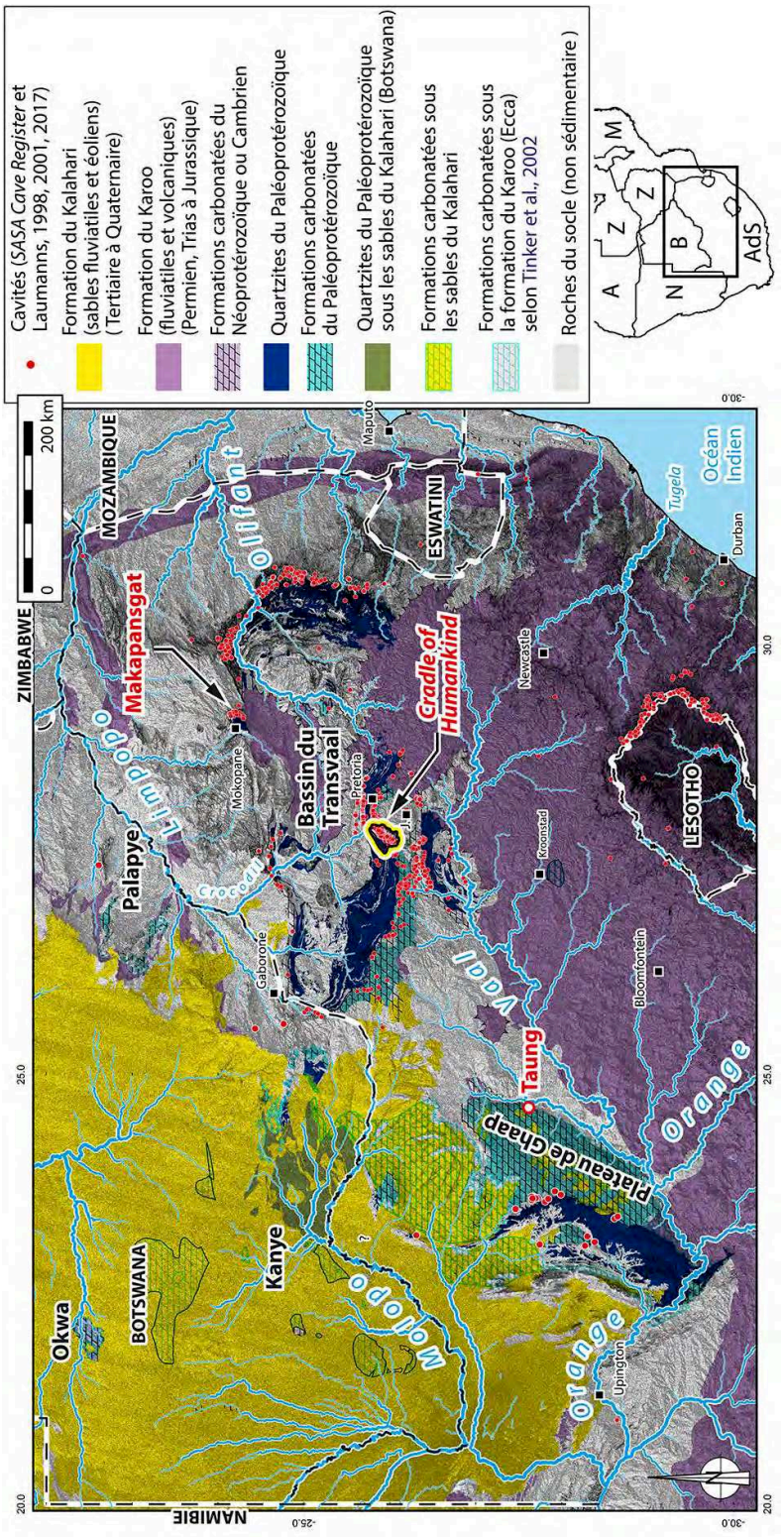


Figure 7 Localisation géologique et hydrographique des karsts sud-africains ayant livré des fossiles d'Hominines (Cradle of Humankind délimité en jaune, Makapansgat et Taung).

0.2. PROBLEMATIQUE DE LA THESE

Cette thèse a pour but de localiser des karsts à l'échelle de l'Afrique australe susceptibles d'avoir accumulé des remplissages plio-pléistocènes contenant des fossiles d'hominines.

Les théories de l'*East Side Story* (Coppens, 1983) et de l'*(H)Omo Event* (Coppens, 1991) suggèrent que l'activité tectonique du Rift est-africain (p.4) et les changements climatiques qui l'ont accompagnée ont joué un rôle déterminant dans l'émergence du genre *Homo*, faisant de l'Afrique de l'Est le berceau de l'Humanité. Selon les paléoanthropologues, la transition entre les grands singes (*Otavipithecus, Proconsul, Afropithecus, Turkanapithecus, Kenyapithecus,* etc.) et les premiers Hominines (*Ardipithecus, Sahelanthropus, Orrorin*, Australopithèques, etc.) se serait produite à partir du Miocène supérieur, vers – 12,5 Ma (Senut *et al.*, 1997 ; Senut, 2009, 2017, 2020). Cependant, la rareté des fossiles complique la compréhension de cette émergence.

Aujourd'hui, grâce aux datations obtenues récemment dans le *CoH*, il apparaît clairement que les Hominines étaient présents dans de nombreuses régions du continent africain, formant ainsi un seul et même berceau (Bruxelles, 2019 ; 2022b, p.24). Les découvertes d'Hominines à Makapansgat (Dart, 1948b) et sur le plateau de Ghaap (Dart, 1925b ; *DACEL*, 1998 ; Hopley *et al.*, 2013), en dehors du *Cradle of Humankind sensu stricto* (Figure 4 p.8), semblent corroborer cette hypothèse.

> *« La découverte de nouveaux berceaux de l'humanité confirmerait que l'Afrique, dans sa quasi-totalité, peut être considérée comme le « Berceau de l'Humanité », dans le sens où elle constitue le lieu d'apparition du genre Homo » (Bruxelles, 2019).*

En s'appuyant sur le contexte géologique et karstologique des fossiles découverts dans le karst du *Cradle of Humankind* en Afrique du Sud, cette thèse vise à explorer d'autres karsts susceptibles d'avoir piégé et préservé des fossiles d'Hominines entre le *Cradle of Humankind* en Afrique du Sud et le débouché du Rift est-africain.

L'objectif est de remonter jusqu'à la découverte la plus méridionale du Rift est-africain : l'Hominine de Malema (et la découverte d'Urema), mis au jour au Malawi (Schrenk *et al.*, 1993). Nous avons pu visiter et caractériser le contexte géologique de ces découvertes en septembre 2022 en collaboration avec les inventeurs. Ces résultats seront présentés dans le Chapitre n°5 (p.1033).

Cette thèse propose donc une analyse géomatique, karstologique, géologique et géomorphologique de cette vaste région d'Afrique australe englobant le Mozambique, le Malawi, le Zimbabwe, le Botswana, la Namibie, la Zambie et l'Afrique du Sud (comme le montrent la Figure 1 et la Figure 109 p.146), afin d'y rechercher des karsts fossilifères. Pour ces raisons, nous avons développé dans cette thèse un outil permettant d'identifier les aires karstiques et de trouver des critères géomorphologiques applicables à d'autres régions d'Afrique. Il s'agit du Système d'Information Géographique (SIG) des karsts de l'Afrique australe, que nous allons présenter dans le Chapitre n°1.

0.3. PLAN DE LA THESE

Afin de répondre à cette problématique et en nous appuyant sur l'ensemble des données collectées et des travaux que nous avons menés, nous avons structuré cette thèse selon le plan suivant. L'introduction présente le sujet de la thèse : **la recherche de fossiles d'Hominines dans les grottes entre les karsts sud-africains et le Rift est-africain**. Elle expose brièvement le contexte géologique de ces régions fossilifères.

Dans le Chapitre n°1 nous expliquerons comment la création d**u SIG des karsts de l'Afrique australe** répondra à cette problématique. Nous décrirons brièvement les grandes étapes de son élaboration. Nous dresserons l'inventaire des données qui y seront intégrées, en précisant leurs caractéristiques et leurs sources d'acquisition. Nous fournirons une liste complète des données satellitaires disponibles sur les reliefs africains ainsi qu'un inventaire exhaustif des différentes cartes géologiques utilisées pour identifier les formations carbonatées potentiellement karstifiées. Nous expliquerons également comment utiliser différentes solutions logicielles géomatiques (Qgis, Arcgis, GlobalMapper, Mapinfo, etc.) pour réaliser des cartes inédites spécifiques à nos recherches. Des fiches méthodologiques seront disponibles en annexe à la fin de la thèse (p. 1156). Nous compilerons d'autres types de données dans le SIG : les données de terrain issues de missions spéléologiques et archéologiques, qu'elles soient de première main (issues de nos propres missions de terrain, de l'HDR de Laurent Bruxelles et des missions HOMINI'KARST) ou de seconde main (issues de la bibliographie : Dart 1925, 1948, 1953 ; Peabody, 1957 ; Cooke *et al.*, 1974 ; Cooke, 1973, 1975, 1980, 1995 ; Cooke et Baillieul, 1974 ; Pickford et Mein, 1981 ; Pickford, 1990 ;Williams *et al.*, 2012, Etc.). Ensuite, nous produirons les premiers documents cartographiques issus du SIG, qui répondront à nos problématiques de recherche. Ce chapitre présentera rapidement le contexte géologique et géomorphologique des karsts sud-africains : le *Cradle of Humankind*, le karst de Makapansgat et le Plateau karstique de Ghaap en les intégrant dans une histoire plus complexe, celle des grands bassins sédimentaires qui s'étendaient sur plusieurs continents avant la séparation du Gondwana au Jurassique.

Cette histoire permet de retracer de grandes phases de karstification qui ont partiellement érodé et altéré ces bassins et créé des karsts.

Le Chapitre n°2 commencera par décrire le contexte géologique et géomorphologique (paléosurfaces) de l'Afrique australe et des karsts fossilifères sud-africains. Ces formes du paysage scandent l'évolution géomorphologique régionale, mais aussi le démantèlement des cavités karstiques qui vont ensuite jouer le rôle de pièges à fossiles. Puis, il présentera les nouveaux concepts de la karstogenèse et de la spéléogenèse qu'il va falloir prendre en compte pour rechercher des grottes mais aussi pour expliquer la richesse de ces cavités et la bonne préservation des remplissages fossilifères.

Le Chapitre n°3 se focalisera sur le karst du *Cradle of Humankind* dans la région du Gauteng, en Afrique du Sud. Nous expliquerons pourquoi et comment les fossiles ont été piégés dans les grottes comme Laurent Bruxelles le montre à travers les travaux inédits de son HDR (Bruxelles, 2019). Dans une première partie, l'analyse des paysages du *CoH* et l'identification de vastes surfaces d'aplanissement refléteront les grandes étapes de l'érosion régressive des rivières, qui ont modelé ces paysages anciens et exhumé des dolomies fantômisées où des grottes se creuseront et pourront alors accumuler des sédiments et des fossiles. Cette érosion a été contrôlée à l'est par les niveaux de bases de l'Océan Indien, à travers l'incision du fleuve Limpopo et de la rivière *Krokodil* et ses affluents, et contrôlée à l'ouest par les niveaux de base de l'Océan Atlantique via le fleuve Orange, la rivière Vaal et ses affluents. Dans une deuxième partie, nous étudierons l'impact des phénomènes d'altération et d'érosion sur les dolomies étant à l'origine de la karstification du *CoH*. Dans une troisième partie, nous décrirons la spéléogenèse par fantômisation qui a en partie été comprise ici et qui est un critère fondamental dans la recherche d'autres sites. Nous caractériserons dans une quatrième partie les surfaces d'aplanissement puis nous verrons le lien entre ces paléosurfaces, la fantômisation et l'âge des remplissages karstiques, afin d'orienter nos recherches de remplissages plio-pléistocènes.

Le Chapitre n°4 sera consacré aux karsts situés entre le Botswana et la Namibie, où l'équipe d'HOMINI'KARST, dirigée par Laurent Bruxelles, mène des fouilles archéologiques et paléontologiques chaque année et auxquelles nous avons pu participer à quatre reprises. Nous comparerons ces karsts à notre modèle de référence, le *CoH*, afin de déterminer si les modes de genèse (fantômisation) et les périodes de fossilisation sont les mêmes (plio-pléistocènes) afin d'évaluer le potentiel de trouver des vestiges d'Hominines.

Le Chapitre n°5 abordera les perspectives de découverte d'autres berceaux, présentant ainsi les résultats du **SIG des karsts de l'Afrique australe** et des études morphokarstiques des chapitres précédents. Nous examinerons les karsts potentiels en Afrique australe afin de rechercher des cavités situées sous la **Surface Africaine*** (lire définition p.268), que nous aurons préalablement définie d'après les études hypsométriques, géomorphologiques et en utilisant les cartes des sols, afin de découvrir des grottes ouvertes au Plio-Pléistocène et donc susceptibles d'avoir piégé les fossiles qui nous intéressent. Nous y rechercherons les critères géomorphologiques favorables à la karstification et à la fossilisation tels qu'ils ont été définis dans le modèle du *CoH*. L'objectif sera donc de rechercher ces paramètres dans de nouveaux secteurs carbonatés, vierges de prospection, en remontant vers le Rift est-africain au Mozambique et au Malawi. Si le modèle du *CoH* n'est pas retrouvé dans son intégralité, nous verrons quelles sont les caractéristiques les plus importantes, quitte à définir d'autres modèles adaptés à d'autres régions.

Après avoir consacré le 3 au *CoH*, nous étudierons les autres karsts situés dans les dolomies de Malmani du Bassin du Transvaal, ce dernier s'étendant du nord de l'Afrique du Sud au sud-ouest du Botswana. Nous commencerons par le karst d'Hoogland-Vlakplaats, à 30 km à l'ouest du *Cradle of Humankind* puis nous nous intéresserons au karst de Makapansgat, situé tout à fait au nord du bassin du Transvaal, à plus de 200 km du *CoH*.

Nous diagnostiquerons ensuite le potentiel karstique des carbonates de *Krokodil River Fragment* - Assen (n°2 sur la Figure 915 p.910) et de *Marble Hall Fragment* (n°3), en plein milieu du bassin du Transvaal. Puis, nous diagnostiquerons les karsts situés à l'ouest du bassin du Transvaal : le karst d'Ottoshoop en Afrique du Sud et les karsts botswanais de Lobatse (n°1) et de Ramotswa.
Enfin, nous étudierons le karst du plateau de Ghaap, situé dans des formations carbonatées équivalentes aux dolomies de Malmani du Bassin du Transvaal.
Nous ferons des analyses d'autres bassins sédimentaires carbonatés situés au Botswana et dans lesquels il est possible de trouver du karst comme le bassin de Kanye, le bassin d'Okwa et le bassin de Palapye mais pour lesquels nous avons peu de données.

Enfin nous examinerons les karsts des carbonates néoprotérozoïques du Botswana dans les *Aha Hills*, *Gcwihaba Hills* et *Koanaka Hills*, contrôlés par les paléoniveaux de base de l'Océan Indien puis par ceux de paléolacs, avant d'être actuellement contrôlés par le delta de l'Okavango. Nous comparerons les surfaces d'aplanissement avec celles du Cradle of Humankind et des karsts paléoprotérozoïques.

Nous étudierons également les karsts de Namibie, situés à quelques centaines de kilomètres plus à l'ouest, comme Harasib, contrôlé par les niveaux de base de l'Océan Atlantique et par ceux du lac d'Etosha.

En conclusion, pour les karsts déjà connus et identifiés que nous avons prospectés, nous ferons un « retour de terrain » afin de comparer les informations cartographiques du modèle avec les observations *in-situ*.

Cette thèse a donc pour but de définir des cibles de prospection mais elle s'enrichira également des nouvelles données acquises lors des futures missions de terrain. Elle s'appuiera donc sur :

- un état des lieux des karsts fossilifères du *CoH* d'où ont été identifiés des critères de recherche ;
- le traitement inédit des données satellites des reliefs par géomatique ;
- des données de terrain de missions anciennes.

Pour identifier des karsts entre le Rift est-africain et les karsts sud-africains, nous réaliserons des analyses inédites des reliefs à partir de données satellitaires (Figure 11) (cf. Chapitre n°1), grâce aux outils de la géomatique. Ces analyses seront croisées avec des données de terrain collectées par les missions HOMINI'KARST ainsi qu'avec des données issues de recherches plus anciennes (Dart 1925, 1948 ; Cooke, 1973, 1975, 1980, 1995 ; Cooke et Baillieul, 1974 ; Pickford et Mein, 1981 ; Pickford, 1990 ; Williams *et al.*, 2012, etc.).

Ces analyses nous permettront de mettre en évidence des critères géomorphologiques spécifiques aux karsts fossilifères. Ces critères serviront d'indicateurs pour identifier et localiser de nouveaux karsts à prospecter dans les régions karstiques.

1. CHAPITRE 1 : METHODOLOGIE DE LA CREATION DU SIG DES KARSTS D'AFRIQUE AUSTRALE ET PRODUCTION DE CARTES INEDITES.

Comment rechercher des grottes et quels outils avons-nous développés ?
Où chercher les grottes ?

Ce chapitre méthodologique a pour but d'expliquer comment nous avons conçu le SIG des karsts d'Afrique australe. Nous détaillerons les données intégrées et la manière dont le SIG nous permet de répondre aux problématiques de cette recherche. Nous procéderons à des comparaisons et à une validation avec la base de données des cavités que nous avons constituée (Tableau 59 p.1090) à partir de recherches bibliographiques et de la compilation des données de terrain des missions HOMINI'KARST du Chapitre n°1 (p.93). Enfin, nous présenterons les cartes inédites issues des résultats du SIG. Durant la thèse, nous avions pratiquement ouvert en simultané sur nos écrans d'ordinateur :

- (1) un logiciel SIG permettant de compiler et de comparer des données, dans lequel nous intégrions constamment
- (2) de nombreuses cartes ou figures issues des articles et des livres consultés, ainsi que
- (3) le manuscrit de thèse, conçu comme une notice et une synthèse de ces documents.

Nous consultions également :

(4) les données de terrain complétées au gré des missions,

(5) et des images satellites issues de plusieurs sources et prises à différentes périodes de l'année.

1.1. COMMENT ELABORER LE SIG DES KARSTS DE L'AFRIQUE AUSTRALE ? 23

1.2. QUELLES DONNEES CARTOGRAPHIQUES A INTEGRER DANS LE SIG DES KARSTS D'AFRIQUE AUSTRALE ? 30

1.3. METHODOLOGIE DU TRAITEMENT DES MNT POUR LE DIAGNOSTIC KARSTOLOGIQUE DES CARBONATES 54

1.4. CORPUS DE THESE : INVENTAIRE DES DONNEES DE TERRAIN ET CONSTRUCTION D'UNE BASE DE DONNEES DES CAVITES D'AFRIQUE SUBSAHARIENNE 93

1.5. ANCIENNES CARTOGRAPHIES DES KARSTS D'AFRIQUE AUSTRALE 121

1.6. PREMIERS RESULTATS DU SIG : OU RECHERCHER DES KARSTS ET DES KARSTS POTENTIELS EN AFRIQUE AUSTRALE ? 138

1.7. CONCLUSION 156

Pour créer le **SIG des karsts de l'Afrique australe,** notre méthodologie repose sur la cartographie et la **géomatique*** *(voir définition ci-dessous)*, en s'appuyant sur l'utilisation de logiciels informatiques exploitant les **Systèmes d'Information Géographique** (SIG).

Définition de la géomatique :

La géomatique regroupe l'ensemble des techniques informatiques (sur ordinateur) permettant la gestion, la compilation et l'analyse de données géographiques issues de sources variées (satellites, drones, GPS, etc.) (Theriaut, 1995). Un volet essentiel de la géomatique concerne les traitements statistiques, la visualisation des données, la réalisation de calculs complexes (modèle ombré, carte de pentes, etc.) ainsi que la modélisation en 2,5D.

Définition d'un SIG :

Un SIG est un logiciel informatique qui permet de compiler sur une interface graphique (un écran) des données numériques de natures diverses, à des échelles cartographiques et dans divers systèmes de projection cartographique. Son objectif est de faciliter la visualisation, la comparaison et la production de cartes inédites.

Les données principales, que nous exploiterons pour rechercher des karsts concernent les reliefs. Nous ferons l'analyse des reliefs à partir de données satellitaires (Figure 8), appelées **Modèles Numériques de Terrain**.

Définition d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) :

Un MNT est un fichier numérique, souvent volumineux, qui contient les altitudes des reliefs mesurées depuis l'espace. Plus précisément, ce sont des matrices numériques au format ASCII, qui attribuent une valeur d'altitude à chaque pixel de l'emprise. Ces fichiers numériques peuvent être visualisés sous forme d'images grâce aux calculs effectués par les logiciels SIG. Nous en reparlerons plus loin (p.36).

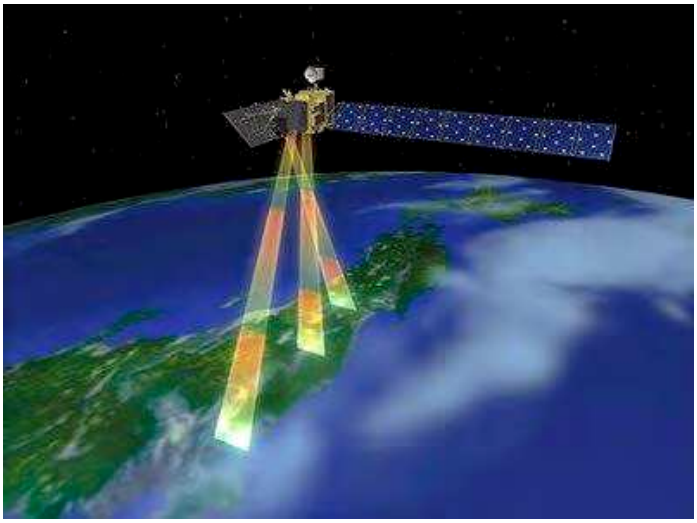


Figure 8 Illustration montrant l'acquisition de MNT par le satellite DAICHI de la JAXA. (Source : JAXA).

Les SIG offrent un large éventail d'outils statistiques permettant de traiter ces MNT et de produire des visualisations des reliefs grâce aux calculs de pentes, aux calculs d'ombres projetées, (modèles ombrés), aux calculs de courbes de niveaux et aux représentations hypsométriques. Nous présenterons ces différentes opérations en détail dans le Chapitre n°1 (p.56). Pour compléter le SIG, nous ajouterons d'autres types de données provenant principalement des missions de prospection archéologique et spéléologique effectuées dans ces régions karstiques, soit par nous-mêmes (l'équipe HOMINI'KARST), soit issues de la bibliographie. Nous décrirons ces données et les inventorierons dans le Chapitre n°1 (p.93).
Ces outils nous permettront de localiser les karsts situés dans les régions carbonatées comprises entre les karsts sud-africains et le Rift est-africain, où les Hominines ont pu circuler et qui sont susceptibles de contenir des fossiles, comme expliqué précédemment. Un autre intérêt des SIG réside dans la production de cartes inédites adaptées à nos problématiques de recherche, notamment :

- La localisation des karsts potentiels à partir de critères de reconnaissance géomorphologiques définis lors de l'étude du *Cradle of Humankind*, le karst de référence de cette thèse (Chapitre n°3, p.268) ;
- la détermination des gammes d'altitude des entrées de grottes en fonction de l'âge des paléosurfaces, comme dans le *CoH* (Chapitre n°3, p.268) ;
- l'identification des altitudes des paléolacs, comme au nord-ouest du Botswana (Chapitre n°4, p.473) ;
- le report des plans topographiques des cavités en surface afin d'identifier d'autres entrées potentielles ;
- la délimitation de la couverture d'altération sur les calcaires exhumés et fantômisés, où se situent les grottes potentielles.

Les logiciels SIG que nous utiliserons seront QGIS, qui propose une licence gratuite et ARCGIS™ dont l'Université a mis une licence à notre disposition.

1.1. COMMENT ELABORER LE SIG DES KARSTS DE L'AFRIQUE AUSTRALE ?

L'un des objectifs de cette thèse est donc de créer le **SIG des karsts de l'Afrique australe**. Nous résumerons les quatre grandes étapes de son élaboration avant de revenir plus en détail dans la suite du chapitre. De plus, des fiches méthodologiques seront disponibles en annexe (p. 1156).

1.1.1. Étape 1 : Identifier des formations carbonatées à l'affleurement

Comme les grottes d'Afrique australe se développent préférentiellement dans les calcaires, les dolomies ou les marbres, nous avons commencé par identifier, d'après les cartes géologiques, où sont situées ces formations à l'affleurement (Figure 107, p.142) (Figure 9). Pour cela, nous avons donc utilisé les cartes géologiques disponibles, avec des précisions et des résolutions variables.

Nous avons répertorié les cartes géologiques utilisées dans le Tableau 58 (p.1089) en annexe. Ce tableau masque sans doute que la recherche et le traitement des cartes géologiques se sont révélés être une tâche ardue et chronophage mais qui n'a visiblement jamais été réalisée.

Lorsque les cartes n'étaient ni vectorisées ni géoréférencées, il a été nécessaire d'obtenir ou de faire des cartes raster scannées à haute résolution (dpi élevé), puis il a fallu les géoréférencer à l'aide des SIG afin de les intégrer dans ces derniers et enfin redessiner vectoriellement les formations carbonatées sous Illustrator pour les réintégrer dans les SIG.

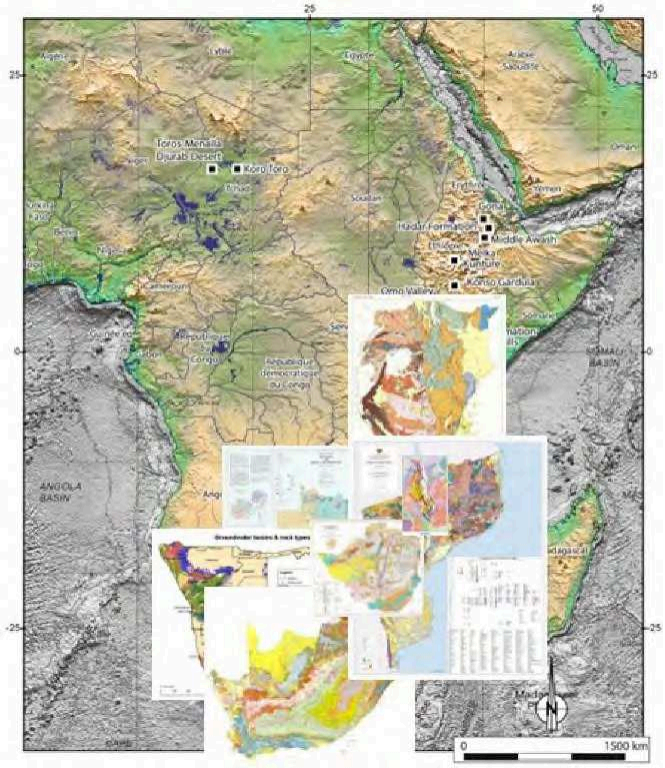


Figure 9 Sélection de quelques cartes géologiques géoréférencées et intégrées dans le SIG.

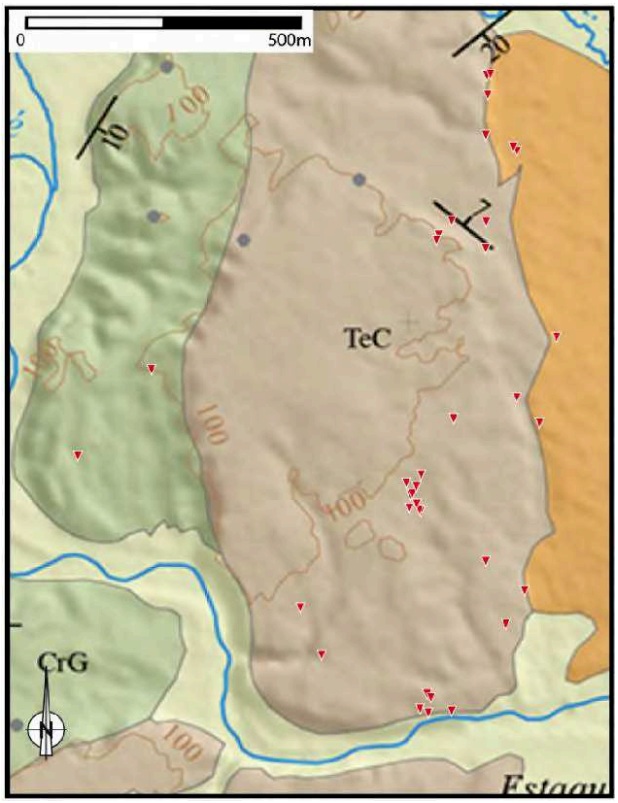


Figure 10 Extrait du SIG montrant la carte géologique du karst de Buzi au Mozambique avec un modèle ombré du relief et les cavités inventoriées (en rouge) (cf. Chapitre n°5 p.1003).

1.1.2. Étape 2 : Analyser l'état de karstification des formations carbonatées identifiées

Les formations carbonatées identifiées à l'étape précédente et représentées par des cercles jaunes sur la Figure 109 (p.146) ont ensuite été analysées pour évaluer leur degré de karstification.

Les affleurements carbonatés n'étant pas nécessairement karstifiés, un diagnostic karstologique a ensuite été réalisé en se basant sur l'analyse des reliefs mesurés par satellite, les MNT (voir définition p.22), afin de repérer des formes karstiques en surface tels que des poljés, des canyons, des dolines, des avens et des buttes karstiques, etc.) révélatrices de karst et possiblement de grottes en profondeur.

À l'issue de cette deuxième étape, nous avons identifié des **zones karstiques potentielles**, représentées par des cercles violets sur la Figure 109 (p.146). Ces zones demanderont ensuite une vérification sur le terrain pour être validées.

Les images aériennes (satellites ou drones) fournissent d'autres types d'information et offrent une meilleure précision que les MNT. Elles nous ont permis de localiser la limite entre les couvertures d'altérites et les formations carbonatées exhumées, où se situent préférentiellement les grottes.

Ces images aériennes servent aussi à fournir des informations sur le couvert végétal. Par exemple les pinèdes sont situées sur les sols acides et permettent de déterminer la présence de couvertures d'altération. Si leur résolution est suffisante, notamment les images par drone, elles permettent d'identifier, dans les secteurs arides, des figuiers *(figtree – ficus cordata)* (Ritter et Garner, 1994, p.57), qui sont généralement des marqueurs de cavité car leurs racines s'enfonçant profondément à l'intérieur des grottes pour récupérer l'humidité (Figure 12 et Figure 13). Ce sont donc de très bons indicateurs d'entrées de cavités, aussi bien en image satellite que sur le terrain. Il est d'ailleurs fait mention de racines de *figtree* dans *Echo cave* en Afrique du Sud avec des racines trouvées jusqu'à 120 m de profondeur (Kutschera, 1991 *in* Du Preez *et al.*, 2015, p.38).

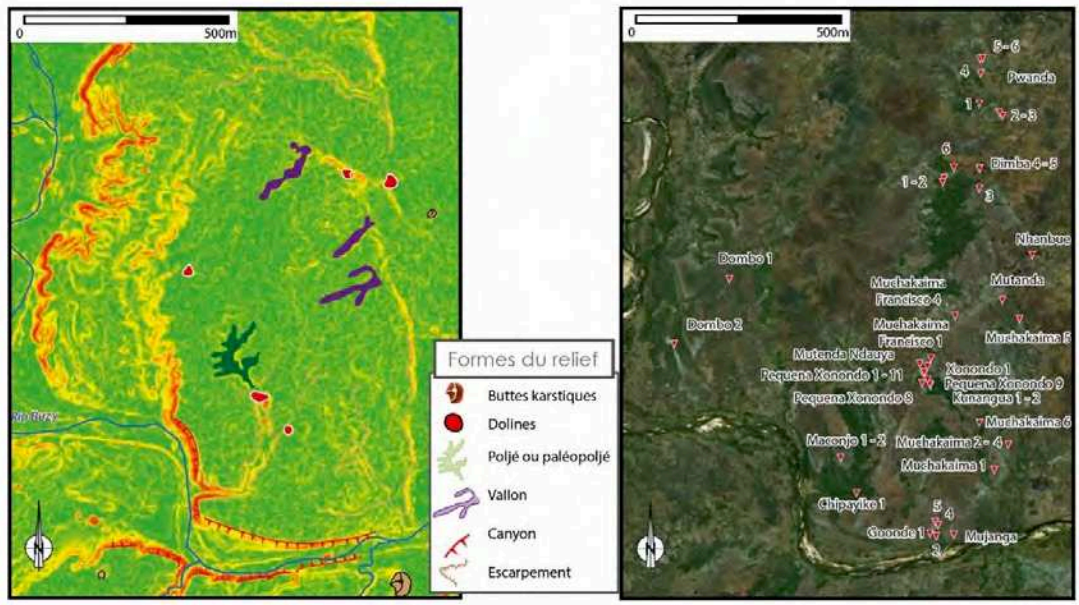


Figure 11 Formes karstiques identifiées en surface d'après l'analyse de la carte des pentes du MNT du karst de Buzi au Mozambique et l'image satellite.

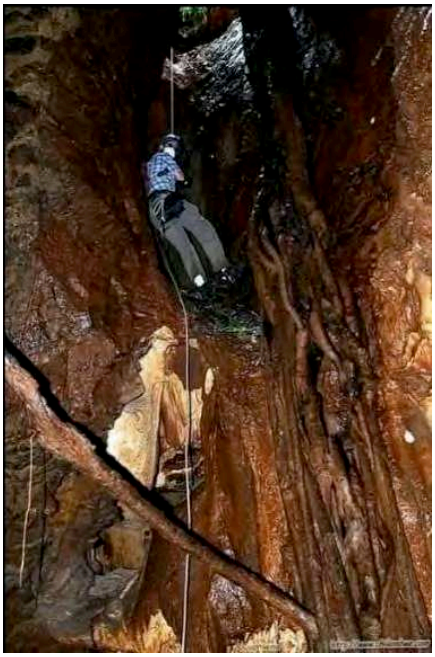


Figure 12 Puits d'entrée de la grotte de Lobatse n°1, au Botswana, où les racines des figuiers descendent le long du puits (cf. p.939). (Source : Hargreaves John).



Figure 13 Grotte de Muchakaima au Mozambique, où les guides utilisent les racines pour descendre dans la grotte (Source : Laumanns, 1997c).



Figure 14 Boyau en cours de désobstruction au niveau des racines d'un figtree au sommet de la colline C à Gcwihaba (Botswana).



Figure 15 À gauche, les racines d'un Namaqua rock fig (ficus cordata) dans l'entrée sud de la grotte de Gcwihaba, au Botswana. (Source : Crochet Philippe).

1.1.3. Étape 3 : Contraindre l'évolution des paysages karstiques et la période pendant laquelle les grottes ont pu fonctionner comme des pièges à sédiments

Après avoir identifié des zones karstiques potentielles dans la zone de prospection, il est crucial de déterminer si des paysages anciens, datant du Plio-pléistocène et où les Hominines ont potentiellement circulé, ont été préservés de l'érosion comme c'est le cas de la vallée de la Bloubank qui incise très faiblement les plateaux relativement anciens du *Cradle of Humankind* comme nous le décrirons dans le Chapitre n°3 (p.268).

Les interfluves sont, par définition, les secteurs les moins affectés par l'érosion et les plus éloignés des grands fleuves. C'est dans ces régions que nous chercherons à **identifier des paysages anciens**. Il a donc été essentiel de **délimiter les grands bassins d'érosion** des principaux fleuves et de leurs affluents, c'est-à-dire de définir les limites des bassins versants hydrographiques, appelés aussi interfluves. Ces limites ont été calculées à l'aide des SIG et de traitements effectués sur les MNT (cf. Chapitre n°1, p.54).

En s'appuyant sur les travaux de Burke et Gunnell (2008), Guillocheau *et al.* (2012, 2013), Baby (2017) et Ponte (2018) sur la chronologie des grands cycles érosifs de l'Afrique australe, nous avons cherché à reconstituer l'évolution des paysages et des karsts. L'objectif est d'estimer l'âge du retrait de la couverture d'altérites recouvrant les carbonates, leurs exhumations, leurs karstifications et la troncature des cavités karstiques par la surface topographique, processus permettant le piégeage de sédiments et de fossiles dans le karst. L'identification du puits de Sterkfontein par lequel l'Australopithèque *Little Foot* a chuté il y a 3,67 millions d'années (Bruxelles, 2019, 2022) illustre parfaitement cette problématique.

1.1.4. Étape 4 : Intégration des données spéléologiques et acquisition de nouvelles données de terrain pour confirmer la présence de grottes et éventuellement de fossiles afin d'améliorer le modèle

L'objectif de cette dernière étape est de confirmer la présence de cavités, de sédiments anciens et de fossiles en s'appuyant sur (1) des données spéléologiques issues de la littérature scientifique et des missions HOMINI'KARST dont nous ferons l'inventaire dans le Chapitre n°1 (p.93) ou (2) en entreprenant de nouvelles prospections sur le terrain dans les secteurs identifiés comme propices à la présence d'un karst et de grottes. Ces explorations visent à valider ou à compléter les résultats de la cartographie afin d'affiner le **modèle évolutif des karsts de l'Afrique australe**. Elles permettent également de recueillir des informations cruciales même si nous ne découvrons pas de fossiles ou de grottes. Ces données acquises sur le terrain permettront d'orienter les futures explorations mais aussi, en retour, d'alimenter notre modèle.

1.2. QUELLES DONNEES CARTOGRAPHIQUES A INTEGRER DANS LE SIG DES KARSTS D'AFRIQUE AUSTRALE ?

Les logiciels SIG sont alimentés par toutes sortes de données, des données numériques et des données cartographiques. Comme précisé en introduction (p.19), la première étape est de localiser les carbonates à l'affleurement en utilisant les cartes géologiques. Puis, nous utiliserons les mesures de relief effectuées par satellite dans les secteurs où les carbonates affleurent, pour y chercher des indices de karstification. Nous rechercherons des formes karstiques en surface (poljé, dolines, canyons, etc.). Tout en sachant que les formes karstiques en surface peuvent être rares comme dans le *Cradle of Humankind* (Martini et Kavalieris, 1976, Bruxelles, 2019). Plusieurs traitements des données de relief seront décrits pour bien rendre compte de la présence de ces indices karstiques (modèle ombré, carte de pente, méthode RRIM). Nous chercherons ensuite dans les bases de données spéléologiques et nous effectuerons des recherches bibliographiques pour trouver des informations sur ces karsts (inventaires des entrées de cavités, plans et coupes topographiques des cavités, carte géomorphologique, etc.). Nous ferons ensuite différentes analyses pour y détecter les indices d'évolution géomorphologique et karstique (calcul des courbes de niveaux, analyse des paléosurfaces, analyse de l'incision des canyons) et nous travaillerons à établir les niveaux de base et à reconstituer l'évolution des paysages. Les sources et le type de données cartographiques qui ont été géoréférencées et intégrées dans le SIG (cf. fiches méthodologiques n°1 – 2 et 3, p.1135) sont multiples et hétérogènes comme le montre cet inventaire, ci-dessous. Les échelles cartographiques s'étendent du 1/25 000, voire plus, au 1/2 000 000 voire 1/10 000 000.

1.2.1. Inventaire des données cartographiques compilées dans le SIG

Ces cartes sont éditées par des instances nationales (Services Géologiques, Instituts Géographiques) ou internationales (ONU) ou elles proviennent directement de publications scientifiques au format pdf. Elles sont en général sous forme d'images raster non géoréférencées qu'il faut alors intégrer dans le SIG. Certaines cartes sont disponibles au format vectorisé et peuvent être directement géoréférencées et intégrées dans le SIG. Ci-dessous, les références bibliographiques notées en bleu sont détaillées à la fin de la thèse dans la bibliographie tandis que les références en gras sont détaillées dans les tableaux en annexe.

1.2.1.1. Différents types de cartes

- Géologiques (compilées dans le Tableau 58 (p.1089) de l'Annexe n°5 (p.1089) **;**
- Topographiques (serveur wms du CDNGI pour l'Afrique du Sud et portail internet) ;
- Géomorphologiques :
  - Afrique (Baby, 2017) ;
  - Afrique australe (Burke & Gunnell, 2008 ; Baby, 2017) ;
  - Botswana (Grove, 1969) ;
  - Namibie (Dauteuil *et al.*, 2014, Fig.6) ;
  - Mozambique (Kayser, 1986 **; MINED, 1986 ;** Cumbe, 2007) ;
  - Mozambique, Swaziland, Afrique du Sud (Förster *et al.*, 1982; Kayser, 1986) ;
  - Kenya, Ouganda, Tanzanie (Spönemann, 1984).
- Hydrogéologiques ;
  - Afrique (BRGM, 2008 ; BRGM Projet Réseau ; SADC) ;
  - Afrique du Sud :
    - Gauteng, Nord West and Ghaap Plateau Dolomite Units Map (Holand, 2009) ;
    - Kliprivier/Natalspruit Dolomite Compartments
    - West Rand Dolomite Compartments
    - Tshwane/Ekurhuleni Dolomite Comparments
    - North West Dolomite Management Units
  - Zambie (BRG : BÄUMIE El F., WARMA K., 2018)
- Minéralogiques (Coetsee, 1981, 1991).
- Paléosurfaces (Afrique du Sud, Afrique austral, Zimbabwe Lister, 1987)
- Pédologiques ou cartes des sols compilées par la FAO-UNESCO (1977) (pour le Mozambique : *Cartas de solos e Instituto de Investigaçao Agronomica de Momçabique*, 1972, 1990 et INIA/DTA 1994 ; pour l'Afrique du Sud le SOTERSAF de l'ISRIC (Dijkshoorn, 2003) et la compilation *Soil Atlas of Africa* (Jones et al, 2013), etc.
- Des karsts, compilés dans le Tableau 8 (p.124) (Ford et Williams, 1989, 2007 ; Pepe *et al.*, 1997 ; Gunn, 2004 ; Salomon 2005 ; Williams, 2008 ; Hollingsworth, 2006 ; WHYMAP, 2017 ; Goldscheider *et al.*, 2020, etc.) ;
- De végétation et de biomes (Chimanimani au Zimbabwe, Goddier & Philipps 1962 *in* Timberlake *et al.*, 2016).

1.2.1.2. Différents types de projection

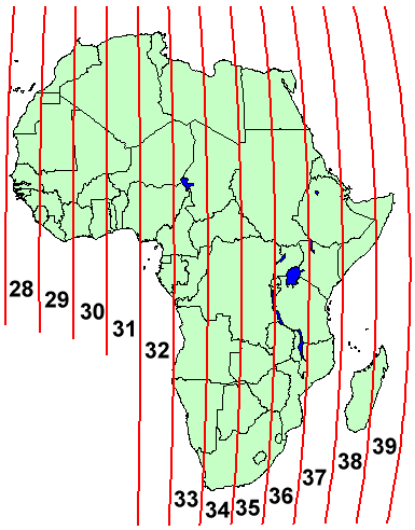


Figure 16 Zone d'utilisation des différents types de projections UTM.

Ces cartes utilisent différents types de projections, parmi lesquelles :

- *Hartebeesthoek* 1994 pour l'Afrique du Sud ;
- Africa Alberts Equal Area Conic pour le continent africain ;
- WGS 1984 UTM Zone 34S, pour le nord-ouest du Botswana ;
- WGS 1984 UTM Zone 35S, pour le *Cradle of Humankind* ;
- WGS 1984 UTM Zone 36S, pour le Malawi.

L'un des avantages des SIG est la possibilité de transformer et d'harmoniser ces données. Nous avons choisi principalement le système de référence géodésique GCS_WGS_1984 (EPSG : 4326) (https://epsg.io/4326) et parfois nous utilisons, pour les cartes de détails, une projection en UTM (Figure 16).

1.2.2. Cartes géologiques compilées dans le SIG

Pour localiser les zones karstiques potentielles, nous avons étudié les cartes géologiques qui nous permettent de déterminer où sont les formations carbonatées (Figure 17 et Figure 18). Nous avons inventorié les cartes géologiques utilisées dans le Tableau 58 (p.1089) de l'Annexe n°4. Les affleurements de carbonates sont compilés sur les cartes géologiques, dont les plus anciennes datent des années 1950 :

- À Chimanimani au Zimbabwe (**Swift, 1952) ;**
- Au Malawi (Dixey, 1956) ;

Et les plus récentes sont vectorisées et géoréférencées par exemple pour :

- La Namibie (ACACIA, 2016) ;
- Le Mozambique **(GTK, 2019)** ;
- Le Malawi **(BRGM, 2023)**.

L'ensemble de ces données, compilé à nos analyses des surfaces des MNT (cf. infra) et aux données spéléologiques nous a permis de produire une carte des karsts de l'Afrique australe (cf. Figure 107 et Figure 108).

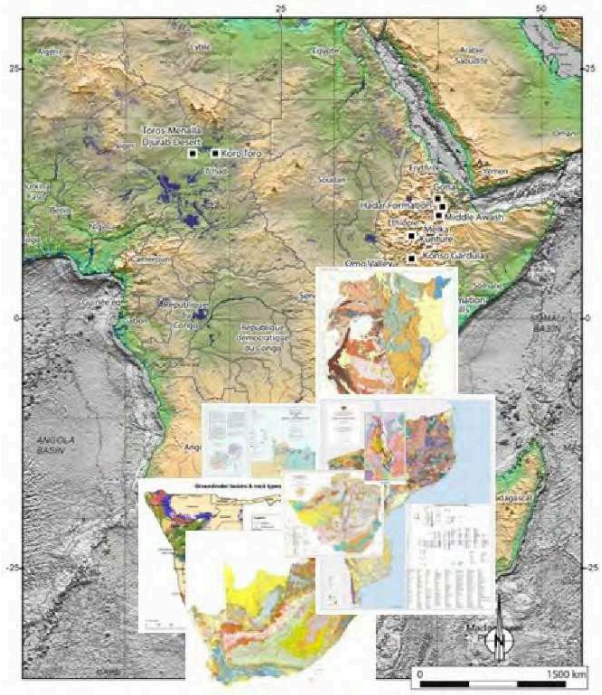


Figure 17 Sélection de quelques cartes géologiques géoréférencées et intégrées dans le SIG.

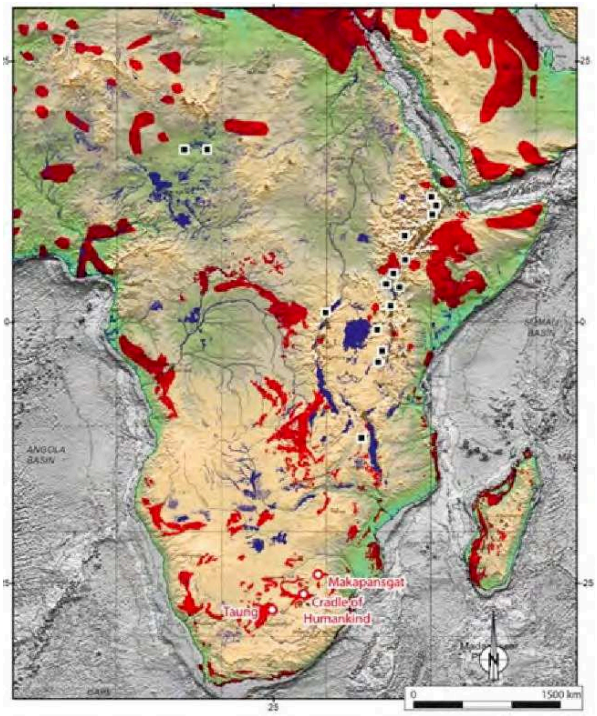


Figure 18 Formations carbonatées potentiellement karstiques (en rouge) redessinées dans le SIG à partir des cartes géologiques. (Cf. Figure 107, p.142 et Figure 108).

1.2.3. Cartes topographiques interrogées

Pour le Mozambique, nous avons pu obtenir des cartes topographiques via le site internet : https://madmappers.com/ (juin 2024).

Pour l'Afrique du Sud, le site internet du *Chief Directorate National Geo-Spatial Information (CDNGI)* permet de télécharger plusieurs types de données géographiques et d'afficher directement dans les SIG des flux wms.

1.2.3.1. Serveurs wms des données géographiques pour l'Afrique du Sud

Via le site internet http://www.cdngiportal.co.za/cdngiportal/#(juin 2024) nous pouvons télécharger plusieurs types de données géographiques (images satellites, cartes topographiques anciennes et récentes, données vectorisées et un MNT malheureusement de basse résolution) qui vont nous permettre d'alimenter notre modèle SIG.

Nous pouvons aussi utiliser des données en direct (flux wms), sans avoir à les télécharger, il suffit pour cela de copier un lien dans notre logiciel SIG. Voyons la procédure ci-dessous. Une fiche méthodologique pour interroger la carte topographique ou l'image satellite de l'Afrique du Sud est disponible en annexe (p.1109).

1.2.3.2. Cadastre pour l'Afrique du Sud

Il est parfois nécessaire d'interroger le cadastre pour resituer des anciennes cartes. Par exemple, le cadastre sud-africain est interrogeable sur le portail interactif du *Council of Geoscience*, disponible à cette adresse :

https://maps.geoscience.org.za/portal/apps/sites/#/council-for-geoscience-interactive-web-map-1-1(juin 2024)

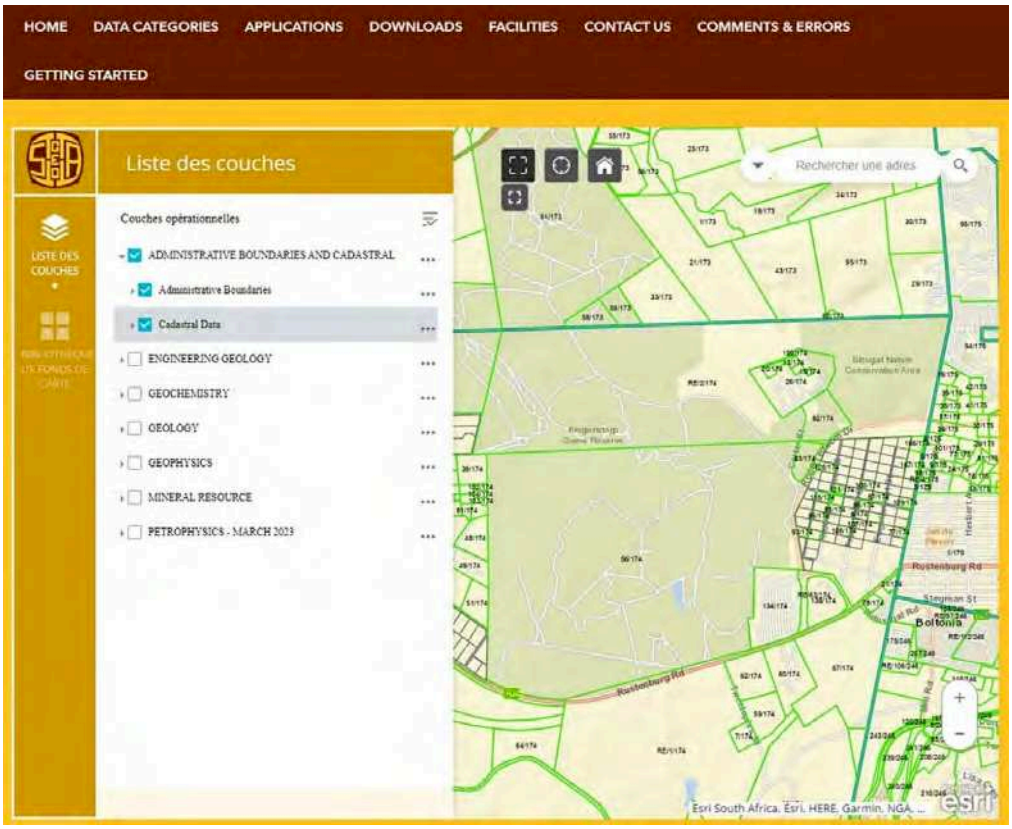


Figure 19 Portail de visualisation des données géologiques vectorisées et du cadastre mis en place par le Council of Geoscience (Afrique du Sud).

1.2.4. Acquisition des données sur les reliefs (SRTM, MNT et MNS)

Les MNT (Modèle Numérique de Terrain) ou MNS (Modèle Numérique de Surface) sont des matrices numériques au format ASCII (dans notre cas) (Figure 20), qui donnent une valeur d'altitude pour chaque pixel de l'emprise.

> *« Un fichier image en télédétection se présente en général comme un tableau de valeurs associant à chaque élément ou pixel repéré par ses indices de ligne et de colonne, la valeur radiométrique mesurée dans une ou plusieurs bandes spectrales. Pour représenter cette image et visualiser l'information apportée par les variations spatiales de la radiométrie, il faut traduire l'échelle des valeurs mesurées en une échelle équivalente de niveaux de gris ou de couleurs »* *(Dandjinou, 1988, p.37).*

Ces données sont acquises par navette spatiale (SRTM), par satellite, par avion ou bien par drone (cf. p.56). La résolution du MNT (ou MNS) et la taille du pixel dépendront du type d'acquisition. Ces fichiers numériques peuvent être visualisés en image raster grâce aux calculs réalisés à l'aide des logiciels SIG (Figure 21).

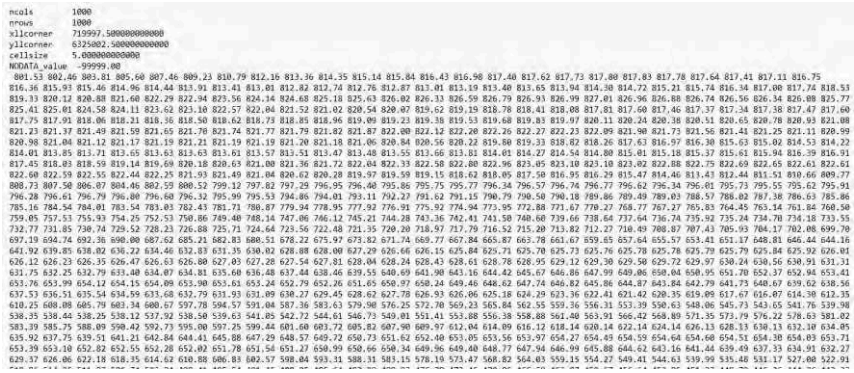


Figure 20 Exemple d'un fichier MNT.

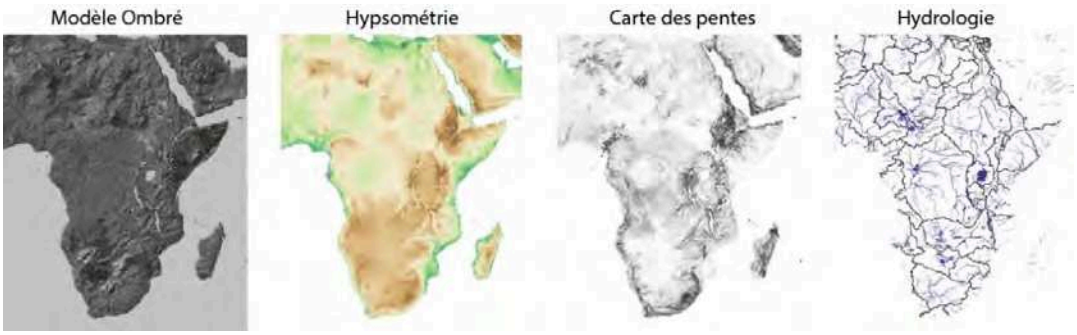


Figure 21 Exemples de calculs réalisés avec le SIG à partir des MNTs. De gauche à droite, on a (1) un modèle ombré (2) une hypsométrie (3) une carte des pentes et (4) une carte hydrologique montrant les talwegs et les limites de bassin versants (interfluves).



Figure 22 Exemple d'un traitement classique (hypsométrie, modèle ombré) d'un MNT de l'Afrique (Source : https://images-assets.nasa.gov/image/PIA04965/PIA04965~orig.jpg juin 2024).

1.2.4.1. Téléchargement des MNT ALOS (JAXA)

Dans le cadre de cette thèse, nous allons utiliser principalement le satellite Daichi (ALOS World 3D) de la JAXA dont les données sont récapitulées sur la première ligne du Tableau 1 (p.43). Les numéros des dalles de MNT Alos World 3D pour le Zimbabwe et le Mozambique sont indiqués sur les deux colonnes en-dessous puis sur la Figure 23 en fonction des longitudes et latitudes.

Pour le Zimbabwe, nous téléchargeons les 24 dalles du satellite ALOS suivantes (au format tiff géoréférencé + format ovr) :	Par exemple, pour le Mozambique, nous téléchargeons les dalles :
ALPSMLC30_S016E026_DSM	S25° E30
ALPSMLC30_S017E026_DSM	S20° E30
ALPSMLC30_S016E027_DSM	S20° E35
ALPSMLC30_S017E027_DSM	S15° E30
ALPSMLC30_S016E028_DSM	S15° E35
ALPSMLC30_S017E028_DSM	S15° E40
ALPSMLC30_S016E029_DSM	S10° E30
ALPSMLC30_S017E029_DSM	S10° E35
ALPSMLC30_S016E030_DSM	S10° E40°
ALPSMLC30_S017E030_DSM	S10° E25
ALPSMLC30_S016E031_DSM	S15° E25°
ALPSMLC30_S017E031_DSM	
ALPSMLC30_S018E026_DSM	Pour les données MNT ALOS issues du satellite JAXA, chaque dalle est divisée en 5 dalles plus petites, correspondant à des carrés d'un degré de côté (111 km).
ALPSMLC30_S019E026_DSM	
ALPSMLC30_S018E027_DSM	
ALPSMLC30_S018E028_DSM	
ALPSMLC30_S018E029_DSM	
ALPSMLC30_S019E029_DSM	
ALPSMLC30_S018E030_DSM	
ALPSMLC30_S019E030_DSM	
ALPSMLC30_S018E031_DSM	Ce qui fait que pour le Mozambique, le MNT est constitué de 47 dalles.
ALPSMLC30_S019E031_DSM	

Pour l'Afrique australe, nous disposons de 641 dalles du satellite JAXA visibles sur la Figure 32 p.57. Le *Cradle of Humankind*, en Afrique du Sud, est situé sur les deux dalles suivantes : ALPSMLC30_S026E027_DSM.tif et ALPSMLC30_S027E027_DSM.tif.

Les fiches méthodologiques n°10 et 11, situées en annexe (p.1153), expliquent comment utiliser ces MNT.

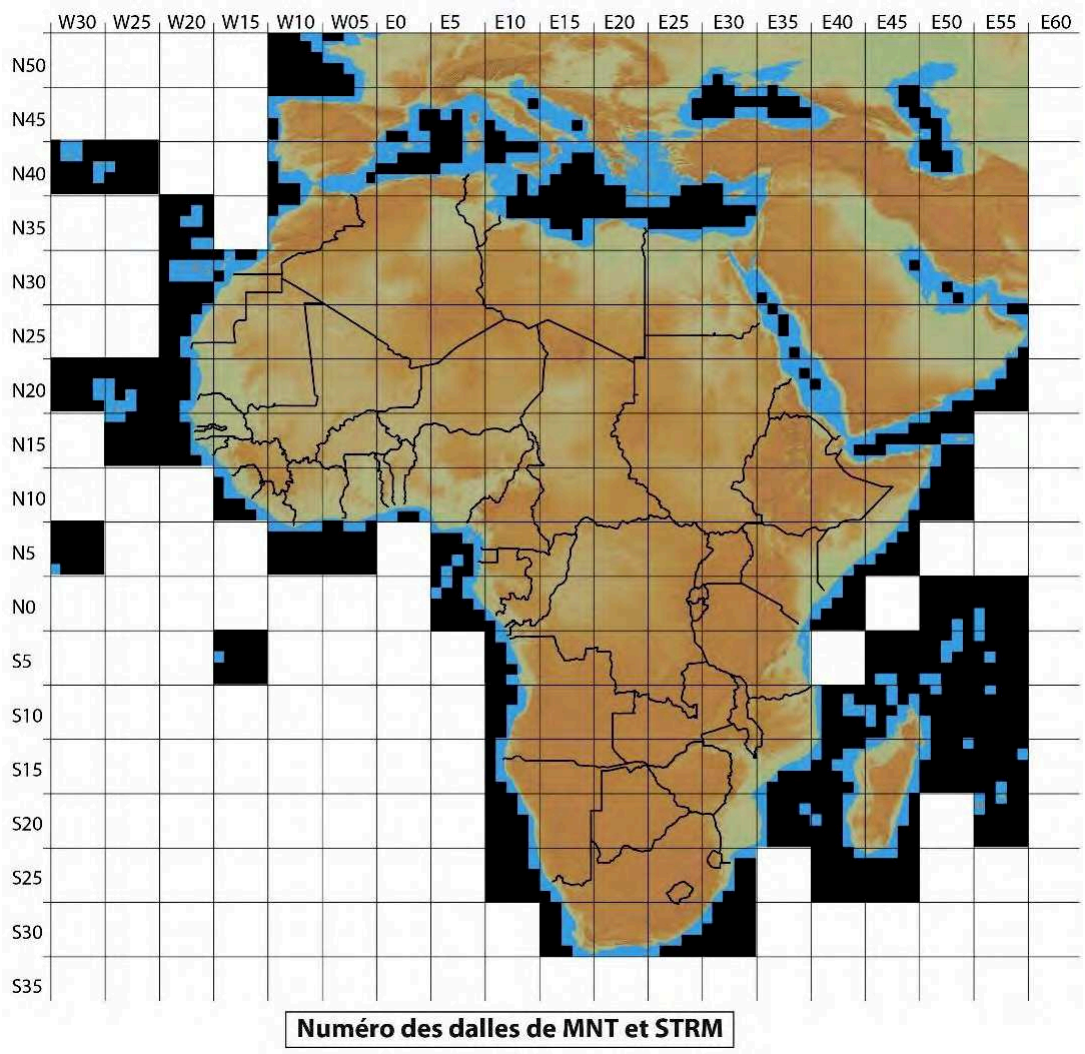


Figure 23 Identification des dalles de MNT en fonction des latitudes et des longitudes.

1.2.4.2. Résolution et qualité des données ALOS (JAXA)

En général, on qualifie la résolution d'un MNT par une dimension en mètre (ou en arc second) qui correspond à la taille d'un pixel du MNT, pour lequel on a une valeur d'altitude moyenne. Pour les données ALOS (JAXA), la résolution est de 30 m pour la version gratuite et jusqu'à 2.5 m pour la version payante. Ce qui signifie qu'en théorie, ce MNT ne pourra pas rendre compte des objets inférieurs à ces dimensions. Ce qui aura de l'importance concernant les formes de relief que nous cherchons à identifier dans les régions carbonatées pour repérer des karsts.
De plus, la plus grande incertitude d'un MNT concerne les mesures des altitudes, le « z ». Nous discuterons plus loin (p.48) de la qualité des données du MNT JAXA, notamment en mettant en évidence une exagération de la profondeur des dépressions que nous avons prospectées au Mozambique.

1.2.4.3. Tableau récapitulatif des MNT disponibles

Le tableau suivant (Tableau 1) récapitule les différentes sources de MNT disponibles pour l'Afrique et leurs liens de téléchargement (voir aussi (https://opentopography.org/).

Nom	Version	Année	Résolution	Véhicule	Lien	Propriétaire
ALOS World 3D - 30 m **AW3D30**	V3.1	2020	30 m (1 arc second) et 4 m pour l'altitude	Satellite DAICHI (ALOS)[2]	https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm autre lien	JAXA

Tadono *et al.*, 2014

[2] Le 7 mars 2023 le deuxième moteur de la fusée devant mettre en orbite le satellite ALOS 3 ne s'est pas allumé et le satellite a malheureusement dû être détruit.

SRTMGL3 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global	V1	1999	90 m (3 arc second) et autour de 10 m pour l'altitude et 4 m en Afrique	NASA Shuttle Endeavour	http://srtm.csi.cgiar.org	NASA
SRTMGL1 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global	V2	2014	30 m (1 arc second)	NASA Shuttle Endeavour	http://srtm.csi.cgiar.org	NASA

Rodriguez *et al.*, 2006 pour SRTMGL3 et Farr *et al.*, 2007 pour SRTMGL1

ETOPO			30 m (1 arc second)		http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html	

USGS GTOPO 30			30 secondes d'arc (1 km)		https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-global-30-arc-second-elevation-gtopo30?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects	USGS

Global Multiresolution Terrain Elevation	GMTED2010	1000, 500 et 250 m		http://pubs.usgs.gov/of/2011/1073		USGS

Danielson, J.J. *et al.*2011

ASTER Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer				Satellite Terra	http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp	NASA

Abrams *et al.*, 2020

GEDI Global Ecosystem Dynamics Investigation Gridded Land Surface Metrics	Level L3	2019-2022	1000 m	NASA Earth Ventures Instrument (EVI) mission	https://gedi.umd.edu/data/download/	NASA

Dubayah, R.O. *et al.* 2021

COPERNICUS Global Digital Elévation Models	GLO-30 GLO-90	2011-2015	30 m-90m	TanDEM-X Mission	https://portal.opentopography.org/datasetMetadata?otCollectionID=OT.032021.4326.1	Airbus, Space GmbH, UE, ESA

Fahrland *et al.*, 2022 ; Daynac *et al.*, 2024, EUROPEAN SPACE AGENCY, SINERGISE (2021) et Guth et Geoffroy, 2021

NASADEM Global Digital Elevation Models				Shuttle Radar Topography Mission	https://lpdaac.usgs.gov/products/nasadem_hgtv001/ autre lien	NASA

Crippen *et al.*, 2016 ; NASA JPL, 2021

SRTM 15+ Global Bathymetry and Topography at 15 Arc Sec + SRTM-CGIAR V4.1 +ArcticDEM + Reference Elevation Model of Antarctica	V2.2	2000-2019	500 m	Cryosat-2, SARAL/AltiKa, Jason-2	https://www.usna.edu/Users/oceano/pguth/md_help/html/srtm_15plus.htm	NOAA

Tozer, B, *et al.* 2019

GMRT Global Multi-Resolution Topography Data synthesis		1992-2016	100 m		https://www.gmrt.org/services/	MGDS

Ryan *et al.* 2009

Tableau 1 Tableau récapitulatif des différentes sources et types de données de relief.

1.2.4.4. Autres moyens d'acquisition des reliefs (MNT, MNS)

Il existe d'autres données concernant les reliefs, certaines ne sont pas accessibles au grand public et doivent faire l'objet d'un contrat, on parle de *proposal* entre l'universitaire et le propriétaire. Ils concernent l'interférométrie radar InSAR, les données TerraSAR-X et TanDEM-X du DLR (Centre Aérospatial Allemand) ainsi que les données satellites d'Airbus D&S (SPOT et Pléiades) et celles des Pléiades de l'*ESA* (Agence Spatiale Européenne). Ces moyens sont les données primordiales pour construire des modèles 3D (par photogrammétrie) à partir de deux ou trois images satellites du même secteur et prises à la même date et avec des angles d'incidence pas trop élevés (Lans i*n* Bruxelles *et al.*, 2016, p.14). Les demandes s'effectuent sur ce site internet https://dinamis.teledetection.fr/login.
Il faut créer un compte et monter un projet, gratuit pour les projets universitaires.

1.2.4.4.1. Paramètres

Pour faire du MNT il faut : Soit deux scènes acquises avec très peu d'écart temporel en raison des variations de radiométrie, et avec des angles d'incidence pas trop grands. Soit une PDV (Prise De Vue) Stéréo ou Tri-stéréo. Les images d'une paire stéréo ne doivent pas être ortho-rectifiées pour pouvoir faire des traitements exploitant la stéréo. Le niveau de produit doit être « *Primary* » dans tous les cas.

Les paramètres géométriques idéaux sont (selon Benjamin Lans) : Géométrie : Tri-stéréo 0.4<BH<0.8 Angle maxi : 25° Nuages maxi : 10% Neige : non Dates : à choisir Périodes : aucune Niveau de produit : *Primary* (obligatoire si on veut faire des MNT) Combinaison : Bundle Ajustement : Basic Format : Geotiff non compressé Encodage : 12 bits

Image résolution 50 cm en mode tri-stéréoscopique (3 images de la même zone sous 3 angles différents) on peut générer un MNT par photogrammétrie (pour de petites surfaces) *Proposal* avec l'ESA (Agence Spatiale Européenne) quotas de 2500 km2 Pour de la tri-stéréoscopie la zone ne doit pas dépasser 800 km2 https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000153729-satellite-imagery-processing

Des aides sont disponibles sur internet :

https://theia.sedoo.fr/wp-content-theia/uploads/sites/6/2022/05/Images-Ple%CC%81iadesV4_2022.pdf
https://theia.sedoo.fr/wp-content-theia/uploads/sites/6/2022/05/Produits-Ple%CC%81iadesV4_2022.pdf

1.2.4.4.2. Exemple pour le Cradle of Humankind

Nous disposons de plusieurs MNS calculés par Benjamin Lans pour le *Cradle of Humankind* en Afrique du Sud, ainsi que pour la région d'Otavi en Namibie.

Les altitudes du MNS pour le CoH sont trente mètres plus élevées que celles des cartes topographiques au 1/ 50 000 du CDNGI et des courbes de niveaux vectorisées de 2014 du CDNGI (2627BA_HYPS_ELEVATION_LINES_10_EXP_2014_07) et des MNTs satellitaires (SRTM3v2, JAXA).

1.2.4.5. NASA

Des données sont mises à disposition par la NASA sur ce lien :
https://ti.arc.nasa.gov/tech/asr/groups/intelligent-robotics/ngt/stereo/

1.2.4.6. TanDEM-X

Les données tanDEM-X sont décrites sur ce lien :
https://tandemx-science.dlr.de/cgi-bin/wcm.pl?page=TDM-Proposal-Submission-Procedure

Fonctionne par paire Ume image fait 57 x 35 km. Avec une paire, on peut générer un MNS

1.2.4.7. Modélisation 3D par photogrammétrie à partir de photographies prises par drone

La photogrammétrie nous a permis, à partir d'un lot de photographies prises par drone (Figure 24), de réaliser des modèle 3D et des MNS (Modèle Numérique de Surface). Nous ne décrirons pas les techniques de la photogrammétrie.



Figure 24 Photogrammétrie par drone de la colline K1 de Koanaka Hills au Botswana.

Avec les MNS, nous pouvons plaquer des cartes (rasters géoréférencés au format GEOTIFF) pour réaliser des vues 2,5D, comme ci-dessous, (Figure 25), des *Aha hills (Waxhou South)* situées à la frontière du Botswana et de la Namibie.

Cette figure présente plusieurs types de représentation des reliefs. De gauche à droite, on observe : un modèle ombré en noir et blanc avec des courbes de niveau rouges, une carte hypsométrique couplée à une carte des pentes et des courbes de niveau, une image satellite, et enfin une visualisation de la méthode RRIM (décrite p.76). Cette région karstique sera décrite dans le Chapitre n°4 (p.473). Une photographie drone des *Aha Hills* est visible plus loin (Figure 508 p.542) ainsi que les prospections que nous avons menées dans le secteur (p.534).



Figure 25 Vue 2.5 D des Aha Hills (Waxhou South).

1.2.4.8. Estimation des altitudes et approximation des mesures par navette spatiale (SRTM), par satellite (MNT, MNS) et comparaison avec les données DRONE et les données GPS ou DGPS sur le terrain

Maintenant que nous avons décrit plusieurs types de données de relief, nous pouvons les évaluer en les comparant. Cet exercice est nécessaire, car nous verrons qu'il existe des artefacts sur les données MNT du satellite DAICHI de la JAXA, ce qui rend indispensable leur vérification avec d'autres MNTs.

1.2.4.8.1. Comparaisons des mesures d'altitudes des collines de Gcwihaba et de Koanaka au Botswana par GPS, GPS différentiel et MNS par drone

En France, près de 111 000 points géodésiques permettent de connaître la position géographique et l'altitude de certains points caractéristiques du terrain, tels que des piliers de ponts, des cimetières ou des façades d'églises. Ils permettent notamment de caler une station topographique pour effectuer des mesures. Leur définition a commencé lors de la réalisation de la carte Cassini au XVIII -ème siècle (Cassini, 1744). Malheureusement, il n'existe pas d'équivalent dans tous les pays d'Afrique australe. En Afrique du Sud, on les appelle *trigonometric beacon* ou *Trig Beacons* mais au milieu du désert du Botswana, il n'existe ni points géodésiques ni cartes topographiques. Nous devons donc utiliser sur le terrain les données satellites calculées par nos GPS.

À Gcwihaba et Koanaka Hills, nous avons la chance de disposer d'un relevé des collines réalisé au GPS différentiel (Figure 1259) (Selfe / *GRS Consulting*, 2005a, Fig.5, p.11 ; 2005b, Fig.5, p.11 et 2013). Ce relevé établi dans un repère local en absence de points géodésiques, les incertitudes sur les mesures d'altitude sont de l'ordre de 20 m (comm. orale Gavin). De plus, nous avons réalisé des modèles 3D par photogrammétrie de certaines collines et secteurs de Gcwihaba et Koanaka (la colline où se trouve la grotte de Gcwihaba, la colline de K1 et celle de K2 où se situe *Bone cave*) à l'aide de photographies prises par drone par Laurent Bruxelles. Ces données 3D ont été calées à l'aide des positions GPS enregistrées par le drone pour chaque cliché, avec une incertitude verticale liée aux limites intrinsèques du GPS. Nous disposons également des MNTs mesurés par satellite, synthétisées dans le Tableau 1 (p.43), principalement le MNT du satellite DAICHI de la JAXA et le SRTM3 V2 de 2014 de la navette de la NASA.

Nous avons donc comparé les altitudes issues de ces différentes sources afin de déterminer l'altitude des sommets des collines de Gcwihaba et Koanaka Hills, dans le but d'établir les altitudes des galeries des grottes et de les relier à d'éventuels paléoniveaux de base et paléolacs. Après avoir évalué ces variations de mesures des altitudes, nous avons choisi d'utiliser comme référentiel les altitudes du MNT JAXA car il s'agit du MNT qui présente la plus grande surface et il est récent. Cela nous permet d'effectuer des comparaisons altimétriques sur de grandes distances, en particulier dans tout le Rift de l'Okavango. Nous en reparlerons en détail avec l'exemple de la région de Koanaka au Botswana (p.598). Nous avons pu interroger les fichiers STK et MSL, fournis avec les MNTs JAXA, afin de connaître la qualité des données pour une zone précise, par exemple le nombre de scènes utilisées et l'éventuelle utilisation d'autres données satellitaires.

1.2.4.8.2. Mauvaise estimation des profondeurs des dépressions du plateau karstique de Buchane au Mozambique avec le MNT Jaxa

Cependant, ce MNT JAXA montre des artefacts et des incertitudes comme à Buchane au Mozambique. Près des grottes de Buchane, nous espérions trouver des dolines profondes de 30 m comme l'indiquaient les altitudes mesurées par le satellite Daichi (ALOS World 3D, JAXA). Nos prospections sur le terrain ont bien révélé qu'il existait bien des dépressions mais elles n'avaient que quelques mètres de profondeur, comme le montre le profil topographique (Figure 27). Ce n'étaient pas des avens permettant de pénétrer dans le réseau souterrain pour y rechercher des fossiles. Leurs profondeurs étaient très largement surestimées.



Figure 26 Prospection (en vert) d'une des dépressions près des grottes de Buchane, dont la profondeur avait été mesurée à une trentaine de mètre alors que sur le terrain la dépression mesurait à peine deux mètres de profondeur.

Effectivement, Tadono *et al.* (2014, p.73) nous apprend qu'en théorie, l'estimation des erreurs verticales des mesures d'altitude du satellite Daichi (ALOS World 3D, JAXA), appelées aussi précision de hauteur (*RMSE*) sont, en moyenne, de 6 m. Mais, du fait du faible nombre de données d'acquisition du satellite (2 piles de scènes DSM indiquées par le *"AW3D STK number" sur la* Figure 27) pour calculer le MNT dans certains secteurs désertiques, comme ici à Buchane, les mesures d'altitude du satellite JAXA ont été complétées avec les données du *Copernicus DEM* (*COP-DEM)* en vert sur la figure ci-dessous (Figure 27), qui est un modèle numérique de surface (MNS) issu du GLO-30, avec 30m de résolution, voire du GLO-90, avec 90 m de résolution (cf. Tableau 1 p.43) (Kuwahara Tomo, par mail). Dans ces cas-là, l'erreur verticale (*RMSE)* est élevée.

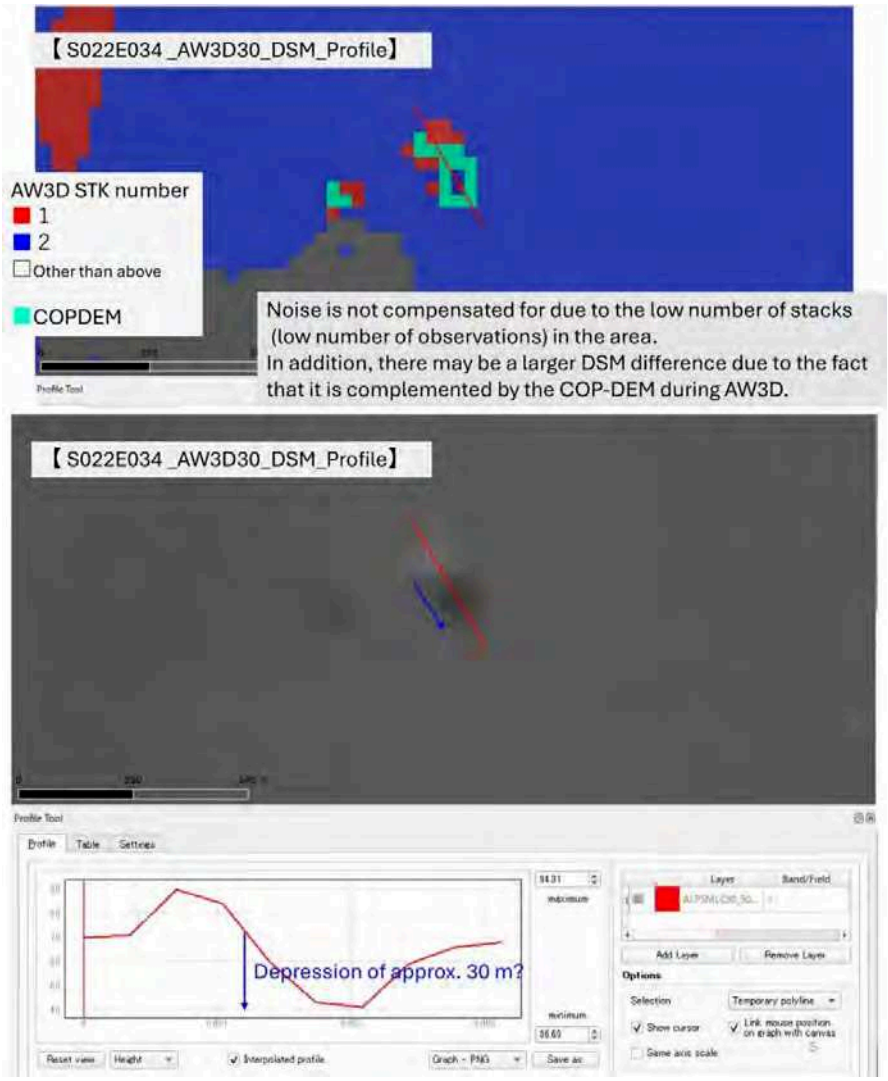


Figure 27 Profil topographique à travers une des dépressions, mesurée avec une profondeur de 30 m sur le MNT et ayant en réalité moins de deux mètres de profondeur sur le terrain (Coordonnées en WGS84 : 34,882 ; -21,678) (Document fourni par la JAXA par échange de mail).

Effectivement, en utilisant les autres MNTs récapitulées dans le Tableau 1 (p.43), provenant d'autres satellites, comme le MNT du SRTM3 V2, les dépressions ne sont pas visibles et les altitudes sont constantes dans le secteur.
En conclusion, les données ALOS World 3D, par rapport aux autres données satellitaires, permettent d'identifier des dépressions de très faible profondeur cependant la mesure de la profondeur ne sera pas fiable.

1.2.4.8.3. Artefacts sur le MNT JAXA qui créent une butte à Koanaka au Botswana

Un problème similaire est apparu sur le MNT JAXA dans le secteur de Koanaka K3, où nos visualisations en 2.5D ont suggéré l'existence d'une quatrième et d'une cinquième colline, à l'ouest de K3, au niveau de la frontière avec la Namibie. Après la mauvaise expérience liée à la surestimation de la profondeur des dépressions de Buchane, au Mozambique, nous avons pris soin de vérifier les altitudes à l'aide d'un autre MNT, le SRTM3 v2. Ces vérifications ont confirmé qu'aucune colline de 77 m de hauteur n'existe dans ce secteur. e sommet de la « colline » - en réalité un artefact - est mesuré à 1136 m d'altitude, tandis que la surface à la base se situe à 1059 m (Figure 28). De plus, une route traverse précisément ces deux artefacts, ce qui rend improbable la présence d'élévations topographiques de cette ampleur. Nous avons également vérifié les altitudes des autres collines du secteur à l'aide du MNT SRTM3 V2. Ce modèle rend bien compte de l'existence de ces collines K1, K2 et K3, qui, elles, sont réelles.

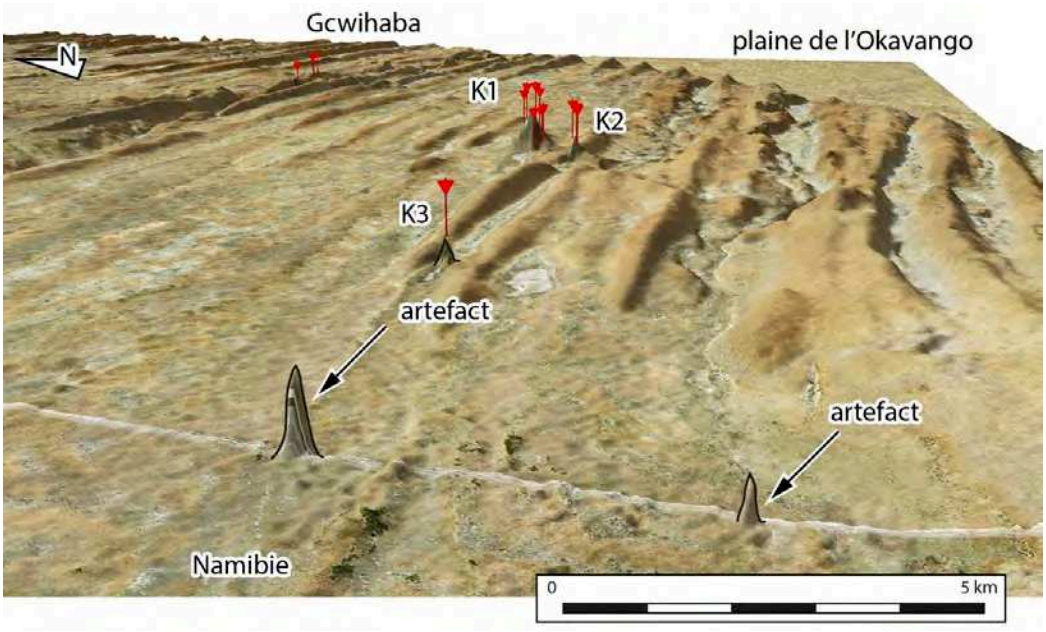


Figure 28 Deux artefacts du MNT JAXA suggèrent la présence de collines à la frontière entre le Botswana et la Namibie, alors qu'elles n'existent pas.

1.2.5. Images satellites

Nous utilisons *Googlemaps* qui permet de voir une image satellite de bonne qualité, gratuite et facilement accessible, sans nuage et harmonisée au niveau des couleurs. *Google Maps* permet aussi d'extraire facilement un lien internet qu'il est facile de communiquer.
Lien de *Google Maps* de la grotte de Sterkfontein(juin 2024).

Nous utilisons aussi l'option *Google Street View* qui permet de voir des photographies des paysages et des affleurements qui sont prises directement depuis la route, grâce à la circulation d'un véhicule équipé de caméra (Figure 29). Il offre notamment la possibilité de voir des photographies réalisées à plusieurs périodes de l'année, et sur plusieurs années. Les photographies pendant la saison sèche permettent de bien distinguer les affleurements rocheux sans végétation. Elles permettent d'obtenir ainsi des informations sur les paysages, sur le type de roche qui affleure et sur le type de couverture sédimentaire. Ici, aussi il est facile d'extraire un lien internet enregistrant l'angle de vue et la date de prise de vue d'un affleurement que l'on souhaite communiquer.
Lien de *Google Street View* de la grotte de Sterkfontein(juin 2024).

Pour les secteurs non couverts par *Google Street View*, nous utilisons le site *Mapillary* (Figure 30).

Lien vers Mapillary(juin 2024).



Figure 29 En bleu, les routes photographiées sur Googlemaps.



Figure 30 En vert, les routes photographiées sur Mapillary.

Nous avons aussi interrogé d'autres images satellites via le site Bing.
Lien vers l'image satellite du site Bing (août 2024).

Il existe de nombreux autres sites internet qui permettent de voir des images satellites.
https://learn.arcgis.com/fr/projects/get-started-with-imagery-for-africa/(juin 2024).
https://livingatlas2.arcgis.com/digitalearthafrica/(juin 2024).
https://www.planetobserver.com/planetsat-viewer-main(juin 2024).
https://gportal.jaxa.jp/gpr/search?tab=0
Des partenariats peuvent être établis entre l'Université, le CNRS et certains organismes (AIRBUS, CNES, NASA, etc.) afin de se procurer des images satellites de meilleure qualité.

AIRBUS https://myservices.intelligence.airbus.com/usage
Landsat 8 et EarthExplorer
Sentinel-2 : https://dataspace.copernicus.eu/
SPOT6/7
SPOT5 : https://www.theia-land.fr/le-programme-isis-du-cnes-sintegre-a-dinamis/
Pléiades : Merci au CNES et au service DINAMIS qui nous a permis d'avoir des images Pléiades
RapidEye
ESA : https://earth.esa.int/web/guest/pi-community/apply-for-data/full-proposal

En général, nous avons extrait des images satellites géoréférencées en utilisant le logiciel Arcmap, qui permet de visualiser (flux WMS ou WMTS) et d'extraire facilement des images satellites (ESRI Bing) au format GEOTIFF.

1.2.6. Réseaux hydrographiques

Les données vectorisées des réseaux hydrographiques sont issues de plusieurs sources :

http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/fr/
https://www.diva-gis.org/gdata

Parfois, nous allons recalculer les réseaux hydrographiques à partir des MNT* (*voir définition ci-dessous*), comme dans le *Cradle of Humankind*. Cependant, dans ces régions arides, cette cartographie représentera plutôt des talwegs et des vallées sèches que des cours d'eau permanents, qui pourront alors être cartographiés pour simplifier en bleu ou en pointillé.

1.3. METHODOLOGIE DU TRAITEMENT DES MNT POUR LE DIAGNOSTIC KARSTOLOGIQUE DES CARBONATES

Les technologies récentes d'imagerie par satellite et l'utilisation de logiciels spécifiques permettent de réaliser sur ordinateur des analyses des reliefs préalablement aux missions de terrain afin d'identifier les objets géomorphologiques à prospecter, présentant un haut potentiel paléontologique.

L'analyse des paysages africains et de leurs reliefs est réalisée à partir de modèles numériques de terrain (MNT) produits par le satellite *Alos Daichi* de l'Agence Spatiale Japonaise (JAXA) qui s'appelle « ALOS World 3D - 30m (AW3D30) Version 3.1 ». Il est à la résolution d'un 1 arc seconde, c'est-à-dire 30 mètres de résolution. Il est disponible à cette adresse :
https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm.

https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/html_v2303/dl/download_v2303.htm?S030E025_S026E027

Notre équipe a fait également l'acquisition de drones permettant la réalisation, sur le terrain, de MNS (Modèle Numérique de Surface) par photogrammétrie.

Les MNT sont visualisés, à distance et sur ordinateur, grâce à des logiciels SIG. Les plus connus sont QGIS qui a une licence gratuite et ARCGIS™ et GLOBALMAPPER qui ont des licences payantes. Le logiciel est choisi en fonction de la tâche à accomplir.

Ces logiciels ont plusieurs avantages :

(1) Ils sont géoréférencés dans l'espace, et permettent la gestion de bases de données géographiques.

(2) Ils font des calculs complexes. Par exemple, ils transforment les relevés bruts de l'altitude (MNT) en cartes de relief (modèle ombré). Les SIG permettent de créer des cartes inédites et spécifiques en fonction de nos problématiques de recherche (rugosité des sols, formes karstiques des reliefs) afin de mieux comprendre les paysages et leur évolution au cours des derniers millions d'années (évaluer l'érosion des paysages, l'incision des vallées, la surrection des reliefs et les paléoniveaux de bases karstiques).

(3) Ils permettent la portabilité des données cartographiques sur le terrain avec l'utilisation des tablettes en mode hors connexion. Ce travail effectué préalablement aux missions, et parfois aussi sur place, permet d'arriver sur le terrain avec toutes les données cartographiques (cartes issues du traitement des MNT, photographies aériennes, etc.) intégrées directement sur des tablettes durcies (Galaxy Tab) qui fonctionnent sans connexion internet mais avec une réception GPS passive peu gourmande en électricité afin d'être autonome en système de localisation et de prospection. L'utilisation des formats MBTILES et de l'application Oruxmaps sur les tablettes A*ndroid* permet de réduire considérablement le poids des données cartographiques 3D embarquées dans les tablettes et donc le besoin en électricité. C'est ce qui est indispensable dans ces terrains reculés.

Cette façon d'appréhender les reliefs et de les visualiser avec les SIG, fournit un éventail d'analyses géomorphologiques très complet (courbes de niveaux, profils topographiques, cartes hypsométriques, cartes des pentes, modèle ombré, visualisation 3D). De plus l'exploitation de ces MNT et MNS permet, par exemple, de réaliser des cartes topographiques dans les secteurs où elles n'existent pas. Indiquons ici quelques caractéristiques du satellite JAXA, illustré par la Figure 31, et dont nous avons utilisé les relevés pour étudier les reliefs africains.

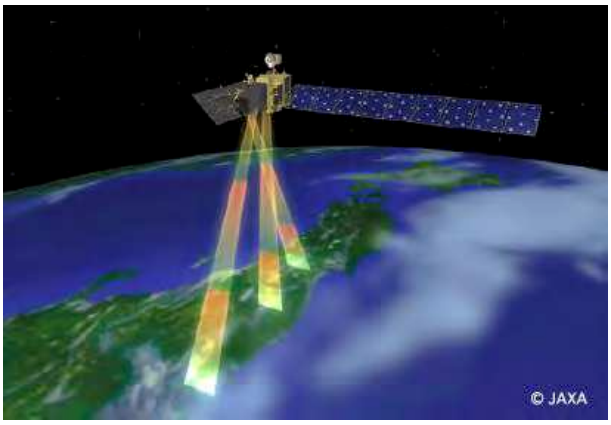


Figure 31 Illustration montrant le satellite japonais "DAICHI (ALOS)" avec son triple système d'acquisition nadir, avant et arrière (Source : JAXA©).

Nom des données :
ALOS World 3D - 30m (AW3D30) Version 3.1
Date de la dernière version :
avril 2020
Résolution :
1 second d'arc (approximation 30 m selon la latitude).
Unité du fichier :
1 x 1 degré de Latitude / Longitude par tuile.

1.3.1. Type de traitement des MNT

Ici, nous prendrons deux exemples, le Cradle of Humankind en Afrique du Sud et Montpellier-le-Vieux sur le Causse Méjean en France pour lesquels nous disposons de données de haute résolution. L'enjeu est de montrer comment on identifie un paysage karstique à partir des MNT. Malheureusement, les territoires que nous allons diagnostiquer en Afrique australe ne disposeront pas de données d'aussi bonne qualité.

1.3.1.1. Modèle Numérique de Terrain

Les MNT sont des matrices numériques au format ASCII, qui donnent une valeur d'altitude pour chaque pixel de la carte. Ces données sont acquises par satellite, par avion ou bien par drone (utilisation de LIDAR) (cf. Chapitre n°1 p.56). La résolution du MNT et la taille du pixel dépendront de l'acquisition. Ces fichiers numériques peuvent être visualisés en image raster grâce aux calculs réalisés par les logiciels SIG (Figure 32, Figure 33).

Par exemple, pour visualiser les altitudes en niveau de gris, il faut calculer pour chaque pixel sa couleur RVB en fonction de l'altitude, le code RVB se classe du blanc (code RVB : 0, 0, 0) pour les altitudes les plus élevées, au noir (code RVB : 255, 255, 255) pour les altitudes les plus faibles. Le logiciel va classer automatiquement les valeurs d'altitudes de la carte en fonction de la valeur la plus petite et de la valeur la plus haute qui varie en fonction du cadre de la zone étudiée. Il faut donc harmoniser les dalles entre elles. Cette harmonisation n'est pas utile avec QGIS.

Ici, nous utilisons les données MNT nommées : ALOS World 3D - 30m (AW3D30) Version 3.1.

https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/how-aspect-works.htm

https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm

https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/an-overview-of-the-raster-interpolation-toolset.htm

Nous ne parlons pas ici de la visualisation des reliefs par *Volume Obscurance* (Rolland *et al.*, 2022 ; Daynac *et al.*, 2024).

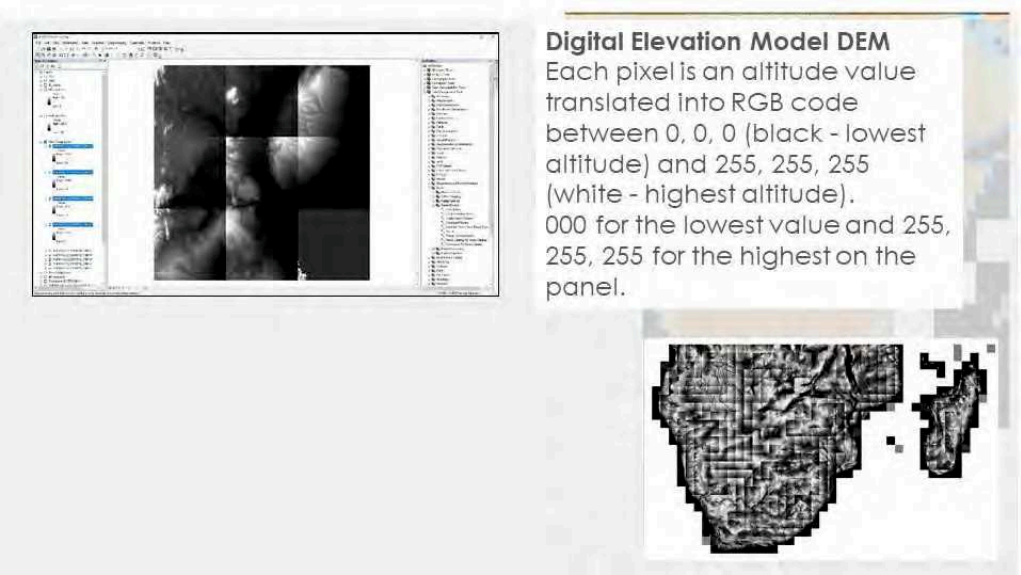


Figure 32 Affichage des dalles de MNT, avant leurs harmonisations, sur le logiciel SIG ARCGIS™.

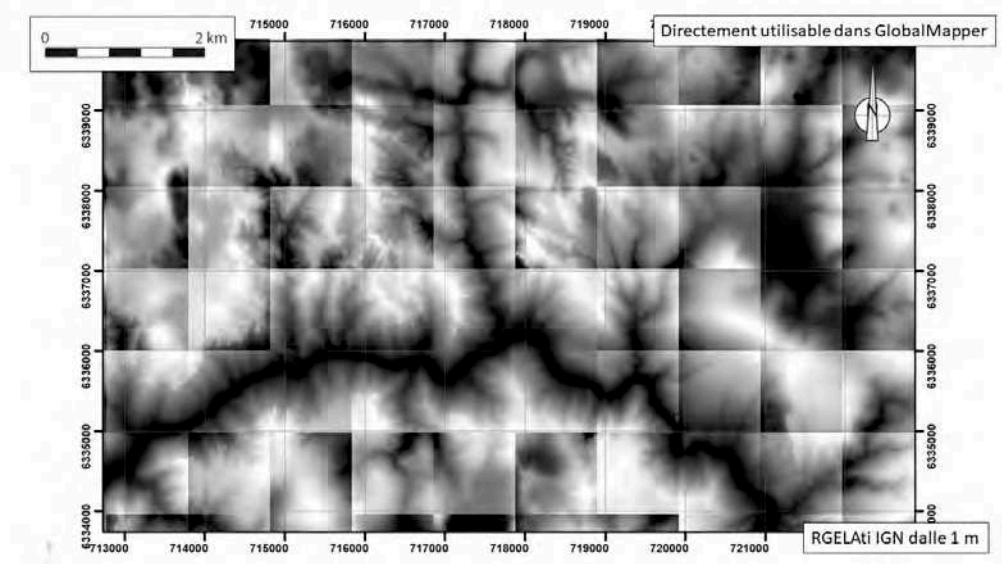


Figure 33 Affichage des dalles de MNT avant leurs harmonisations sur le logiciel SIG ARCGIS™. Exemple de Montpellier-le-Vieux sur le Causse Méjean. Le résultat de l'harmonisation est visible sur la Figure 38.

Chaque dalle est représentée en niveaux de gris (Figure 34), en fonction de sa valeur minimum d'altitude en noir (code RVB 0 0 0) et de sa valeur maximum en blanc (code RVB 255 255 255). Pour utiliser les MNT, il faut tout d'abord harmoniser les dalles avec l'outil *Mosaic to New Raster* (Figure 35), accessible dans l'*Arctoolbox* > *Data Management Tools* > *Raster* > *Raster Dataset* > *Mosaic to New Raster*.

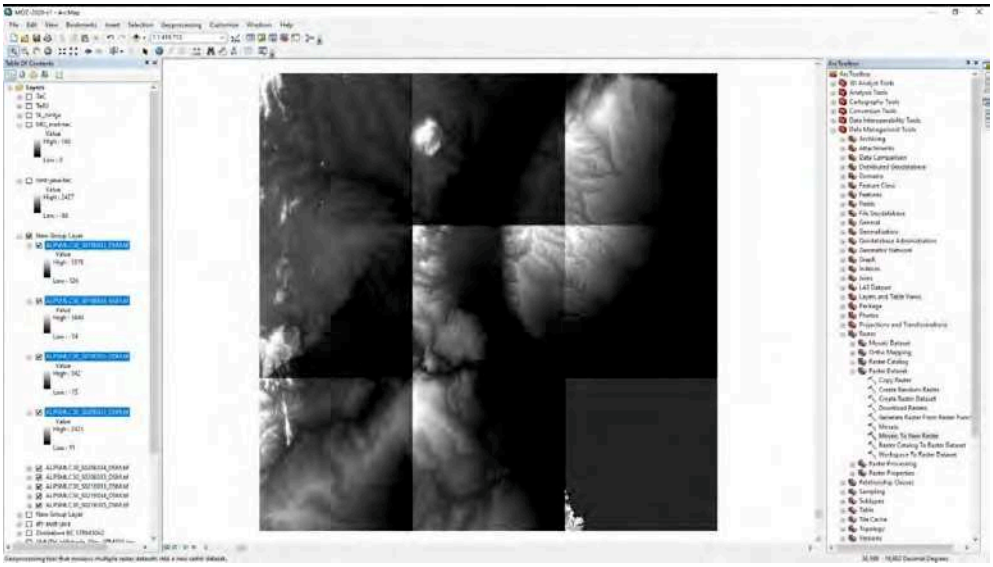


Figure 34 Ouverture de plusieurs dalles MNT avec ARCMAP (ARCGIS™).

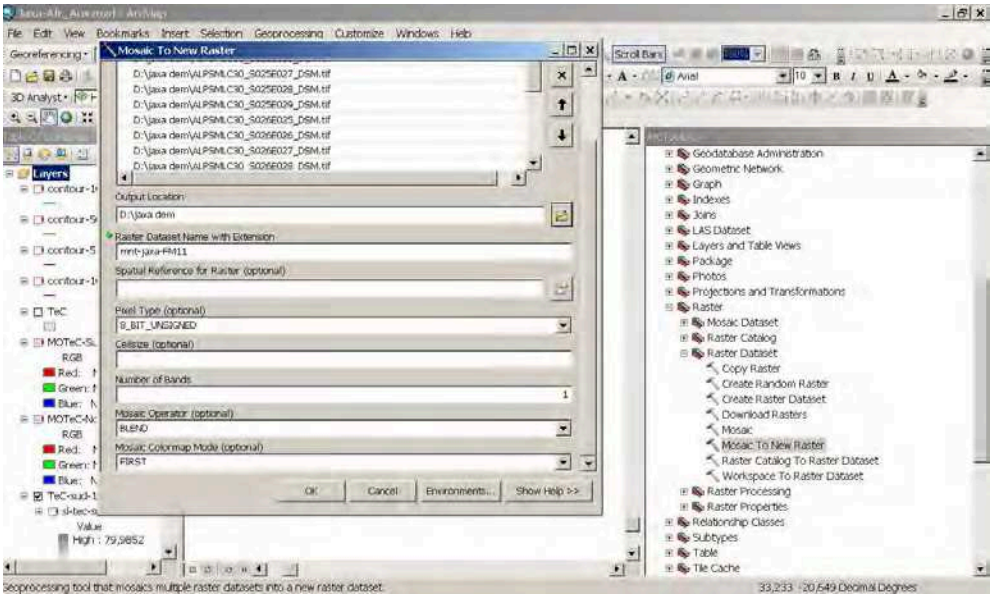


Figure 35 Utilisation de l'outil Mosaic to New raster.

La réunion des dalles (Figure 36) permet d'harmoniser les variations d'altitude et d'obtenir un document exploitable pour faire des cartes hypsométriques, des modèles ombrés, pour tracer des profils topographiques, calculer des courbes de niveaux ou bien faire des statistiques. Le point le plus bas de la carte est en noir et le point le plus élevé est en blanc.



Figure 36 Réunion des dalles pour créer un MNT.

1.3.1.2. Hypsométrie

En général, les reliefs sont visualisés en couleur, en utilisant une teinte hypsométrique, allant du bleu pour les altitudes les plus basses, au marron pour les plus élevées, évoquant la couleur des océans et celle des reliefs montagneux et de la végétation (Figure 37). Au lieu d'utiliser des niveaux de gris (du blanc au noir), on classe les altitudes en fonction d'une gamme de couleurs, on parle de bande raster (*color ramp*) (Figure 38).
Plusieurs types de classement des teintes hypsométriques peuvent être utilisés pour rendre compte des reliefs, par exemple soit pour visualiser le fond d'un canyon ou soit plutôt pour visualiser les lèvres d'un canyon (Figure 39, Figure 41, Figure 40).

Il est impératif de découper le MNT suivant le cadre de la carte que l'on souhaite faire, avant de calculer une hypsométrie, afin d'obtenir un bon contraste et d'utiliser vraiment le minimum et le maximum du cadre. L'utilisation de classes d'altitudes favorise en effet la visualisation des variations des reliefs (bosses et creux). Pour réaliser une carte hypsométrique, il faut donc découper un MNT. Cette opération peut se faire avec ARCMAP (ARCGIS™). Il faut alors créer un polygone au format shape de la zone dont l'on souhaite extraire un MNT et utiliser l'outil clip dans : *Data Management Tools* > *Raster* > *Raster Processing* > *Clip*. La réalisation d'une hypsométrie est expliquée en annexe (p.1110).

Le MNT harmonisé (c'est-à-dire homogène au niveau de la teinte des pixels) montre ci-dessous (Figure 38) que l'altitude la plus basse est de 368 m. Elle est représentée par un pixel noir ayant pour code RVB : 0,0,0. L'altitude la plus élevée, de 928 m, est représentée en blanc et son code RVB correspond à : 255,255,255. Tous les autres pixels de cette carte s'échelonnent entre ses deux valeurs extrêmes et permettent de représenter les reliefs en niveaux de gris.

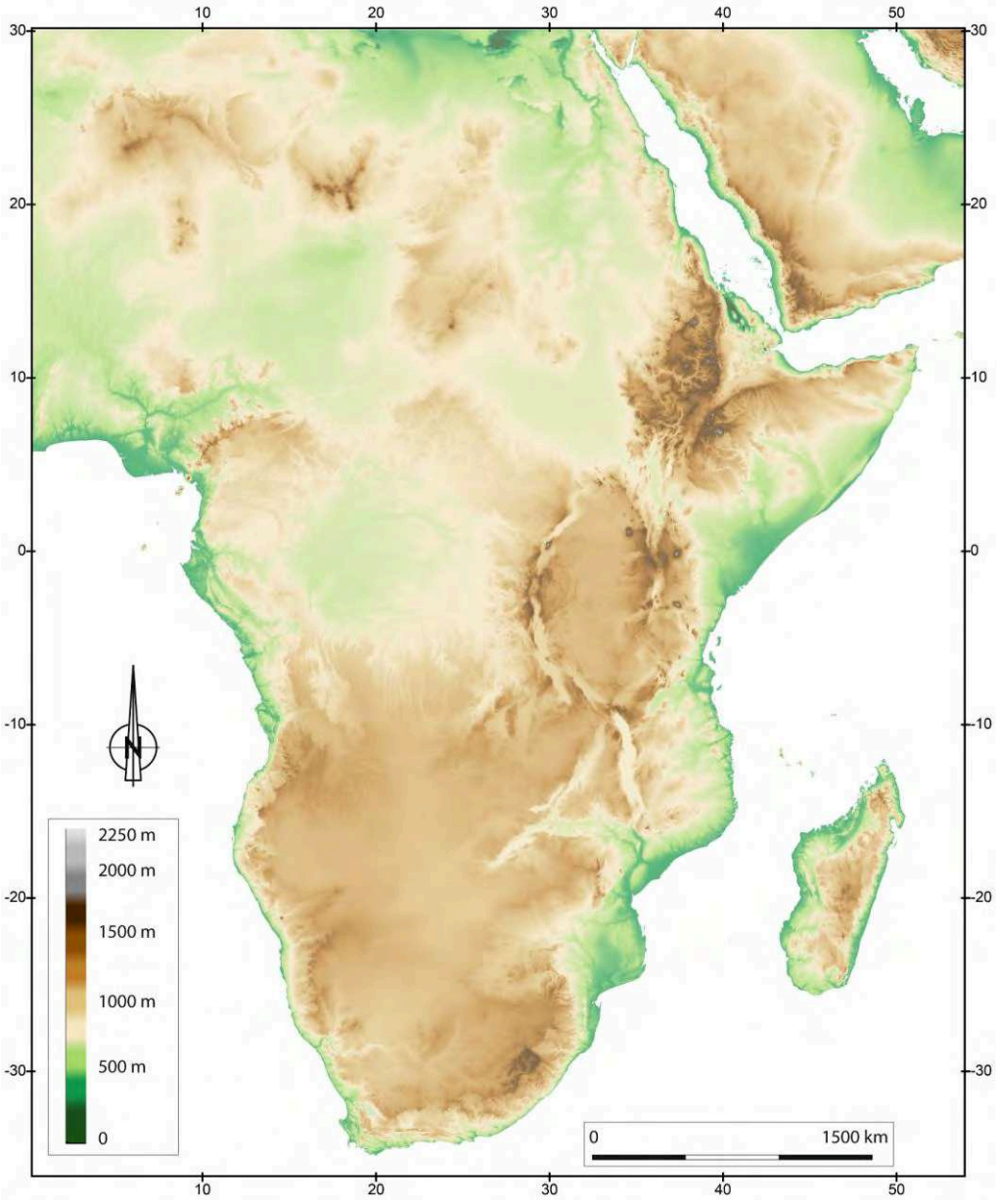


Figure 37 Hypsométrie de l'Afrique subsaharienne (https://ows.terrestris.de/osm/service?) calculée à partir du SRTM30.

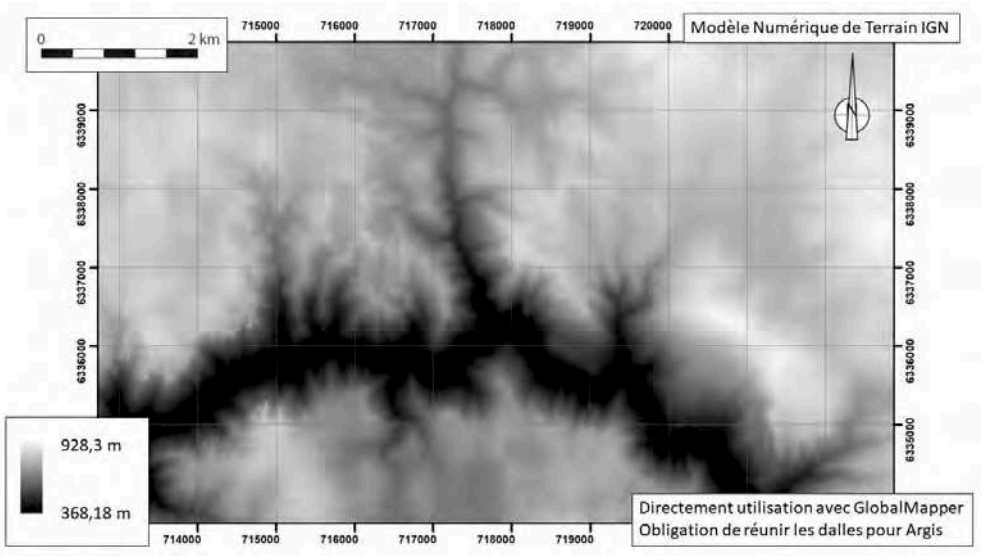


Figure 38 MNT harmonisé et homogène de la région de Montpellier-le-Vieux (France).

La gamme de couleur du MNT peut être changée, comme l'illustrent les figures suivantes (Figure 39 et Figure 40). Ces variations de couleur permettent de mieux visualiser les reliefs suivant si on souhaite mettre en valeur l'échancrure du canyon ou les replats du plateau.

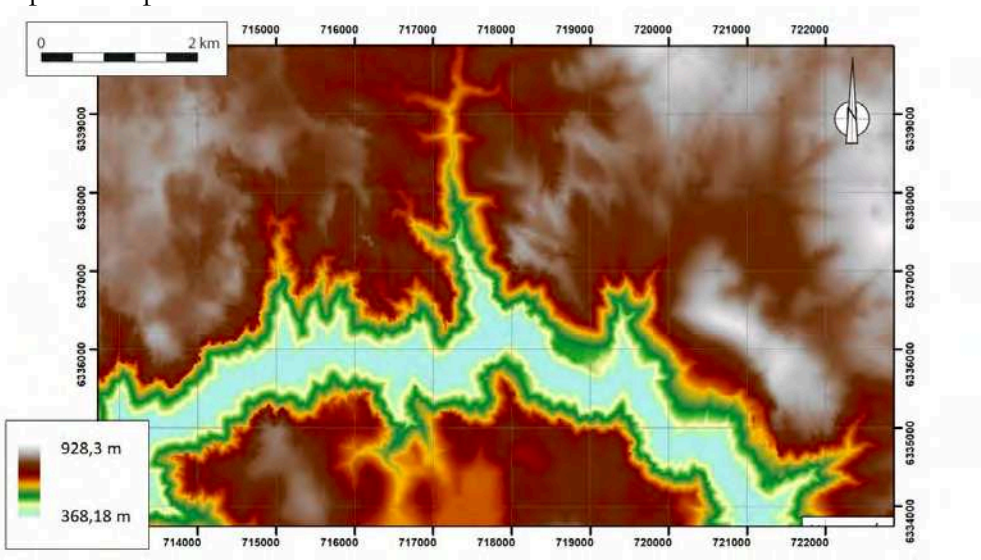


Figure 39 Exemple d'hypsométrie du MNT de la région de Montpellier-le-Vieux (France).

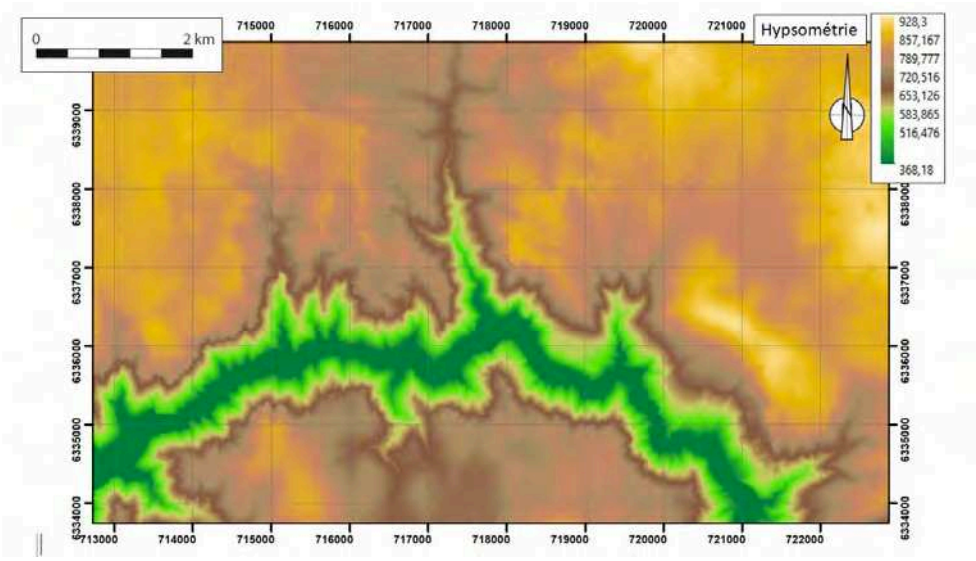


Figure 40 Idem.

Un classement des altitudes peut être effectué pour mettre en valeur par exemple des paléosurfaces (Figure 41).

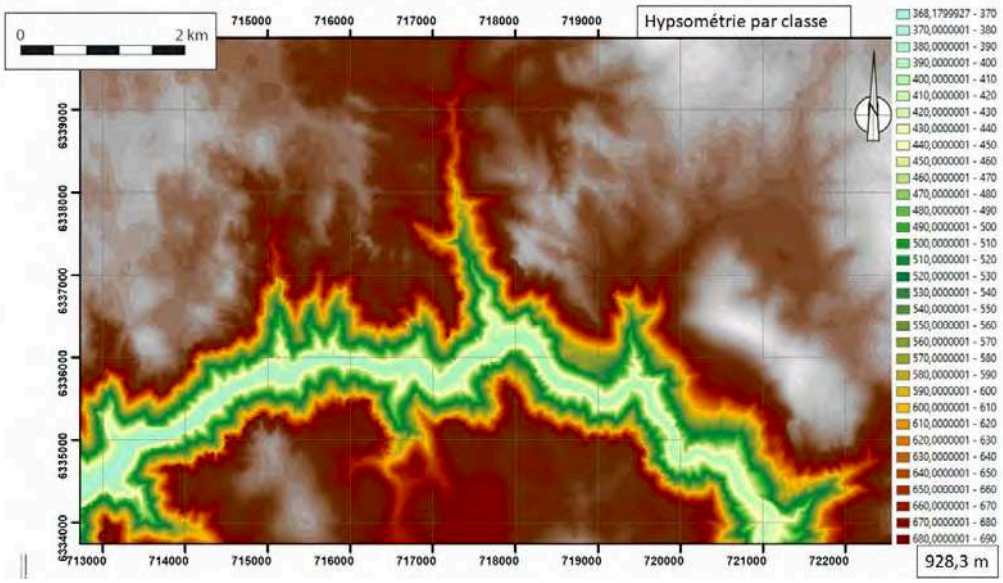


Figure 41 Classement des altitudes du MNT de la région de Montpellier-le-Vieux (France).

1.3.1.3. Méthode de classement hypsométrique pour mettre en valeur l'érosion des carbonates du West Rand (Bassin du Transvaal, Afrique du Sud) afin d'y rechercher des vallées peu incisées dans la classe d'altitudes de la vallée de la Bloubank du Cradle of Humankind

Avec Arcmap, plusieurs méthodes statistiques peuvent être utilisées pour classer les altitudes : *manuel, equal interval, defined interval, quantile, natural breaks (jenks), geometrical interval* et *standard deviation*. En fonction du classement hypsométrique, les rendus des reliefs sont très différents. Ici, la méthode des quantiles est préférable pour mettre en valeur les vallées (Figure 44 à Figure 46). Le *Cradle of Humankind* est délimité en rouge sur ces cartes.

1.3.1.3.1. Equal Interval

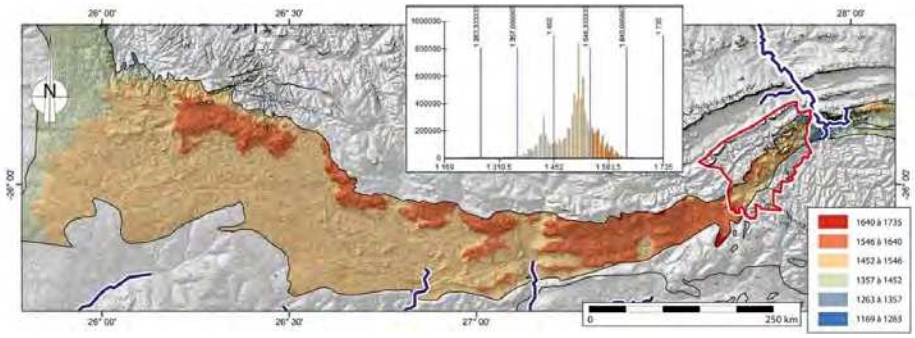


Figure 42 Rendu du relief sous Arcmap en utilisant un classement hypsométrique par la méthode Equal interval (West Rand, Bassin du Transvaal, Afrique du Sud).

1.3.1.3.2. Quantile

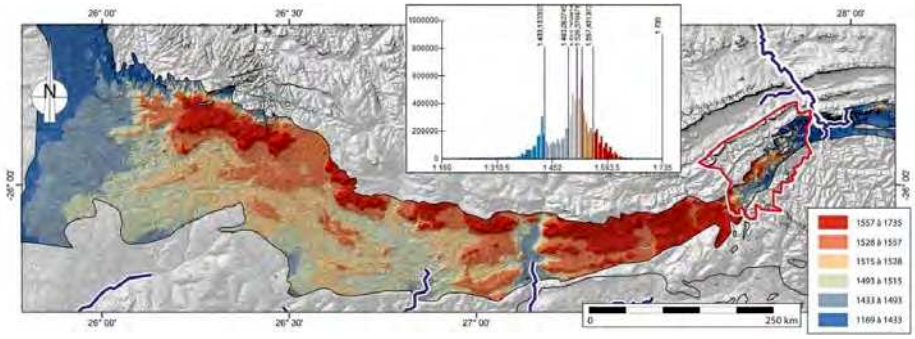


Figure 43 Rendu du relief sous Arcmap en utilisant un classement hypsométrique par la méthode des quantiles (West Rand, Bassin du Transvaal, Afrique du Sud).

1.3.1.3.3. Natural Breaks (Jenks)

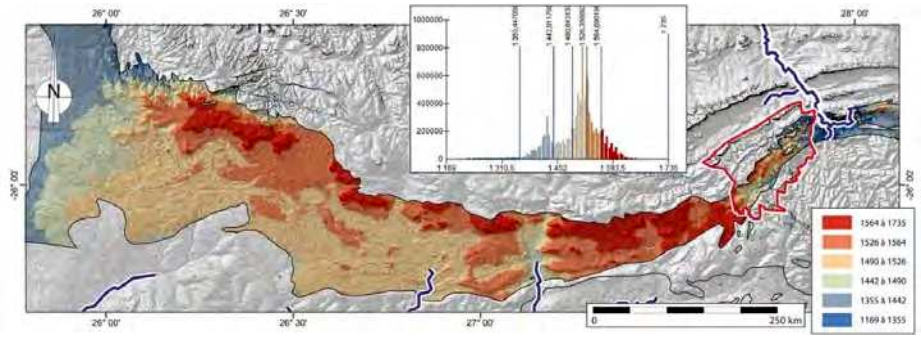


Figure 44 Rendu du relief sous Arcmap en utilisant un classement hypsométrique par la méthode des Natural Breaks (West Rand, Bassin du Transvaal, Afrique du Sud).

1.3.1.3.4. Geometrical Interval

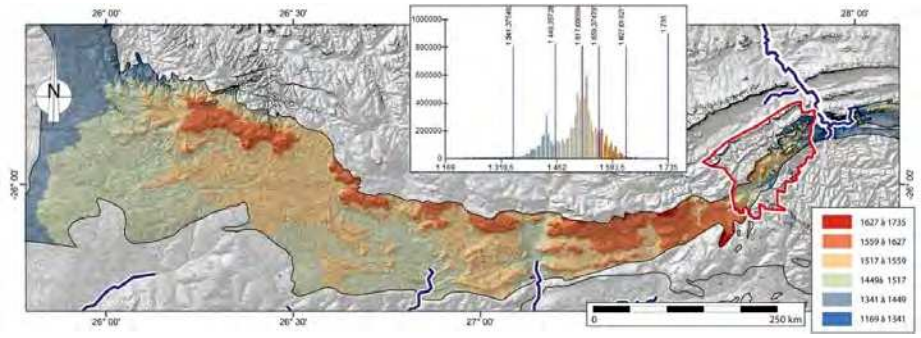


Figure 45 Rendu du relief sous Arcmap en utilisant un classement hypsométrique par la méthode des Geometrical Interval (West Rand, Bassin du Transvaal, Afrique du Sud).

1.3.1.3.5. Standard Deviation

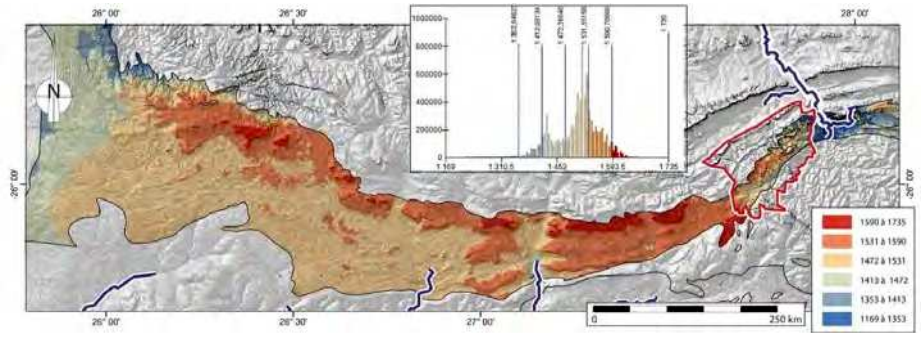


Figure 46 Rendu du relief sous Arcmap en utilisant un classement hypsométrique par la méthode des Standard Deviation (West Rand, Bassin du Transvaal, Afrique du Sud).

1.3.1.4. Calcul d'un Modèle Ombré

Pour mieux appréhender les reliefs, les logiciels SIG permettent de projeter une ombre portée sur les reliefs. L'image raster ainsi obtenue s'appelle un modèle ombré (*hillshade*). Plusieurs paramètres peuvent être choisis. En général, c'est une ombre portée calculée à partir d'un éclairage venant du NO, orientée N310° (Figure 47, Figure 48) mais l'orientation de la lumière peut être changée afin d'améliorer la visualisation des reliefs (Figure 49, Figure 50, Figure 51).

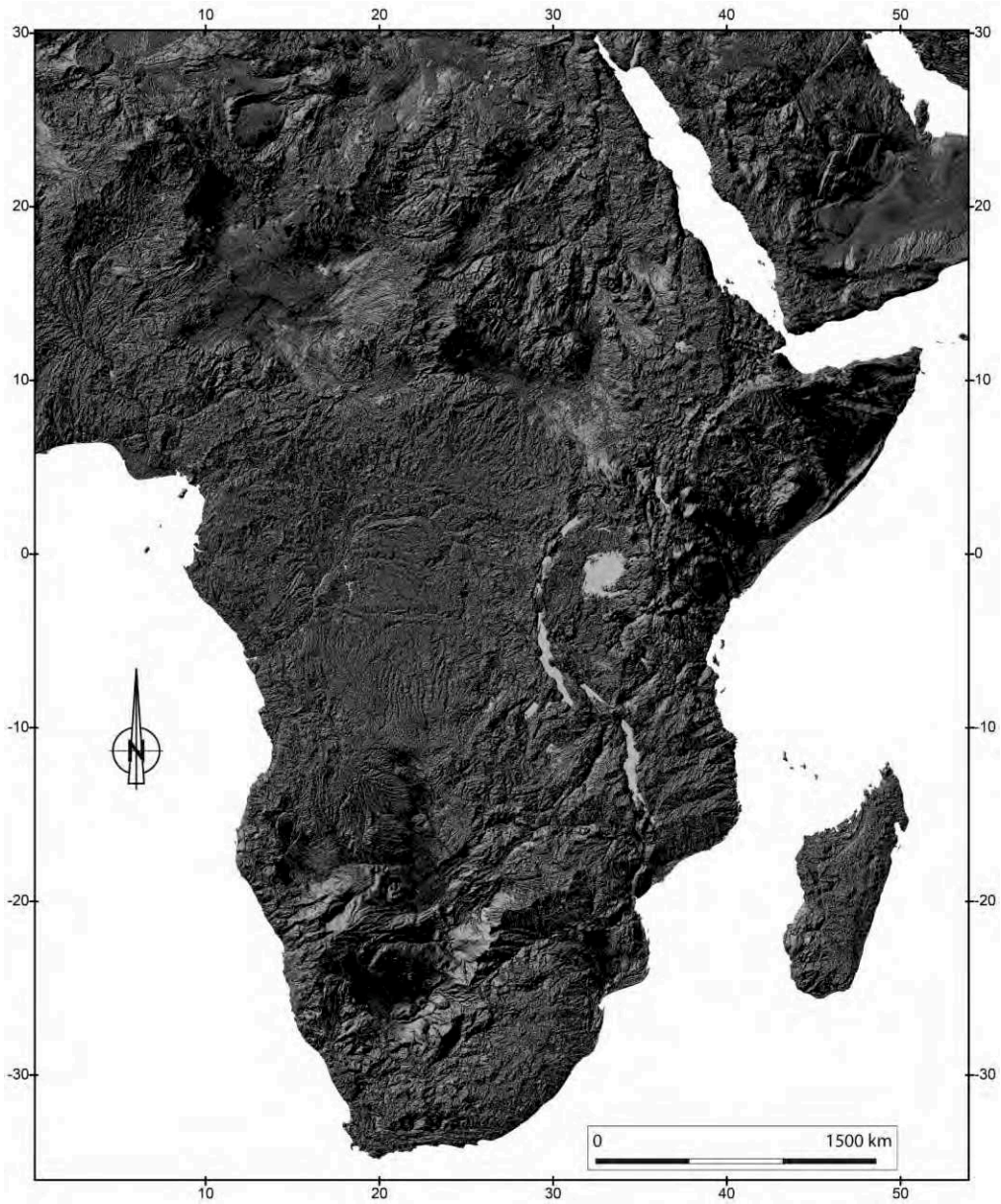


Figure 47 Modèle ombré de l'Afrique subsaharienne, calculé à partir du MNT JAXA et d'un éclairage venant du NO.

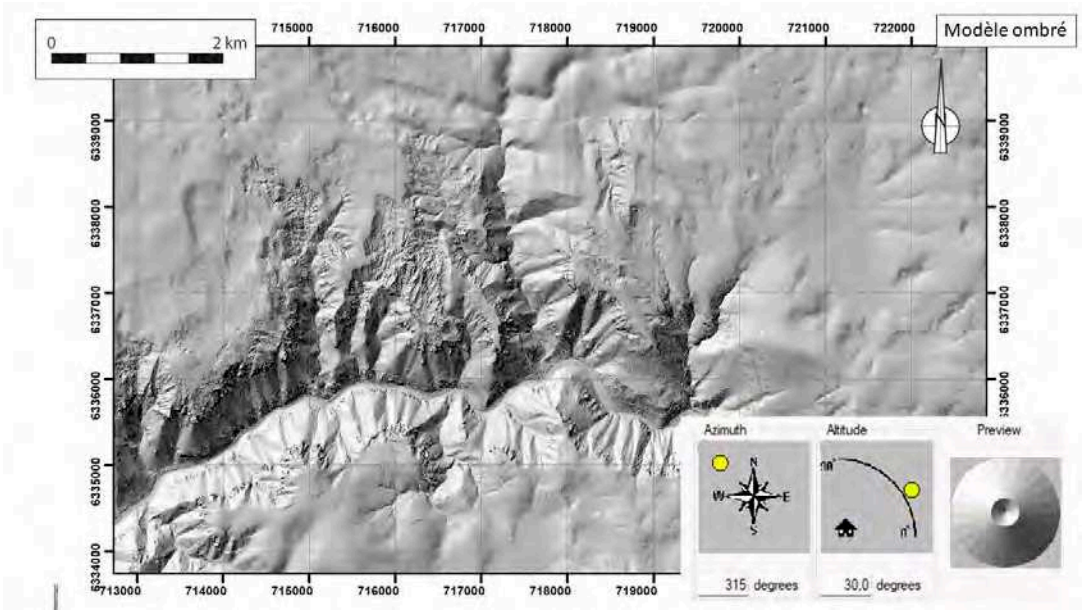


Figure 48 Modèle ombré calculé à partir d'un éclairage venant du NO de la région de Montpellier-le-Vieux (France).

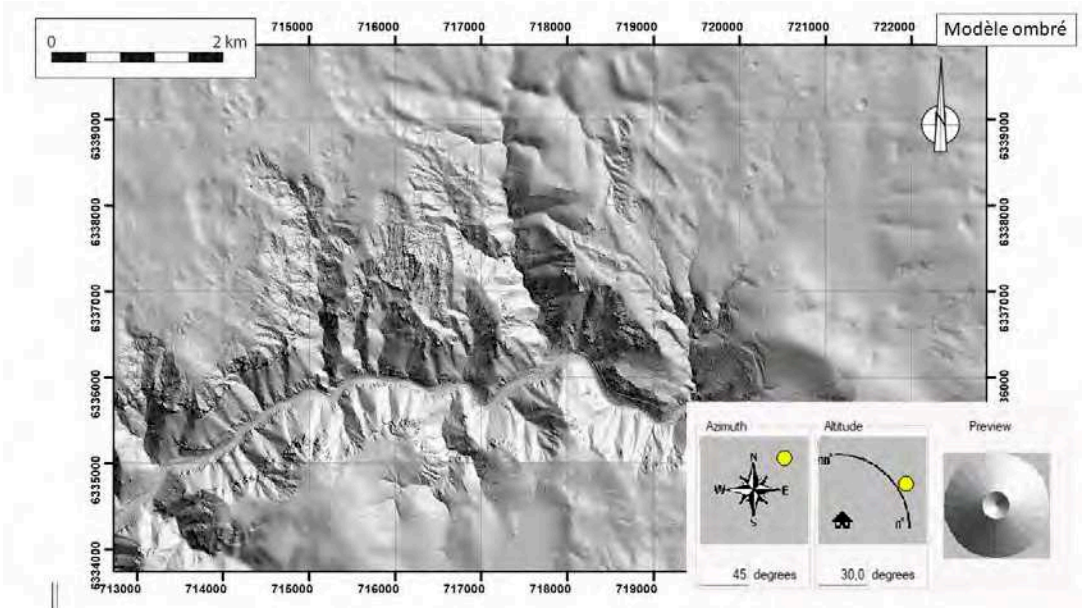


Figure 49 Modèle ombré calculé à partir d'un éclairage venant du NE de la région de Montpellier-le-Vieux (France).

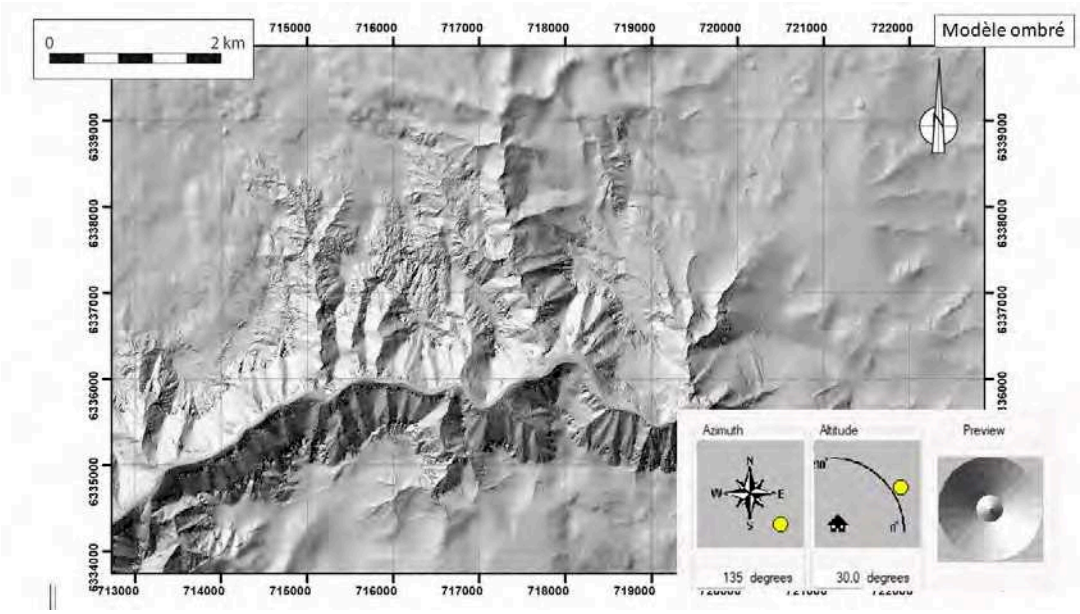


Figure 50 Modèle ombré calculé à partir d'un éclairage venant du SE de la région de Montpellier-le-Vieux (France).

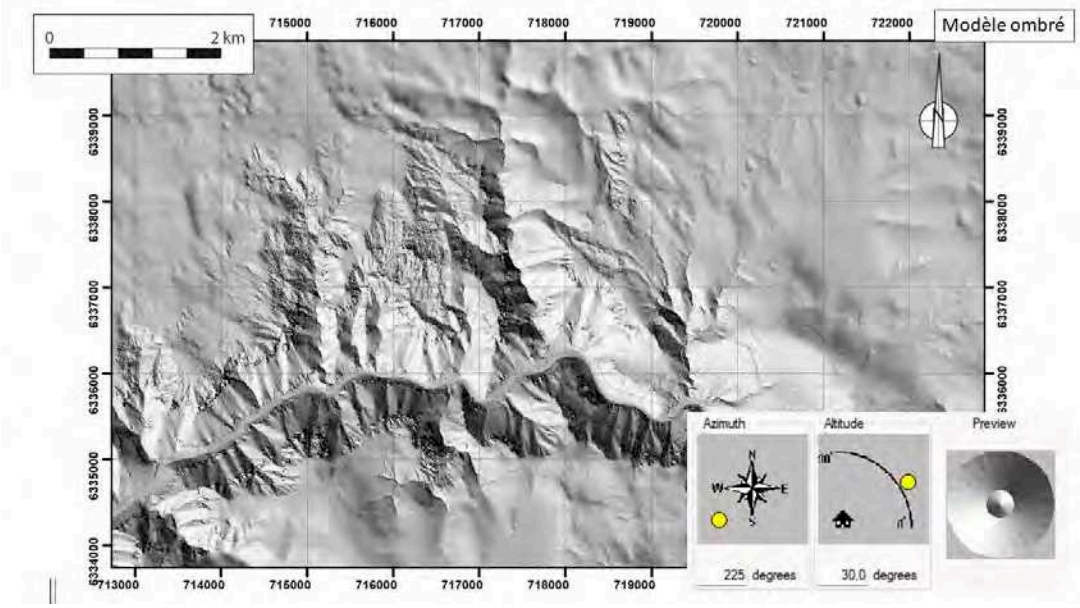


Figure 51 Modèle ombré calculé à partir d'un éclairage venant du SO de la région de Montpellier-le-Vieux (France).

1.3.1.5. Calcul des pentes

Par le même procédé que le calcul du modèle ombré, nous pouvons projeter une ombre selon toutes les directions de l'espace, sur 360° (Figure 52). Nous obtenons alors une image raster montrant toutes les pentes du relief, c'est une carte de pentes (*slope*). Ce qui apparaît en blanc est subhorizontal, ce qui est en noir est pentu. Cette visualisation des reliefs est très importante pour visualiser les reliefs karstiques comme les dolines, les poljés. Plusieurs paramètres peuvent être adaptés afin de mettre en valeur les reliefs karstiques notamment sur les reliefs contrastés (Figure 53, Figure 54, Figure 55, Figure 56, Figure 57).

Établir une carte des pentes (slope) avec Globalmapper :

Ouvrir le MNT avec *Globalmapper*.
Tools > *Configure* > *shader option* > *slope shader* > *minimum slope* > *slope value*,
Dans la première colonne (degrees (entrer slope in degrees from horizontal).
minimum slope : la valeur de la pente minimum est sur 0°, la régler sur 8°.
maximum slope : la valeur de la pente maximum est sur 0°, la régler sur 15°.
On peut aussi changer la gamme des couleurs.

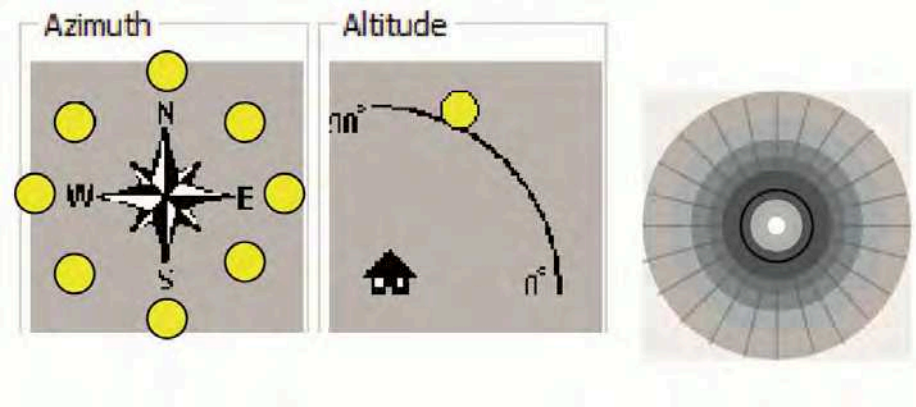


Figure 52 Schémas du calcul des pentes d'un relief.

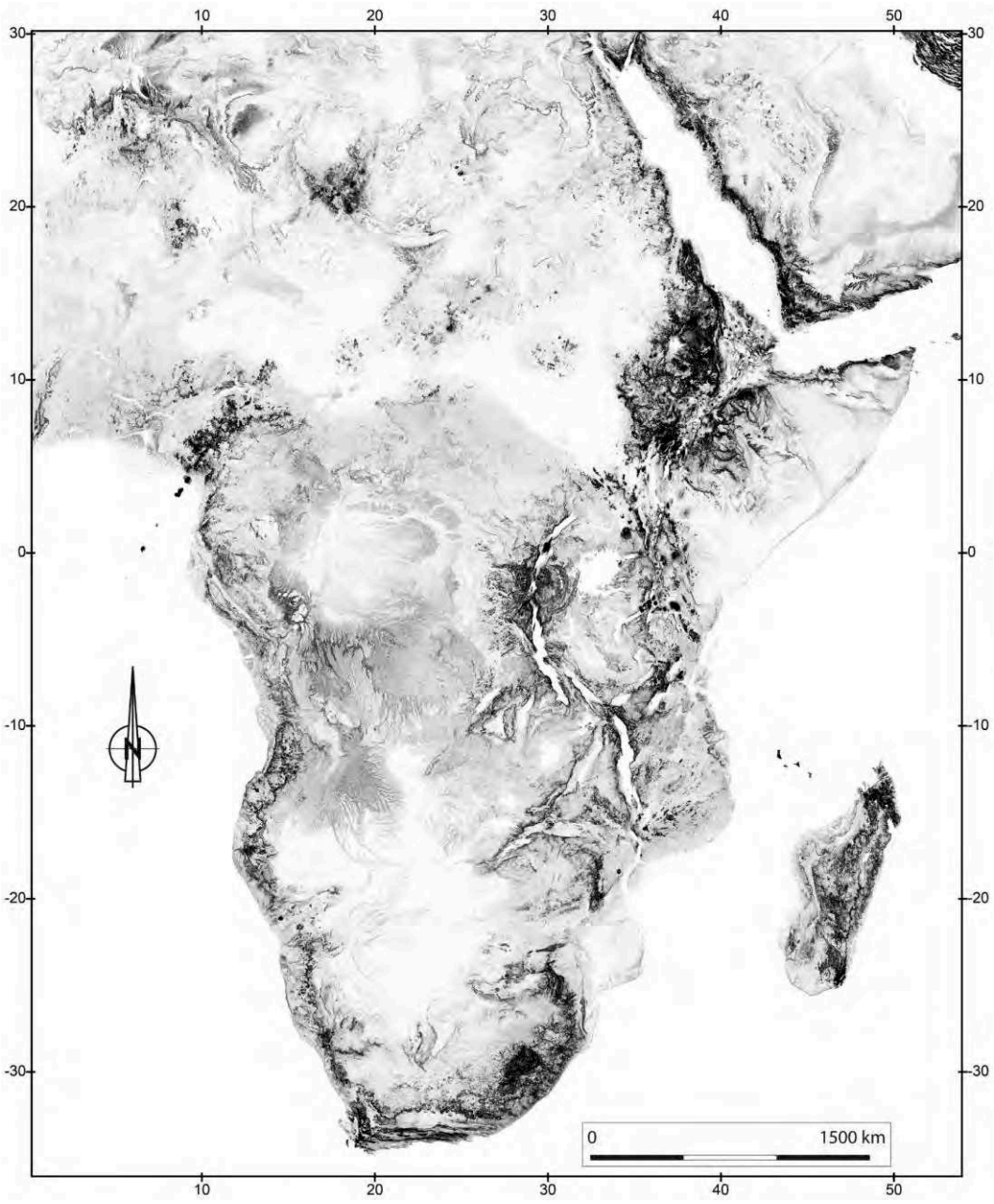


Figure 53 Carte des pentes calculées à partir du MNT30 (JAXA) de l'Afrique subsaharienne.

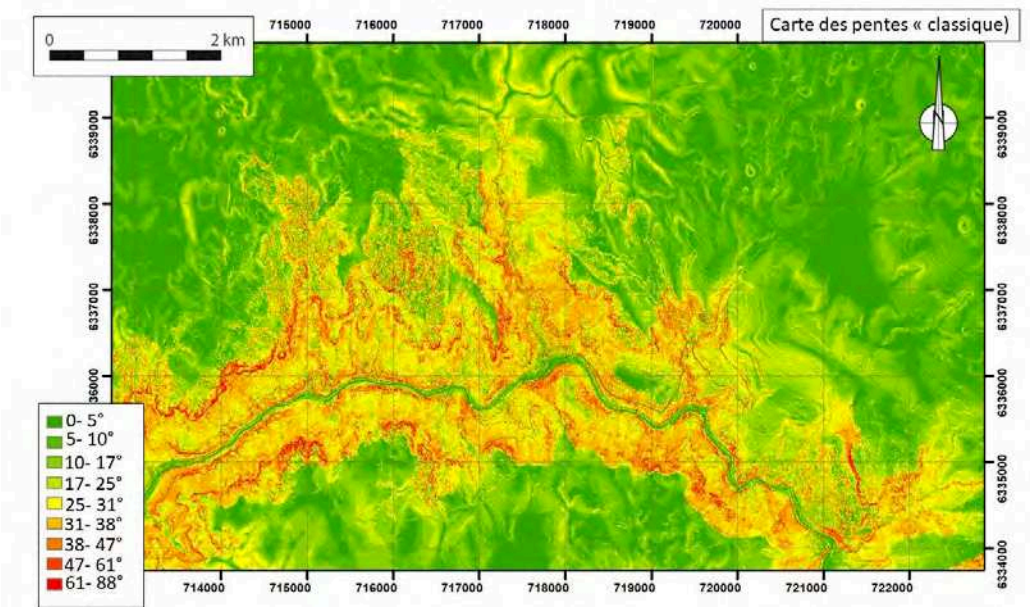


Figure 54 Carte des pentes calculées selon les paramètres de base d'Arcmap de la région de Montpellier-le-Vieux (France).

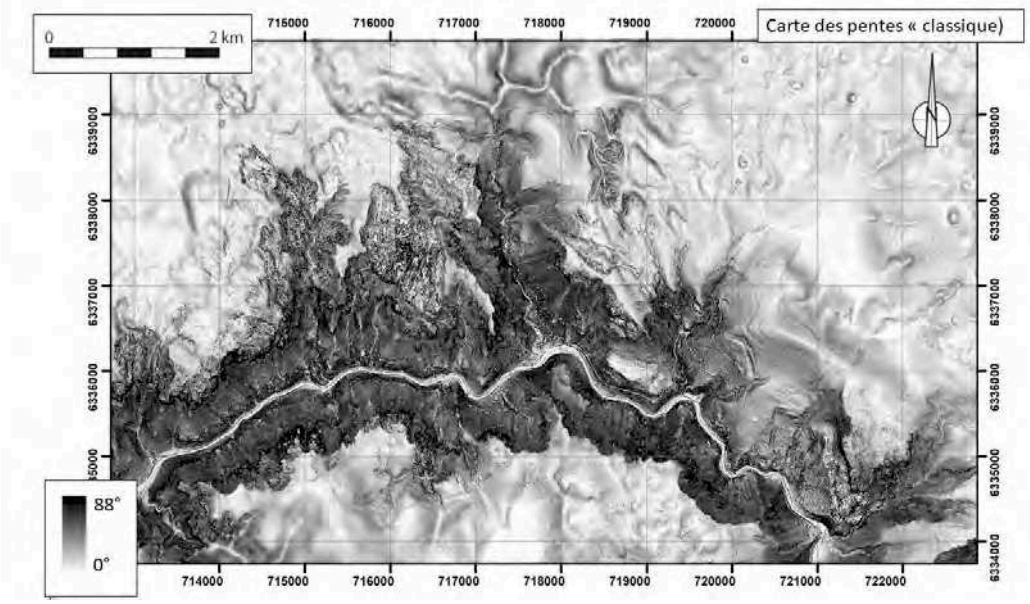


Figure 55 Carte des pentes calculées avec Globalmapper de la région de Montpellier-le-Vieux (France).

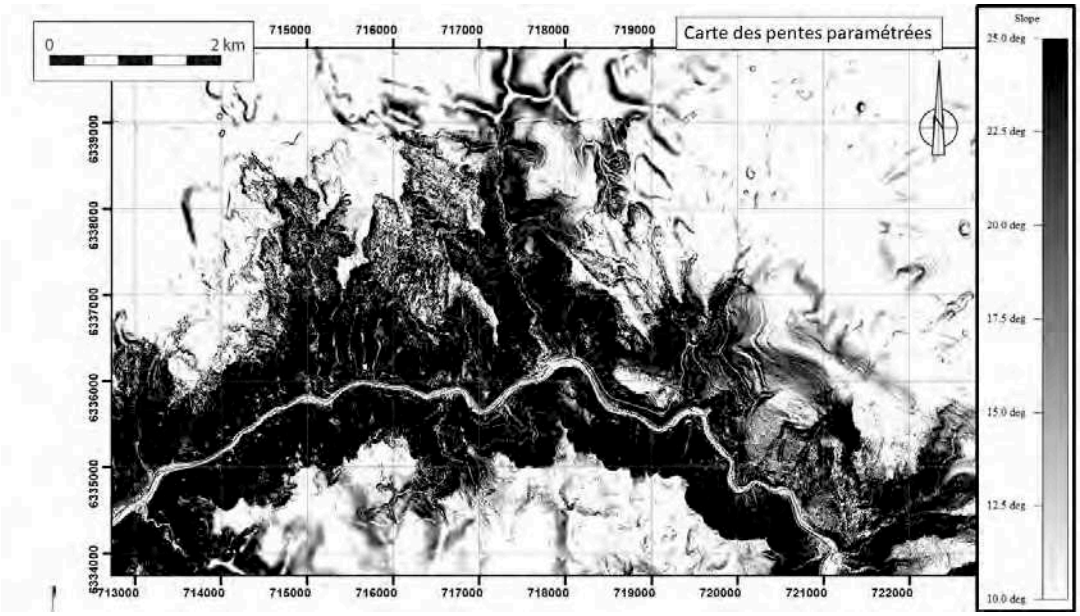


Figure 56 Carte de pentes paramétrées, où les pentes de 0 à 10 ° sont laissées en blanc et les pentes supérieures à 25° sont en noir de la région de Montpellier-le-Vieux (France).

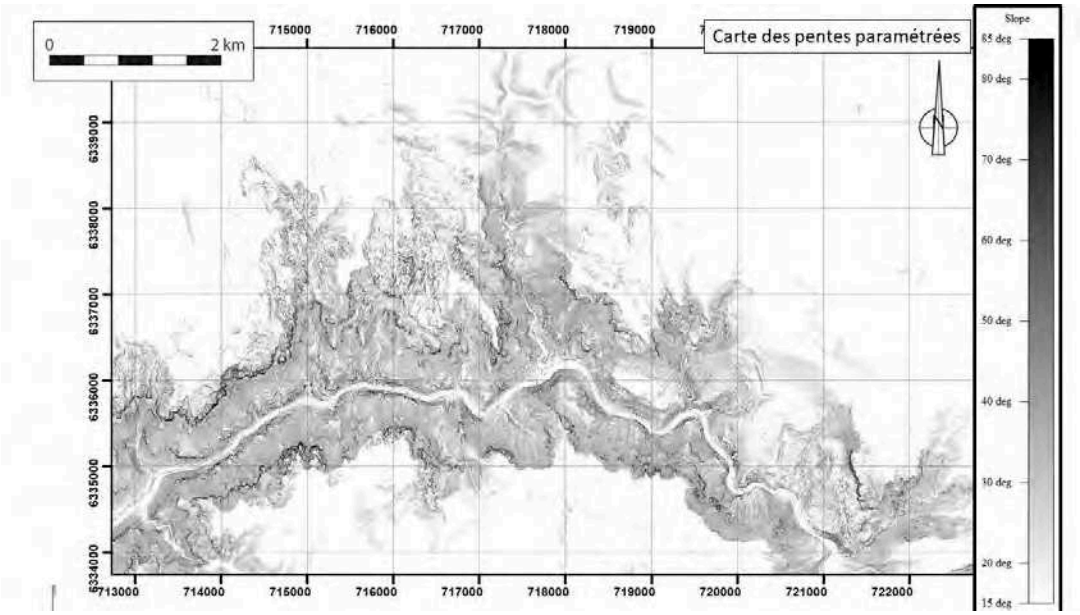


Figure 57 Carte de pentes paramétrées, où les pentes de 0 à 15 ° sont laissées en blanc et les pentes supérieures à 85° sont en noir de la région de Montpellier-le-Vieux (France).

1.3.1.6. Topographic Openness

Ce calcul de *topographic openness* que l'on peut traduire par « ouverture du paysage » est réalisé sur Qgis via un *plugin* de SAGA (https://saga-gis.sourceforge.io/saga_tool_doc/2.2.2/ta_lighting_5.html) car ARCGIS ne réalise pas ce calcul. C'est le plugin *Processing Saga NexGen Provider*.

Sur le terrain, l'ouverture correspond à l'étendue d'un paysage que l'on peut observer depuis un lieu donné. Concrètement, pour chaque pixel du MNT, va être calculée l'étendue du champ de vision perçu depuis ce pixel ; c'est ce qui est désigné par *Positive* T*opographic Openness*. À l'inverse, ce qui est caché de la vue par les reliefs du sol est désigné par *Negative Topographic Openness.* Ainsi, un sommet aura une forte valeur de PTO et une faible valeur de NTO, tandis qu'un point situé au fond d'une dépression aura un PTO faible et un NTO fort. Ce calcul est réalisé pour chaque pixel du MNT et l'on va intégrer les résultats afin d'obtenir un raster de D*ifferential Topographic Openness*. Là encore, il existe plusieurs paramètres qui complexifient le calcul mais donnent un rendu plus pertinent.

Au final, l'image raster de l'ouverture topographique différentielle (*Differential Topographic Openness*) est calculée en faisant la différence entre une image raster P*ositive Topographic Openness (PTO)* et une image raster N*egative Topographic Openness (NTO)* (Yokoyama et al, 2002, Daxer, 2020). Les calculs sont plus compliqués et plus longs que pour une simple projection d'une ombre portée comme avec les modèles ombrés ou les cartes de pentes.

Les cartes obtenues par cette méthode offrent plus de détails et plus de contraste pour nos études géomorphologiques, que les modèles ombrés et les cartes de pentes et sont donc essentielles. Prenons maintenant en exemple le Plateau de Ghaap où se situe la mine de Finsch mesurant 700 m de long et qui est profonde de 400 m. Elle se situe à 1540 m d'altitude (Figure 61).

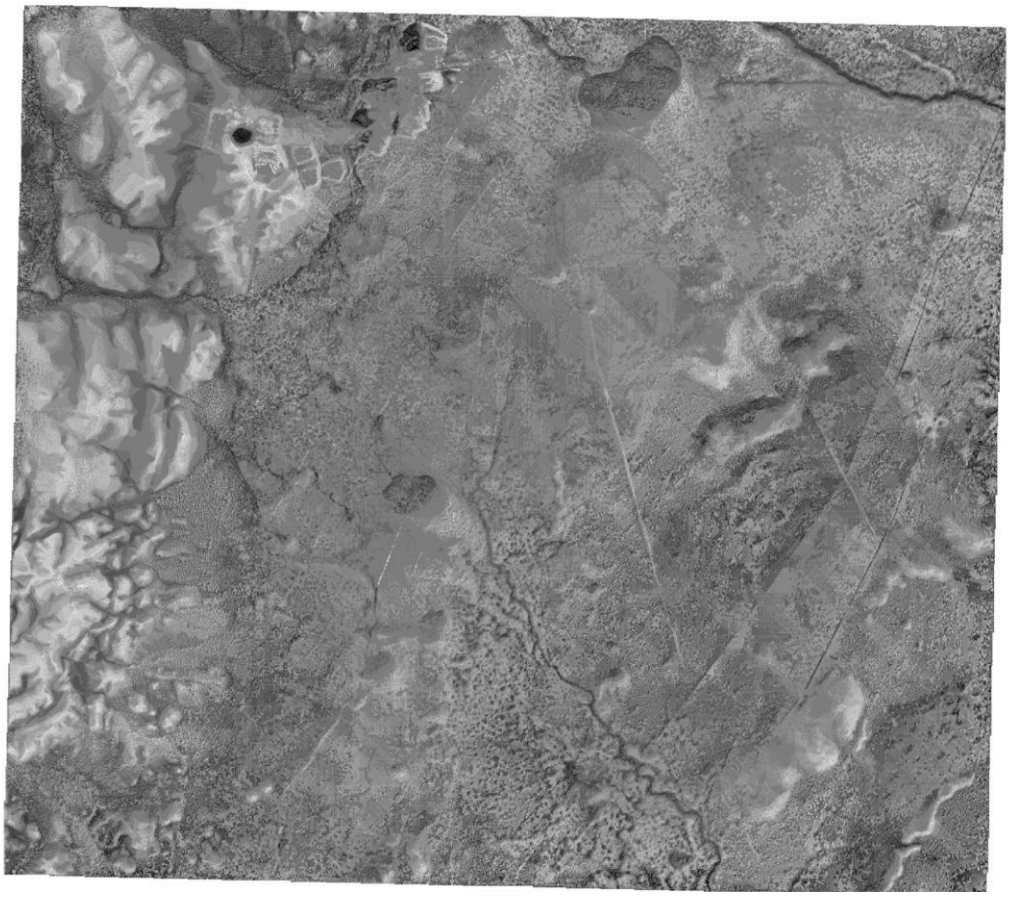


Figure 58 Exemple de Differential Topographic Openness au niveau de la bordure orientale dolomitique du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud. La carte est au nord géographique et la largeur mesure 33 km.

1.3.1.6.1. Topographic openness positive

Une image raster « *topographic openness positif* » (Figure 59) est le résultat de calculs à partir d'une position nadirale (Figure 60), on obtient une visualisation des reliefs depuis le bas.



Figure 59 Exemple de Positif Topographic-Openness» (bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud).

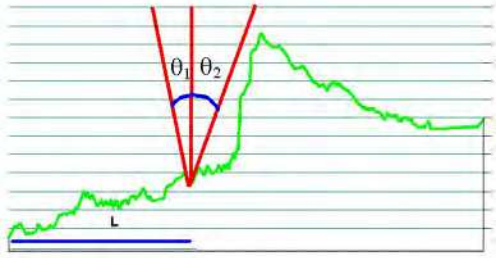


Figure 60 Schéma du PTO. (Source : USNA United States Naval Academy).

1.3.1.6.2. Topographic openness negative

Une image raster *« negative topographic openness »* (Figure 61) est le résultat de calculs à partir d'une position zénithale (Figure 62), on obtient une visualisation des reliefs depuis le haut.

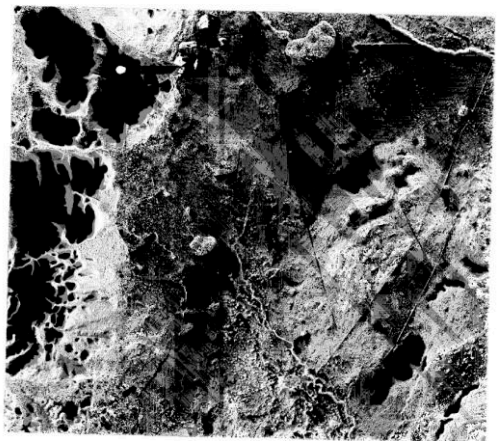


Figure 61 Exemple de « Negative Topographic Openness »(bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud).

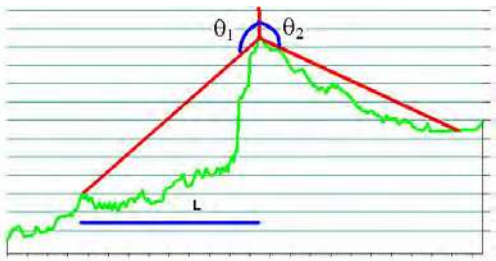


Figure 62 Schéma du NTO (Source : USNA United States Naval Academy).

.

1.3.1.7. Méthode du Red Relief Image Map (RRIM) pour visualiser les reliefs karstiques à partir des MNT.

La visualisation des reliefs est donc réalisée en calculant une image raster, le *Differential Topographic openness,* que l'on ajoute au modèle ombré, à la carte des pentes et à une hypsométrie selon la méthodologie *Red Relief Image Map (RRIM)* (Chiba *et al.*, 2008 ; Yokoyama et al, 2002) et qui consiste à ajouter plusieurs couches :

- Hypsométrie (Type de rendu : Pseudo-couleur à bande unique > Palette (de basse altitude ou forte altitude) : Rouge > Vert > Bleu, par exemple turbo (inversé) ; mode de fusion : multiplier) ;
- Pente (Type de rendu : Pseudo-couleur à bande unique > Palette : Rouge (inversé) luminosité = 80 ; mode de fusion : multiplier) ;
- Modèle ombré (opacité 50 %, mode de fusion : *blending mode lighten*) ;
- *Differential Topographic openness* (min/max : moyenne standard ; rendu de couche : luminosité = 50).

La fiche méthodologique, disponible en annexe (p.1112), décrit les étapes de mise en œuvre de cette méthode RRIM au niveau de la mine de Finsch mesurant 700 m de long et profonde de 400 m. Elle se situe à 1540 m d'altitude sur le Plateau de Ghaap, dans les dolomies de *Campbellrand* équivalentes aux dolomies de Malmani du Cradle of Humankind (Figure 63 à Figure 66).

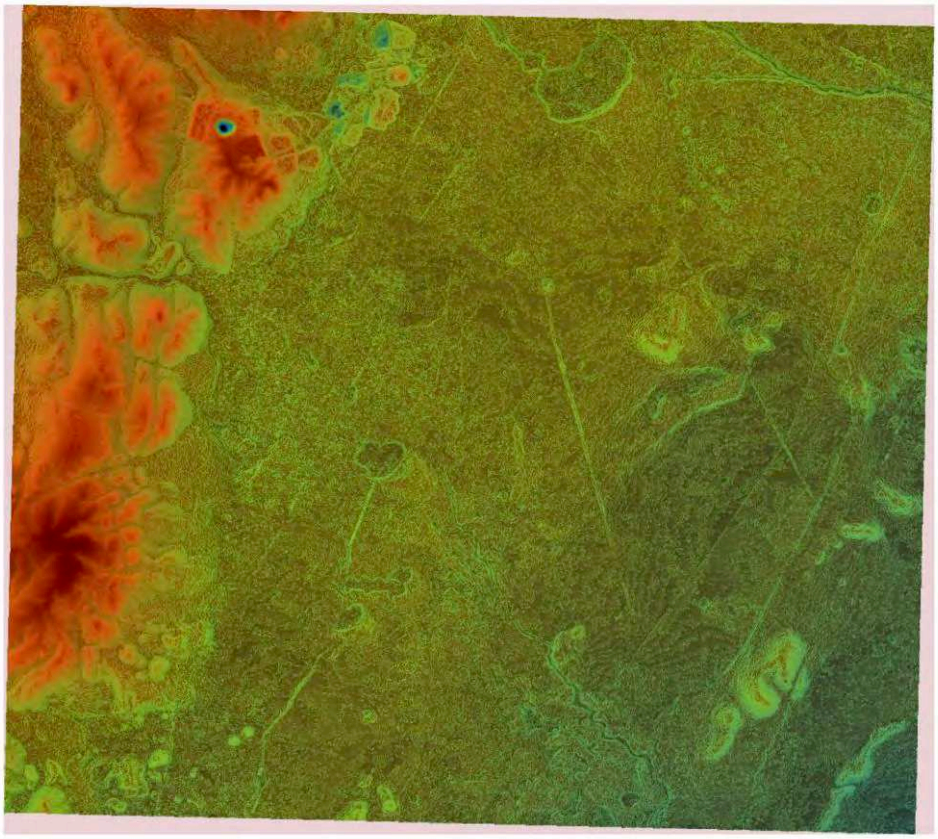


Figure 63 Rendu final de la méthode RRIM mettant en évidence la dépression formée par la mine (bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud).

1.3.1.7.1. Méthode RRIM appliquée au Cradle of Humankind

Appliquons maintenant la méthode RRIM au *CoH* afin de mieux visualiser les reliefs (Figure 64) et notamment les morphologies karstiques comme les poljés en noir sur la Figure 65. Les poljés sont définis à la page 90.

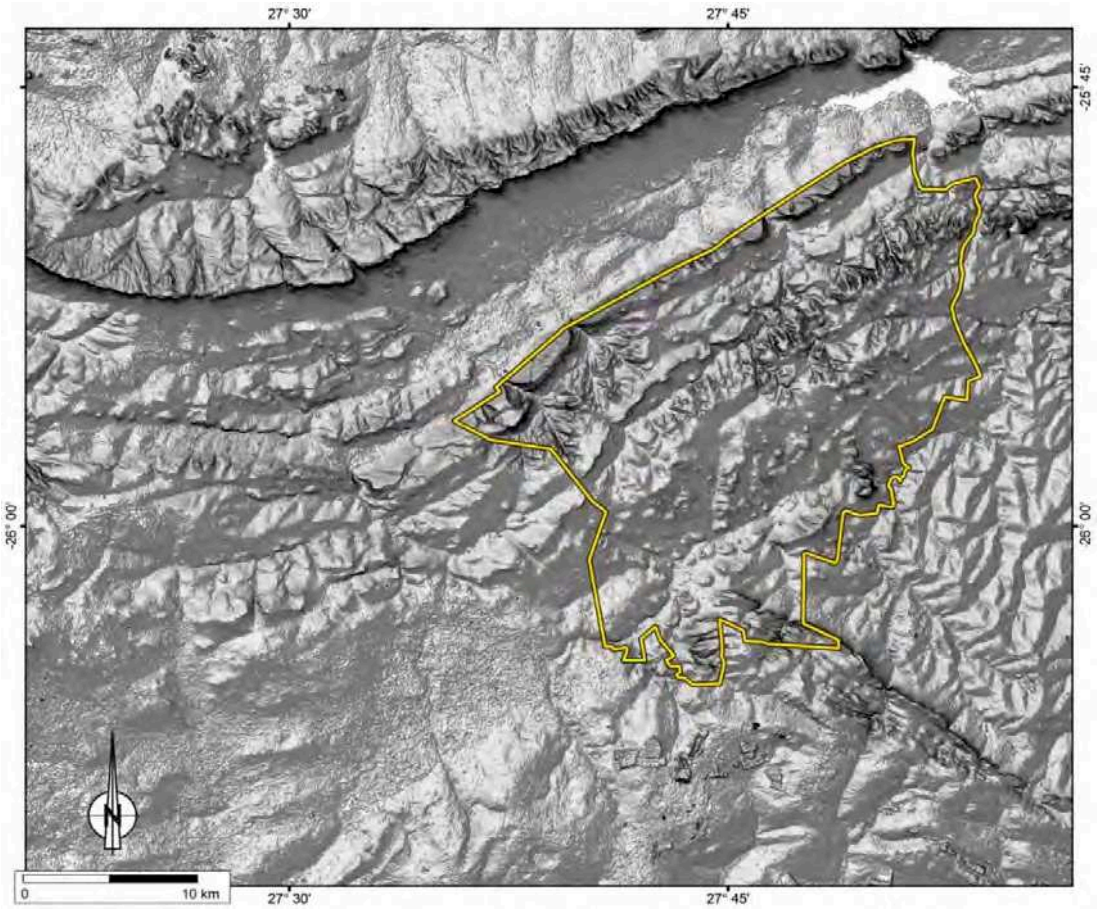


Figure 64 Carte des pentes couplées à un modèle ombré du CoH.

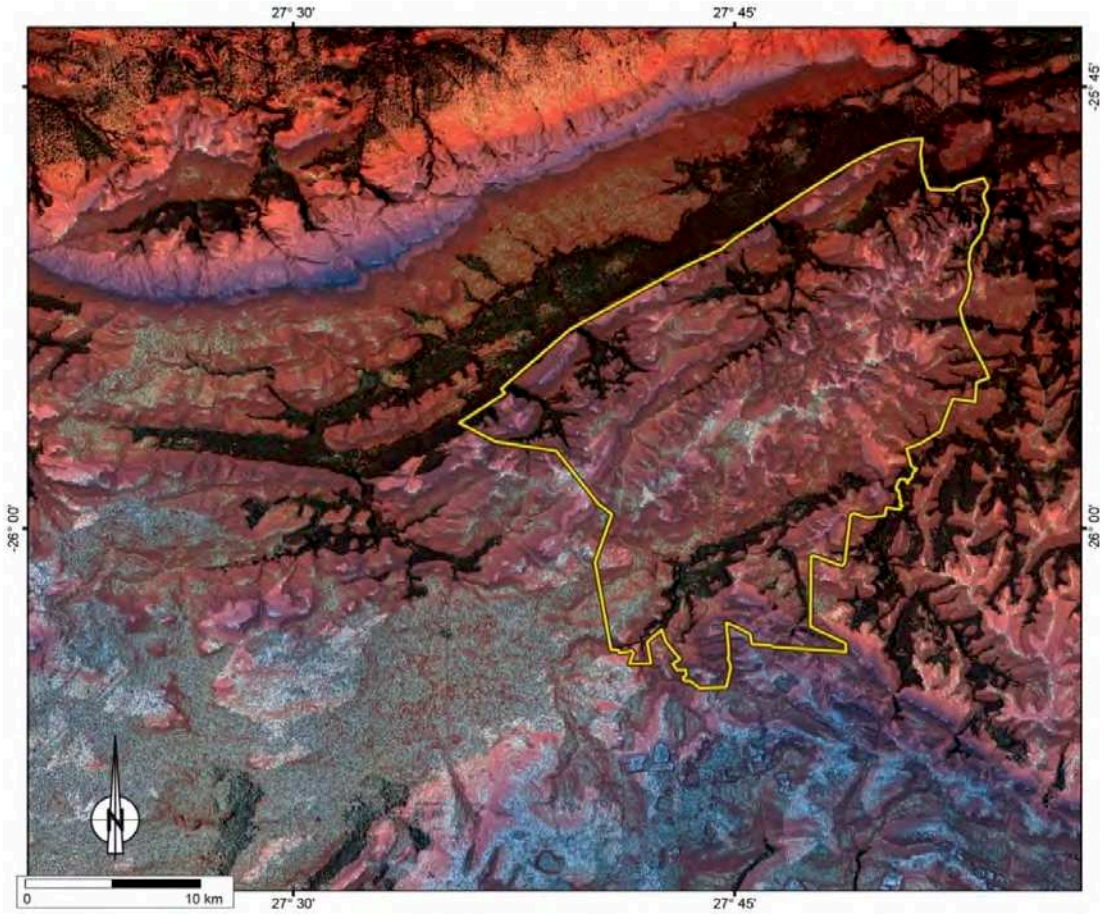


Figure 65 Méthode RRIM appliquée au CoH pour rendre compte des morphologies karstiques et notamment des poljés en noir.

1.3.1.8. Représentation des réseaux hydrographiques et des limites de bassins-versants par calcul automatique des talwegs à partir du MNT

À partir des MNT, et en utilisant les logiciels SIG, les talwegs peuvent être calculés et vectorisés comme par exemple pour le *Cradle of Humankind* (Figure 66), où les cavités fossilifères majeures sont indiquées en rouge. Attention à ces opérations automatiques, car les talwegs calculés ne correspondent pas forcément aux réseaux hydrographiques actuels et pérennes et peuvent être par exemple, des vallées sèches où l'eau ne circule plus. Ce sont des opérations assez complexes, que nous détaillons en annexe (p.1124).

À droite, nous avons calculé les réseaux hydrographiques majeurs de l'Afrique subsaharienne, en bleu, et les limites de bassins versants hydrographiques, en noir. Les lacs ont été rajoutés sans avoir été calculés.

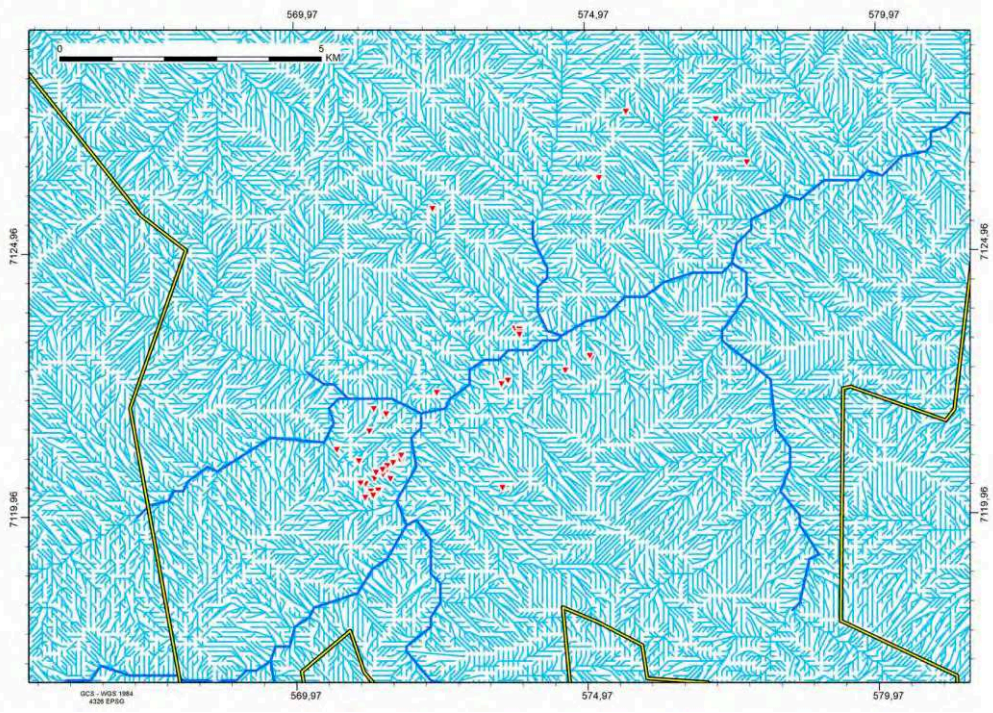


Figure 66 Exemples de calcul des talwegs (vallées sèches ou paléovallées) et des réseaux hydrographiques à partir des MNT (JAXA) du Cradle of Humankind.

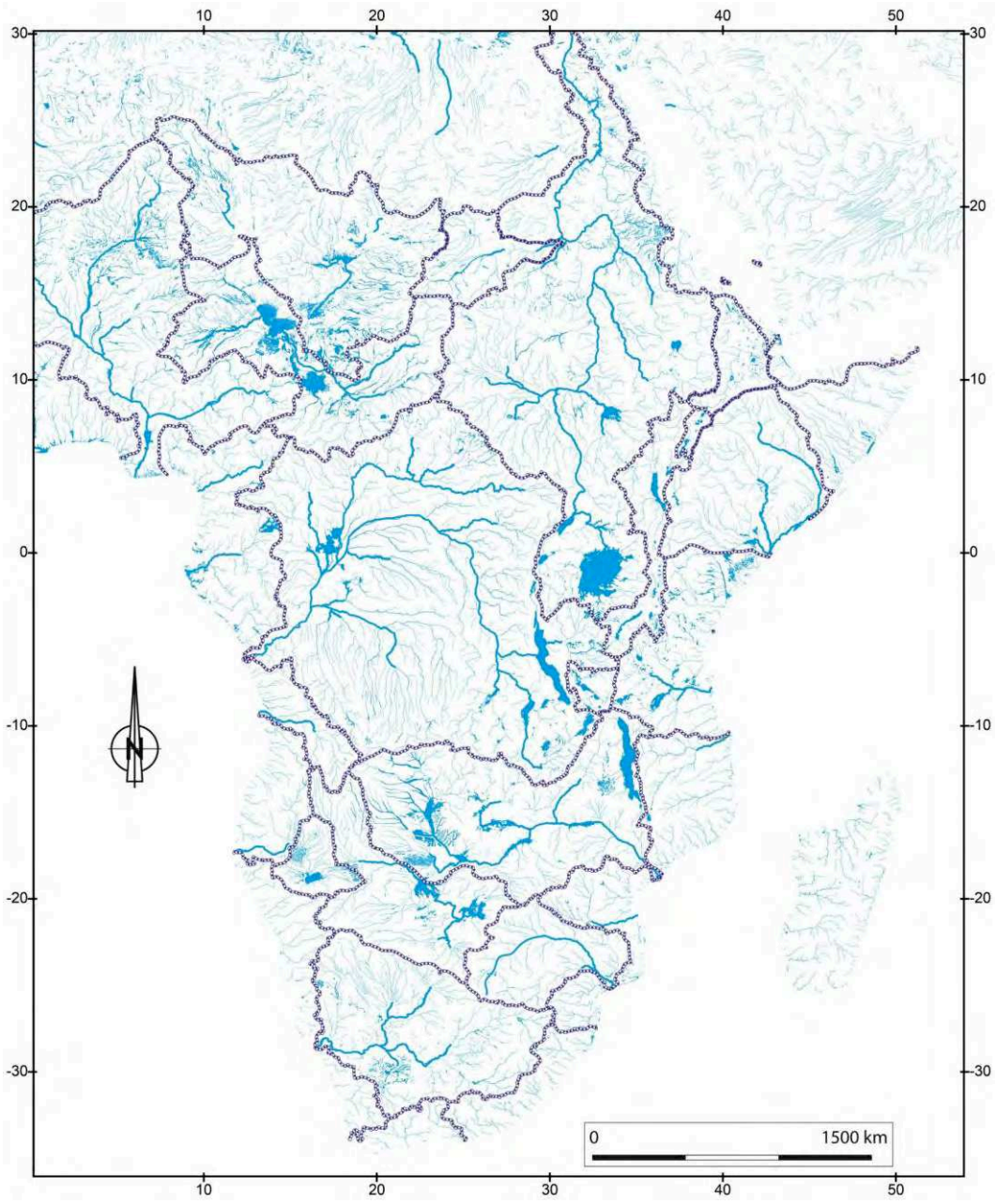


Figure 67 Hydrographie et limites des bassins versants (https://www.diva-gis.org/gdata) calculées à partir du SRTM de l'Afrique subsaharienne.

1.3.1.9. Calcul des courbes de niveaux

À partir des MNT, nous pouvons réaliser des courbes de niveaux (Figure 68), comme expliqué en annexe (p.1125). Celles-ci peuvent être colorées en fonction des classes d'altitude choisies, par exemple pour mettre en valeur des paléosurfaces (Figure 69, Figure 70).

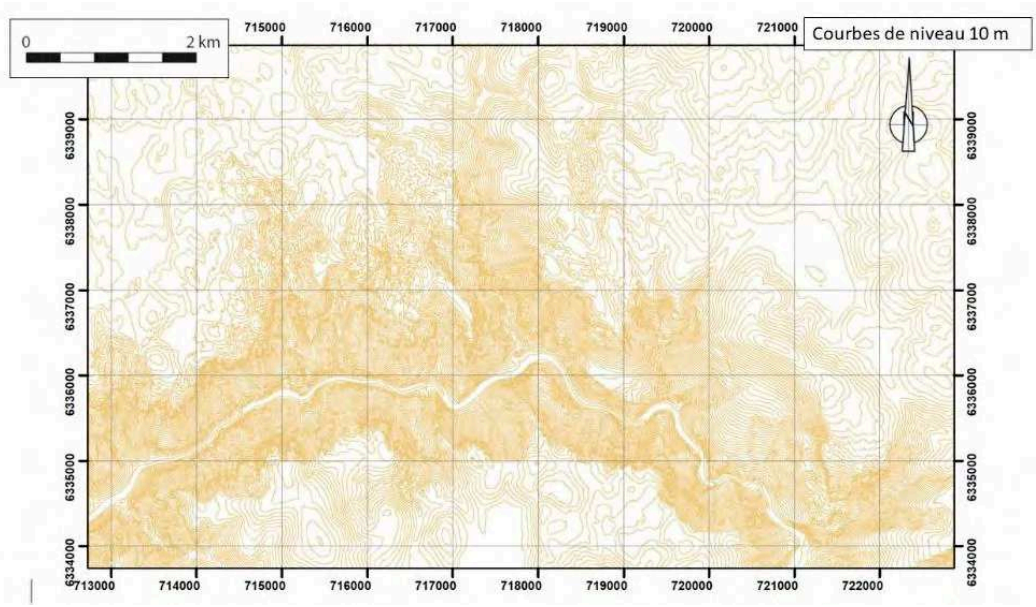


Figure 68 Courbes de niveau calculées à partir du MNT de la région de Montpellier-le-Vieux (France).

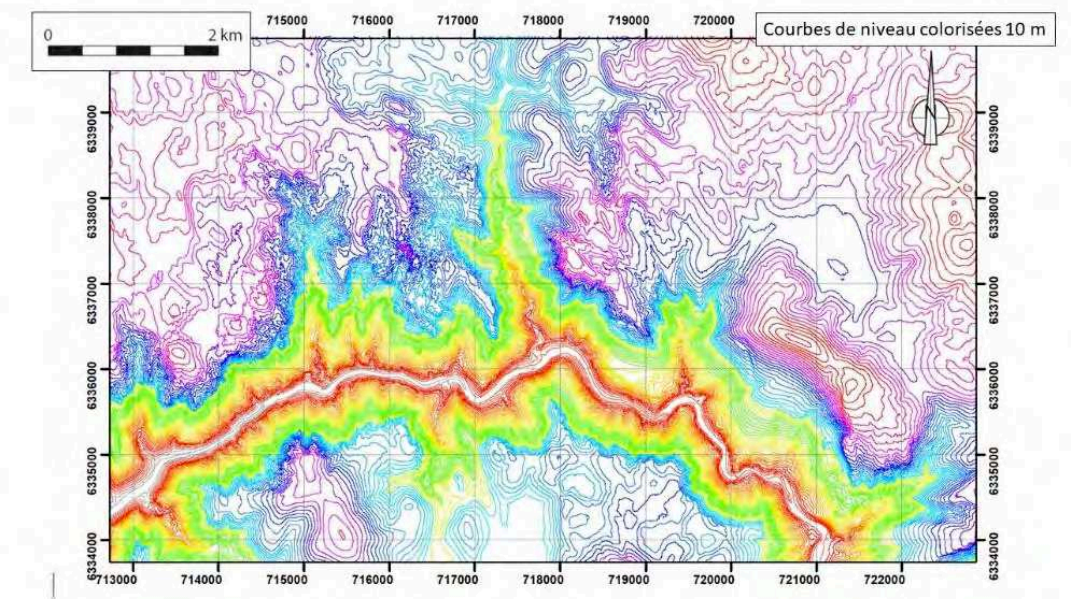


Figure 69 Courbes de niveau calculées à partir du MNT et colorées en fonction des altitudes de la région de Montpellier-le-Vieux (France).

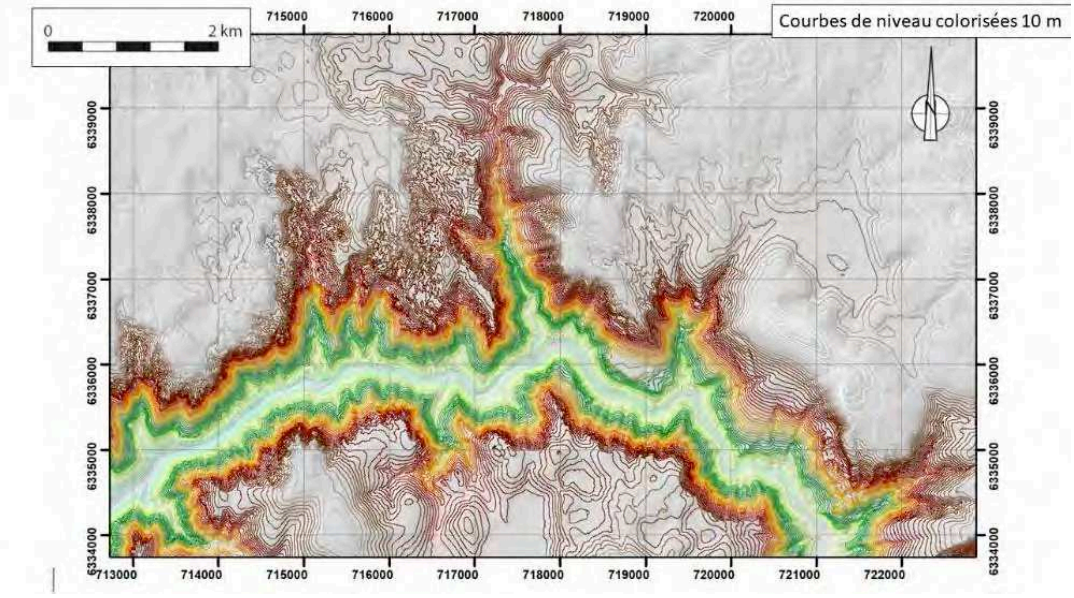


Figure 70 Courbes de niveau calculées à partir du MNT et colorées en fonction des altitudes de la région de Montpellier-le-Vieux (France).

1.3.1.10. Détection automatique des dolines

La fiche méthodologique, située en annexe (p.1128), permet d'extraire automatiquement des contours vectorisés des dolines à partir de calculs effectués sur un MNT avec Qgis[3]. D'autres méthodes existent pour détourer d'autres types de relief comme les dunes de sable (Daynac *et al.*, 2024). À titre d'exemple, cette méthode a été appliquée au Botswana pour l'identification de reliefs en creux, en bleu sur la Figure 448 (p.497) ; une adaptation du code a ensuite permis de détecter également des reliefs en bosse.

1.3.1.11. D'autres méthodes à essayer : courbures, profils Swath et TPI

D'autres paramètres d'analyses des MNT existent comme la courbure, les profils « S*wath* » et les *TPI*.

> *« Les profil "Swath", qui représentent en coupe, la projection des valeurs d'altitudes moyennes maximales et minimales d'une surface rectangulaire d'une largeur de pixels donnée. Ce type de méthode est particulièrement adapté pour caractériser les surfaces d'aplanissement qui ne subsistent que de façon résiduelle dans le paysage. En effet, la courbe des altitudes maximales n'échantillonnera que les points hauts résiduels en s'affranchissant relativement des dégradations postérieures liées à l'incision des rivières. À l'inverse, la courbe des altitudes minimales permet de caractériser le niveau de base actuel grâce à la configuration des profils de rivières.*
> *Les "Topographic Position index" (TPI), soit la différence d'altitude entre une cellule donnée et l'altitude moyenne de ses voisines dans un rayon déterminé. La combinaison de deux calculs de TPI avec des rayons de recherche différents améliore l'identification de formes du relief plus complexes (Ponte 2018 p.149). ».*

[3] Nous remercions ici Johan Jouves de CENOTE pour son aide

1.3.2. Exemples de reliefs karstiques en creux et en bosse sur les MNT

Avant d'appliquer ces traitements des MNT pour rechercher des karsts en Afrique australe, nous devons calibrer la méthode sur une zone karstique bien identifiée et où l'on sait qu'il y a des dépressions karstiques : le karst de Bùzi au Mozambique.
Nous y caractérisons et identifions des critères géomorphologiques liés à la présence du karst. Ce sont des reliefs en creux et en bosse, de type : canyons, buttes karstiques, poljés, dolines, vallées sèches que l'on retrouve en surface des formations carbonatées comme le montre la Figure 71.
Ensuite, ces critères géomorphologiques, identifiés grâce aux différents traitements des MNT, seront recherchés dans d'autres secteurs où les formations carbonatées affleurent mais pour lesquels nous ne savons pas s'ils sont karstifiés.

Le plateau carbonaté de Bùzi, au Mozambique, est karstifié, et nous disposons de bases de données permettant de localiser les cavités (Laumanns, 1998). De plus, Laurent Bruxelles et son équipe ont prospecté ce karst et visité des cavités en novembre 2019 (Beaudet et Fourvel, 2019 ; Fourvel *et al.*, 2022).

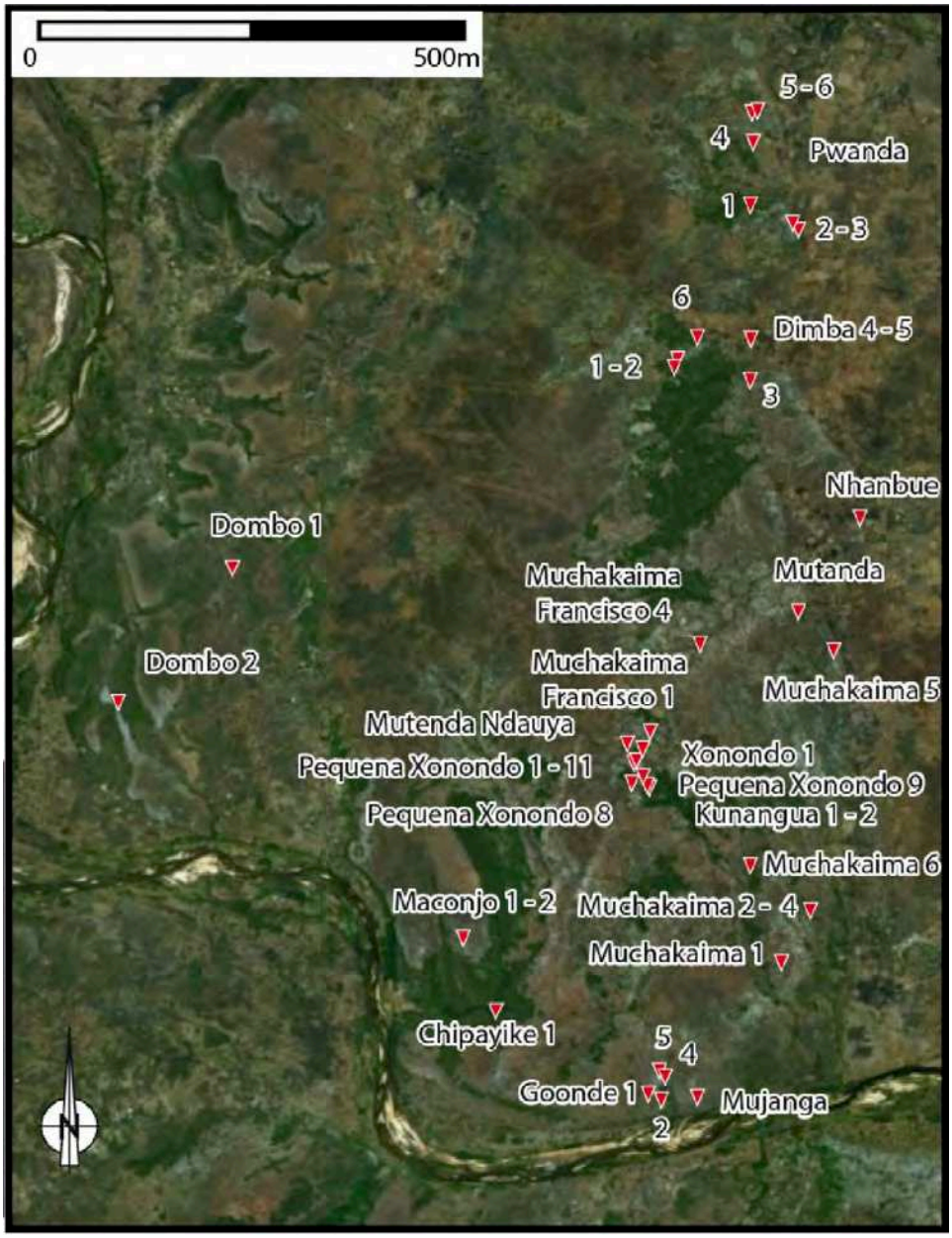


Figure 71 Image satellite et localisation des grottes à Bùzi au Mozambique.

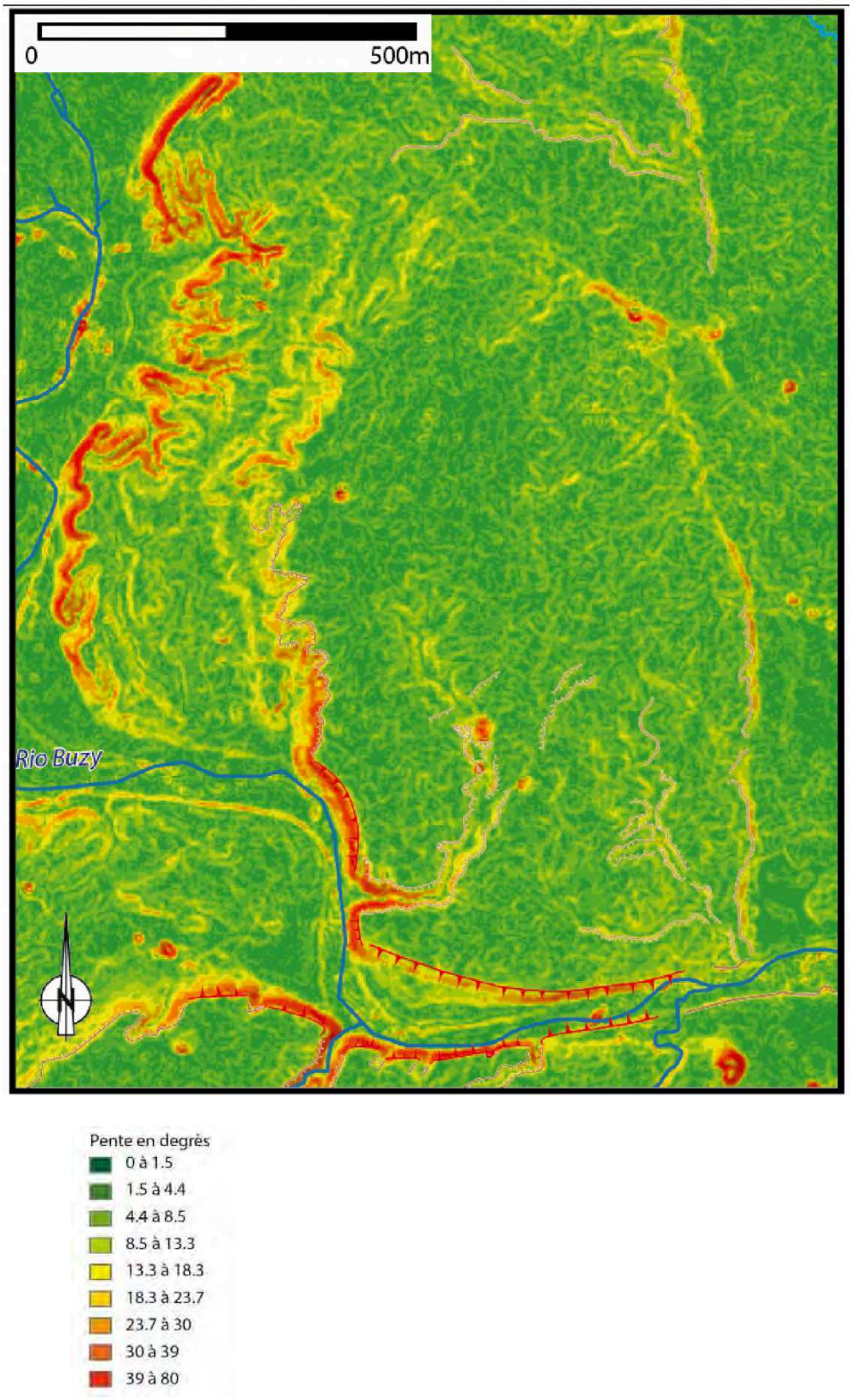


Figure 72 Carte des pentes du MNT JAXA du karst de Bùzi au Mozambique.

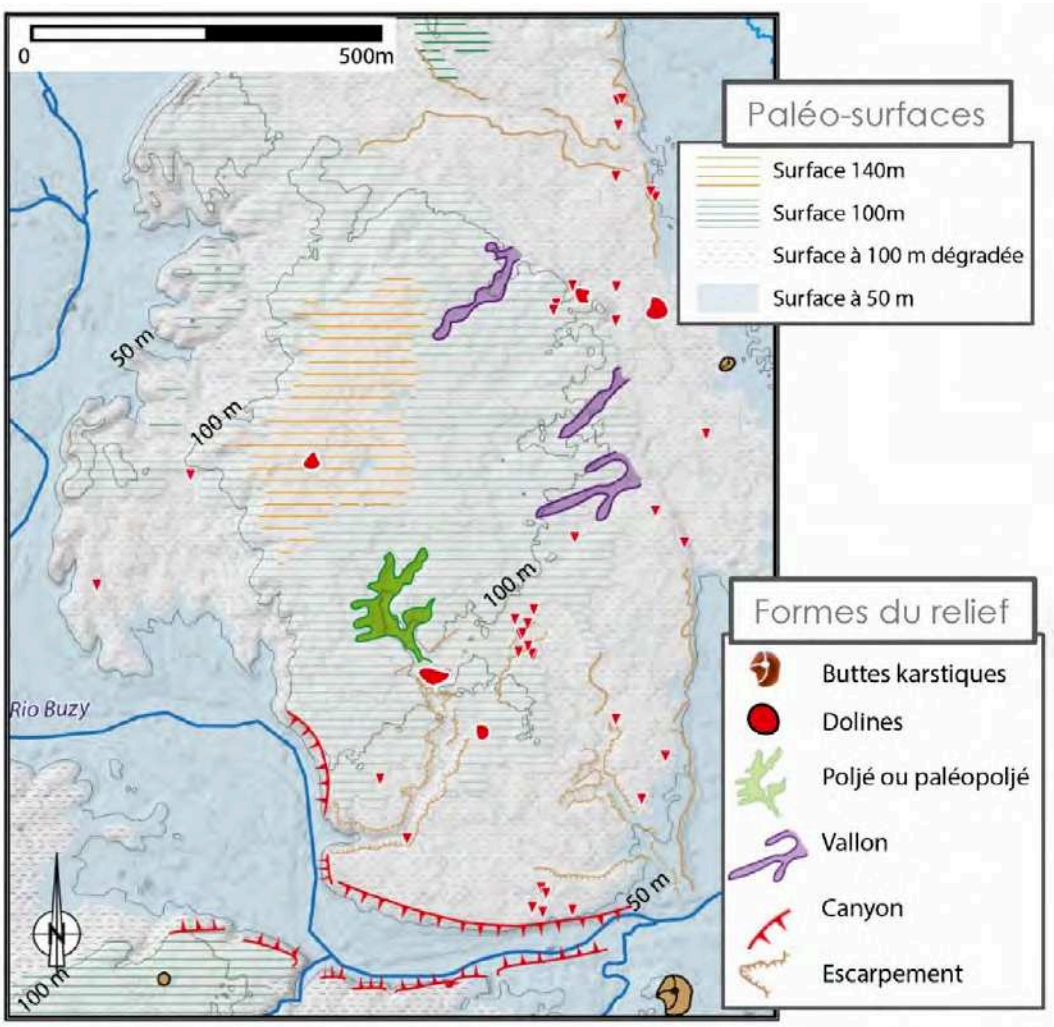


Figure 73 Analyse morphokarstique du karst de Bùzi au Mozambique.

1.3.2.1. Les canyons

Nous venons d'illustrer la représentation des canyons selon les traitements des MNT précédemment (Figure 48 à Figure 51, Figure 54 à Figure 57 et Figure 68 à Figure 70).

1.3.2.2. Les reliefs carbonatés karstifiés et fantômisés

En surimposant, à la fois un modèle ombré, une carte de pentes et une carte hypsométrique, nous obtenons une meilleure visualisation des reliefs karstiques, ici plus particulièrement de la crypto-altération des dolomies sous couverture sédimentaire : la fantômisation que nous traiterons plus tard (p.214). La couverture sédimentaire se distingue par sa faible rugosité mise en valeur en rouge pâle et, en-dessous, la partie fantômisée dont les ruiniformes carbonatées sont nettement visibles car organisés sous forme de couloirs.

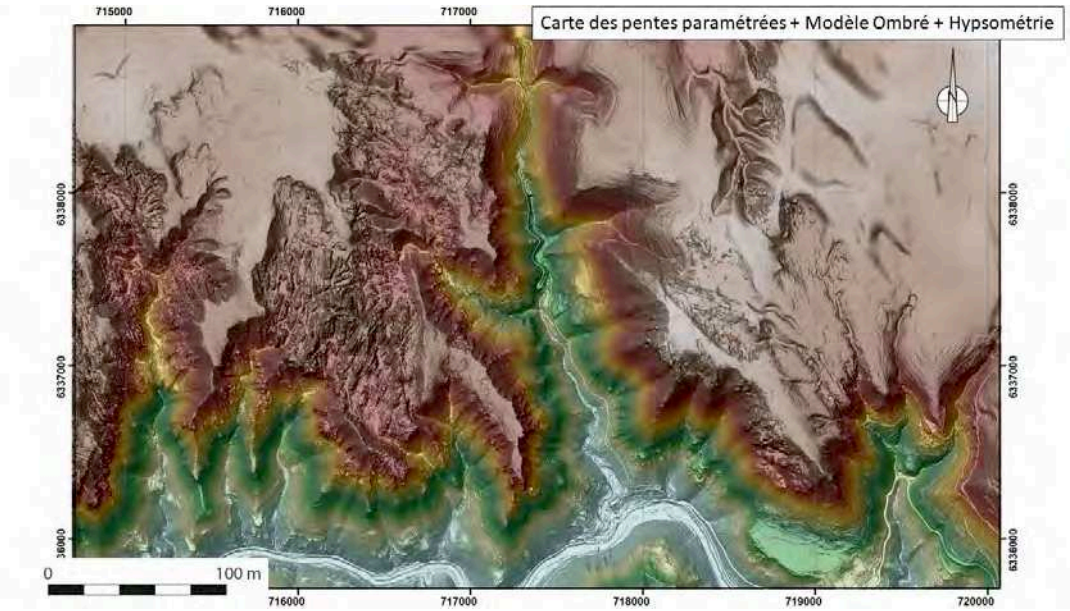


Figure 74 Visualisation de la crypto-karstification des dolomies sous couverture sédimentaire, soutirée par l'incision du canyon (Région de Montpellier-le-Vieux, France).

1.3.2.3. Les poljés

Nous avons précédemment défini les poljés dans le cas du karst de Makapansgat (p.236) et ceux du *Cradle of Humankind* (Figure 65 p.79) mais rappelons ici la définition.

Définition d'un poljé : un poljé est une vaste dépression fermée ou semi-fermée située à la surface des plateaux calcaires. Ils sont typiques des régions karstiques (Nicod, 1972, p.113).
Il se forme lorsque l'eau en surface ne peut pas s'infiltrer rapidement (proximité du niveau de base, couverture imperméable de marnes, d'argiles ou d'altérites). Cette stagnation favorise la dissolution latérale de la roche, créant des bordures de corrosion, comme représenté sur la Figure 175 p.243. Au niveau de ces bordures se situent souvent des cavités jouant le rôle de ponors (embuts) en absorbant l'eau dans le massif calcaire. Les bordures de corrosion s'emboîtent au cours du temps, en fonction de la baisse du niveau de base.
Une autre caractéristique du fonctionnement des poljés est que, lorsque le niveau de base s'élève dans le massif karstique, les poljés peuvent se mettre en eau, et les cavités des bordures de corrosion agissent alors comme des exsurgences. Nous verrons que les paléopans installés au-dessus des affleurements de dolomies joueront un rôle similaire (Chapitre n°4, p.742).

L'identification de poljés en surface des plateaux calcaires par analyse des MNT (cf. Chapitre n°2) sera diagnostique de réseaux souterrains et de grottes en profondeur et donc de potentiels pièges fossilifères comme nous l'avons montré pour les poljés identifiés à Buzi au Mozambique (Figure 71 p.86). Ils sont fréquents en Afrique du Sud (Martini *et al.* 1975).

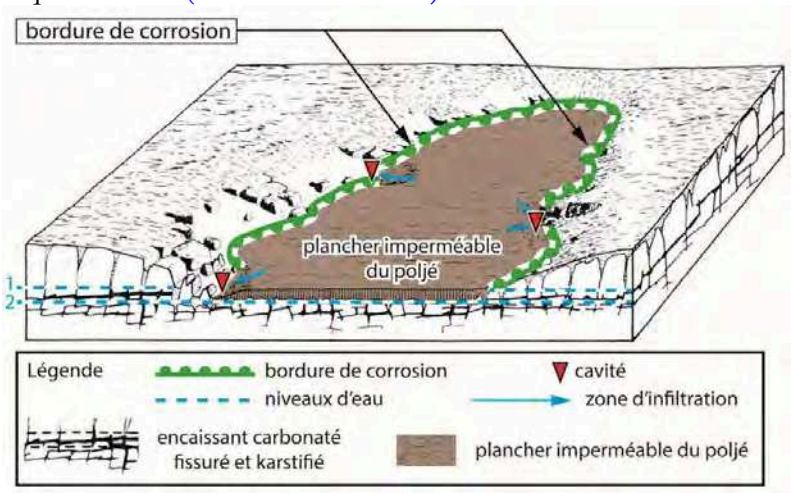


Figure 75 Blocs 3D du fonctionnement d'un poljé avec points d'absorption au niveau des cavités dans les dolomies d'Ottoshoop sur les dolomies, à l'ouest du bassin du Transvaal (Martini et al., 1975, Fig.4).

1.3.2.4. Détection des buttes sur un MNT

Au nord du Zimbabwe, dans la région de Lomagundi et plus particulièrement vers *Hunyani Range*, près de la grotte de Kauka, les observations de terrain de la mission de 2021 ont permis d'identifier des buttes sur le terrain et puis de les détecter sur un modèle ombré et une hypsométrie, calculés à partir d'un MNT (Figure 76). Nous traitons de la méthodologie de traitement du MNT dans le Chapitre n°1 (p.56). L'intérêt de détecter des buttes est que ce sont des formes karstiques pouvant potentiellement contenir des cavités, comme celles décrites au Botswana dans les *Aha Hills* (Figure 526 p.550).

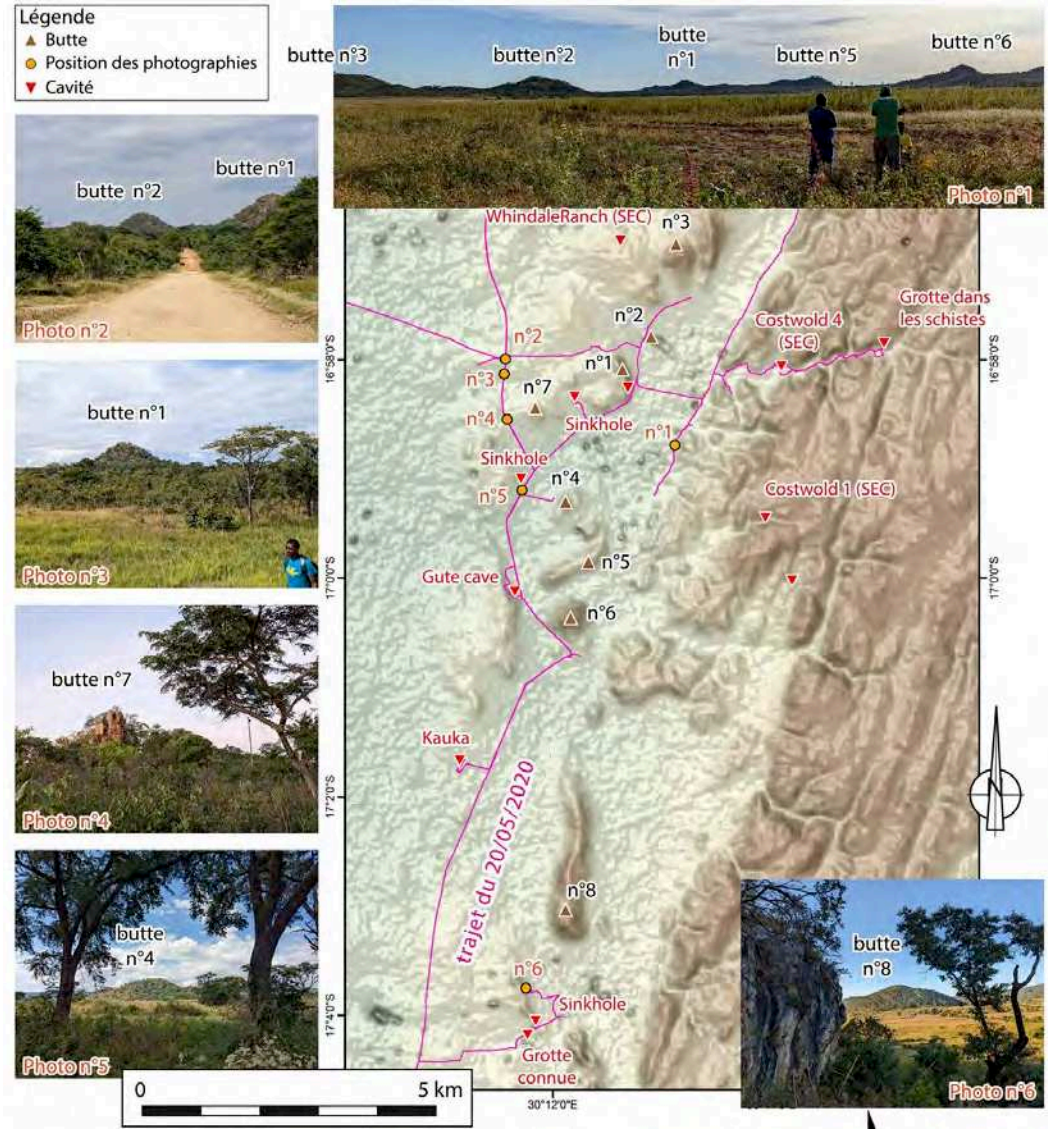


Figure 76 Identification des buttes vues sur le terrain et report sur le modèle ombré, calculé à partir du MNT JAXA (Source des photographies : Bruxelles).

1.3.3. Analyse des images satellites

La visualisation des reliefs par les images satellites permet de faire un bon diagnostic des formes karstiques et des paysages en général.

1.3.4. Visualisation 2,5D

L'ensemble de ces données peut être visualisé en 2.5D grâce aux logiciels SIG tels que GlobalMapper ou, plus particulièrement, ArcScene, développé par ARCGIS. Nous fournissons suffisamment d'exemples de vues 2.5D dans cette thèse, mais nous pouvons reproduire la figure ci-dessous représentant les reliefs du Botswana par Eckardt (2022, Fig.1.7 p.9 et 10) (Figure 77), où l'on aperçoit clairement le Rift de l'Okavango en jaune, dont une partie est occupée par son delta actuel.

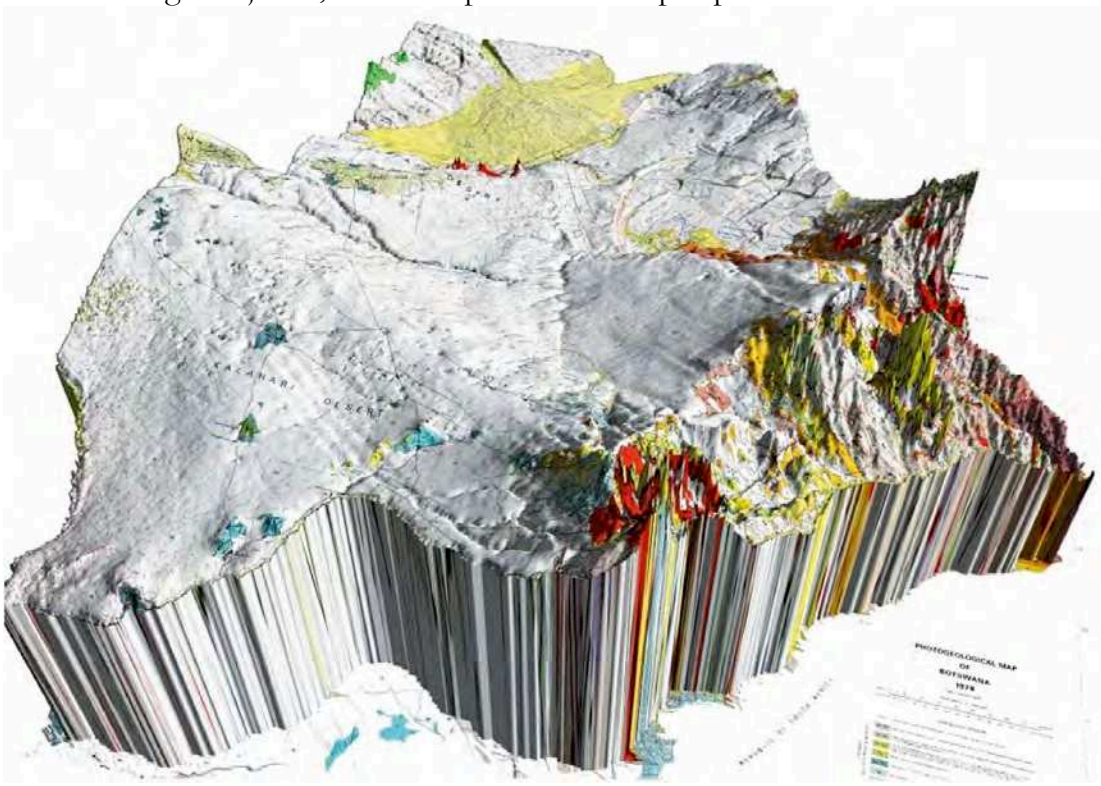


Figure 77 Vue 2.5D exagérée des reliefs du Botswana (Source : Eckardt (2022, Fig.1.7 p.9 et 10).

1.4. CORPUS DE THESE : INVENTAIRE DES DONNEES DE TERRAIN ET CONSTRUCTION D'UNE BASE DE DONNEES DES CAVITES D'AFRIQUE SUBSAHARIENNE

L'objectif de cette thèse est donc d'identifier des karsts situés entre les deux grandes régions fossilifères que sont le Rift est-africain et les karsts sud-africains, comme nous l'avons décrit en introduction (p.1). Ensuite, le but est de prospecter ses karsts lors des missions **HOMINI'KARST*** afin d'y rechercher des fossiles d'Hominines. Dans ce but, nous avons compilé l'ensemble des données de terrain relatives à ces karsts (p.148) pour constituer le corpus de cette thèse.

***HOMINI'KARST** :

Ce programme correspond à des missions d'exploration spéléologique et de prospection archéologique et paléontologique, dirigées par Laurent Bruxelles, en Afrique australe. L'équipe pluridisciplinaire est composée d'experts en paléontologie, archéologie, géologie, géomorphologie, karstologie, ainsi que de journalistes, médecins et photographes. Tous les membres de l'équipe sont spéléologues et formés à la progression en milieu souterrain.

En plus de prospecter les grottes à la recherche de remplissages anciens, ces missions rapportent diverses données de terrain compilées dans des rapports de mission (Figure 78) qu'il convient d'analyser afin d'améliorer notre compréhension des milieux karstiques d'Afrique australe.

Ces éléments constitueront donc un des corpus de la thèse. Une liste détaillée des missions HOMINI'KARST, débutées en 2015, est présentée sur la Figure 82 et la Figure 83 des pages suivantes.



Figure 78 Une partie des rapports de missions HOMINI'KARST qui contiennent des données primordiales concernant les karsts sud-africains.

L'objectif est de compiler l'ensemble de ces données dans un SIG afin de produire des cartes (Figure 110 et Figure 109 p.147), auxquelles nous ajouterons des données de relief mesurées par satellite, selon la méthode que nous avons décrite précédemment (p.23). Le but étant d'identifier des formes karstiques en surface des reliefs carbonatés qui seraient caractéristiques de karst en profondeur.



Figure 79 Logo HOMINI'KARST (Source : Bruxelles L.) et fouille de Koanaka Hill au Botswana.

1.4.1. Les données concernant le Cradle of Humankind (Afrique du Sud) : le karst de référence de cette thèse

Le karst du *Cradle of Humankind* est celui que nous connaissons le mieux en Afrique australe et il sera donc le karst de référence de la thèse. Nous lui consacrerons un chapitre entier, le Chapitre 3 (p.268).

1.4.1.1. Données de terrain d'une mission de trois mois dans le Cradle of Humankind

Tout d'abord, nous avons eu l'opportunité d'effectuer une mission de terrain [4] de trois mois, durant l'été 2021 (du 18/06/2021 au 16/09/2021), dans le *Cradle of Humankind* en Afrique du Sud. L'intérêt était de comprendre et caractériser la genèse de ce karst fossilifère si remarquable. L'objectif était de faire de ce karst **le modèle de karstification de référence** pour les karsts de l'Afrique australe que nous rechercherons. Cette mission a permis d'identifier les critères de reconnaissance géomorphologique d'un karst fantômisé et exhumé de sa couverture d'altérites, que nous pourrions retrouver ailleurs en analysant les reliefs mesurés par satellite. De plus, le secteur des grottes de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai bénéficie d'un LIDAR à haute résolution qui nous a été fourni par Matthew V. CARUANA.

1.4.1.2. L'Habilitation à Diriger des Recherches de Laurent Bruxelles

Antérieurement, ce karst avait fait l'objet d'une étude approfondie réalisée par Laurent Bruxelles depuis 2006 et publiée en 2019 dans son HDR (Bruxelles, 2019). Ce manuscrit est l'un des documents de référence de cette thèse, notamment parce qu'il décrit pour la première fois la spéléogenèse par fantômisation à l'origine des karsts du *CoH*, ainsi que la méthodologie de datation des remplissages karstiques qui est très complexe.

[4] Cette mission a été financée par l'université dans le cadre du programme de mobilité internationale ERASMUS+.

1.4.1.3. Base de données spéléologiques du SEC Caving et SASA

La mission de trois mois effectuée dans le *CoH* nous a permis de fréquenter le club spéléologique local, le *SEC Caving (Speleological Exploration Club)*, qui nous a fourni des inventaires de cavités et l'accès à leurs bulletins spéléologiques. On dénombre 44 bulletins de 1956 à 2021, et il existe également 8 bulletins du *Free Caver*, publiés de 1978 à 1981, comprenant notamment des données sur les réseaux de *Danielrust* au nord du *CoH*, incluant de très grands réseaux *(Nico caves)*.

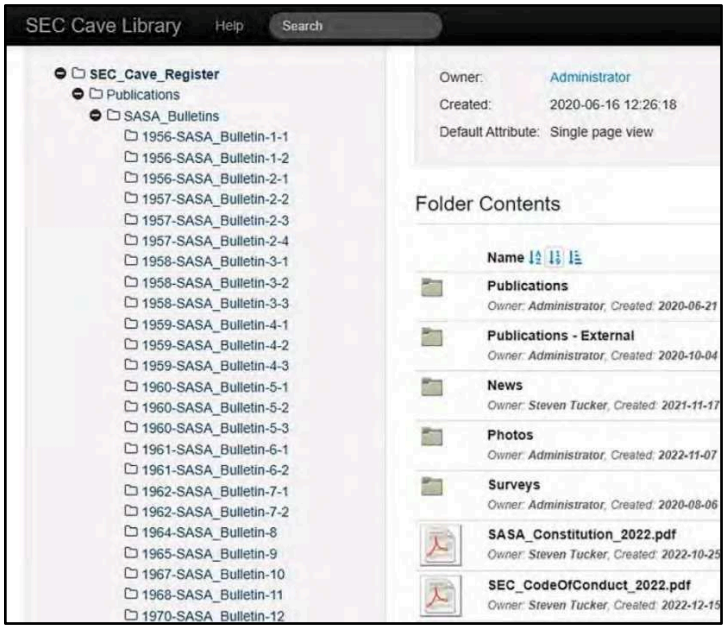


Figure 80 Interface de l'intranet du SEC Caving permettant de télécharger les bulletins spéléologiques et les topographies des grottes d'Afrique du Sud et du CoH.

Nous avons aussi interrogé les rapports de classement des sites du Patrimoine Mondial de l'*UNESCO comme ceux* du *DACEL (Department of Agriculture, Conservation, Environment and Land Affairs)* (1998) et du *COHWHS (Cradle Of Humankind World Heritage* Site (2008).

1.4.2. Les données bibliographiques

Une source majeure de données que nous avons intégrée dans le SIG et qui constitue une part importante du corpus de cette thèse concerne les publications et les rapports scientifiques.

1.4.2.1. Publications et les rapports scientifiques

La découverte et la recherche de grottes fossilifères en Afrique australe ont débuté il y a longtemps (Dart, 1925, 1948 ; Broom, 1936). D'ailleurs, des karsts en dehors du *CoH* ont aussi préservé des fossiles d'Hominines piégés dans le karst (voir la synthèse de Valois et Movius (1953), comprenant la partie rédigée par Dart pour l'Afrique du Sud et par Wells pour le Zimbabwe, le Malawi et la Zambie), ainsi que les synthèses plus récentes comme celle de Val (2014) et celle de Thackeray (2016).

De nombreuses missions ont recherché des grottes en Afrique australe. Certaines avaient uniquement un but spéléologique (Laumanns, 1998, 2017 (Figure 81) ; *Mother Lode Grotto of the National Speleological Society*, 2006 ; Stephens *et al.*, 2022), et ont été d'une grande importance pour cette thèse car elles localisent des grottes. Cependant avant les années 1990 et l'utilisation des premiers GPS, les coordonnées n'étaient pas précises, surtout dans ces territoires reculés de l'Afrique australe.



Figure 81 Comptes-rendus spéléologiques du Berliner Höhlenkundliche Berichte, dont les deux Atlas of the Great Caves and the Karst of Africa (Laumanns, 2017).

Nous avons aussi interrogé :

- Les bulletins de la revue Karstologia (https://www.persee.fr/collection/karst);

1. Le livre de Cotterill (2001) qui mentionne la présence de chauves-souris dans des grottes et pour lesquelles il fournit les positions GPS.

Certains ouvrages anciens font mention de la présence de cavités, tels que :

- Les Colonial reports-Miscellaneous Nyasaland Protectorate rédigés par Dunstan (1908, 1909, 1911) ;
- Et les bulletins coloniaux britanniques du Malawi (Colonial Geology and Mineral Resources, 1950, 1953, 1954, 1955) des années 1950.

Pour le Botswana, nous pouvons citer Cooke (1973, 1975) pour les karsts de Gcwihaba et Lobatse.

Remarque pour la recherche bibliographique :

Certains pays d'Afrique australe, qui étaient d'anciennes colonies, portaient autrefois des noms différents et leurs frontières ont pu changer.

- Le Malawi était appelé Nyassaland ;
- Le Botswana, le Bechuanaland et le Ngamiland ;
- La Tanzanie, le Tanganyika ;
- La Zambie, la Rhodésie du nord ;
- Et le Zimbabwe, la Rhodésie du sud.

C'est donc sous ces noms qu'il faudra les rechercher dans les documents anciens.

1.4.2.2. Bases de données spéléologiques

Certaines des données décrites précédemment ont déjà été compilées sous forme de base de données.

Nous avons interrogé :

- les bases de données spéléologiques
  - *Grottocenter* *https://grottocenter.org/* ;
  - *Karstlink* *https://uisic.uis-speleo.org/wiki/karstlink/index.php/KarstLink* ;
  - SASA Cave Register (qui est privé, au format Google Earth, kmz);
  - *Namibian Cave Register* https://www.namibweb.com/cavesreg.htm;
- la *South African Heritage Resources Agency* https://sahris.sahra.org.za/
- l'inventaire des mines Mindat (https://www.mindat.org/loc-14468.html).

1.4.2.3. Recherche sur internet et sur les réseaux sociaux

Nous avons aussi effectué des recherches sur internet et notamment sur les réseaux sociaux.

La recherche dans les métadonnées des photographies de cavités publiées sur Flickr, par exemple, nous ont permis de vérifier la position de certaines cavités souvent citées mais dont les coordonnées n'étaient pas précises (Photographie de Chingwe's Hole sur le plateau de Zomba au Malawi par Matt Floreen) (https://flic.kr/p/qzYFnt).

Pour la région karstique de Lobatse, au Botswana, nous avons trouvé des informations sur le site internet du spéléologue John Hargreaves et de leur expédition de 2006 qui nous a permis d'avoir des informations de localisation des grottes et des photographies et nous avons pu le contacter directement. (https://www.chilembwe.com/botswana/reports.html)

Nous avons trouvé de précieux documents sur les grottes de Gcwihaba sur le groupe facebook de « *Independent Cave Explorers* » dont des relevés gravimétriques des buttes karstiques et des topographies de grottes (https://www.facebook.com/profile.php?id=100067775523975).

Nous avons eu des informations sur des cavités au Malawi, en envoyant des mails à des escaladeurs professionnels.

1.4.2.4. Les missions HOMINI'KARST et les karsts prospectés depuis 2015

Les données majeures constituant le corpus de la thèse proviennent des missions HOMINI'KARST dirigées par Laurent Bruxelles depuis 2015 en Afrique australe.

1.4.2.4.1. Liste des missions HOMINI'KARST

Dans la zone qui nous intéresse, en gris sur Figure 1, plusieurs karsts sont déjà identifiés, et certains ont même fait l'objet de prospections spéléologiques, archéologiques et paléontologiques.

Nous décrivons ici brièvement les missions HOMINI'KARST qui se sont déroulées dans différents secteurs karstiques en Afrique australe. Certaines missions, n'appartenant pas à HOMINI'KARST, ont été ajoutées à cette liste, car Laurent Bruxelles y a participé et parce que nous avons contribué à réaliser les cartes de prospection.

1. **Mozambique / Malawi**

Cette thèse, commencée en 2019, avait pour objectif initial d'identifier des karsts au Mozambique et au Malawi, en vue de leur prospection prévue en 2020. Cependant, la pandémie de Covid a perturbé le calendrier des missions pendant ces deux premières années, rendant les missions impossibles.

La deuxième mission majeure de cette thèse a été la mission de prospection au Mozambique et au Malawi pendant quatre semaines en septembre 2022. Une grande partie du temps de travail de la thèse entre le début de celle-ci en mars 2020 et cette date a consisté à identifier des formations carbonatées susceptibles d'être karstifiées et que nous pourrions prospecter pour y rechercher des grottes et des fossiles. Nous fournissons les éléments les plus importants de cette réflexion dans le Chapitre n°5 (p.899).

Cette mission nous a permis d'étudier les karsts de Buchane, de Kirk Range et de Fingoe. Ces données s'ajoutent à celles collectées lors des missions antérieures d'HOMINI'KARST qui ont prospecté le karst de Cheringoma et de Bùzi/Sofala en 2019. Ces informations ont été cruciales pour réaliser un grand transect morphokarstique de plus de 3000 km (Figure 907 et Figure 1085, p.903).

Human Origin Mozambique and Malawi **HOMME**, (financement Miti80 et IFAS)

- Mars 2017 : Au nord-est du Mozambique. De Pemba situé sur la côte est jusqu'à Metangula à l'ouest sur les rives du lac Malawi (Bruxelles, 2017) ;

- Novembre 2019 : prospection dans les karsts de Cheringoma et de Bùzi/Sofala au centre du Mozambique (Beaudet et Fourvel, 2019; Fourvel *et al.*, 2022) ;

- Du 30/08/2022 au 22/09/2022, avec la traversée, aller-retour, depuis le sud du Mozambique jusqu'au nord du Malawi (Chadelle et Bruxelles, 2022).

2. Botswana / Namibie

Le karst de *Gcwihaba Hills* et *Koanaka Hills* au Botswana, qui s'ouvre vers 1000 m d'altitude, est identifié depuis longtemps (Cooke, 1973, 1975, 1980, 1995 ; Cooke et Baillieul, 1974 ; Pickford et Mein, 1988 ; Pickford, 1990 ; Pickford *et al.*, 1994, 2014 ; Senut, 2008) et a révélé des remplissages karstiques fossilifères attribués à -3,2 Ma (Pickford et Mein, 1988) et de *Papio* (babouins) de 317 000 ±114 000 ans (Williams *et al.*, 2012).

Plus haut en altitude, à 1380 m d'altitude, et à l'ouest, à Otavi, en Namibie, été découvert un primate d'âge miocène, nommé *Otavipithecus*, vieux de 13 Ma, piégé dans les remplissages karstiques de la mine de **Berg Aukas** (Conroy *et al.*, 1992; Pickford *et al.*, 1994; Pickford et Senut, 2010; Pickford *et al.*, 2014; Pickford, 2019). Cette découverte montre l'intérêt du karst d'Otavi, le numéro n°8 de la Figure 109, dans son aptitude à piéger des fossiles depuis le Miocène.

De nombreuses missions ont été menées dans ces régions pour rechercher des fossiles (Pickford et Senut, 2010 ; Pickford *et al.*, 2014 ; Pickford, 2019). Depuis 2015, Laurent Bruxelles dirige des missions au Botswana et en Namibie. D'abord dans les *Aha Hills*, une surface à buttes karstiques, qui s'étend de part et d'autre de la frontière. Enfin, depuis 2021, les missions se concentrent uniquement sur le volet botswanais des karsts de *Gcwihaba* et *Koanaka Hills* (Bruxelles, 2015 ; Bruxelles *et al.*, 2016, 2017, 2018, 2019, 2021, 2022 ; Dandurand *et al.*, 2019 ; FFS, 2024 ; Fourvel *et al.*, 2024).

Nous avons eu l'opportunité d'effectuer trois missions d'un mois chacune, en décembre 2021, décembre 2022 et décembre 2024 avec l'équipe d'HOMINI'KARST pour étudier ces karsts botswanais.
Nous avons réalisé un transect morphokarstique ouest-est, de plus 900 km de longueur (Figure 908 p.904) de ces karsts afin de réfléchir à l'impact des variations des niveaux de base commandés par l'Okavango sur le karst et les paysages. Les résultats de la mission de décembre 2024 viennent d'être intégrés **au modèle SIG des karsts** et nous ont permis de reconstituer les paléoenvironnements qui régnaient autour des grottes pendant les dépôts des remplissages fossilifères que nous fouillons actuellement. Notamment, en 2024 la découverte d'os de poissons ainsi que des os de plus 25 espèces d'oiseaux, dont des taxons étroitement liés à l'eau tels que des canards (Anatidés) et une grande diversité de limicoles (*Charadriiformes*). Ces découvertes suggèrent l'existence dans le passé d'un système hydrique complexe et d'une vaste étendue d'eau. Nous en discuterons dans le Chapitre n°4 (p.473).

Human Origin in Namibia **HON** (financement MEAE, ministère de l'Europe et des Affaires Etrangères)

- Du 10 au 22 octobre 2015 : Aha Hills (Namibie) (Bruxelles, 2015) ;
- Du 3 au 17 Décembre 2015 : Etosha et Aha Hills (Namibie), Tsodilo Hills (Botswana) (Bruxelles, 2015) ;
- Du 24 avril au 8 mai 2016 : Aha Hills (Namibie) ;
- Du 29 novembre au 13 décembre 2016 : Otavi et Aha Hills (Namibie), Gcwihaba (Botswana) (Bruxelles *et al.*, 2016, Dandurand *et al.*, 2019);
- Du 14 octobre au 15 décembre 2017 : Otavi, Grootfontein, Aha Hills (Namibie) (Bruxelles *et al.*, 2017) ;
- Septembre 2018 : Aha Hills, Otavi (Namibie) ;
- Décembre 2018 : Otavi, Harasib (Namibie) (Bruxelles *et al.*, 2018).
- Septembre 2019 (du 8 au 22/09/2019) : Grootfontein-Otavi-Tsumeb : Berg Augas, Nosibn Harasib 3, Jägersquelle (Namibie) (Bruxelles *et al.*, 2019).

Hominins in Botswana : Karst Research Project **HOB**
&
HOMINI'KARST Human origins in Botswana Karst Research Project

- 2021 (du 15/11/2021 au 11/12/2021) à Gcwihaba et à Koanaka (NO Botswana) (Bruxelles *et al.*, 2021) ;
- 2022 (du 22/11/2022 au 18/12/2022) à Gcwihaba, à Koanaka (NO Botswana) et à Otavi (Ouest de la Namibie) (Bruxelles *et al.*, 2022 ; Fourvel *et al.*, 2024) ;
- 2023 (du 07/12/2023 au 21/12/2023) à Gcwihaba, à Koanaka (NO Botswana) (FFS, 2024) ;
- Juin 2024 Lobatse (SE Botswana) et Makapansgat (Nord de l'Afrique du Sud)
- 2024 (du 19/11/2024 au 12/12/2024) *Aha Hills, Gcwihaba* et *Koanaka Hills* (NO Botswana)

Les cartes du Chapitre n°4 synthétisent l'ensemble de ces missions (Figure 448 p.497).

3. Zimbabwe

Laurent Bruxelles participe également aux missions de terrain du projet HOPE.Z au Zimbabwe. Ces missions sont dirigées par Raphaël Hanon et Sandrine Prat. Elles ont pour but de rechercher des fossiles d'« Hominines du Plio-Pléistocène et [des] paléoenvironnements au Zimbabwe ».

https://hnhp.mnhn.fr/fr/actualites/rs-prospections-et-decouvertes-recentes-en-afrique-de-lest-zimbabwe-kenya-avec-2

Pour ces missions, nous avons fourni des cartes des formations carbonatées et des analyses de relief pour identifier les karsts et aider à localiser les cavités (disponibles dans le Chapitre n°5 p.989). Ils ont prospecté le karst de Lomagundi en mai 2022, le karst de Sanyati en août 2023 et le karst de Chimanimani en septembre 2023, rapportant ainsi des données de terrain cruciales à intégrer dans notre modèle karstique.

Trois missions de terrain du projet HOPE.Z au Zimbabwe :

- Lomagundi en mai 2022 ;
- Sanyati en août 2023 ;
- Chimanimani en septembre 2023.

4. Zambie

La mission Lusakarst en Zambie a permis de prospecter, en septembre 2024, les grottes de Chipongwe et *Leopard Hill*, pour laquelle nous avons aussi préparé des cartes de prospection que nous avons indiquées dans le 5.12 (p.995).

1.4.2.5. Chronologie des missions de terrain HOMINI'KARST

La chronologie de ces missions est compilée dans les figures suivantes (Figure 82 et Figure 83).

Les données collectées lors de ces missions sont primordiales pour notre recherche de grottes et de karst en Afrique australe et elles alimentent le SIG des karsts de l'Afrique australe que nous construisons. Nous le présenterons dans la partie qui suit.



Figure 82 Chronologie des missions de terrain HOMINI'KARST avant la thèse.

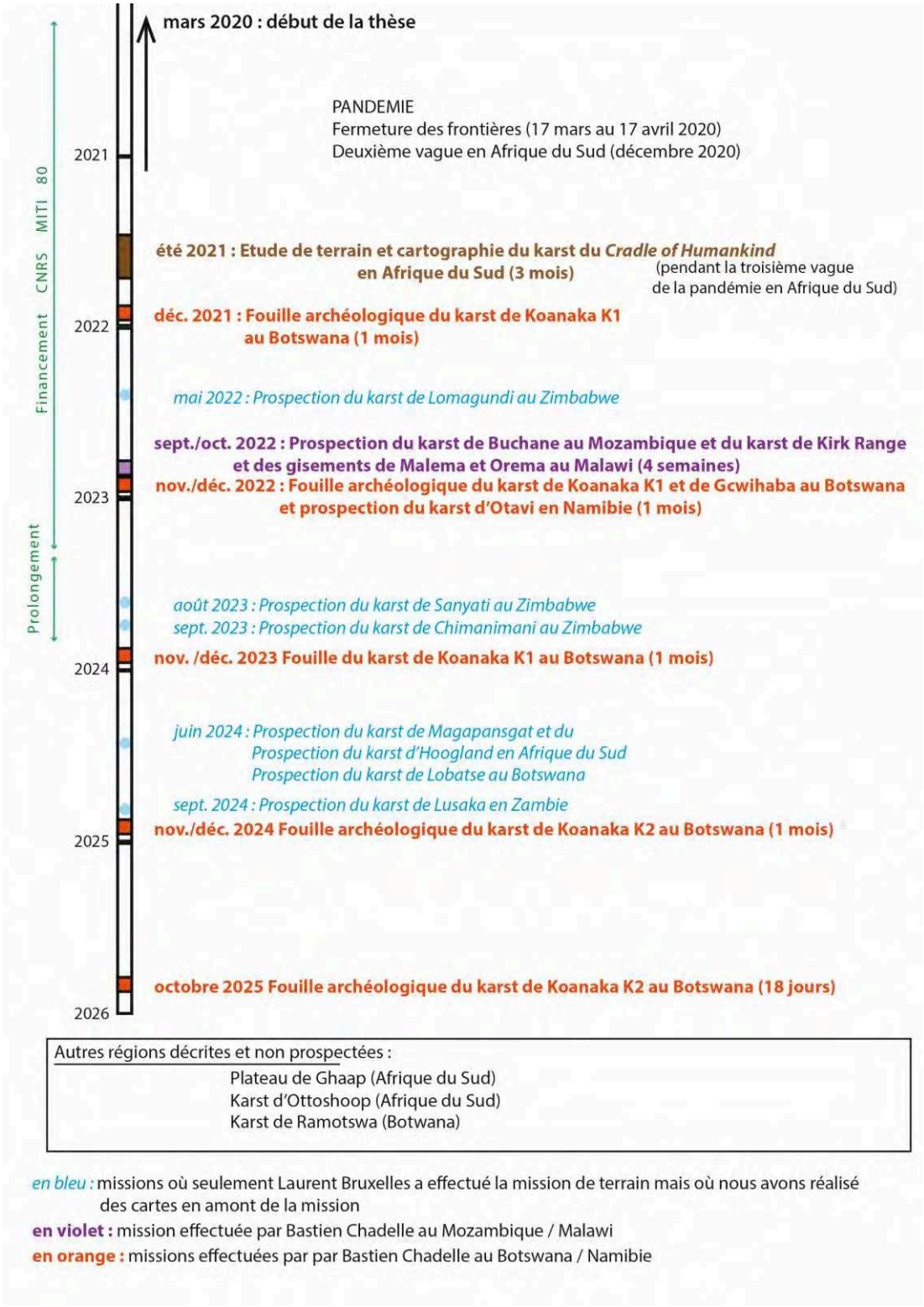


Figure 83 Chronologie des missions de terrain pendant la thèse.

1.4.3. Résultats de l'inventaire des données spéléologiques

Après avoir (1) localisé les formations carbonatées à l'affleurement à partir de l'étude des cartes géologiques, puis (2) sélectionné les formations carbonatées karstifiées en surface à l'aide de différents traitements des MNT décrits précédemment, nous pouvons maintenant (3) chercher à confirmer la présence de cavités dans l'ensemble des données citées précédemment.

Nous avons ainsi constitué une base de données des cavités de l'Afrique australe, compilant plus de 1000 cavités, issues de diverses sources. Le Tableau 2 ci-dessous présente le nombre de cavités par pays d'après deux sources majeures : GROTTOCENTER et le SASA. La procédure d'extraction des données issues de GROTTOCENTER est détaillée en annexe (p.1129).

Le tableau des cavités, de 28 pages, se situe en annexe (Tableau 59 p.1090). Un tableau compilant les bases de données est indiqué ci-dessous (Tableau 4).

1.4.3.1. Données ponctuelles : les entrées des cavités

1.4.3.1.1. Inventaires spéléologiques par pays

Pays de l'Afrique subsaharienne	Cavités dans notre base de données (Tableau 59 p.1090)	SASA
Afrique du Sud	66	2299
Ethiopie	220	
Mozambique	137	22
Madagascar	101	
Congo Démocratique	70	
Namibie	56	46
Gabon	36	
Tanzanie	34	
Centrafrique	40	
Congo République	23	
Cameroun	18	
Zimbabwe	18	39
Zambie	18	2
Rwanda	17	
Somalie	12	
Kenya	10	
Botswana	8	16
Ouganda	6	
Tchad	4	
Mali	4	
Malawi	3	
Angola	3	
Burundi	3	
Lesotho	2	16
Nigeria	1	
Swaziland	1	1
Somme des cavités	911	2437

Tableau 2 Cavités connues par pays en Afrique subsaharienne.

Nom pays AFRIQUE SUBSAHARIENNE	Nb de grottes Grottocenter	Nb de grottes notre base de données
Kenya	0	10 (attention grottes de laves non dénombrées)
Ouganda	0	0
Congo	8	10
Madagascar	39	76
Gabon	15	36
Guinée Eq.	0	0
Cameroun	6	6
Ethiopie	224	?
Somalie	3	12
Djibouti	0	0
Erythrée	0	0
Soudan	0	0
Tchad	0	0
Niger	0	0
Nigeria	1	1
Benin	0	0
Niger	0	0
Mali	4	?
Afrique du Sud	16	66
Congo Démocratique	16	79
Mozambique	81	137
Namibie	3	23(+)
Tanzanie	31	32
Zambie	5	6
Malawi	0	2
Botswana	0	8
Zimbabwe	10	14
Somme des cavités	462	485

Tableau 3 Nombre de cavités connues par pays. Source des données pour les cavités par pays.

PAYS	NOM	Lien de téléchargement	SOURCE	Publication	NB	Année
Afrique du sud	University of the Witwatersrand inventory	https://wiredspace.wits.ac.za/server/api/core/bitstreams/1b224de3-f224-4d06-8831-947b085961e6/content	ZIPFEL & BERGER	New Cenozoic fossil- bearing site abbreviations for collections of the University of the Witwatersrand	100	2009
	SASA Cave Register	http://caveregister.sec-caving.co.za/	SASA		2166	2023
	SEC Cave Library	https://www.sec-caving.co.za/	*SEC Caving*			
	Dolomite Caves Of The Eastern Transvaal		Müller Horst O.	Dolomite Caves Of The Eastern Transvaal A Free Caver Monograph	39	1985 - 2007
			Laumanns	Atlas of the great caves and the karst of africa (3 rd edition)		2017
	Grottocenter	https://grottocenter.org/	Grottocenter		15	2020
	SAHRA	https://sahris.sahra.org.za/				

Tableau 4 Sources des données des cavités d'Afrique du Sud

Mozambique			Grottocenter			
	Mozambican caves list LB-v2bc		Bruxelles (2019)			
			Laumanns	LAUMANNS M. (1998) Mozambique 1998: Report on the European Speleological Project "Cheringoma 1998". *Berliner Höhlenkundliche Berichte*, 2,p.1-75		1998

Malawi			Grottocenter			

Botswana			Museum if Gaborone			2021
			Grottocenter			

Namibia			Grottocenter			
	Waxhou-caves-		SASA	n°41		2015
		https://www.namibweb.com/cavesreg.htm				

République démocratique du Congo DRC			Grottocenter			
	Kwilu 84 Expédition spéléologique		Quinif 1985			1985, 1986, 1989, 1992
	Les gisements de fer de la région de Kisanga (Shaba méridional)		Roland BUFFARD			Karstologia n°21 1983

République du Congo			Grottocenter			
	Expédition spéléologique Congo 1984 FFS	http://rapports-expeditions.ffspeleo.fr/1984-004.pdf	SpéléoClub Albigeois			
			Laumanns			

Zambie			Grottocenter			
	Lusaka		Lawrence S. Barham			1995

Tanzanie			Grottocenter			

Tableau 5 Données spéléologiques pour les autres pays.

1.4.3.1.2. Tableau de synthèse des données géologiques des karsts du Mozambique.

Le Tableau 6 classe les données spéléologiques du Mozambique en fonction des formations géologique carbonatées dans lesquelles elles se situent. Cette comparaison permet de privilégier la prospection des formations géologiques les plus karstifiées.

Karstic massif	Geologic Formation	Age	Name	Lithologic description	Thickness	Area (km2)	Caves	Caves names
CHERINGOMA	Quissirua/Repa	Cenozoic (Eocene)	T1m	Numulitic limestone or ? reef, mainly clay	30 m - 1400 m	311	2	Ninga Manguenje, Western Codzo Cave
	Sancul / Cogune	Cenozoic	T2m	Fossileferous reef limestone, sandy at the base	?	633	8	Ninga Miriango, Eastern Codzo, Smalller Eastern Codzo, Ninga Niamabawa, Ninga Cupicua, Mazamba Valley, Codzo River
BUCHANE	Jofane / Morrumbene	Cenozoic	T2m(a)	Reef limestone or sandy limestone	11 to 50 m	12689	11	Magochene, Embondeiro, Cagi(Caverna X), Inhaluele, de Cobra, Caverna VIII, Caverne VI/Via/II
BUZI	Quissirua/Repa	Cenozoic (Eocene)	T1m	Numulitic limestone or ? reef, mainly clay	30 m	566	2	Nyaboa caves, Boca complex
	Cheringoma	Cenozoic	T1m(a)	Numulitic limestone and glauconic sandstone with limestone at base	200 m	39	21	Dimba, Mutanda Francisco, Xonondo, Kunangua, Muchakaima, Chipayike, Goonde
	Cheringoma	Cenozoic	T1m1			99	8	Pwanda, Maconjo, Chipayike, Gruta Maruluwire

Tableau 6 Synthèse des données géologiques des karsts du Mozambique.

Nous décrivons en annexe plusieurs fiches méthodologiques pour convertir des données GPS (p.1130).

1.4.3.2. Données vectorisées : les plans topographiques des cavités

Après avoir présenté les données ponctuelles spéléologiques (position géographique des entrées de cavité), présentons les données vectorisées, comme les plans de cavités.

L'analyse des plans topographiques de grottes donne des indices sur le type de spéléogenèse à l'origine des réseaux karstiques. Par exemple, les réseaux labyrinthiques montrant des couloirs conjugués et orthogonaux, plus hauts que larges, traduisent un processus de spéléogenèse par fantômisation, que nous présenterons plus loin (p.214) (Bruxelles, 2019, 2022). C'est le cas de la grotte de Sterkfontein en Afrique du Sud (Atlas Figure 1192, p.1219) ou de certaines grottes du Mozambique (Figure 1374 p.1413) comme *Codzo River Cave* (Laumanns, 2017c) (Figure 1375 p.1414), Dimba n°2 (Laumanns, 2017b, p.232) ou Ninga Miriango (Laumanns, 2017c) (Figure 1376 p.1415).

1.4.3.2.1. Report en surface des réseaux

Les cartes, ci-dessous (Figure 84 et Figure 85), illustrent le **report en surface** que nous avons réalisé des plans topographiques des grottes de Gcwihaba, situées au nord-ouest du Botswana, et que nous présenterons dans le 4 (p.473). Ce type de report permet de comparer les formes de relief et les couvertures de surface et la présence des réseaux karstiques.

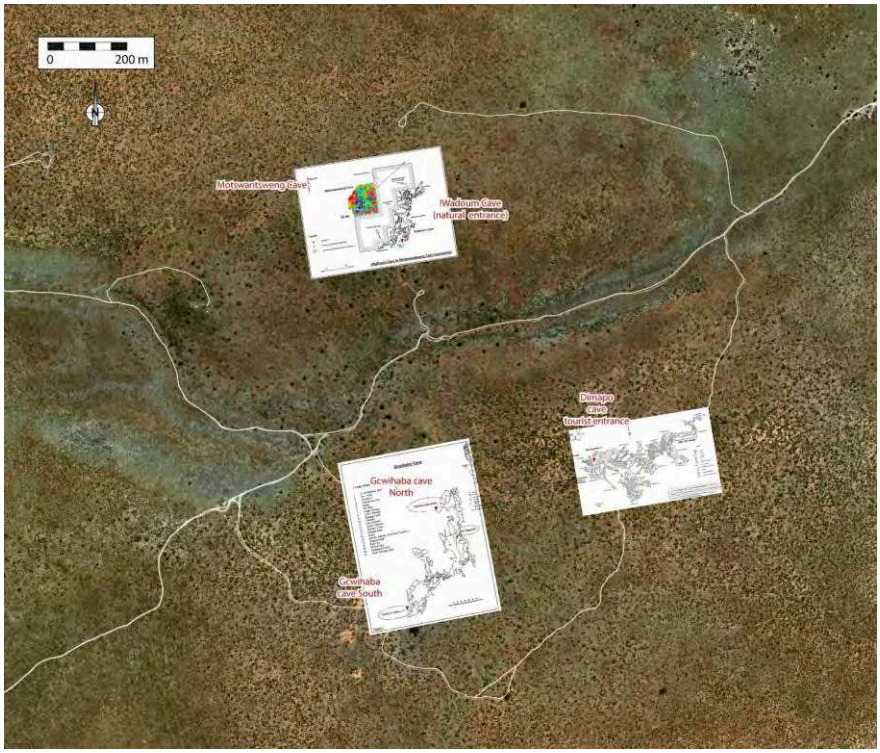


Figure 84 Géoréférencement des topographiques et calcul des déclinaisons magnétiques.

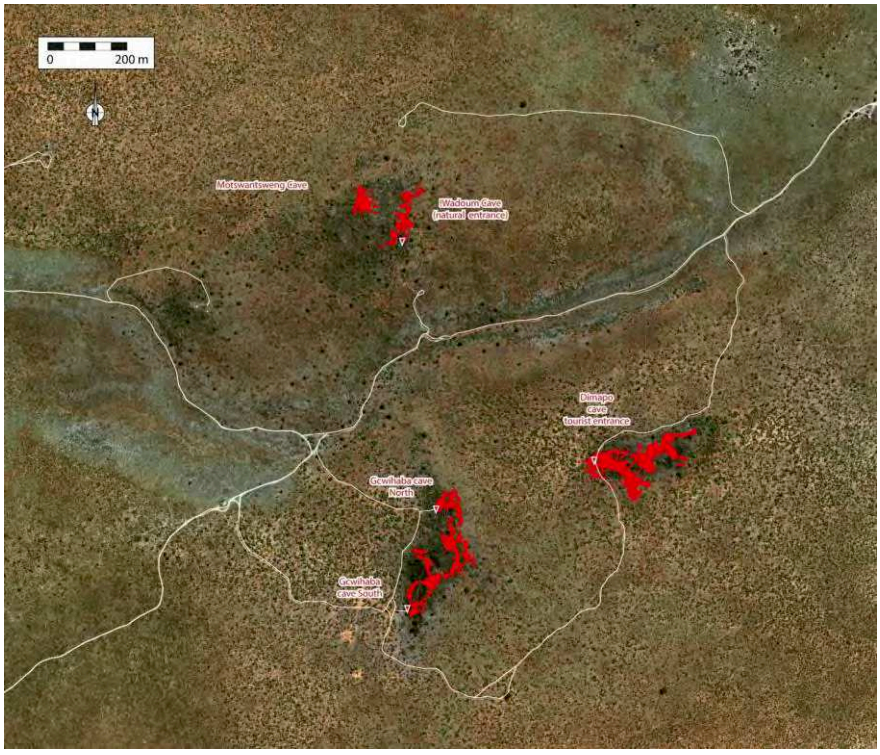


Figure 85 Dessin vectorisé des topographies.

1.4.3.2.2. Précisions et erreurs concernant les données vectorisées (reports des réseaux karstiques en surface)

Des erreurs peuvent se produire pendant :

- les changements d'échelle ;
- le géoréférencement de la topographie par rapport au point GPS des entrées de grotte et des avens ;
- le calcul des déclinations magnétiques par exemple si la date des levées n'est pas indiquée, ou bien s'il n'est pas indiqué si c'est le nord magnétique ou le nord géographique. Parfois les séances de levé se sont effectuées sur plusieurs missions, à plusieurs mois d'intervalle ce qui peut apporter des erreurs de calcul de déclinaison.

Nous avons compilé nos calculs de déclinaison dans le Tableau 60 (p.1106).

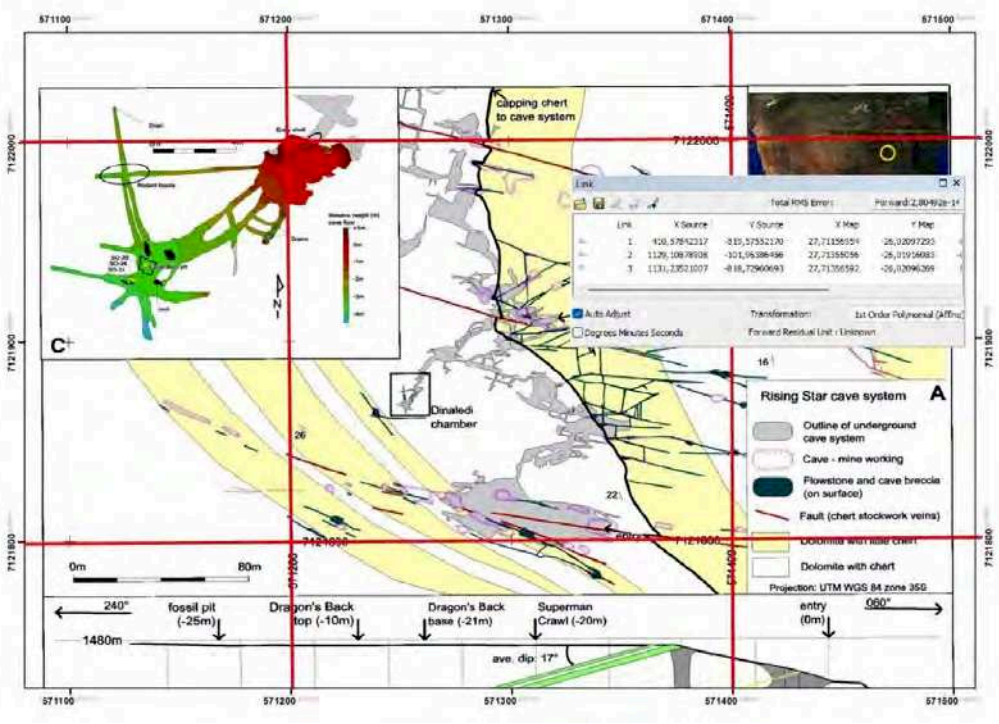


Figure 86 Méthode de géoréférencement de la grotte de Rising Star (Dirks et al., 2015) et indication des points de calage et du quadrillage en WGS84 UTM Zone 35S.

Décrivons maintenant la méthode de calcul de la déclinaison magnétique d'un plan topographique de grotte.

1.4.3.3. Calcul de la déclinaison magnétique lors d'un levé de terrain

Lorsque l'on effectue des levés de terrain à la boussole, par exemple pour faire la topographie d'une grotte, on s'oriente par rapport au nord magnétique. Cependant, celui-ci varie au cours du temps, ce qui rend nécessaire un recalage des plans par rapport au nord géographique, qui est la référence utilisée sur les cartes.

La déclinaison magnétique peut être facilement calculée à l'aide de ce site internet : https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#declination

Il suffit d'indiquer la position géographique et la date. C'est pour cette raison que la date du levé doit être mentionnée sur les topographies.

Le site fournit alors un angle en degrés minute, qu'il faut convertir en degrés décimaux.

Pour cela, on utilise ce site internet : https://fr.planetcalc.com/1129/

Nous indiquons un exemple de calcul de déclinaison pour la topographie d'une grotte en annexe (p.1134).

1.4.3.4. Tableau des déclinaisons

Nous avons compilé les déclinaisons que nous avons calculées dans le tableau ci-dessous (Tableau 7).

Noms	alti--tude (m)	Date	Déclinai--son (°)	Source
Grobler N ou Grobler 1		2017	18,57	Trucker S. Grove A., 2018
Koelenhof (avant Grobler)	1485	1972	17,02	SASA 1972
Sterkfontein (Silberberg grotto, Exit series, Terror Chamber, Milner Hall Name Chamber, Fossil Chamber)			15,87	Martini 2003 (Fig. 2)
Lincoln - Fault cave			16,2	Boshoff 1990
Armaggedon		2013 à 2015	26,48	Trucker, 2015 Bulletin SASA Volume 41 p.39 à 47
Rising Star *(Westminster, Empire, Bedspring, Silt)*		1985	15,45	Harris J., Rees D., Möller H., Priddle C., van der Hoodt R. 1985
Eel	1435	?		Möller H., Priddle C., Redmayesmith, Harris J., Rees D.
Eel		07/03/ 1988	16,3	Martini, Bulletin SASA, Volume 31, p.43

Villa Louisa III	2014	18,22	Boshoff P., Hunter R., Tucker S.
Villa Louisa I	2014	18,22	Boshoff P., Hunter R., Tucker S.
Villa Louisa II	1971	17,08	Verhulsel J.
Yom Tov	1972		
Yom Tov	2016	18,08	van Rooyen D., Hlophe M., Tucker S., Ramalepa M.
Scrambler	1983-2022		SASA
Scrambler	1981	16,23	SASA
Nico 1	2016	18,45	
Nico 2	1977-1982	calé sur la strati de la photo aérienne et sur les pts GPS des avens 20,7°	Harris J.M., Kenny P.J., Lloyd T.D., Möller H.O., van der Hooft R.E.Free Caver SASA 1993
Nico 3 (mesuré en nombre de pas, pas en mètre)			
Wossname = Villa Louisa 2	29/03/1987	16,45	Harris J.M., Priddle C.J.
van der gryd	14/07/1974	16,9	Harris J.M.
Wagoon coco pan	07/01/1974	16,93	Verhulsel J.B.
Bookie	1987	16,45	
Bokkie			
Bat	1986-87	15,98	Martini J., Rietbroek C., Boshoff P., Ellis R.

Antcave	1496 (topo) et 1503 MNT	9/77 à 1/79	18,1 (proposé sur la topographie), par calcul 16,62°	van Der Hooft H., Harris J., Thomson H., Priddle C.
Antcave		25/07/1977		Innes et Verhulsel

Tableau 7 Déclinaisons magnétiques des topographies de grotte.

1.5. ANCIENNES CARTOGRAPHIES DES KARSTS D'AFRIQUE AUSTRALE

Après avoir décrit la création du SIG et réalisé l'inventaire des données de terrain intégrées dans celui-ci, nous allons présenter de premiers résultats cartographiques en réponse à nos problématiques de recherche.

Afin de répondre à l'objectif de cette thèse, nous avons développé une méthode de diagnostic karstologique appliquée aux secteurs où les cartes géologiques signalent la présence de formations carbonatées.

Les différentes étapes de la réalisation du SIG des karsts de l'Afrique australe ont été les suivantes :

(1) localiser les formations carbonatées à l'affleurement à partir de l'analyse des cartes géologiques, en géoréférençant celles disponibles uniquement en raster (image) ;
(2) analyser les reliefs à partir de mesures effectuées par satellite (modèles numériques de terrain). Ces analyses permettent un premier diagnostic à distance de l'état de surface des formations carbonatées à l'affleurement (identifier à l'étape précédente). Si des formes karstiques sont identifiées en surface (canyons, poljés, dolines, etc.), cela indiquera la présence de réseaux karstiques en profondeur.

Maintenant que nous avons expliqué dans ce chapitre comment un SIG est conçu et quelles méthodes ont été utilisées, nous pouvons présenter les résultats que le SIG a apportés à notre problématique de recherche, notamment la production de cartes de localisation des karsts potentiels et des karsts validés. Présentons à présent les premières cartes issues de ce travail, tandis que les autres cartes produites illustreront le Chapitre n°5 (p.899).

L'étude des cartes géologiques, listées dans le Tableau 58 (p.1089), a permis une nouvelle cartographie des formations carbonatées à l'affleurement, identifiées comme des secteurs karstiques potentiels (Figure 109, Figure 110, Figure 107, Figure 108 et Figure 911). Toutefois, ce type de cartographie n'est pas une nouveauté, comme en témoignent les anciennes cartes des karsts, cataloguées ci-dessous.

Des cartes des formations carbonatées et/ou des karsts avaient déjà été réalisées dans le passé. Nous les avons compilées dans le tableau, ci-dessous, par ordre chronologique (Tableau 8).

1.5.1. Tableau des anciennes cartes des karsts du monde ou de l'Afrique

Nom	Lien internet	Auteurs	Année
Karst geomorphology and hydrology. First Edition. London, Chapman and Hall, 601 p	Carte publiée par HOLLINGSWORTH E. (2006, Fig.1, p.15) https://digitalcommons.usf.edu/kip_etd/15/	FORD Derek. et WILLIAMS Paul	1989
Carbonate rocks of Africa know to, or likely to, contain karst-fill breccias (Fig. 1 p. 227)	https://hdl.handle.net/10520/AJA00382353_5386	PICKFORD M., MEIN P. et SENUT B.	1994a
Atlas des régions karstiques Afrique Asie Océanie	https://digitalcommons.usf.edu/kip_monographs/6	PEPE *et al.*	1997
The main karsts areas of sub-saharan Africa. Encyclopedia of Caves and Karst science. (Figure 1, p.42)	https://sudartomas.files.wordpress.com/2012/11/encyclopediaof_cavesandkarstscience.pdf	GUNN J.	2004
Carte mondiale des affleurements carbonatés. (Fig.111 p.162)		SALOMON J.-N. Karstologia Mémoire n°14	2005

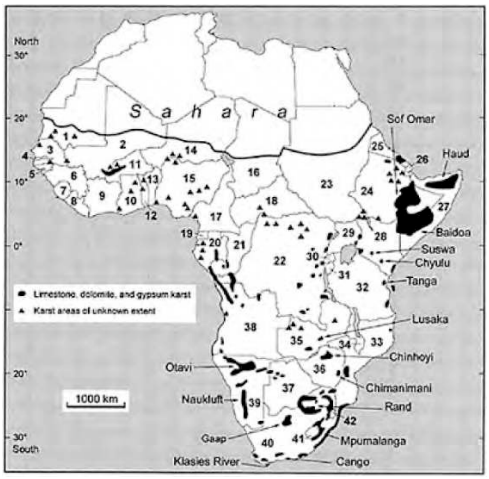
Projet réseau SIGAfrique (Figure 6, p.21)	http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-54328-FR.pdf	LESCUYER J.-L.	2005
Karst Hydrogeology and Geomorphology (Figure 1.1, p.2)	https://sudartomas.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/11/karsthydrogeologyandgeomorphology1.pdf https://environmental-geology-dev.pressbooks.tru.ca/wp-content/uploads/sites/73/2021/07/Fig-5-scaled-1.jpg https://ackma.org/journal/116/116_Full_ACKMA_journal.pdf (page 9)	FORD D. et WILLIAMS Paul.	2007
IUCN, World Heritage Caves and Karst, A Thematic Study (Figure 2 p.7)	https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2008-037.pdf	WILLIAMS Paul.	2008
KROW, Karst Regions Of the World	https://digitalcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1014&context=kip_etd	HOLLINGSWORTH E.	2009
Dolomite Guideline	https://www.dws.gov.za/Groundwater/Documents/Dolomite/DWA%20Dolomite%20Guideline%202009%20(Final)11.pdf	Water Geosciences Consulting, Department of Water Affairs	2009

Karstic regions of Africa. Carbonate rocks are widespreat in Africa (Figure 2, p.2)	https://www.mme.gov.na/files/publications/97b_Memoir%2021_2010_Pickford&Senut_Karst%20geology%20and%20paleobiology%20of%20Northern%20Namibia.pdf	PICKFORD M. et SENUT B.	2001
WHYMAP World Wide Hydrogeological Mapping and Assessment Program Projet WOKAM World karst aquifer Mapping	https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/laufend/Beratung/Whymap/whymap_projektbeschr_en.html?nn=1546392 https://whymap.bgr.de/mapapps4/resources/apps/whymap/index.html?lang=en&tab=whymap_gwr https://www.whymap.org/whymap/EN/Maps_Data/Wokam/wokam_inhalt_en.html https://download.bgr.de/bgr/grundwasser/whymap/shp/WHYMAP_WOKAM_v1.zip	BGR, IAH, KIT et UNESCO, 2017	2017
Distribution of Proterozoic carbonates and of described localities (Fig. 1 p.867)	https://doi.org/10.1007/978-3-319-53348-3_59	MARTINI J. in KLIMCHOUK *et al.*, 2017	2017
GEODAN NL SADC GMI	https://apps.geodan.nl/igrac/ggis-viewer/viewer/sadcgip/public/default		
Map of the studied area and carbonate outcrop areas of southern Africa (Figure 1A) *(Source: http://www.fos.auckland.ac.nz/our_research/karst/index.html).*	https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.10.027	DANDURAND *et al.*	2201 9
Global distribution of carbonate rocks and karst water resources	https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-020-02139-5	Goldscheider *et al.*	2020

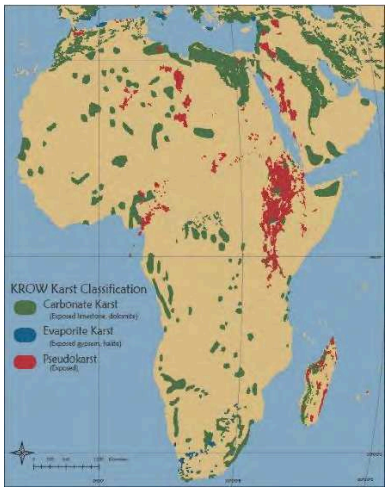
Tableau 8 Anciennes cartes des karsts du monde ou de l'Afrique.

1.5.2. Quelques exemples des anciennes cartes des karsts pour l'Afrique

Les cartes des affleurements carbonatés et/ou des karsts à l'échelle de l'Afrique ne sont pas satisfaisantes, comme le montrent les exemples ci-dessous (Figure 87). Elles reprennent des informations issues de cartes antérieures, sans vérification, et présentent souvent un calage géographique imprécis, ce qui aboutit à des représentations erronées et peu fiables. Il est donc impératif d'en réaliser une nouvelle en utilisant les méthodes modernes de la géomatique (*cf.* Chapitre 1) (Figure 107), tout en citant correctement les documents et sources utilisées, notamment les cartes géologiques, compilées dans le Tableau 58 (p.1089). Cette carte sera évolutive en fonction de nos missions de terrain ou de la production de nouvelles cartes géologiques, comme celles produites par le BRGM GFK CGS (dirigées par Thomas Fullgraf) en 2021 au Malawi (Marteau *et al.*, 2015).



Source : Gunn, 2004, p.42.





Source : Hollingsworth, 2006, Fig.19, p.72.





Source : Ford et Williams Version v.3, 2007.

Figure 87 Différentes cartes des formations carbonatées de l'Afrique.

1.5.2.1. Carte des affleurements carbonatés majeurs dans le monde (Ford et Williams,1989).

La première carte montrant les principales zones karstiques est produite par Ford et Williams (1989) (Figure 89), et a été republiée par Hollingsworth (2006, Fig.1 p.15).

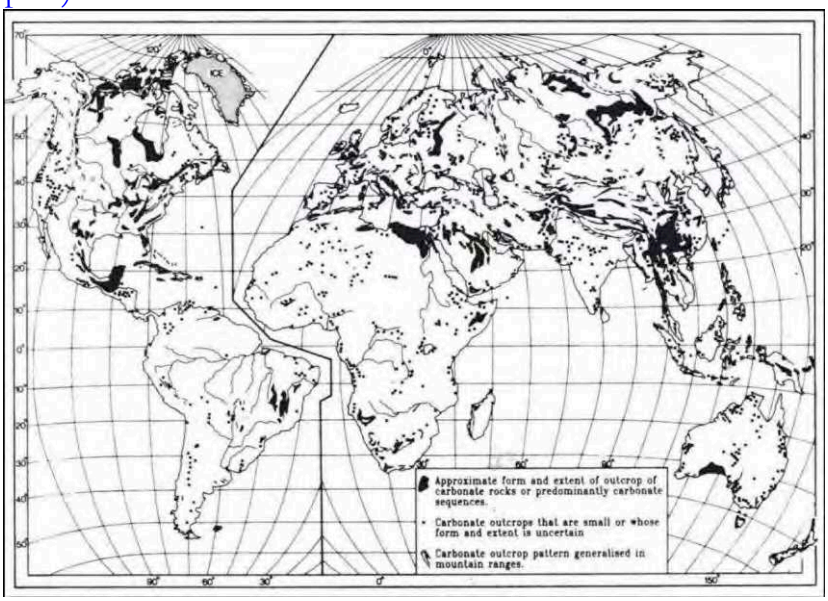


Figure 88 Carte de affleurements carbonatés majeurs dans le monde (Ford et Williams, 1989).



Figure 89 Détail.

Les karsts ayant une faible superficie ou dont l'extension est inconnue sont représentés sur cette carte par des points. On remarque clairement qu'il y a peu de formations carbonatées autour du fleuve du Limpopo, qui y sont figurées.

Concernant l'Afrique australe, on distingue le karst du Bassin du Transvaal, le Plateau de Ghaap et surtout les karsts namibiens.

1.5.2.2. Carte des karsts africains (Pickford, Mein et Senut, 1994)

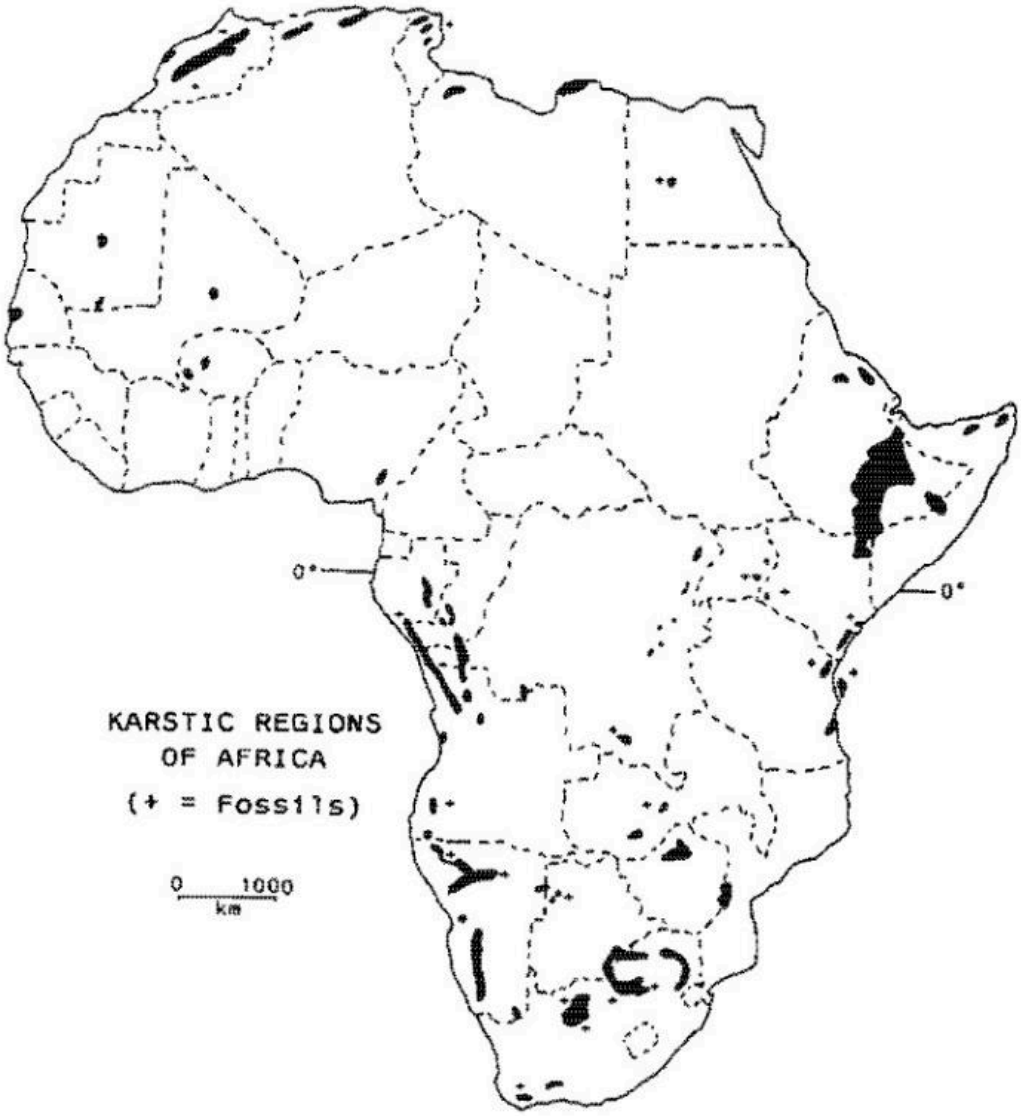


Figure 90 Carte des karsts africains par Pickford, Mein et Senut (1994, Fig. 1, p.227).

1.5.2.3. Carte des principales zones karstiques d'Afrique subsaharienne de Gunn 2004

La carte de Gunn (2004) (Figure 91) regroupe les karsts carbonatés, les karsts dolomitiques et les karsts gypseux en les représentant par des polygones noirs.

Cette carte localise également les karsts dont l'extension est mal définie, représentée par un simple symbole triangulaire.

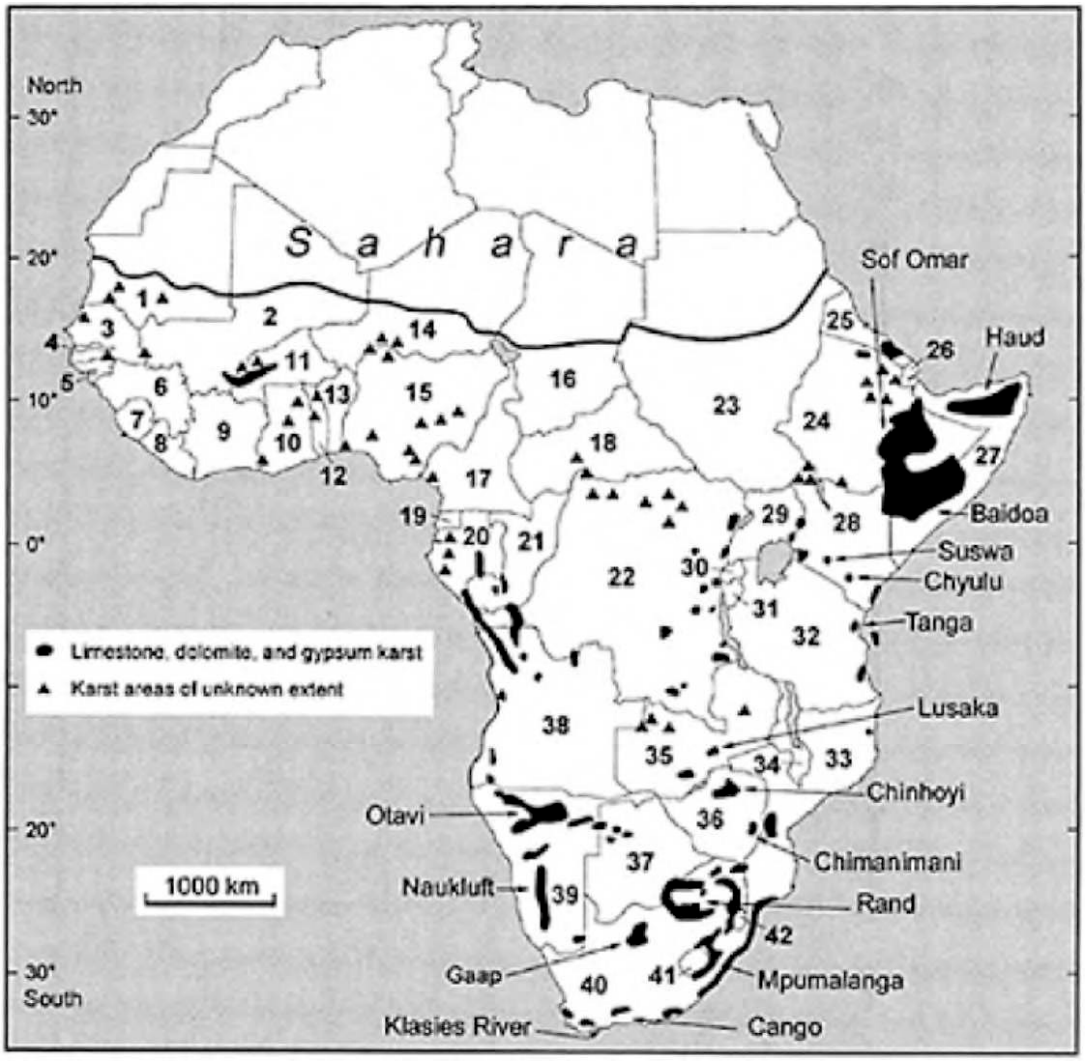


Figure 91 Carte des principales zones karstiques d'Afrique subsaharienne.(Gunn, 2004, p.42).

1.5.2.4. Carte mondiale des affleurements carbonatés (Salomon et Pulina, 2005)

Cette carte reprend celle de Ford et Williams (1989) (Figure 88 p.127) et y ajoute les climats. Le point rouge (Figure 93) au sud du Zambèze correspond aux karsts des *Aha Hills* et de *Gcwihaba Hills* et *Koanaka Hills* que nous étudions dans le Chapitre n°4 (p.473).

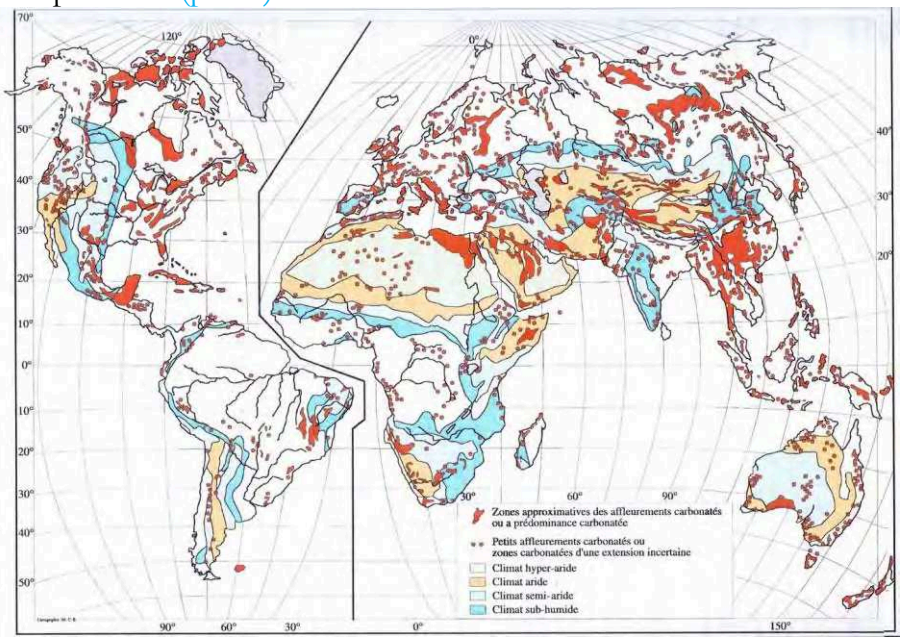


Figure 92 Carte mondiale des affleurements carbonatés (Salomon et Pulina, 2005).

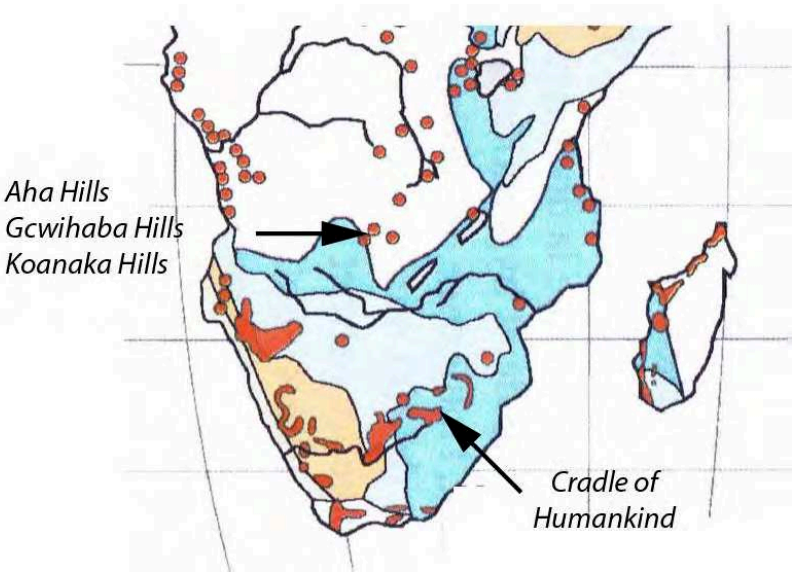


Figure 93 Affleurements carbonatés en Afrique australe.

1.5.2.5. Carte de la distribution des affleurements majeurs de roches carbonatées en Afrique (Williams et Ford, 2006, 2007)

Différentes cartes de l'Université d'Auckland (Williams et Ford, 2007) ont été très largement publiées, comme dans Furey et Racey (2016, Fig.15.1 p.464) (Figure 94 et Figure 95), et ont inspiré de nombreux scientifiques, y compris notre équipe, comme le montre la carte, ci-après, Figure 96, publiée par Dandurand *et al.* (2019, fig.1A,p.285). Ford et Williams (2007) indiquent s'être inspirés de la carte de Gunn (2004), ci-dessus (Figure 91).



Figure 94 Distribution globale des roches carbonatées (en noir) d'après Paul Williams, University of Auckland, NZ, et publiée par Furey et Racey (2016, Fig.15.1 p.464).

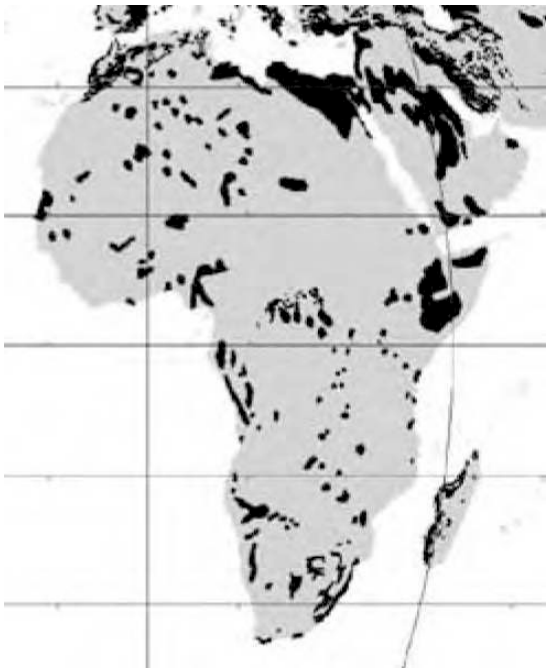


Figure 95 Distribution des affleurements majeurs de roches carbonatées en Afrique, selon la carte de Ford et Williams (2007), inspirée de la carte de Gunn, (2004[5]), ci-dessus (Figure 91).

[5] Ford et Williams (2007) indique la référence « Gunn, 2000a » en légende de leur carte de la distribution des affleurements majeurs de roches carbonatées de la Fig.1.1 (p.2). Dans leur bibliographie, on ne trouve qu'une référence correspondant, c'est Gunn, J. (ed.) (2004a) Encyclopedia of Caves and Karst Science, Fitzroy Dearborn, New York, 902 pp et pas 2000 !

Ces cartes, bien qu'intéressantes pour une première approche, ne permettent pas de programmer des missions de prospection dans des secteurs précis. De plus, les sources de données utilisées, telles que les cartes géologiques ou les inventaires spéléologiques, ne sont pas fournies. Pour remédier à ces manques, le **modèle SIG des karsts d'Afrique australe**, que nous réalisons dans cette thèse, permettra de produire nos propres cartes, accompagnées de tableaux précisant les cartes géologiques et les inventaires spéléologiques utilisés.

Remarque :

De plus, le site internet contenant les cartes ne fonctionne plus : http://www.fos.auckland.ac.nz/our_research/karst/index.html.

1.5.2.6. Carte des formations carbonatées protérozoïques à l'affleurement et des pans (Dandurand et al., 2019, fig.1A, p.285).

La carte des formations carbonatées protérozoïques à l'affleurement et des pans (Dandurand *et al.*, 2019, fig.1A, p.285) a été réalisée à partir des cartes précédentes, notamment celles de Paul Williams et de l'Université d'Auckland. Les pans* (définition p.742) sont d'anciennes étendues d'eau, aujourd'hui asséchée, qui ont pu attirer les populations humaines par le passé. Ce sont aussi des pièges sédimentaires, donc ils peuvent contenir des fossiles anciens, ce qui est pertinent pour notre problématique de recherche.

Cette carte reflète les connaissances de 2019, avant le début de cette thèse. Sa réalisation a mis en évidence la nécessité d'étudier en détail les cartes géologiques et de maîtriser les outils SIG pour réaliser une nouvelle cartographie des formations carbonatées à l'échelle de l'Afrique australe, avec une résolution fine.

L'étude des cartes géologiques entreprise pour réaliser la carte des formations carbonatées / des karsts potentiels dans le cadre de cette thèse montre que la carte ci-dessous, Figure 96, contient des erreurs. Par exemple, il n'y a pas de carbonates sur la côte est de l'Afrique du Sud, dans la région de Durban, nommée Mpumalanga sur la carte de Gunn (2004, p.42) (Figure 91) et apparait déjà sur les cartes plus anciennes (Ford et Williams, 2007) (Figure 94 et Figure 95).

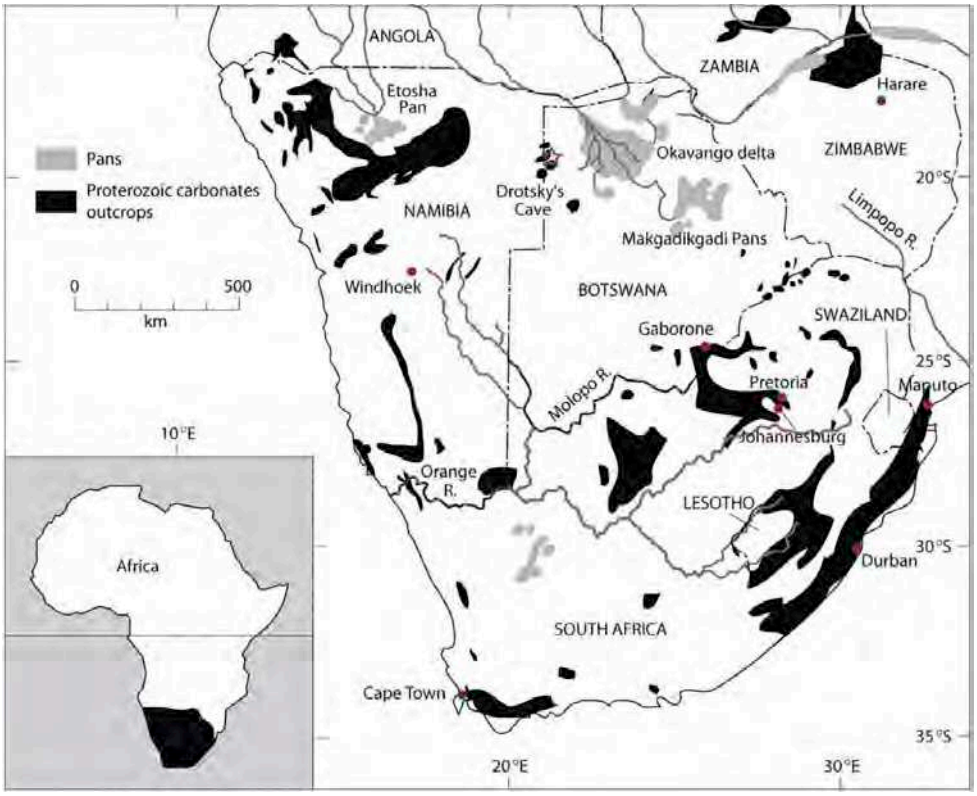


Figure 96 Carte des formations carbonatées protérozoïques à l'affleurement et des pans (Dandurand et al., 2019, fig.1A, p.285).

1.5.2.7. Carte de la distribution des karsts à l'échelle du continent africain (KROW) (Hollingsworth, 2006)

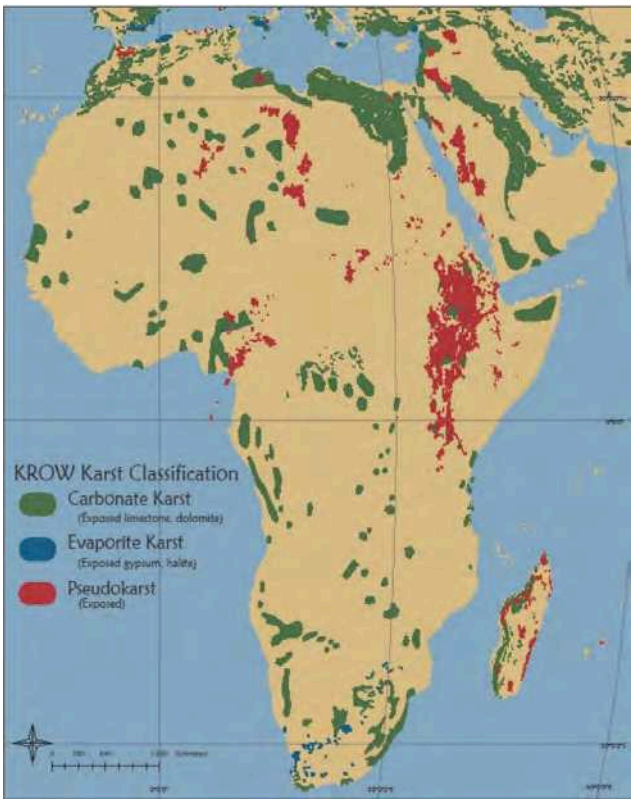


Figure 97 Carte de la distribution des karsts à l'échelle du continent africain (Hollingsworth, 2006, Fig.19, p.72).

La carte de la distribution des karsts à l'échelle du continent africain (Hollingsworth, 2006, Fig.19, p.72) (Figure 97) permet de différencier les karsts carbonatés des karsts évaporitiques.

Nous n'étudierons pas les karsts évaporitiques, car leur évolution est trop rapide pour avoir eu le temps de piéger des sédiments et ils ne préservent pas bien les fossiles.

En annexe Hollingsworth (2006, p.126) fournit les coordonnées des personnes par pays ayant contribué à compiler des données sur les karsts.

1.5.2.8. Carte WHYMAP et projet WOKAM (2017)

La carte des aquifères karstiques (Figure 98, Figure 99) présente l'avantage d'être vectorisée et géoréférencée, ce qui facilite son intégration dans un logiciel SIG. Elle est téléchargeable en suivant ce lien : https://download.bgr.de/bgr/grundwasser/whymap/shp/WHYMAP_WOKAM_v1.zip.



Figure 98 Carte des aquifères karstiques de l'Afrique (WHYMAP, 2017).

On remarque des lacunes concernant les données pour le Zimbabwe et le Botswana.



Figure 99 Carte des aquifères karstiques de l'Afrique australe (WHYMAP, 2017).

1.5.2.9. Portail internet du GEODAN NL SADC GMI (Groundwater Management Institute)

Le portail en ligne du *GMI* (*Groundwater Management Institute)*, accessible à cette adresse (https://sadc-gip.org/DataViewer) permet d'accéder et d'interroger les données compilées dans les cartes précédemment décrites, telles que celles du projet WHYMAP et WOKAM.

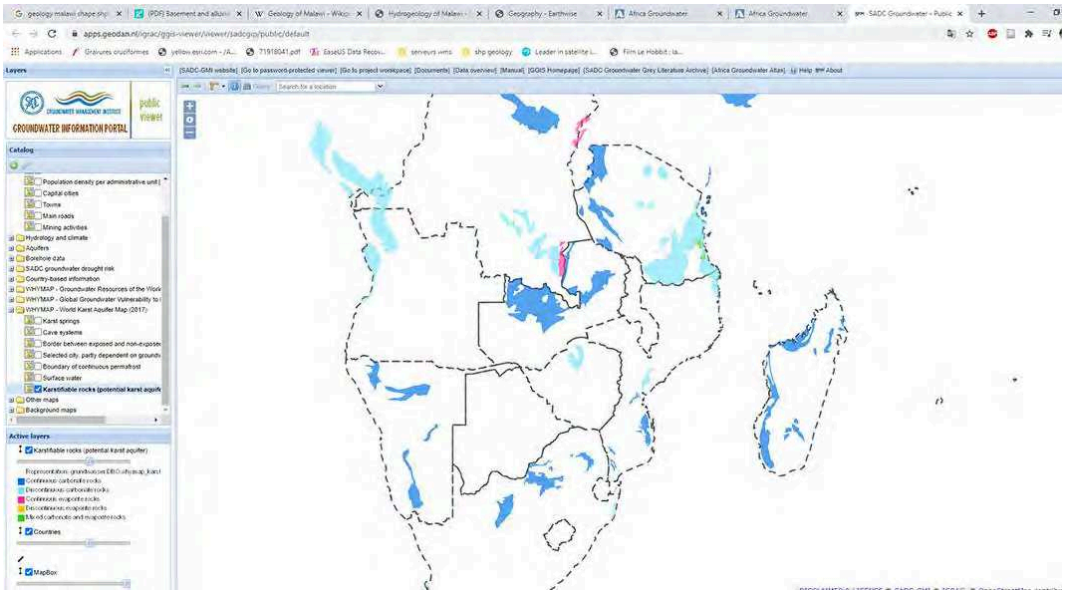


Figure 100 Portail du site internet du GMI (Groundwater Management Institute).

1.6. PREMIERS RESULTATS DU SIG : OU RECHERCHER DES KARSTS ET DES KARSTS POTENTIELS EN AFRIQUE AUSTRALE ?

Nous présentons ici les premiers résultats du **Système d'Information Géographique des karsts d'Afrique australe**. Ce sont des cartes inédites, réalisées sous Illustrator, grâce à un plugin permettant d'intégrer les données géoréférencées issues du SIG. L'intérêt d'utiliser Illustrator réside dans la possibilité d'exploiter les outils de dessin vectoriel, comme les courbes de Bézier et les effets de transparence des rasters (des fonds de cartes). Il est facile alors, sous Illustrator, de modifier un tracé existant sans prendre en compte les tables attributaires et les autres contraintes du dessin réalisé sous SIG. Cependant, Illustrator ne peut pas réaliser de calculs statistiques complexes (modèle ombré, calcul de pente, hypsométrie, calcul de courbe de niveaux, etc.) comme le font les SIG. Donc, coupler l'utilisation des logiciels SIG et d'Illustrator est une bonne méthode pour réaliser des cartes. Certaines cartes, que nous avons produites, sont directement issues du SIG et sont « sorties de bécane ».

Une des premières cartes réalisées est celle des formations carbonatées, qui correspond en réalité à la carte des karsts potentiels. Elle provient directement de l'étude des cartes géologiques, c'est-à-dire de la sélection des formations carbonatées (marbres, calcaires, dolomies, calcaires argileux, etc.). En raison de la faible superficie et du faible nombre de formations carbonatées en Afrique australe, nous avons choisi de les considérer toutes comme potentiellement karstiques, même lorsqu'aucune forme karstique n'a été identifiée (étape 2) ou qu'aucune cavité n'y a été reconnue. Ce choix nous permet de ne pas passer à côté de karsts. Toutes les cartes réalisées présentent une analyse des reliefs calculés à partir du MNT satellitaire (cf. Chapitre n°1, p.19) comme un modèle ombré, une carte de pente, une hypsométrie et une hydrographie. Par exemple, la carte des pentes, que nous avons calculée à partir du MNT JAXA, à l'échelle de l'Afrique australe, pèse 62 Go. Les cartes produites intègrent également les karsts connus, issus des inventaires de cavités et des données de terrain, décrites et listées précédemment (p.93).

Réfléchir au contexte hydrographique permet aussi de localiser les grands bassins d'érosion des cours d'eau dans lesquels il sera peu probable de trouver des grottes. À partir du Chapitre n°2, d'autres données géologiques (géométrie des bassins sédimentaires permettant de localiser les surfaces d'altération, d'érosion et de karstification) et géomorphologiques (paléosurfaces) seront intégrées aux cartes.

Nous allons présenter les premières cartes, puis dresser une liste des karsts potentiels et présenter les autres intérêts des SIG comme la diffusion des données, la préparation des missions de prospection et nous finirons par une application de cette méthodologie pour le Mozambique et Malawi en vue de la préparation de la mission de 2022 qui a mobilisé les deux premières années de travail de la thèse.

1.6.1. Premières cartes inédites pour répondre à nos problématiques de recherche

Les cartes suivantes (Figure 109 et Figure 110), comparées à la première carte de cette thèse présentée en introduction (Figure 1, rappelée ci-dessous Figure 106), illustrent parfaitement l'apport de la méthodologie géomatique (ajout de modèles ombrés, carte de pentes, inventaire spéléologique, lecture géomorphologique du MNT, etc.) et des SIG pour répondre à notre problématique de recherche.

Elle s'inspire de cartes antérieures (Tobias, 1990, Fig. 1, p.31 ; Pickford, Mein et Senut 1994, Fig. 1, p.227 ; Senut et Pickford, 2010, Fig. 2, p.2 ; Berger *et al.*, 2017, Fig.1 ; Bruxelles, 2019, Fig.59, p.101 ; Bruxelles, 2022, Fig.6, p.24).

Ce triptyque (Figure 101 à Figure 103), montrant les cartes réduites, illustre l'évolution de la cartographie de l'Afrique sub-saharienne. Les cartes en grand format sont disponibles plus loin (Figure 107 et Figure 108 p. 142).

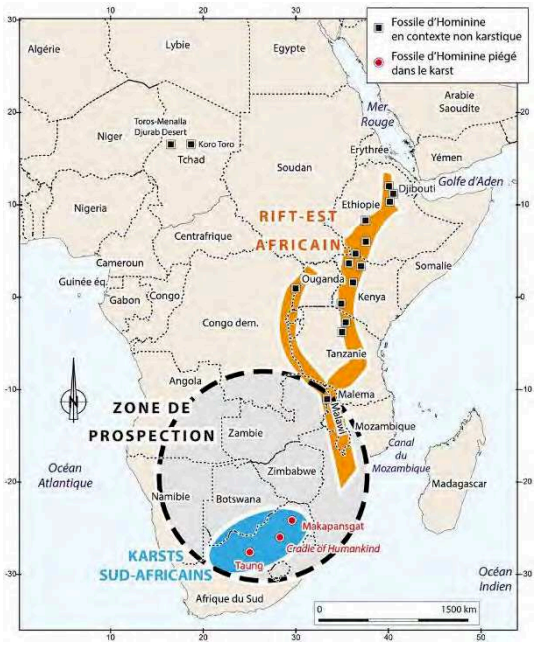


Figure 101 Carte initiale illustrant la problématique et la zone de prospection.

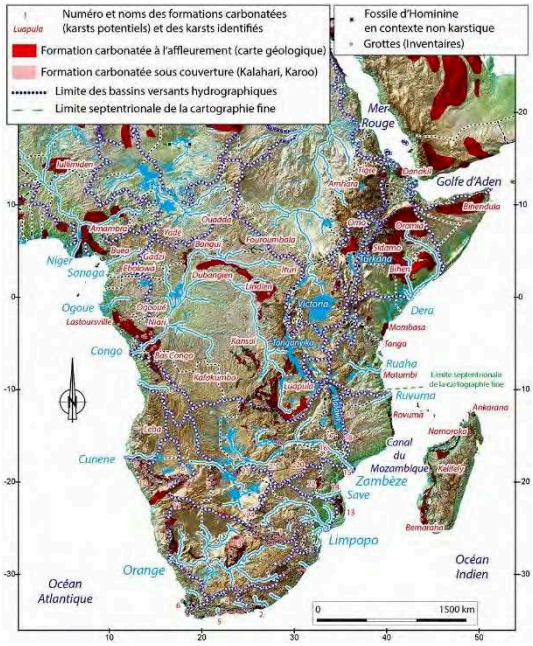


Figure 102 Carte des formations carbonatées à l'affleurement, des cavités connues et du contexte hydrologique (bassin d'érosion).

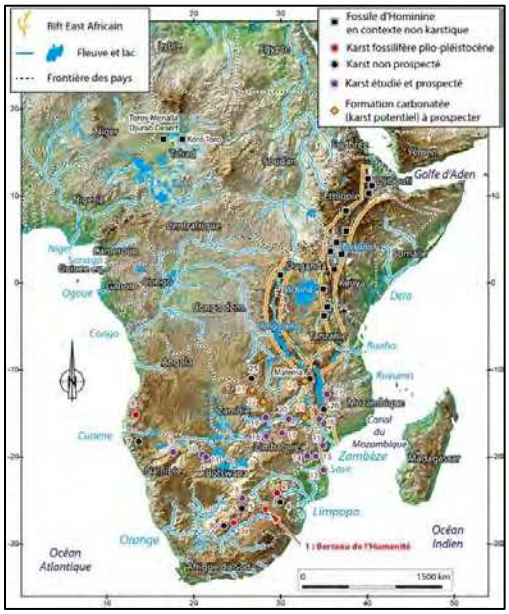


Figure 103 Carte des karsts et des karsts potentiels, figurés par des points.

À l'échelle de l'Afrique australe, nous avons reporté sur les cartes (Figure 104) les informations liées à la géologie et dans le chapitre suivant, le Chapitre n°2, à la mise en place des bassins sédimentaires et à leurs altérations et karstifications.

Notamment nous avons tenu compte des paléosurfaces d'érosion (Figure 105). Les cartes en grand format sont disponibles plus loin (Figure 139 et Figure 140 p. 198).

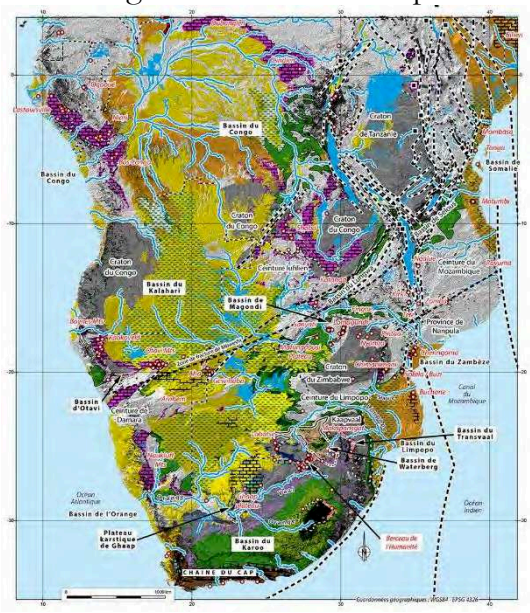


Figure 104 Carte géologique des karsts et des formations carbonatées à l'affleurement.

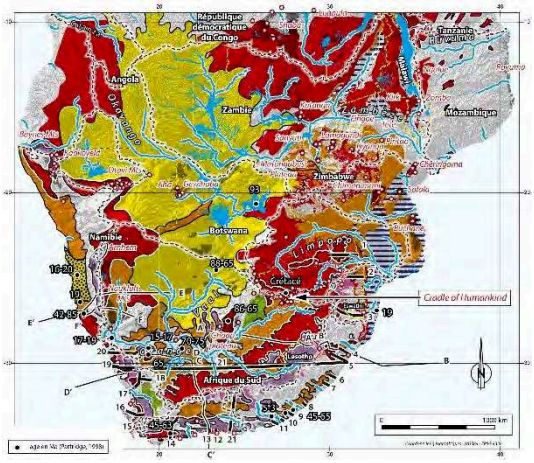


Figure 105 Carte des surfaces d'érosion.

1.6.1.1. Rappel de la carte initiale

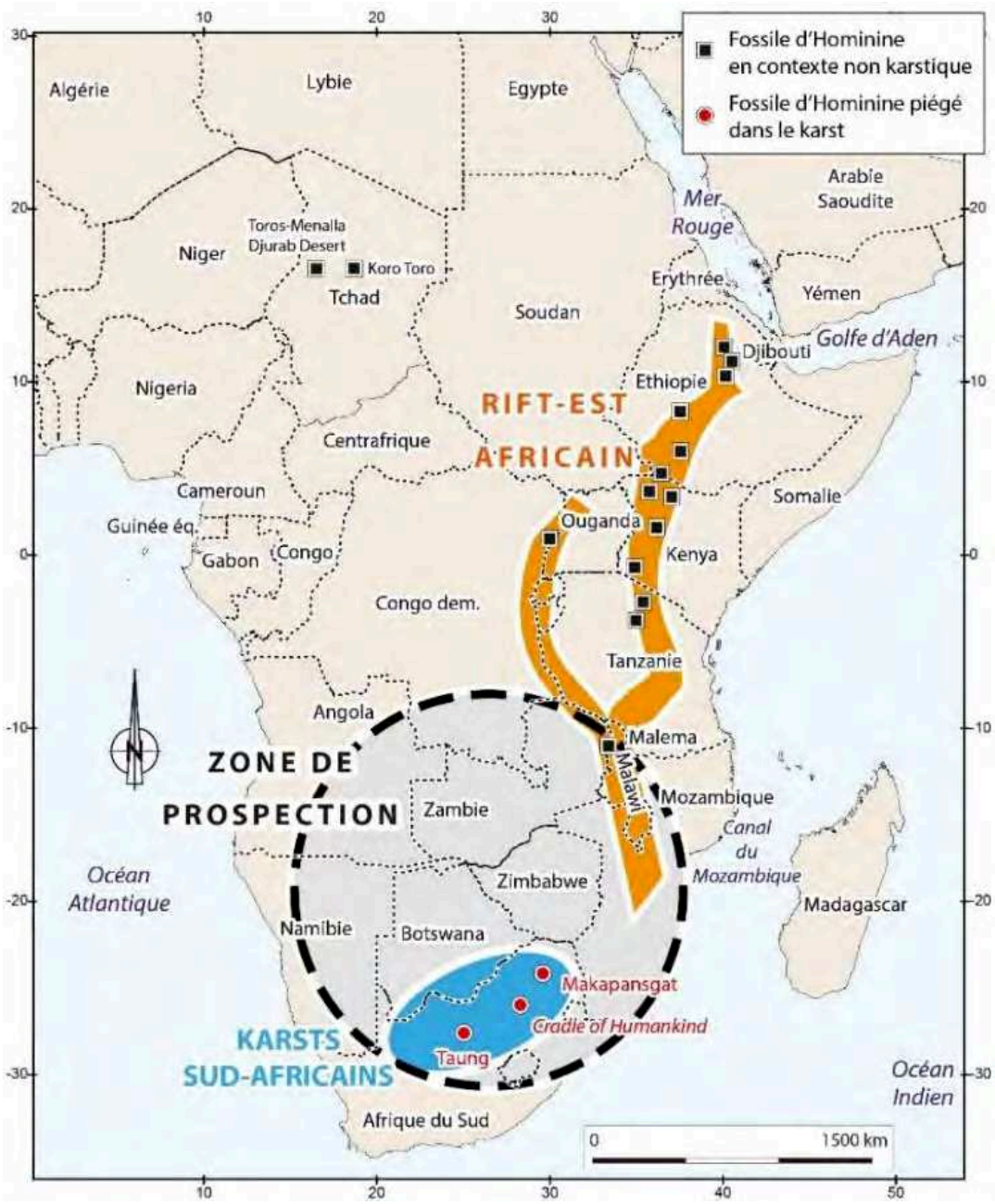


Figure 106 Les principales régions fossilifères attestant de la présence des Hominines en Afrique subsaharienne sont indiquées en couleur, tandis que la zone de prospection de la thèse et du projet HOMININ'KARST est représentée en gris.

1.6.1.2. Carte des formations carbonatées potentiellement karstifiées et des karsts et contexte hydrographique

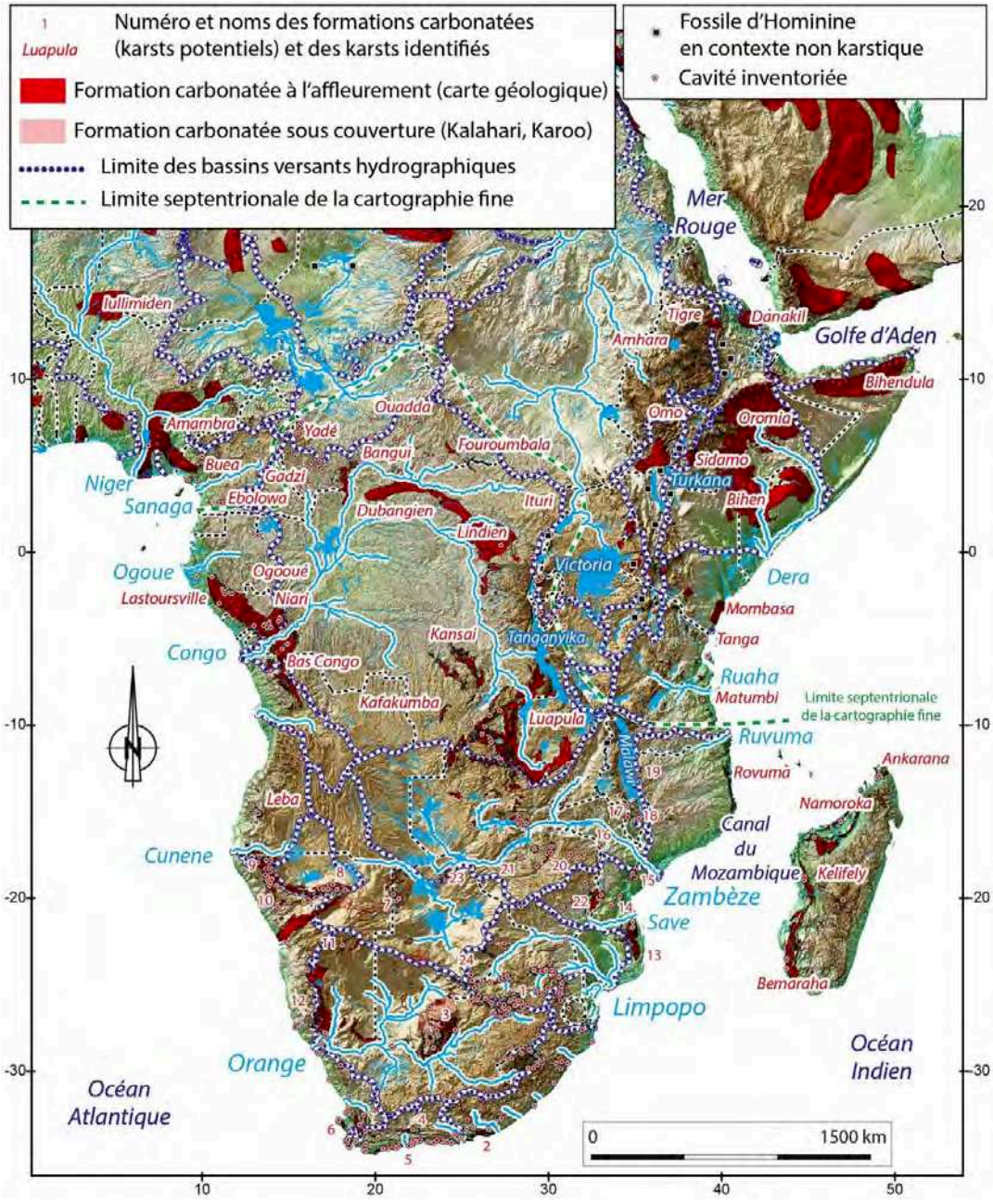


Figure 107 Formations carbonatées (karsts potentiels) et karsts identifiés en Afrique subsaharienne et leur position dans les bassins hydrographiques.

Noms des formations carbonatées (karsts potentiels) et des karsts identifiés de la carte précédente (Figure 107) :

1 : Bassin du Transvaal (*Cradle of Humankind*, Makapansgat, Berlin, etc.)
2 : Langebaanweg (ce n'est pas un karst, à proprement parler il y a de la faune pliocène piégé au niveau de calcaires littoraux)
3 : Northern Cape : Plateau de Ghaap (site fossilifère de Taung)
4 : Vallée du Cango (Martini, 2000)
5 : Bredasdorp
6 : Péninsule du Cap
7 : Aha, Gcwihaba et Koanaka Hills
8 : Otavi Hills (Harasib)
9 : Karstveld
10 : Kaokoveld
11 : Arnhem
12 : Naukluft
13 : Buchane
14 : Sofala/Buzi
15 : Cheringoma
16 : Pintao
17 : Kirk Range
18 : Zomba
19 : Ngalue
20 : Lomagundi
21 : Sanyati

22 : Chimanimani (sensu stricto ce n'est pas un karst car ce sont des quartzites (comm.orale Bruxelles L.) mais il y a des cavités. Les images satellites et les plans ramenés par les spéléologues montrent qu'il s'agit plutôt de grandes fractures que des grottes (SASA, 1994, p.11). Nous en parlerons plus loin (p.994).

23 : Chinamba (*Copperbelt ?*)
24 : Lobatse & Otse
25 : Lusanka
26 : Luapula
27 : Katanga
28 : Kafakumba
29 : Bas Congo
30 : Matumbi
31 : Leba (Angola)

Remarques :

Des informations complémentaires concernant les affleurements carbonatés sont consultables dans l'ouvrage de Bosse *et al.* (1996).

Au Rwanda il existe de nombreux tubes de laves (Laumanns *et al.*, 2001 ; Laumann *et al.*, 2007) comme au Burundi et au Kenya. Nous avons pointé ces cavités sur nos cartes (comme sur la Figure 107 p.142) pour le Rwanda et le Burundi car des formations carbonatées karstifiées sont présentes dans ce secteur d'après Goldscheider *et al.* 2020 et d'après la carte du projet *WOKAM (World Karst Aquifer Mapping)* du *WHYMAP (World Wide Hydrogeological Mapping and Assessment Program)* de 2017 (cf. Tableau 8 p.124 et Tableau 58 p.1089). Une étude plus approfondie de ce secteur devra être effectuée car il se situe un peu en dehors du cadre géographique de cette thèse.

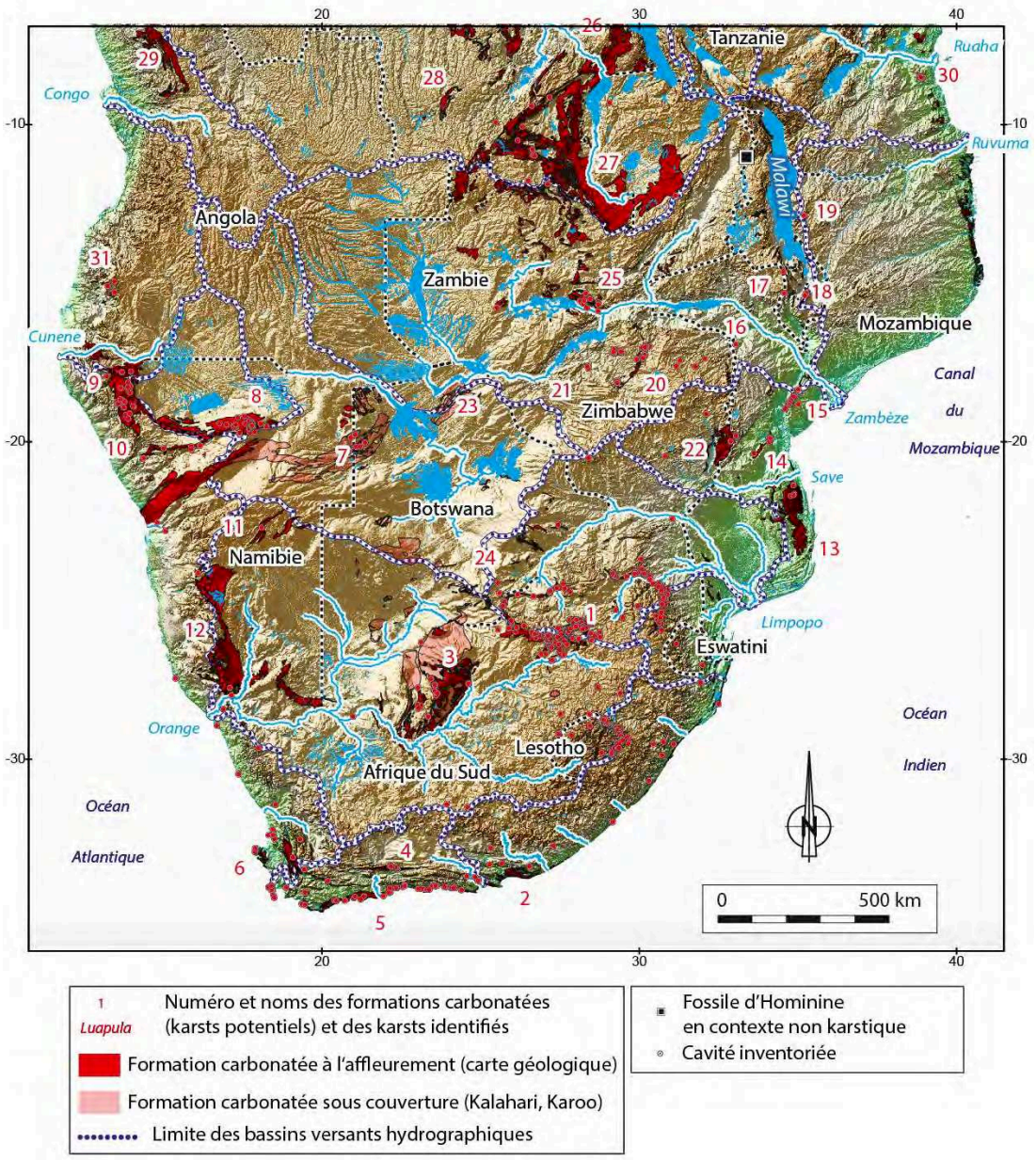


Figure 108 Formations carbonatées (karsts potentiels) et karsts identifiés en Afrique australe et leur position dans les bassins hydrographiques. Les numéros font référence aux karsts indiqués deux pages au-dessus.

1.6.1.3. Carte synthétique des karsts et karsts potentiels et contexte hydrographique

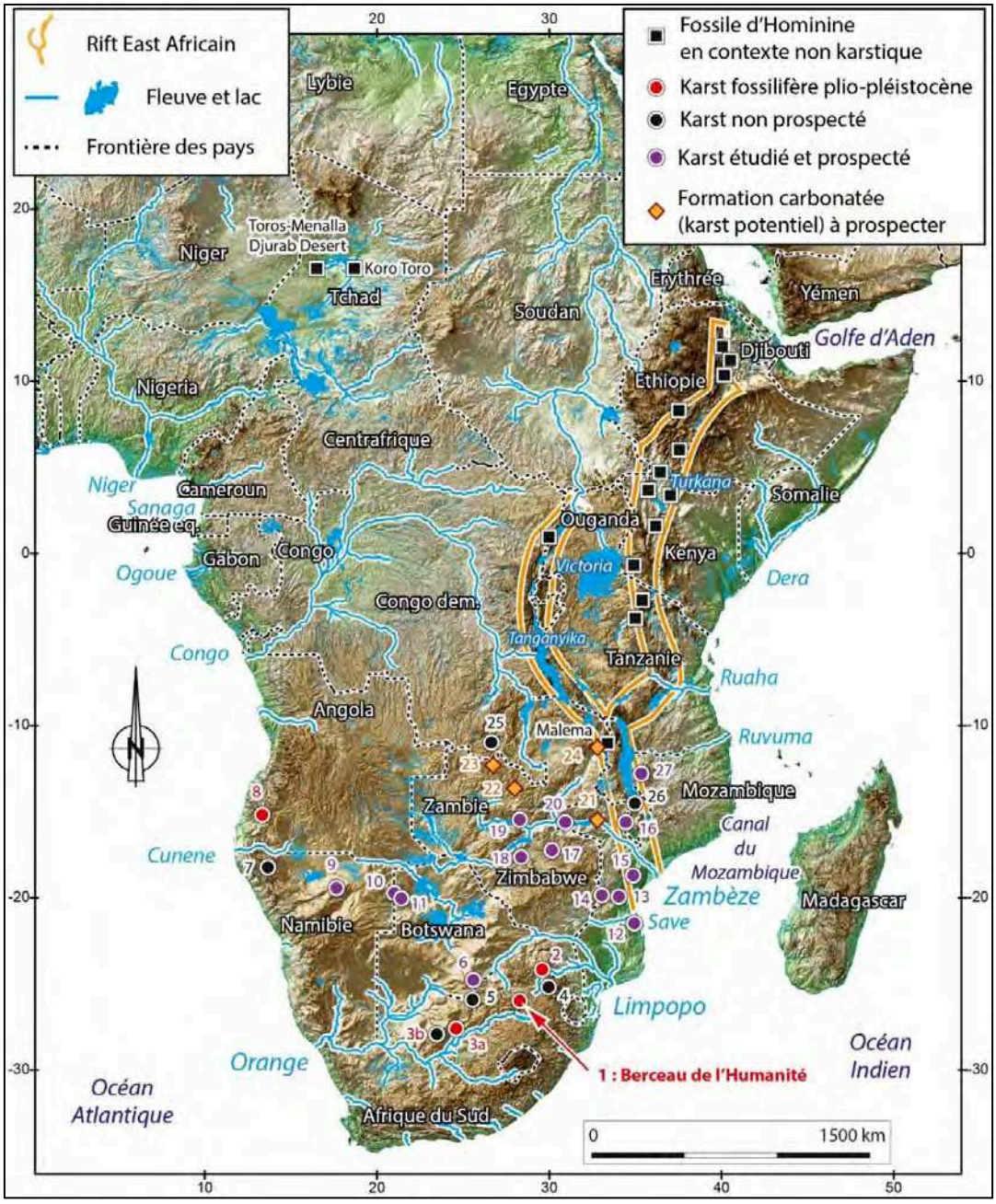


Figure 109 Localisation des formations carbonatées (karsts potentiels) et des karsts à étudier en Afrique subsaharienne. Les numéros font référence aux karsts indiqués dans les pages suivantes.

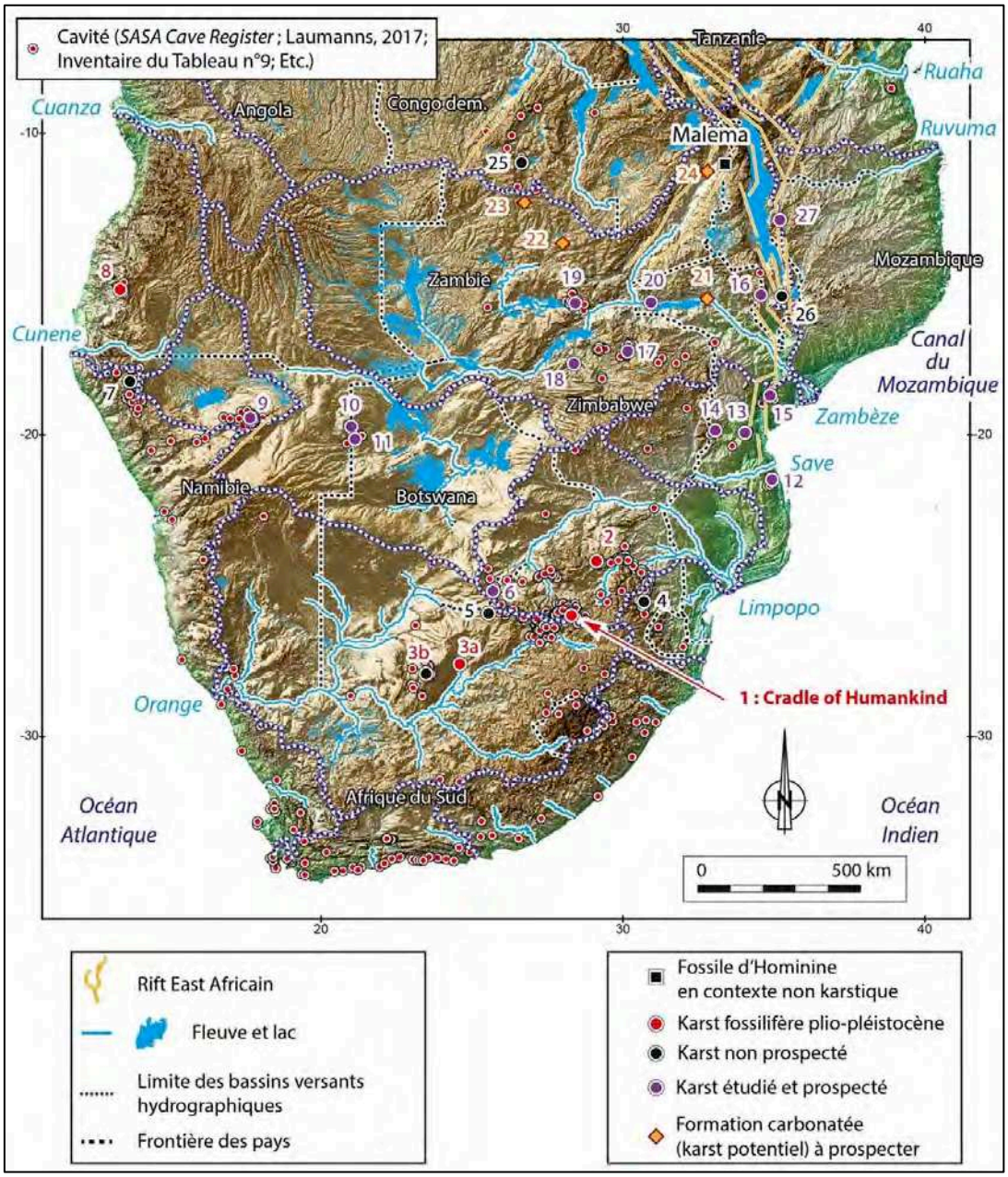


Figure 110 À l'échelle de l'Afrique australe.

1.6.2. Liste des karsts ou des formations carbonatées étudiées et références bibliographiques

Nous avons listé ici (1) les karsts fossilifères ayant livré des Hominines, puis (2) les karsts connus situés entre les karsts sud-africains et le Rift est-africain. Nous avons indiqué les publications majeures concernant ces sites.

Noms des trois karsts fossilifères à Hominines d'Afrique du Sud (en rouge sur la Figure 1) :

1 : *Cradle of Humankind* (Dart, 1925a ; Partridge, 1973 ; Wilkinson, 1973, etc. (cf. liste p.148).
2 : Makapansgat (Dart, 1948b; Brock *et al.*, 1977; Mc Fadden *et al.*, 1979; Partridge, 1979; Dirks *et al.* 2010 in Adams *et al.*, 2010, p.690; Herries *et al.*, 2013; Thackeray et Dyke, 2023)
3a : Grottes et travertins de la carrière de Taung (Dart, 1925b; Peabody, 1954, DACEL, 1998 ; McKee, 1993 ; Partridge, 2000 ; Tobias, 2000 in Bailey *et al.*, 2011; Hopley P.J *et al.*, 2013; Thackeray et Dyke, 2023)

Noms des autres karsts ou des formations carbonatées étudiés :

3b : Le Plateau de Ghaap et la grotte de Wonderwerk (Berna *et al.*, 2012 ; Goldberg *et al.*, 2015 ; Chazan *et al.*, 2012 in Murszewski *et al.*, 2019, Etc.)
4 :Berlin (Martini, 1985)
5 : Ottoshoop (Martini et Kavaleries, 1976; Martini, 1977; Du Preez *et al.*, 2016)
6 : Lobatse (King, 1951; Cooke, 1975; Holmgren *et al.*, 1994, 1995; Holmgren et Shwa, 1995; *Mother Lode Grotto of the National Speleological Society*, 2006; Stephens *et al.*, 2022) et Ramotswa (Selaolo, 1985)
7 : Koakaland (Namibie) (Martini, Marais et Irish, 1999; Martini et Marais, 2002 ; Pickford, 2023)
8 : Plateau d'Humpata (*Leba cave*) (Angola) (Dart 1950 ; Pickford *et al.*, 1992, 1994 ; Mateus *et al.*, 2019 ; Sen S. & Pickford, 2022 ; De Matos *et al.*, 2023, p.6)
9 :Otavi (Namibie) où a été découvert le primate miocène *Otavipithecus*, vieux de 13 Ma, à Berg Aukas (Otavi), en Namibie (Conroy *et al.*, 1992; Pickford *et al.*, 1994a; Pickford et Senut, 2010; Pickford *et al.*, 2014; Pickford, 2019).
10 : Aha Hills (Namibie et Botswana) (Bruxelles, mission HOB et HOMIINI'KARST)
11 : Gcwihaba Hills et Koanaka Hills (Botswana) (Cooke et Baillieul, 1974; Cooke 1975; Pickford, 1990)
12 : Buchane (Mozambique) (Laumanns, 1998, 1999 et 2002 ; Bruxelles, 2019 ; cette thèse)
13 : Bùzi / Sofala (Mozambique) (Laumanns, 1998, 1999 et 2002 ; Bruxelles 2019)

14 : Chimanimani (Zimbabwe) (SASA) (Bruxelles, comm.) (Bruxelles participant au programme Hope-Z Raphaël Hanon et Sandrine Prat, septembre 2022), Dacata (Mozambique) (SASA)
15 : Cheringoma (Mozambique) (Laumanns, 1998, 1999 et 2002 ; Bruxelles 2019)
16 : Kirk Range (Malawi et Mozambique) (Dunstan, 1908, 1909 et 1911 ; *Colonial Geology and Mineral Resources*, 1950, 1953, 1954, 1955 ; Dixey, 1956) et Zomba (*Changalumi Pothole*) (Bloomfield, 1965);
17 : Lomagundi (Zimbabwe) (Bruxelles, comm.) (Bruxelles participant au programme Hope-Z Raphaël Hanon et Sandrine Prat, juin 2022);
18 : Sanyati (Zimbabwe) (Bruxelles, comm.) (Bruxelles participant au programme Hope-Z Raphaël Hanon et Sandrine Prat, juin 2022);
19 : Lusaka (Broken Hill, Twin Rivers, Chipongwe (Zambie) (White, 1908, p.13); découverte d'un crâne Woodward, 1921; Mennell, 1929; Oakley, 1953**;** Barham *et al.*, 2002**;** Clark, 2001, **Avery, 2001**; crâne daté à -300 000 ans par Grün *et al.*, 2020; **Barham *et al.*, 2023**) (mission en septembre 2024)
20 : Pintao (Mozambique), découvert lors de notre mission en 2022 cette thèse ;
21 : Tete et Fingoe, Caduco (Mozambique) (Cilek, 1989 ; Bosse, 1996)
22 : Lukanga (Zambie)
23 : Copperbelt (Zambie)
24 : Karonga (Malawi) (Dixey, 1956 ; Schrenk), cette thèse ;
25 : Katanga (Zambie) (Dom Adalber Anciaux De Favaux, 1955 ; Buffard, 1984 ; Quinif, 1985, 1986 ; Quinif et Dupuis, 1989)
26 : Zomba (Changalumi Pothole) (Bloomfield, 1965, p.155).
27 : Ngalue (Mercader *et al.*, 2009)

1.6.3. Intérêts du SIG

La réalisation du SIG a permis, dans un premier temps, de compiler l'ensemble des données afin de les comparer et d'identifier les zones de karsts potentiels. L'accessibilité du SIG a été améliorée grâce à l'utilisation de *Google Earth Engine*. Le SIG a ensuite permis de préparer des cartes de prospection pour les missions, comme nous le montrerons dans la partie suivante pour le Mozambique. Enfin, il permet de réaliser des cartes de synthèse et de contexte morphokarstique des karsts étudiés et prospectés, utilisées tout au long de la thèse, notamment dans le Chapitre n°5.

1.6.3.1. Accessibilité du modèle SIG des karsts d'Afrique australe avec Google Earth Engine intégré sur un site internet

L'utilisation de l'interface du site internet *Google earth Engine* permet à un utilisateur possédant le lien internet du programme d'interroger le SIG des karsts de l'Afrique australe élaboré sans avoir à utiliser de logiciel SIG et à télécharger de données volumineuses.

Lien : https://www.karstesien.fr/gee.html

Cette interface a été créée en développant un code informatique indiqué en annexe (p.1074).

À partir de cette interface et d'une connexion internet, l'utilisateur a accès à :

- la base de données des cavités constituée (et qui est disponible en annexe Tableau 59 p.1090), ainsi qu'aux autres bases de données (Grottocenter, SASA, etc.) ;
- aux karsts potentiels définis ;
- différents fonds de cartes créés et intégrés dans cette interface : hypsométrie, modèle ombré, pentes.

L'avantage de cette interface est de permettre d'avoir accès directement aux images satellites de googlemaps et aux cartes topographiques vectorisées sans avoir à les télécharger et à la meilleure résolution disponible.

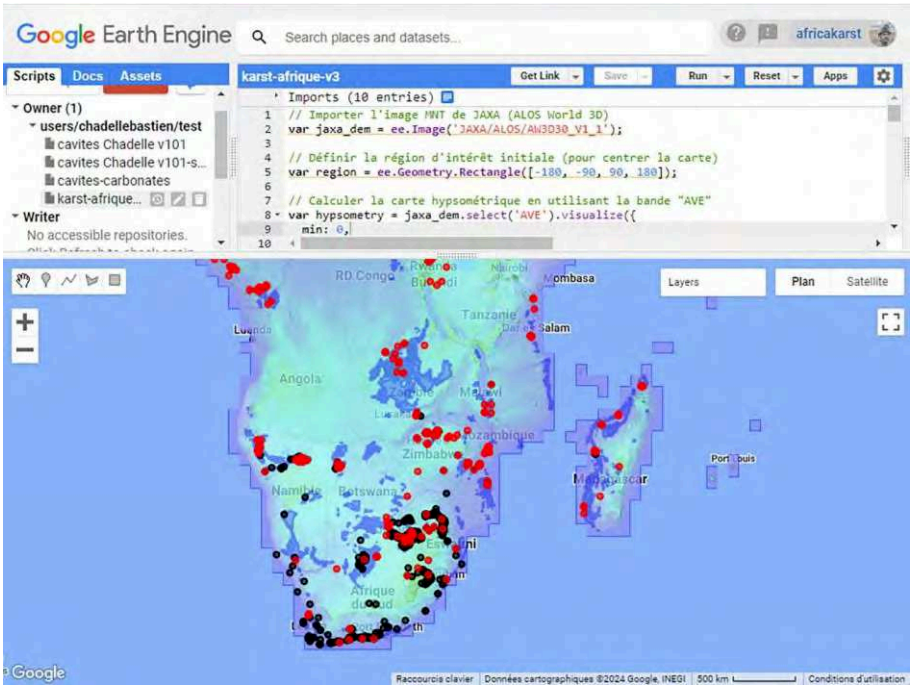


Figure 111 Capture d'écran de Google Earth Engine contenant les données du modèle SIG.

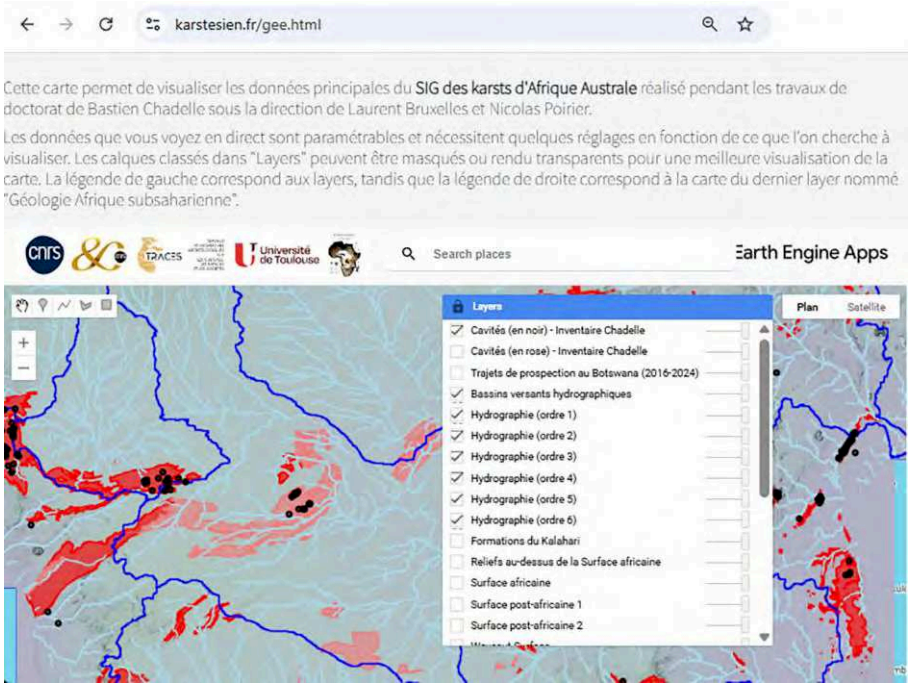


Figure 112 Interface du site internet hébergeant le SIG des karsts d'Afrique australe.

1.6.3.2. Préparation des cartes de prospection pour les missions de terrain HOMINI'KARST

Utiliser les SIG et les MNT permet par exemple de réaliser des cartes topographiques inédites dans des régions éloignées, peu peuplées et presque entièrement recouvertes par les dunes de sables, pour lesquelles n'existent pas de carte, comme au nord ouest du Botswana. Nous avons pu générer pour cette région des cartes topographiques à l'échelle de 1/5000 et produire des courbes de niveau, à très faible intervalle (1 m) les paysages étant très plats. Avec le même objectif, les logiciels SIG nous permettront de réaliser des vues en 3D très fortement exagéré (x 10 ou x 20) pour mieux visualiser ces reliefs anciens aplanis.

Ce travail, effectué en amont des missions de terrain, parfois même réalisé *in situ*, permet de disposer dès le début de la mission de toutes les données cartographiques (cartes issues du traitement des MNT, photographies aériennes, etc.), qui sont directement intégrées sur des tablettes durcies telles que la Galaxy Tab. Ces tablettes fonctionnent sans connexion internet, avec une réception GPS peu énergivore, assurant l'autonomie du système de localisation embarquée. L'utilisation des formats BTILES et de l'application ORUXMAPS™ sur les tablettes ANDROID (*cf.* fiches méthodologiques en annexe p. 1156) permet de réduire considérablement le poids des données cartographiques embarquées, et par conséquent, réduit nos besoins en électricité, ce qui est crucial dans les régions éloignées et souvent sans alimentation électrique.

Cette thèse se distingue donc également par son appui pendant les missions de terrain, offrant avant, pendant et après les missions un support technique sur trois niveaux :

- la réalisation de cartes et d'atlas cartographiques ;
- l'enrichissement de la base de données numériques et informatiques du SIG au fur et à mesure de la reconnaissance de terrain ;
- l'établissement d'un modèle de karstification de référence.

1.6.3.3. L'étude préalable du Mozambique et du Malawi montre l'importance de cette nouvelle méthodologie de cartographie des formations carbonatées potentiellement karstifiées sous SIG

Au départ, cette thèse portait sur le diagnostic karstologique des formations carbonatées du Mozambique et du Malawi. Cependant, l'analyse des cartes géologiques a révélé que ces deux pays en comptent peu. On en observe essentiellement le long du littoral (Figure 114), mais ces formations sont trop récentes pour notre problématique, comme nous le verrons plus loin (p.177). Elles abritent de nombreux cénotes, cavités sous-marines creusées par l'action des vagues. Le contexte est donc différent de celui des karsts fossilifères étudiés et ne constitue vraisemblablement pas de bons pièges.
Les deux cartes ci-dessous, (Figure 113 et Figure 114), indiquent la localisation des secteurs considérés comme potentiellement karstiques d'après l'état des connaissances en 2009, soit avant la thèse.

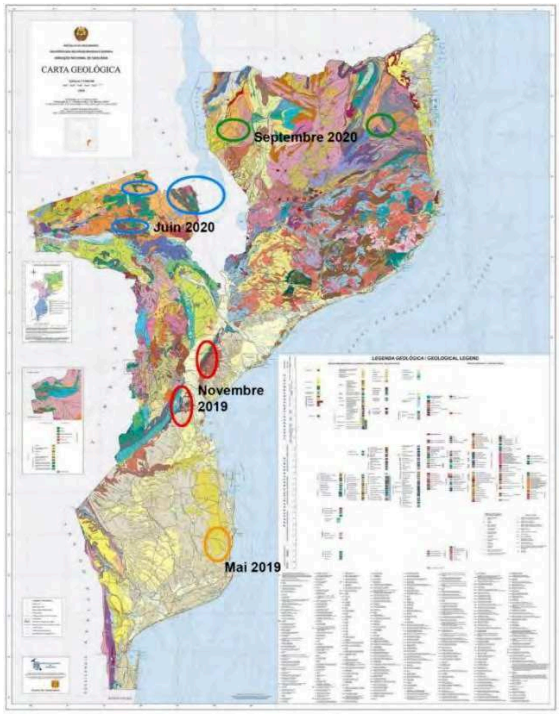


Figure 113 Secteurs considérés comme potentiellement karstiques en 2019, avant la thèse.

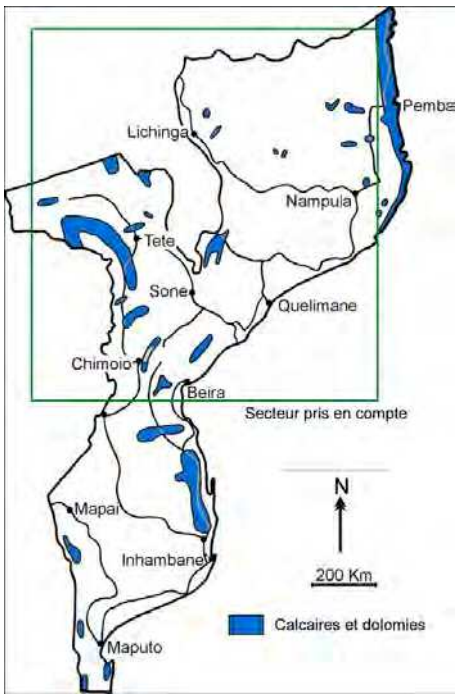


Figure 114 Idem mais indiqués en bleu (Source : Vernet – Habaque et al., 2017, Fig.2, p.11).

La nouvelle cartographie des formations carbonatées, ci-dessous (Figure 115), réalisée à partir de l'analyse des cartes géologiques au 1/ 250 000 permet de redessiner, identifier et mieux localiser les karsts potentiels du Mozambique et du Malawi et ainsi redéfinir les cibles à prospecter lors de la mission de 2022.
Comparer aux cartographies précédentes (Figure 113 et Figure 114), les formations carbonatées à l'affleurement (karsts potentiels) au Mozambique semblent moins nombreuses que ce qui avait été envisagé au début.

Nous présenterons ces secteurs cibles ainsi que les résultats de cette prospection dans le Chapitre 5 (p.1003). Nous pouvons toutefois déjà souligner que la mission de terrain a montré que, lorsqu'elles existent les formations carbonatées sont généralement métamorphisées en marbre (indiquées comme calcaires sur les cartes géologiques). Elles forment effectivement des reliefs, mais nous y avons trouvé peu de grottes.

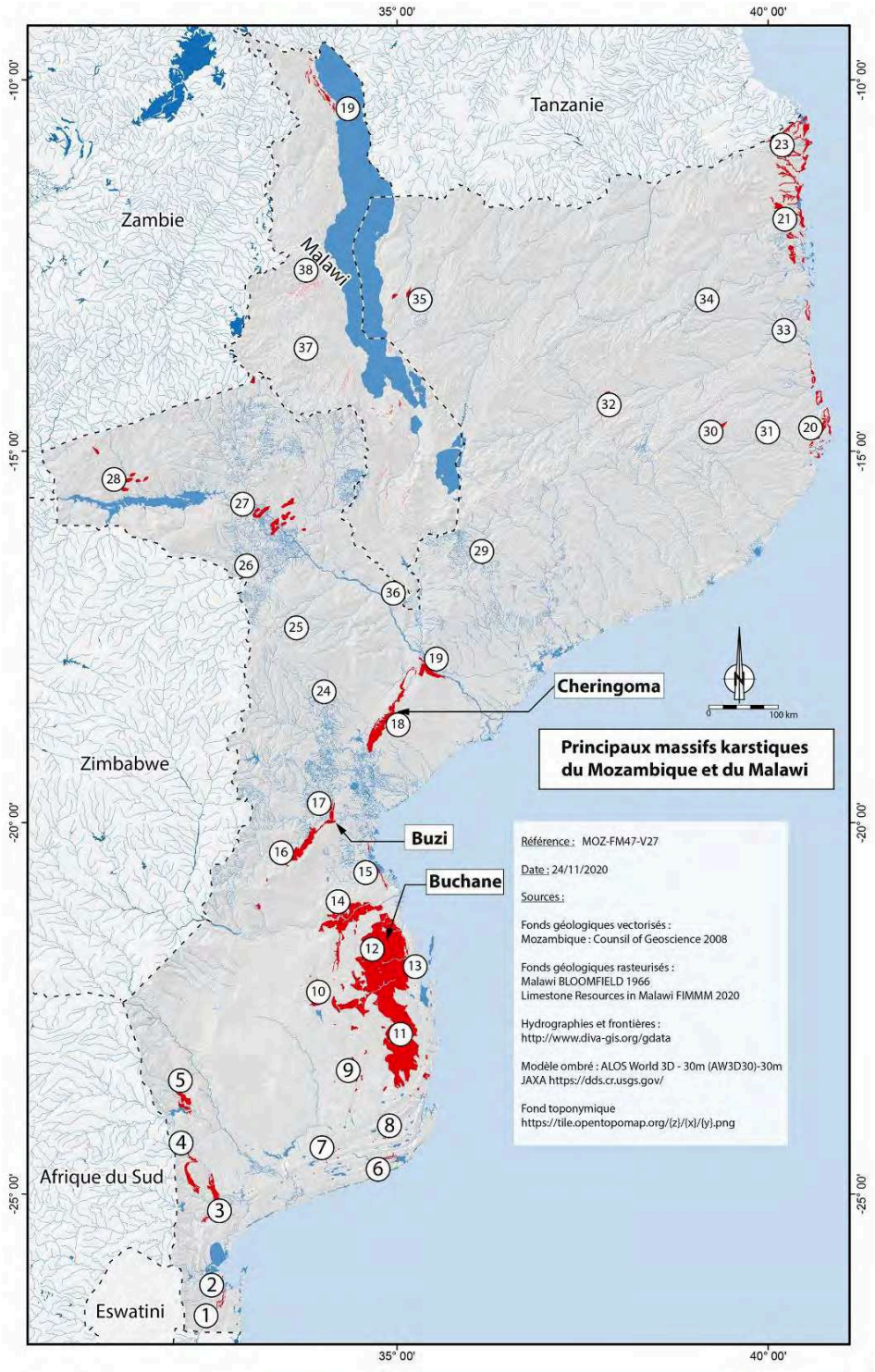


Figure 115 Nouvelle cartographie des formations carbonatées à l'affleurement en rouge (karsts potentiels) proposée par cette thèse pour le Mozambique et le Malawi.

1.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté, et illustré, les techniques et les outils de la géomatique mobilisés pour répondre à nos problématiques. Des fiches méthodologiques viennent compléter ce chapitre en annexe. Elles expliquent les protocoles et les étapes nécessaires à la réalisation de cartes inédites, adaptés à des recherches spécifiques. Nous avons expliqué le traitement des données de relief issues de mesures satellites, en discutant de leurs apports mais aussi de leurs limites. Notamment les exagérations de la profondeur de certaines dépressions à Buchane au Mozambique.
Nous avons longuement compilé et harmonisé l'ensemble des données intégrées dans le **SIG des karsts de l'Afrique australe** et utilisées dans l'ensemble de notre travail.
Il s'agit notamment de :

- cartes géologiques, qu'il a fallu obtenir, géoréférencer puis redessiner sous forme vectorielle ;
- données extraites de publications scientifiques, parfois anciennes, qu'il a fallu analyser et synthétiser ;
- données de terrain recueillies au cours des missions HOMINI'KARST, menées depuis 2015 dans plusieurs pays d'Afrique australe : l'Afrique du Sud, le Mozambique, le Malawi, la Namibie, le Botswana, le Zimbabwe et la Zambie.

Cette méthodologie, ainsi que l'élaboration du SIG, ont permis de produire des **cartes inédites des karsts et des karsts potentiels**. Leurs limites ont été redessinées, redéfinies et ont permis de mieux localiser les cibles à prospecter, comme cela a été mis en œuvre lors de la mission de 2022 au Mozambique et Malawi.
À présent, dans le 2, nous allons discuter des résultats issus des premières cartes inédites produites à partir du SIG. Nous les enrichirons par une analyse du contexte géologique et morphokarstique des karsts fossilifères sud-africains, ainsi que des grands bassins sédimentaires dans lesquels ils se situent. Le but est de mieux comprendre et expliquer la présence de karsts fossilifères afin de permettre leur identification dans les zones potentiellement karstiques révélées par le SIG.

2. CHAPITRE 2 : CONTEXTE GEOLOGIQUE ET MORPHOKARSTIQUE DES GROTTES FOSSILIFERES D'AFRIQUE DU SUD (*CRADLE OF HUMANKIND*, MAKAPANSGAT ET TAUNG)

Les grottes fossilifères d'Afrique australe, en particulier celles du *Cradle of Humankind*, de Makapansgat et de Taung, ne peuvent se comprendre qu'à la lumière de leur contexte géologique et morphokarstique. Ces cavités se sont formées dans des dolomies paléoprotérozoïques qui aujourd'hui sont profondément altérées. Elles ont été modelées par une succession de phases tectoniques, d'aplanissement et de karstification. La reconstitution de cette longue histoire, qui s'étend de l'Archéen à l'époque récente, permet de mieux saisir les mécanismes ayant conduit à l'ouverture des grottes au Plio-Pléistocène et à la préservation des remplissages fossilifères. Ce chapitre propose d'abord un cadre géologique et morphologique de l'Afrique australe, avant de préciser les processus d'érosion et de karstification qui expliquent la genèse et l'évolution des principaux karsts fossilifères étudiés.

2.1. HISTOIRE GEOLOGIQUE DE L'AFRIQUE AUSTRALE.....159

2.2. SURFACES D'EROSION SUR LE CONTINENT 161

2.3. SYNTHESE GEOLOGIQUE ET LOCALISATION DES KARSTS DE L'AFRIQUE AUSTRALE 197

2.4. KARSTIFICATION ET SPELEOGENESE DES KARSTS FOSSILIFERES SUD-AFRICAINS.....206

2.1. HISTOIRE GEOLOGIQUE DE L'AFRIQUE AUSTRALE

Elle se décompose en quatre périodes distinctes, s'étendant sur des durées considérables, parfois très espacées dans le temps, que nous avons synthétisées sur les échelles de temps présentées en annexe (p.1155, Figure 1134, Figure 1135 et Figure 1136 p.1156) :

(1) de la fin de l'Archéen (-2500 Ma) jusqu'à la fin du Protérozoïque (-600 Ma) c'est l'installation d'un vaste bassin marin sur une grande partie de ce qui sera l'Afrique australe (en fait sur le Gondwana qui donnera l'Amérique du Sud, l'Antarctique, l'Australie, l'Inde, etc.). Les témoins de ce bassin en Afrique australe sont aujourd'hui le **Bassin du Transvaal** (dolomies de Malmani), le **Plateau de Ghaap** (carbonates de Campbell Rand) en Afrique du Sud et le **Bassin de Kanye** au Botswana ;

(2) au Paléozoïque, la période du Karoo débute avec la formation de bassins marins qui seront ensuite compressés pour former la Chaîne Plissée du Cap (cf. en marron sur la Figure 139 (p.959)), localisée dans la partie méridionale de l'Afrique du Sud. Au nord de cette chaîne, s'installe un bassin d'avant-pays, le Bassin sédimentaire du Karoo qui recouvre une bonne partie de l'Afrique australe et notamment les anciens bassins carbonatés que nous avons décrits précédemment (Transvaal, Ghaap, Kanye) (en violet). Le Karoo montrait une extension bien plus importante que les dépôts conservés aujourd'hui. Puis, des glaciations importantes sont venues éroder le continent. Les témoins de cette érosion seront les tillites de la formation de Dwyka (en violet sur la Figure 139 et les grandes surfaces d'aplanissement (que l'on qualifie de pré-Karoo) encore préservées en Afrique australe ;

Les évènements géologiques pré-Karoo et la paléosurface subhorizontale, à 1600 m d'altitude, corrélée à ces évènements pourraient correspondre à une phase de karstification des dolomies de Malmani dans le Bassin du Transvaal et dans le *Cradle of Humankind* dont les plateaux dolomitiques karstifiés sont situés un peu en-dessous de cette altitude, caractéristique de la **Surface Africaine*** (voir définition ci-dessous).

(3) au Jurassique, certains des bassins marins initiés au Paléozoïque ont évolué en rifts (en vert sur la Figure 139). L'Océan Indien et l'Océan Atlantique Sud ont commencé à s'ouvrir, avec la création des premiers planchers océaniques basaltiques par accrétion océanique. Puis, au Crétacé inférieur, c'est la fragmentation du Gondwana : à l'ouest, c'est l'ouverture de l'océan Atlantique au Barrémien (-130 Ma selon Jungslager, 1999) et à l'est l'ouverture de l'océan Indien au Valanginien (-140 ma selon Petroleum Agency of South Africa, 2023 *in* Burke et Gunnell, 2008) ;

(4) à partir du Crétacé inférieur, on enregistre l'arrivée de flux sédimentaires fluviatiles sur les basaltes des planchers océaniques, nouvellement créés. Ces enregistrements sédimentaires résultent de l'érosion du continent en soulèvement (épeirogenèse). Les surfaces d'aplanissement pré-Karoo sont incisées et recoupées par de nouvelles surfaces dont la Surface Africaine. Les fleuves se réorganisent et font prograder les premiers deltas sur les croûtes océaniques, tant du côté du rift indien que du côté du rift atlantique. Les taux d'érosion ne peuvent être restitués par les géologues pétroliers qu'à partir du Crétacé inférieur. Il est difficile de déterminer les taux d'érosion avant cette période.

Le karst aura-t-il conservé des témoins de cette histoire ?

Les thèses et les travaux supervisés par François Guillocheau (Université de Rennes) décrivent ces évènements géologiques dans différentes régions africaines : bassin du Congo (Linol, 2013), marge de l'Océan Indien (Thomson, 2017), delta du Zambèze (Ponte, 2018), Namibie (Linol et al, 2015), delta de l'Orange (Dauteuil *et al.*, 2014), delta de l'Okavango (Royer, 2020), plateau sud-africain et ses deux marges (Baby, 2017), Madagascar (Delaunay, 2018) et le Zimbabwe (Ponte, 2018, Ponte *et al.,* 2019). À partir du Tertiaire, la partie orientale du continent africain s'individualise en formant le Rift est-africain. Ce processus tectonique engendre la création de bassins de rift où s'accumulent des formations détritiques, parfois riches en artefacts et en fossiles d'Hominines, interstratifiées avec des roches volcaniques datables. Ce volcanisme est intrinsèquement lié à l'amincissement crustal du rifting.

2.2. SURFACES D'EROSION SUR LE CONTINENT

Les grands replats morphologiques à l'échelle du continent africain ont été très tôt identifiés dans les paysages mais de nombreuses questions subsistent encore concernant leurs âges, faute de fossiles directeurs ou de couvertures sédimentaires bien datées. Comme l'indique cette citation de Tardy et Rouquin (1998, p.103), que nous citons textuellement :

> *« Au Sud et au centre de l'Afrique, la surface la plus ancienne, rattachée au **cycle du Gondwana**, est attribuée par King (1962) au Jurassique moyen ou supérieur, parce qu'elle oblitère les accidents tectoniques qui, au Lias, ont affecté la série du Karoo et parce que les marges du Gondwana sont recouvertes par les sédiments transgressifs du Crétacé. La surface de pénéplanation suivante, d'âge crétacé, est rattachée au cycle **Post-Gondwana**. […] Le cycle de pénéplanation suivant, appelé **cycle africain**, est séparé du précédent par les importants mouvements tectoniques de la fin du Crétacé. Au cours du Tertiaire, depuis le Paléocène jusqu'à l'Oligocène supérieur, s'est façonnée une grande surface monotone, appelée **Surface Africaine 1**, d'altitude assez constante dans toute l'Afrique centrale (Boulvert, 1996). La fin du cycle Africain est marquée par d'importants mouvements tectoniques et par la formation du **rift-est africain**, à l'Oligocène terminal. Le nouveau modelé de la **Surface Africaine II** se met en place à partir du Miocène inférieur jusqu'au Pliocène. Il caractérise le **cycle Fini-Tertiaire**, autrement appelé par Fair et King (1955) **cycle de Victoria Falls**. Il faut noter que ce cycle, autrefois réservé au Pliocène, couvre aujourd'hui une période plus longue et inclut aussi le Miocène. Le cycle suivant, sans doute peu important pour le cuirassement, est appelé cycle Quaternaire ou cycle du Congo. Devant l'extrême difficulté éprouvée pour dater les éléments du modelé latéritique, on choisit, par convention, de dénommer les différents cycles d'aplanissement par leur âge et de fixer les coupures au moment des grands évènements tectoniques qui ont le plus de chance d'avoir modifié les reliefs et les conditions de morphogenèse. Les principales phases de morphogenèse sont donc jurassiques, crétacée, début-tertiaire, fini-tertiaire et quaternaire. ». (Tardy et Rouquin, 1998, p.103).*

En Afrique du Sud la vaste surface plane qui correspond à la plaine du Karoo se confond parfois avec la Surface Africaine. Peut-être que l'impact de la glaciation Dwyka à la fin du Paléozoïque, avant le dépôt du Karoo, est responsable de cette planicité en ayant arasé les substrats préalablement. En tout cas, dans ce secteur, au sud-est du *Cradle of Humankind*, la Surface Africaine culmine à 1560 m d'altitude alors que les dépôts du Karoo sont conservés en place vers 1630 m d'altitude.

Ensuite, les cycles d'érosion postérieurs ont mis en place des aplanissements emboîtés en contrebas de la Surface Africaine.

Liste non exhaustive des auteurs ayant étudié les surfaces africaines :

- Dresch (1946) pour la République Démocratique du Congo, où est située la région karstique de Katanga.
- King (1951, 1954, **1962, 1967)** pour l'Afrique du Sud ;
- Lister (1967, 1987) pour le Malawi et le Zimbabwe (notamment Chimanimani) ;
- Partridge et Maud (1987, 1988, etc.) ;
- Burke et Gunnell, 2008 à l'échelle de l'Afrique australe ;
- Partridge *et al.*, 2010 (Map 1 p.13) ; Linol et De Wit, 2016, pour l'Afrique du Sud ;
- Baby, 2017 pour l'Afrique du Sud et le versant atlantique ;
- Ponte, 2018, pour l'Afrique australe et le Zimbabwe et le Malawi ;
- Segalen, 1995 rapide synthèse en Afrique, (Afrique australe, p.72);
- etc.

Une liste plus complète a été établie par Tardy et Roquin (1998, p.296).
Cette longue histoire géologique montre que l'Afrique australe a connu très tôt de grandes périodes de continentalisation, avec des émersions, des phases de karstification des formations carbonatées et des phases d'altération des autres types de roches. Les paysages de l'Afrique australe présentent aujourd'hui de vastes surfaces planes, de plusieurs centaines de kilomètres, synthétisées sur la Figure 136, et qui sont recouvertes de formations superficielles plus ou moins altérées (Tardy et Rouquin, 1998), comme le montrent les cartes des sols de la FAO-UNESCO (1977) (Figure 137) et qui correspondent aux plaines de corrosion (*stripped etchplain)* décrites par Guillocheau *et al.* (2018). La Figure 116 ci-dessous montre la **Surface Africaine** définie par Moore *et al.* (2009b). Il s'agit d'un profil d'altération constitué d'une saprolite profondément kaolinisé, recouvert de ferricrète.



Figure 116 La Surface Africaine photographiée par Moore et al. (2009b, Fig. 3, p. 73), à 10 km à l'est de Gweru sur la route Bulawayo – Harare, au Zimbabwe.

Nous pouvons citer ces trois autres extraits qui résument bien la problématique de cette partie.

> *« Les traits généraux du relief africain sont si simples qu'on a tendance à les schématiser : socle cristallin pénéplané, plateaux structuraux limités par des cuestas grandioses, bassins remblayés, occupés par des lacs et généralement drainés par des cours d'eau récents, encaissés dans les hauteurs qui isolent ces bassins de l'Océan, à la suite de captures par érosion régressive ». […] Quelles sont les surfaces qui nivèlent le socle, car elles peuvent être multiples ? Les retrouve-ton dans les cuvettes ? Comment s'est établi le drainage de ces dernières ? (Dresch, 1946, p.116).*

> *« C'est en ces système de plateaux ou de basses-plates-formes que se trouvent les blocs affaissés vastes dépressions occupant les régions centrales de l'Afrique : cuvette du Niger moyen, des Pays-Bas du Tchad du Bahr-el-Ghazel, du Zambèze, du Congo surtout, la mieux dessinée de toutes. L'Afrique australe elle-même n'est pas autre chose qu'un plateau déprimé au centre – le désert du Kalahari- relevé sur tous ses bords par des talus montagneux de 2 000 à 3 000 m du Damara à l'Ouest, au Drakensberg à l'Est, en passant par les plateaux et les montagnes du Sud. Mis à part les pays du Nord-Est africain et la région des Grands Lacs, on ne voit sur cette Afrique embrassée d'un seul coup d'œil que des déformations à grand rayon de courbure engendrant l'uniformité. L'examine-t-on de plus près ? Ce sont d'immenses étendues sans relief, des centaines de kilomètres parcourus sans que le regard trouve un accident où s'accrocher. Que pèsent ces petits massifs volcaniques dans les millions de kilomètres carrés du vieux socle cristallin, ces chicots isolés qui trouent le désert, ces alignements de dunes en vagues figées, ces monts du Hombori ou ces falaises gréseuses de Bandiagara qui ne dépassent guère quelques centaines de mètres de hauteur relative et que souligne la courbe du Niger ? Rien à l'intérieur ne réussit à dissiper la désespérance monotonie de la terre. ». (Milley Jacques, 1960, p.18. La vie sous les tropiques. Connaissance de l'Afrique).*

> *« La discordance à la base du groupe du Kalahari marque une surface de pénéplanation à l'échelle du continent qui est communément appelée la « Surface Africaine » (par exemple King 1963 ; Partridge et Maud 2000 ; Haddon et McCarthy 2005 ; Decker et al. 2013), développée à la suite d'une dénudation et d'un soulèvement importants suite à la séparation de l'Afrique du Gondwana lors de l'ouverture des océans Indien et Sud-Atlantique, et au début de l'épirogénèse du Kalahari (De Wit, 2007) » Linol et al. (2015, p.193).*

Intéressons-nous maintenant aux évènements plus récents du Mésozoïque car ils concernent plus directement les paysages que nous étudions. Après le rifting de l'épisode précédent, les grands fleuves de l'Afrique australe se réorganisent au fur et à mesure que d'importantes surrections continentales (*uplifts*) se produisent et sont à l'origine de nouvelles surfaces d'érosion qui continuent d'aplanir les reliefs et qui font que les fleuves apportent de grandes quantités de sédiments dans les nouveaux deltas qui progradent vers le large sur ce nouveau rift.

Nous verrons notamment que l'érosion régressive a été importante sur le continent et que certains reliefs en roche dure ont formé des barrières face à la progression de cette érosion (*knickpoint)* vers l'intérieur du continent.

> *« Au moment de la rupture du continent du Gondwana, l'Afrique [...] était fortement aplanie. La mise en place d'un nouveau niveau de base, consécutif à cette rupture, s'accompagne du départ d'un nouveau cycle d'érosion au Crétacé. Les répercussions lointaines de l'orogenèse alpine, se traduisent par de nouveaux niveaux de base et de nouveaux aplanissements, dont celui du début à la* ***mi-Tertiaire*** *est le mieux réussi avec la mise en place de la* ***surface africaine*** *qui concerne des étendues immenses. Un nouvel aplanissement se produit à la* ***fin du Tertiaire****, suivi par plusieurs autres au cours du Quaternaire, conséquences des changements répétés du niveau des mers dus aux glaciations et déglaciations successives » (Segalen, 1995, Tome 3, p.102).*

Ces phases de surrection du continent peuvent être liées à des points chauds ou à des processus mantelliques dont les causes ne sont pas encore tranchées.

Les hypothèses principales sont :

- l'amincissement crustal pendant le rifting provoque une réduction de densité sur les continents qui ont tendance à se soulever (rebond isostatique) ;
- le rôle des panaches du manteau (*plume*) (Moore et Broderickt, 2002) ;
- la dynamique du manteau terrestre (Gurnis *et al.*, 2000) ;
- une vaste province à faible vitesse de cisaillement LLSVP dans le manteau profond (Lithgow-Bertelloni et Silver, 1998 *in* Guillocheau *et al.*, 2012).

Quelles qu'en soient la ou les causes, une pénéplanation généralisée s'observe à l'échelle du continent africain. Cette érosion a débuté **bien avant le Crétacé** (-140 Ma), surtout si on prend en compte que ces bassins sédimentaires sont très anciens, datés du Paléoprotérozoïque *(Bassin du Transvaal, -2588 Ma) et du Protérozoïque (Bassin du Waterberg, -1500 Ma* (Callaghan *et al.,* 1991 ; Dorland et al., 2006). Cette érosion a été importante car les roches du socle qui affleurent aujourd'hui en surface, le granite d'*Halfway House*, le gneiss de Lanseria et le Complexe du Bushveld, se sont formées à plusieurs kilomètres en profondeur. La coupe de la Figure 349 (p.395) montre clairement l'importance de cette érosion.

Les auteurs évoquent, avant la Surface Africaine, une Surface pré-Waterberg et une Surface pré-Karoo, déjà mentionnées précédemment. Cette dernière correspond à l'érosion provoquée par les glaciers de la fin du Paléozoïque. En général, les auteurs font commencer cet épisode des « surfaces d'érosion africaines » à partir du Crétacé inférieur car c'est à partir de cette époque que les géologues sont capables de quantifier et mesurer des taux d'érosions, à partir des premiers dépôts sédimentaires sur les marges continentales (Guillocheau *et al.*, 2018 et Baby,2017). Décrivons-les.

2.2.1. Nouvelles données pour étudier et déterminer l'âge des paléosurfaces

Depuis les années 2000, deux technologies offrent de nouveaux outils pour identifier les surfaces d'érosion et fournir de nouveaux jalons chronologiques :

- les mesures des reliefs par satellite (MNT), décrites dans le Chapitre n°1 (p.36) ;

- l'imagerie par sismique réflexion de la géométrie des deltas au débouché des grands fleuves. Ces analyses stratigraphiques séquentielles permettent de reconstituer les taux d'érosion sur le continent dans le passé (Guillocheau *et al.*, 2012 ; Saïd, 2015 ; Guillocheau, 2016 ; Baby, 2017 ; Braun *et al.*, 2012 ; Braun, 2018 ; Ponte, 2018) et fournissent des jalons chronologiques qui manquent sur le continent du fait de l'érosion et de l'altération. Nous utiliserons ces analyses pour essayer de dater les karsts du nord-ouest du Botswana (Chapitre n°4 p.473) dont le niveau de base dépendait de la circulation des fleuves du Limpopo et du Zambèze comme nous le verrons dans le Chapitre n°4 (p.820).

2.2.1.1. Les mesures de relief par satellite

La mesure des reliefs par satellite, l'élaboration des MNT, décrites dans le Chapitre n°1 (p.36), ainsi que l'utilisation des SIG, permettent l'identification des paléosurfaces d'érosion et leur corrélation d'un bassin à l'autre à l'échelle du continent. Cela se fait, par exemple, grâce à l'analyse hypsométrique des reliefs, à l'établissement de courbes de niveau à l'échelle du continent, ou encore par la visualisation des reliefs en 2.5D.

2.2.1.2. L'étude stratigraphique séquentielle des deltas

Des corrélations stratigraphiques et chronologiques ont été établies entre les discordances sédimentaires des deltas sous-marins dans le canal du Mozambique ou sur les côtes de l'Afrique australe, qui sont bien datées, et les surfaces continentales en Afrique australe (Burke et Gunnell, 2008 ; Thomson, 2017 ; Ponte, 2018 ; Guillocheau *et al.*, 2018, Baby, 2019), qui sont, quant à elles, difficiles à dater. Pour ce qui concerne les évènements géologiques **à partir du Crétacé inférieur**, les géologues pétroliers sont capables de quantifier les taux d'érosion et les surrections du continent car, après le rifting de l'épisode précédent, les deltas des grands fleuves de l'Afrique australe, qui se réorganisent, enregistrent des accumulations terrigènes importantes qui favorisent leur progradations sur les croûtes océaniques nouvellement créées.

Ces progradations de corps sédimentaires du delta sur les marges sont donc liées à des phases d'érosion continentale qui amènent des charges sédimentaires détritiques importantes aux débouchés des grands fleuves. Les géologues pétroliers visualisent par sismique réflexion la géométrie de ces deltas, pour la recherche pétrolière, et datent ces phases très précisément, à 1000 ans près (Guillocheau ; comm. orale).

Ces deltas sont présents sur tout le pourtour du continent Africain qui est bordé, en ce qui concerne l'Afrique australe :

- Par l'Océan Atlantique, à l'Ouest, qui commande le niveau de base du fleuve Orange et de son affluant la rivière Vaal, ce dernier érode la partie ouest et sud du *Cradle of Humankind* ;

Pour la marge atlantique sud de l'Afrique australe les premiers dépôts post-rift du delta de l'Orange sont datés du Barrémien (-130 Ma) (Figure 117) (Jungslager, 1999).

- Par l'Océan Indien, à l'Est, qui contrôle le niveau de base du fleuve Limpopo, de son affluant la rivière Krokodil et celui du fleuve Zambèze. La rivière Krokodil érode la partie est et nord du *Cradle of Humankind*.

Pour la marge indienne de l'Afrique australe les premiers dépôts post-rift du delta du Zambèze, du Limpopo et du Tugela sont datés du Valanginien au Cénomanien supérieur (de -140 Ma à -100 Ma) (Figure 118) (Petroleum Agency of South Africa (2003), modifiée par Burke et Gunnell, 2008, fig. 28, p.49). Des informations sont disponibles pour le delta de Beira (cf. Mueller *et al.*, 2016 in Thomson, 2017, Fig.11 p.179).

> *« Le delta du Zambèze enregistre une phase d'afflux important de sédiments après 10 Ma, qui a été attribuée à un doublement de la taille du bassin versant du Zambèze au cours du Pliocène. Les profils topographiques longitudinaux des fleuves africains présentent les nombreuses marches topographiques, définissant les rapides et les knickzones, qui sont typiques des fleuves des Tropiques » (Bunke et Gunnell, 2008 p.57).*

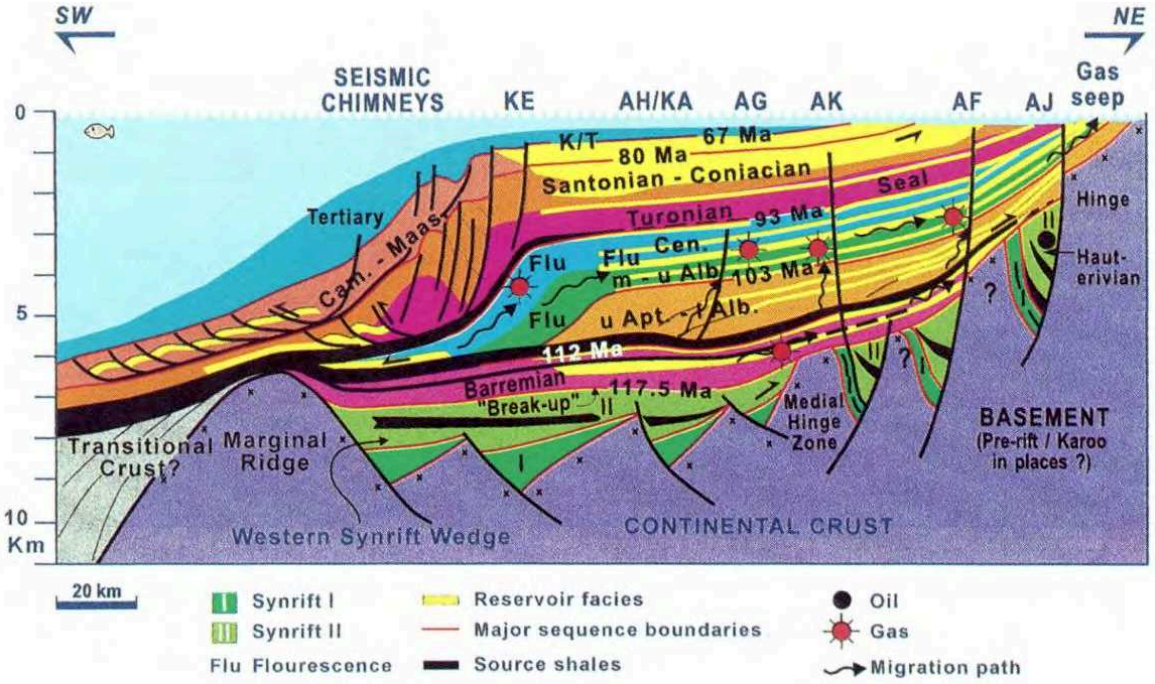


Figure 117 Analyse stratigraphique séquentielle du delta de l'Orange (Jungslager (1999, Fig. 2). Il existe une version modifiée par Bunke et Gunnell (2008, fig.27, p.49).

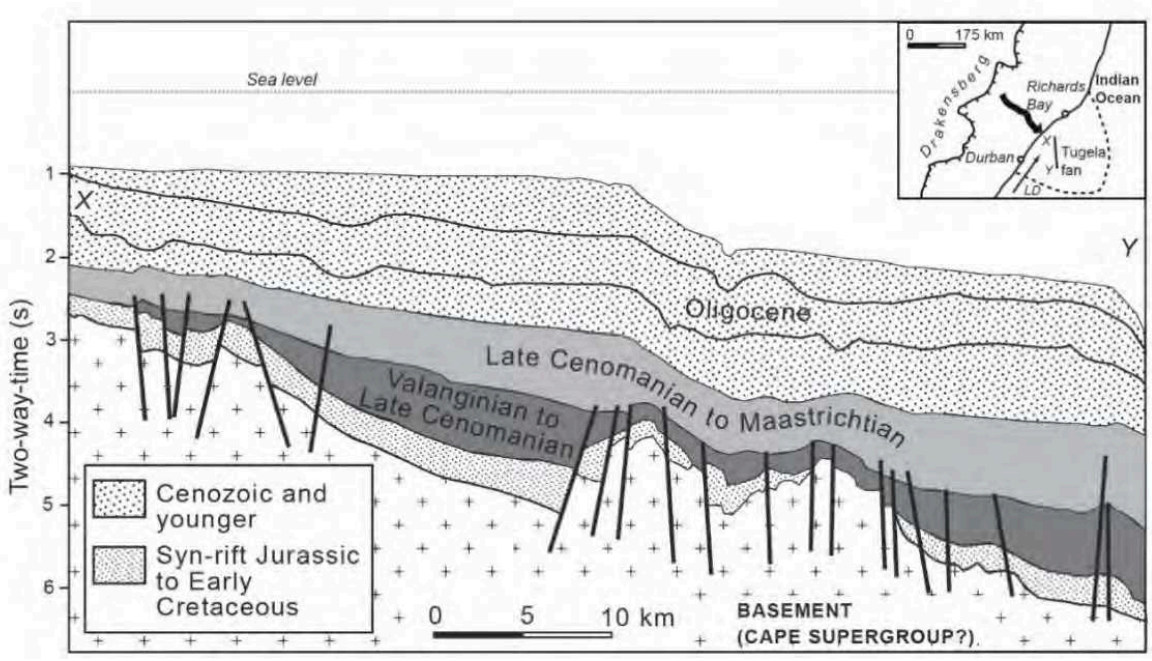


Figure 118 Analyse stratigraphique séquentielle du delta de la Tugela (Source : Petroleum Agency of South Africa (2003), modifiée par Burke et Gunnell, 2008, fig. 28, p.49).

La Figure 119, ci-dessous, réalisée par Ponte (2018), synthétise la chronologie (en abscisse) des arrivées de sédiments pour les principaux deltas de l'Afrique australe et rappelle aussi les datations obtenues pour les principales surfaces d'aplanissement.

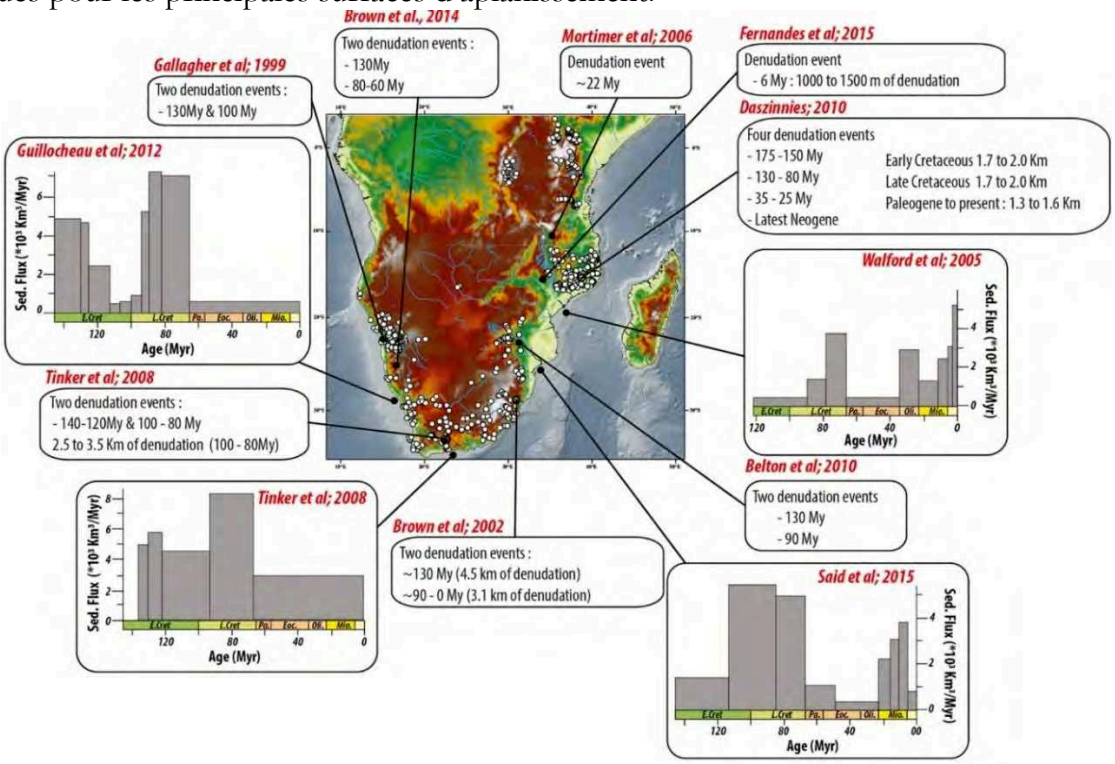


Figure 119 Les différents taux d'érosion calculés au débouché des deltas des fleuves à partir du Crétacé inférieur et représentée sur une échelle horizontale des temps géologique. (Source : Ponte, 2018).

Ces deltas ne se mettent donc en place qu'à partir du Crétacé inférieur. L'étude des deltas permet de corréler les surfaces continentales qu'à partir du Crétacé inférieur (vers – 140 Ma) mais cette méthode ne permet pas de caractériser les phases d'altération et d'érosion du continent antérieures au rifting. Aucun indice de ces phases d'érosion plus anciennes ne peut être recherché au niveau de ces deltas, qui leur sont postérieurs.

Les indices de ces phases d'érosion et d'altération (et de karstification lorsqu'il s'agit de carbonates) seront donc à rechercher sur le continent :

- au niveau des surfaces d'érosion (hiatus sédimentaires) et des discordances stratigraphiques mises en évidence par la carte géologique synthétique (p.198) ;
- au niveau des formations altérées si elles sont conservées et en prenant en compte qu'elles ont continué à évoluer. Ces informations seront fournies par les cartes des sols à l'échelle :
  - de l'Afrique (FAO, 1977) *(Soil Atlas of Africa* (Jones et al, 2013)) (Figure 137, p 196) ;
  - du Mozambique : Cartas de solos e Instituto de *Investigaçao Agronomica de Moçambique*, 1972, 1990 et INIA/DTA 1994 ;
  - de l'Afrique du Sud le SOTERSAF de l'ISRIC (Dijkshoorn, 2003).
- au niveau des karsts, que ce soit en déterminant quand ils se sont mis en place ou en étudiant leurs remplissages. Par exemple :
  - avec les remplissages fossilifères des grottes du *CoH* (Chapitre n°3) ;
  - avec les remplissages karstiques alluviaux allochtones à diamants (Helgren, 1979 ; **Stratten, 1979** *in* Lageat, 1989 ; De Wit, 1981, 1996, 1999 ; Marshall et Norton, 2009), indiquant le démantèlement des kimberlites crétacées situées en amont.

En conclusion, seule une partie récente des phases d'érosion continentale est enregistrée au niveau des deltas, et seulement à partir du Crétacé inférieur (au Valanginien pour le versant indien et au Barrémien pour le versant atlantique). L'étude des surfaces, quant à elle, permet de reconstituer l'installation des grands fleuves africains qui décapent les topographies antérieures en créant des surfaces d'érosion. Ces dernières finissent par atteindre les formations carbonatées qui vont se karstifier, notamment par fantômisation ou par crypto-altération comme nous allons le décrire après (p.214), puis piéger des sédiments et des fossiles lors de leur débourrage.

2.2.1.3. Pour le Plateau sud-africain et le Cradle of Humankind

C'est avec l'ensemble de ces données que les géomorphologues (Burke et Gunnell, 2008 ; Guillocheau *et al.,* 2013a ; Baby, 2017) ont déterminé qu'aucun relief antérieur au Crétacé supérieur (vers -75, -65 Ma) n'est conservé en Afrique et que « vers le nord, aucun relief n'est plus ancien que l'Éocène moyen (vers -50, -40 Ma) » (Guillocheau *et al.,* 2013a).

On peut donc considérer le début du démantèlement du **Plateau sud-africain**, composé du *West Rand*, du *Central Rand* et de l'*East Rand*, comme le montre la carte (p.204), mise en évidence par la coupe géologique (p.395) est datée au plus tôt du Crétacé supérieur. Le *Cradle of Humankind* et la vallée de la Bloubank qui ont entaillé ce plateau, sont donc postérieurs à cette période. La Chaîne du Witwatersberg et la Chaîne du Magaliesberg, qui constituent un soubassement important du *Cradle of Humankind,* et sont visibles sur la Figure 426 (p.467), se sont formées au Paléoprotérozoïque, lors de la collision du Craton du Kaapvaal et du Craton du Zimbabwe. Leurs reliefs ont ensuite évolué par érosion différentielle et sont postérieurs aux aplanissements post-crétacés. En effet, des surfaces d'aplanissement ont nivelé les sommets du Witwatersberg à 1600 m et du Magaliesberg à 1700 m (p.327). Cette Surface Africaine peut elle-même être polygénique vu sa durée. Nous reviendrons sur ces éléments dans le Chapitre n°3, consacré au *CoH*.

2.2.1.4. Âges des paléosurfaces

Les études géochimiques des couvertures sédimentaires et pédologiques des paléosurfaces, ont fourni des âges selon plusieurs méthodes de datations :

- datation des cryptomélanes par la méthode ^{40}K-^{40}Ar (Vasconcelos *et al.*, 1992 in Tardy et Rouquin, 1998, p.313) ;
- datation Al-Al ;
- thermochronologie à basse température.

Nous avons indiqué sur la carte synthétique des surfaces d'Afrique australe (p.192) les dates compilées par Partridge (1998, Fig.2, p.170). Cependant « c*es surfaces ayant été surélevées à la fin du Tertiaire les altérations qu'elles portent sont probablement plus récentes que l'âge de leur façonnement* » (Tardy et Rouquin, 1998, p.139).
Comme l'indique aussi la citation de Burke et Gunnell (2008, p.5) :

> *« Traditionnellement, la chronologie de la dénudation de l'Afrique a été reconstituée sur la base de corrélations d'altitude (par exemple, King, 1962), ou du point de vue de corrélations de faciès latéritiques liées à des reconstructions paléoclimatiques (par exemple, Tardy et Roquin, 1998). Mais les surrections récentes, survenues il y a 30 000 ans (Burke, 1996 ; Burke et al., 2003), faussent les corrélations d'altitude ».*

De plus, *« les formations de couverture ont souvent disparu, si tant est qu'elles n'aient jamais existé, et leur stratigraphie reste encore mystérieuse »* (Dresch, 1946, p.118). Malgré ces difficultés, plusieurs auteurs ont établi des corrélations entre ces surfaces planes et des âges géologiques. Nous allons présenter les plus significatives.

2.2.2. Différents modèles des surfaces d'érosion en Afrique australe

Nous rappelons ici les différents modèles qui se sont succédé ou opposés jusqu'à l'avènement des techniques modernes d'étude des reliefs et des dépôts deltaïques sur les marges continentales, comme expliqué précédemment.

2.2.2.1. Modèle de King (à partir des années 1959)

D'après **King,** et cité par Lageat (1989, p.11) :

- Surface Gondwana (Jurassique) ;
- Surface post-Gondwana (Crétacé inférieur) ;
- Surface africaine (fini-Crétacé à-mi-Tertiaire) ;
- Surface post-africaine 1 (Miocène) ;
- Surface post-africaine II (Pliocène).

2.2.2.2. Modèle de Lister (1967, 1987)

Pour le Malawi (d'après **King, 1963** *in* Lister 1967, p.15) :

- Surface Gondwana (Jurassique) ;
- Surface post-Gondwana (Crétacé inférieur à moyen) ;
- Surface africaine (Crétacé supérieur à Tertiaire inférieur) ;
- Surface post-africaine (Miocène supérieur à Pliocène) ;
- Surface quaternaire (fin du Pliocène à actuel).

Pour le Zimbabwe (d'après **King, 1967, Pp.274-278** *in* Lister 1987, p.17) :

- Surface fossile Pre-Karoo (Paléozoïque supérieur (diffères selon les endroits)) ;
- Surface fossile Intra-Karoo (Trias)
- Surface Gondwana (Jurassique moyen à supérieur)
- Surface post-Gondwana (Crétacé inférieur) ;
- Surface africaine (Crétacé moyen - fin de l'Oligocène) ;
- Surface post-africaine (Miocène) ;
- Surface pliocène (Pliocène) ;
- Surface quaternaire (fin du Pliocène à actuel).

Notons l'évolution des idées sur les datations des surfaces d'érosion africaine chez Lister entre 1967 et 1987.

2.2.2.3. Modèle de Ponte (2018)

Ponte (2018, p.175 et tableau synthétique (p.160) cartographie jusqu'à 7 surfaces d'aplanissements en Afrique du Sud, au Zimbabwe, au Malawi et en Zambie, dont certaines sont disséquées et représentées par des hachures. Il distingue également la formation récente des sables du Kalahari *(Kalahari Sands)* que nous présenterons dans le Chapitre n°4 sur le Botswana (p.473). Sa carte est présentée ultérieurement (p.174). Ponte (2018) propose des corrélations entre ces surfaces et celles définies par d'autres auteurs : King (1967, 1982), Lister (1967, 1987) et Partridge et Maud (1987). En résumé, Ponte (2018, p. 152 et tableau synthétique p.160) (Figure 120 p.174) distingue :

- La **surface Gondwana** datée du Jurassique moyen à terminal (Surface S1);

  « La surface du Gondwana est définie par la fin de l'épanchement volcanique Karoo et le début de la dislocation du Gondwana. Le volcanisme Karoo ainsi que le rifting n'étant pas synchrone à l'échelle du continent africain, la surface gondwanienne est considérée comme diachrone » Ponte (2018, p. 152).

- La **surface post Gondwana** datée du Crétacé inférieur (aussi la Surface S1);

  « La surface post Gondwana débute après la dislocation du Gondwana jusqu'à la base du Crétacé supérieur. Aujourd'hui extrêmement décapées par les cycles érosifs postérieurs, les surfaces Gondwana et post-Gondwana sont limitées aux altitudes les plus élevées » Ponte (2018, p. 152).

- La **surface africaine** datée du Crétacé moyen à Oligocène terminal (Surfaces S2, S3 et S3') ;

  « Le Crétacé moyen est caractérisé par l'initiation d'une déformation à grande longueur d'onde puis par une période de quiescence tectonique. Liée à la longue durée de ce cycle, la surface africaine qui en résulte est caractérisée par (i) une surface très plane, étendue sur de vastes zones géographiques, (ii) la présence de ferricrètes, bauxites et calcrètes, dépendant de la lithologie du substratum et du climat » Ponte (2018, p. 152).

- La **surface post-Africaine,** datée du Miocène (Surface S4 et S4 déformée) ;
- La **surface pliocène,** datée du Pliocène (Surface S6) ;
- La **surface quaternaire,** datée de la fin du Pliocène à l'actuel (Surface S7) ;

2.2.2.4. Synthèse cartographique de Ponte (2018) pour le nord de l'Afrique du Sud, le Zimbabwe, le Mozambique, le Malawi, la Zambie

La synthèse cartographique proposée par Ponte (2018, p.175[6]) regroupe le nord de l'Afrique du Sud, le Zimbabwe, le Mozambique, le Malawi et la Zambie. Notamment, les secteurs qui nous intéressent situés entre le *Cradle of Humankind* et le Rift-Est africain. Il identifie sept surfaces d'aplanissement (Figure 120 et Figure 121) comme nous venons de le voir.

Récapitulatif des éléments cartographiés par Ponte (2018, p.175) :

Surface S1 (Surface du Gondwana).

Surface S2 (92 – 83 Ma) (Crétacé supérieur – Turonien Santonien) (correspond à la Surface Africaine de King, 1967, 1982, Lister 1967, 1987). Cette surface recoupe les formations du Karoo datées entre -183 et 176 Ma (Jourdan *et al.*, 2008 *in* Ponte (2018, p.152), elle est donc postérieure à cette date.

Surface S3 (83 – 72 Ma) (Crétacé supérieur – Campanien) (correspond à la Surface Africaine de King, 1967, 1982, Lister 1967, 1987 et à la Surface post Africaine 1 de Partridge et Maud, 1987). + Surface S3 dégradée Cette surface érode les formations du Crétacé inférieur et il se dépose dessus les sédiments du Paléocène (formation de Grudja et formation de Cheringoma) datés entre 66 et 41 Ma (Salman et Abdula, 1995 *in* Ponte (2018, p.152).

Surface S4 (26-16 Ma) (Oligocène à Miocène) (Surface post Africaine et Surface post Africaine 2 de Partridge et Maud, 1987) +Surface S4 déformée Cette surface est recouverte par les sédiments marins de la formation de Jofane datée du Miocène moyen (Salman et Abdula, 1995 *in* Ponte (2018, p.152). Et elle est recouverte par la formation de Sungwe datée du miocène.

Surface S5 *Wave cut surface correspond à la transgression marine qui a déposé la formation de Jofane* datée du Miocène moyen (Salman et Abdula, 1995 *in* Ponte (2018, p.152) (correspond à la Surface post-Africaine).

Surface *S6 post ~3 à 2.5 Ma (Pliocène)*
Surface *S7 surface actuelle*
En gris : surface disséquée
En jaune : Formation des sables du Kalahari

[6] Voir aussi : Ponte, 2018, p.59 et p.178.

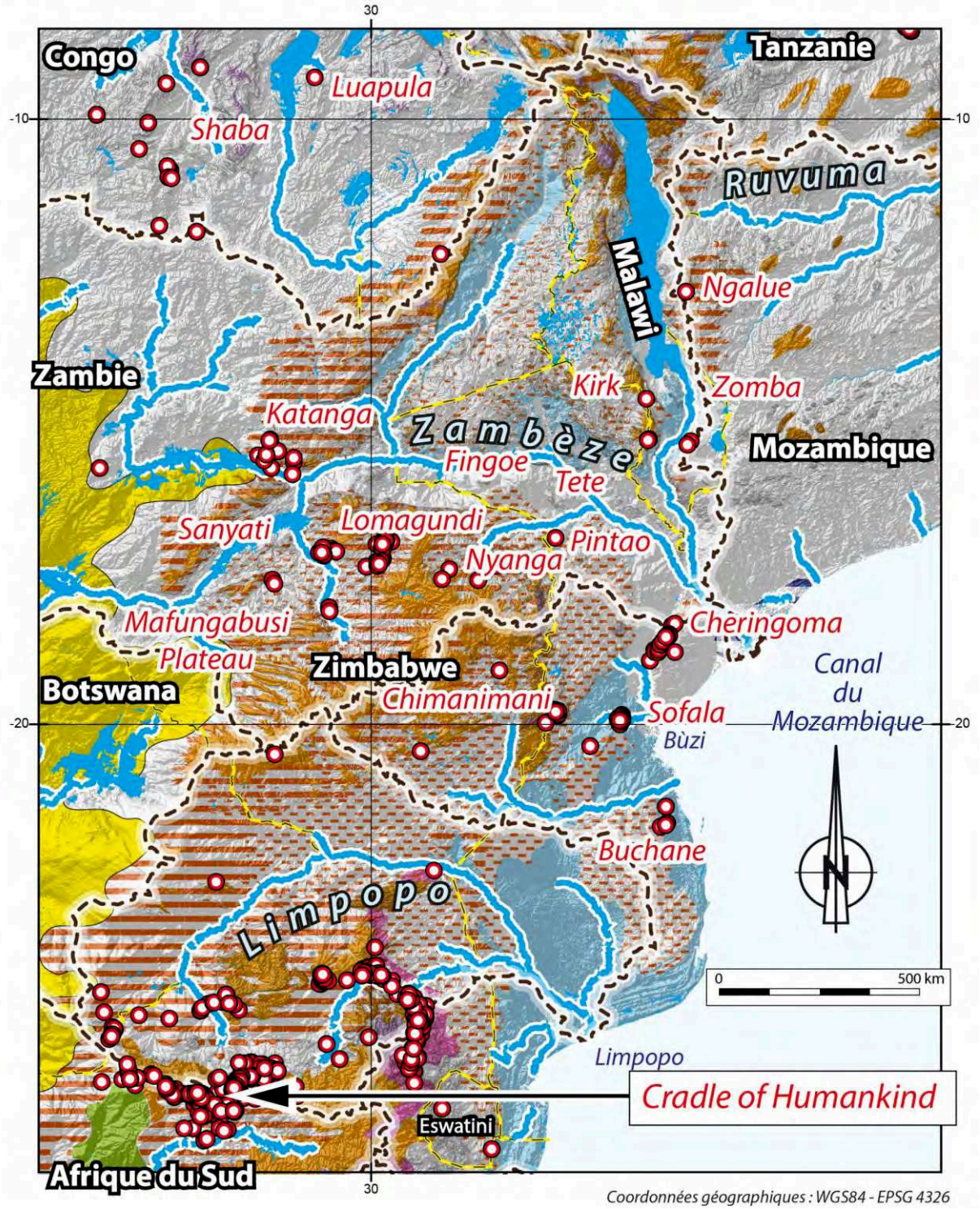


Figure 120 Position des différents karsts et des sept surfaces identifiées par Ponte (2018, p.175, modifié).

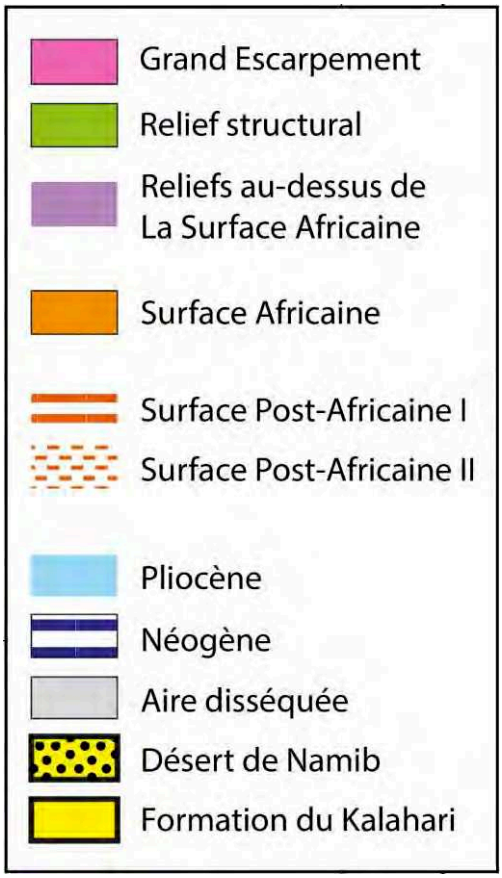


Figure 121 Légende de la carte précédente.

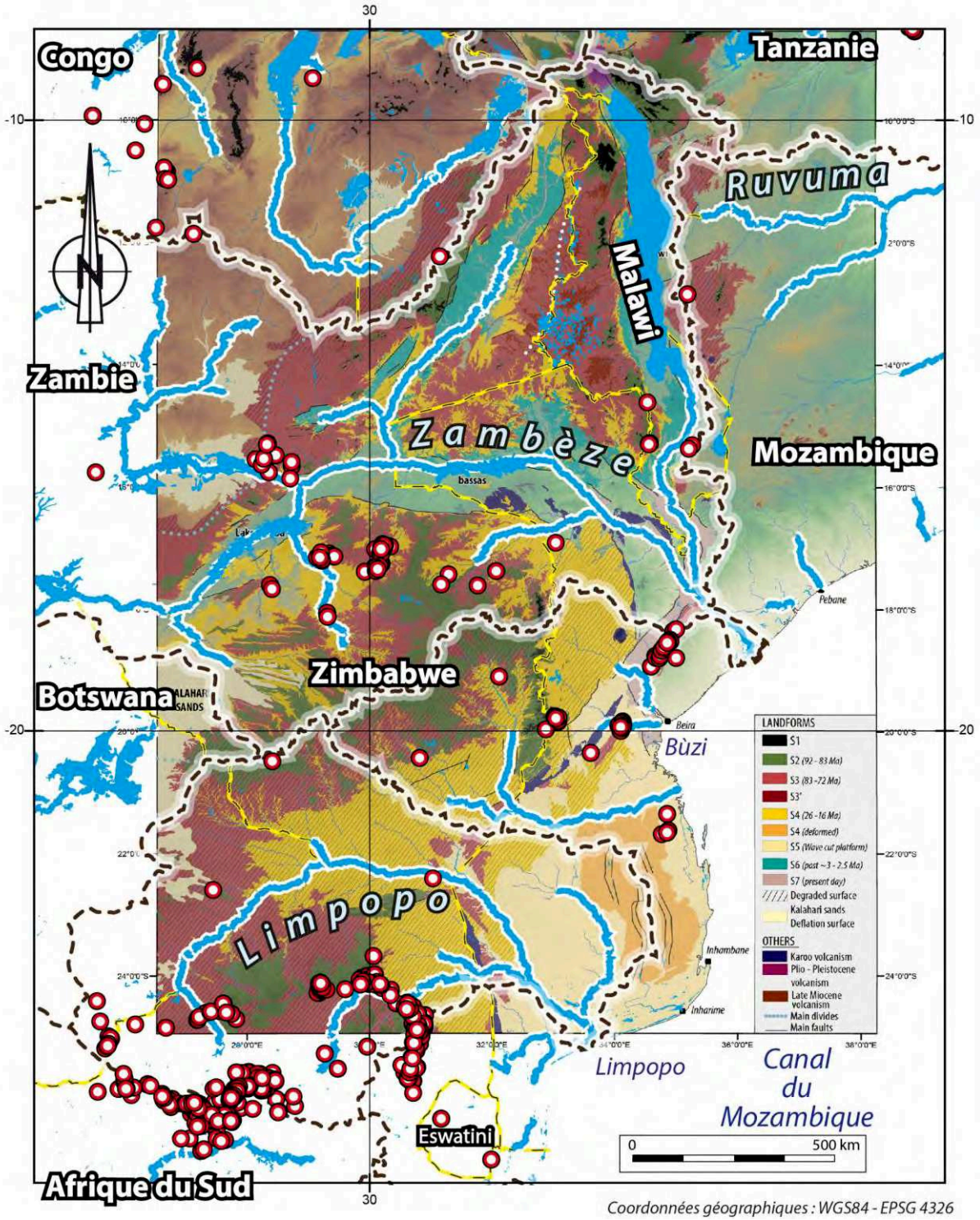


Figure 122 Les sept surfaces cartographiées par Ponte (2018, p.175, modifié).

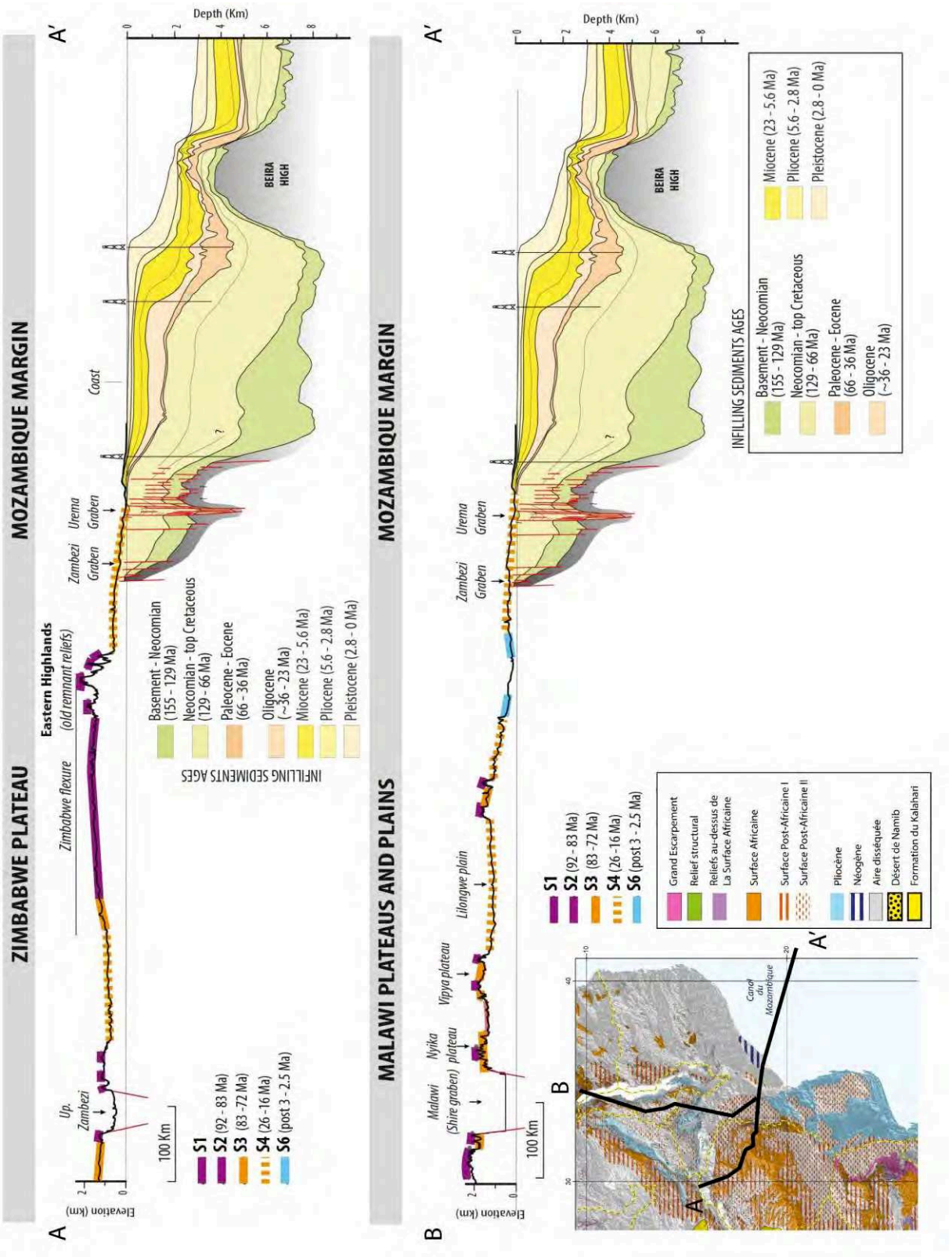


Figure 123 Stratigraphie séquentielle sur deux grands profils (nord sud en haut et ouest-est en bas) entre le continent africain et la marge océanique du Canal du Mozambique. (Ponte, 2018, p.178).

On repère sur la carte précédente (Figure 120) le karst mozambicain de Buchane que nous avons prospecté et dont nous parlons plus loin (p.1009). Ce karst, situé sur la surface S7 définie par Ponte (2018), semble récent par rapport à nos problématiques de recherche

2.2.2.5. Modèle de Tardy et Rouquin (1998)

Tardy et Rouquin (1998, p.103) proposent de classer les surfaces de la manière suivante :

- **Surface Gondwana** (Jurassique moyen ou supérieur pour **King, 1962**) : Cycle Gondwana ;
- **Surface Post-Gondwana** (Crétacé) : Cycle Post-Gondwana ;

La fin du Crétacé est marquée par d'importants mouvements tectoniques.

Du Tertiaire, du Paléocène à l'Oligocène supérieur :

- **Surface Africaine 1** de **King (1951)** (Crétacé) : Cycle Africain.
- La fin de ce cycle est marquée par l'ouverture du Rift est-africain, (p.5), dont l'initiation est datée de l'Oligocène terminal (Tiercelin et Lazzar, 2002 ; Molnar et Stock, 2009) ;
- **Surface Africaine II** (du Miocène inférieur au Pliocène) : Cycle Fini-Tertiaire ou Cycle de *Victoria Falls* **(Fair et King, 1955)**.
- Cycle Quaternaire ou Cycle du Congo.

2.2.2.6. Modèle de Burke et Gunnell (2008)

Pendant longtemps, les géomorphologues ont pensé que les reliefs africains et les Surfaces Africaines dataient de l'époque du Gondwana (King, 1954) ou étaient liés à la mise en place des rifts jurassiques, comme le proposent Burke et Gunnell (2008). Après la séparation des bords d'un rift, on devrait retrouver sur les deux continents issus du rifting, des reliefs correspondant à des épaulements de rift (effet d'épaule), également appelés « bourrelets de marge passive » (Gunnell, 1998). Selon Burke et Gunnell (2008) leur érosion serait rapide (moins de 10 Ma) et fournirait des sédiments terrigènes aux deltas en cours de progradation.

La position actuelle du Grand Escarpement, à plus de 200 km à l'intérieur des terres par rapport au littoral, a conduit certains auteurs à suggérer qu'il pourrait résulter :

- Soit du « retrait d'un ensemble d'épaulement de rifts flexuraux datant de l'époque de la formation de la marge continental au Jurassique » (Partridge et Maud, 1987 ; Braun, 2018 ; Gilchrist *et al.*, 1994 ; Brink & Stern, 1992 in Stanley *et al.*, 2021) ;

- Soit d'un processus plus récent, comme les Montagnes du Lebombo (issues du volcanisme Karoo), et serait le résultat du recul érosif des épaulements de rifts depuis la surrection de l'Afrique australe qui a commencé à se soulever vers -30 Ma (Burke et Gunnell 2008 p.50, p.70).

Pour Burke et Gunnell, les surfaces gondwaniennes peuvent être rattachées à la surface africaine (Burke et Gunnell, 2008).

2.2.2.7. Modèle de Baby (2017)

Baby (2017) propose une synthèse des âges des surfaces d'érosion en Afrique du Sud (Figure 124), notamment celles situées en contrebas du Grand Escarpement et sur la côte est. Il les a datées par corrélation en produisant de grands profils topographiques (localisés sur la Figure 136) par les lettres AA', BB', etc.), où les couvertures pédologiques sont caractéristiques et, pour certaines, datées de manière absolue.
Cette synthèse permet de dire que c'est bien la Surface Africaine qui est préservée sur les points hauts du *Cradle of Humankind* car il est situé à une altitude bien plus élevée que les secteurs que Baby analyse.

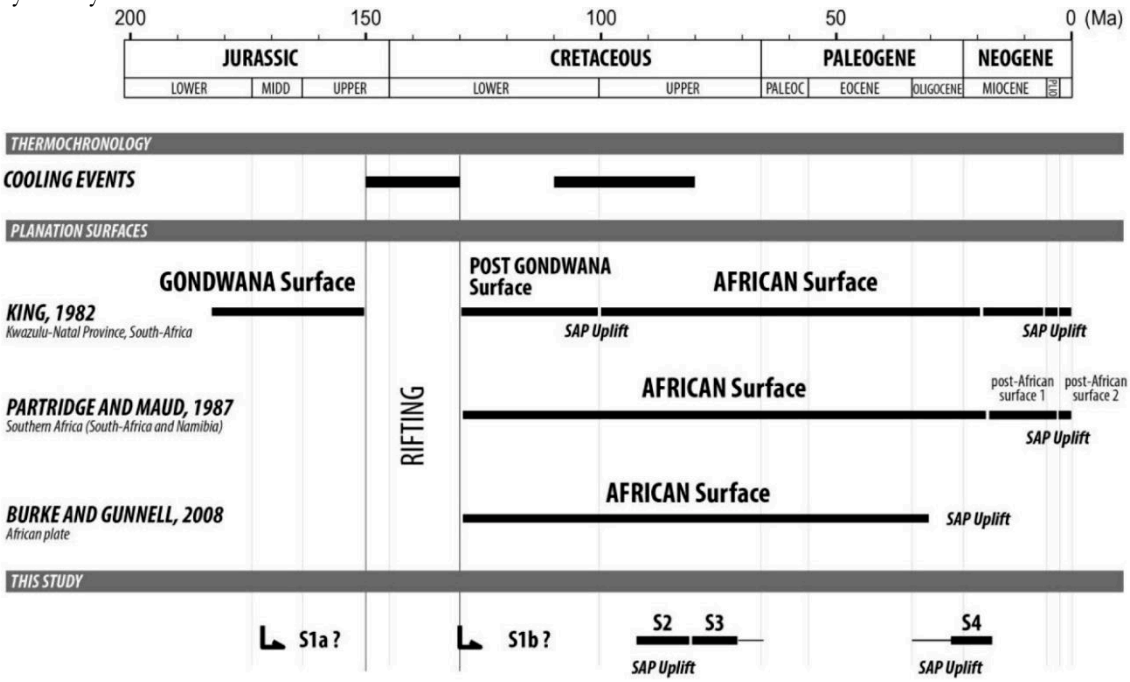


Figure 124 Echelle de temps récapitulant l'âge des surfaces selon différents auteurs (King, 1982; Partridge et Maud, 1987 et Burke et Gunnell, 2008) et la dernière en bas correspond aux datations de Baby (2017). (Source : Baby, 2017).

2.2.2.8. Modèle de Guillocheau et al. (2012)

Les modélisations numériques à partir des données thermo-chronomètres (Guillocheau *et al.*, 2012) proposent deux scénarios :

- un seul soulèvement rapide de la région vers -90 à -100 Ma et un soulèvement plus faible au Cénozoïque ;
- ou deux soulèvements majeurs, de 400 à 800 m, vers -90 à -100 Ma et, de 500 à 1000 m, vers – 40 Ma, au Cénozoïque.

2.2.2.9. Modèle de Guillocheau (2016)

Pour Guillocheau (2016) *« ces plateaux et plaines africaines résultent de la dégradation ou de la préservation d'une surface de corrosion – la surface africaine – datée entre -60 à -40 Ma, par des pédiplaines/pédiments et des vallées incisées plus jeunes »*. Il observe un début de surrection des dômes camerounais et est-africains aux alentours de -40/ -30 Ma et une surrection généralisée de l'Afrique centrale aux alentours de -10 / -3 Ma.

2.2.2.10. Modèle de Partridge (1969, 1973)

Partridge analyse la présence de la Surface Africaine (a) dans le *Cradle of Humankind* et (b) à Makapansgat.

2.2.2.10.1. Pour le Cradle of Humankind

Pour Partridge (1969, 1973), repris par Dirks et Berger (2013) et Dirks et al. (2016) par la suite, la Surface Africaine est située à 1500 m à Sterkfontein. Avant les travaux récents, Partridge (1969, 1973) a identifié et cartographié la Surface africaine et la Surface post-africaine dans le *CoH* (Figure 125, ci-dessous) et à Makapansgat.

> *"Pour déterminer le temps approximatif nécessaire à l'élargissement de la vallée pour ouvrir les grottes, une ligne a été tracée entre la base du chenal actuel et le point d'intersection de la surface africaine avec le côté actuel de la vallée (ligne CD). Une ligne parallèle a été tracée à travers le sommet projeté de l'aven à travers lequel l'ouverture de la caverne s'est produite, et une autre a été insérée pour indiquer le chemin descendant du canal du ruisseau lors de son incision de la Surface Africaine à sa position actuelle (ligne ABC). […] L'intersection AB est une mesure de la quantité d'incision et d'élargissement de la vallée nécessaire pour ouvrir la caverne. Ceci, exprimé en proportion de l'incision totale le long du chemin descendant du canal (AC), représente la proportion du temps qui s'est écoulé après l'arrivée du point de coupure post-africain I en face du site, nécessaire pour réaliser l'ouverture de la caverne". Partridge (1973).*

Partridge (1969, 1973) a identifié la Surface Africaine vers 1500 m d'altitude dans la vallée de la Bloubank, à Sterkfontein et à Swartkrans. Cette surface est indiquée par le trait rouge sur la Figure 125 et par les hachures rouges sur ces cartes que nous avons reportées (Figure 127).

> *« Dans tous les cas, le site d'hominidés est situé dans une vallée incisée sous la surface d'érosion africaine dans le cycle d'érosion post-africaine. L'ouverture de la vallée ou de la grotte s'est donc produite sous l'influence de cette incision [qualifiée de post-africaine] » (Partridge, 1973).*

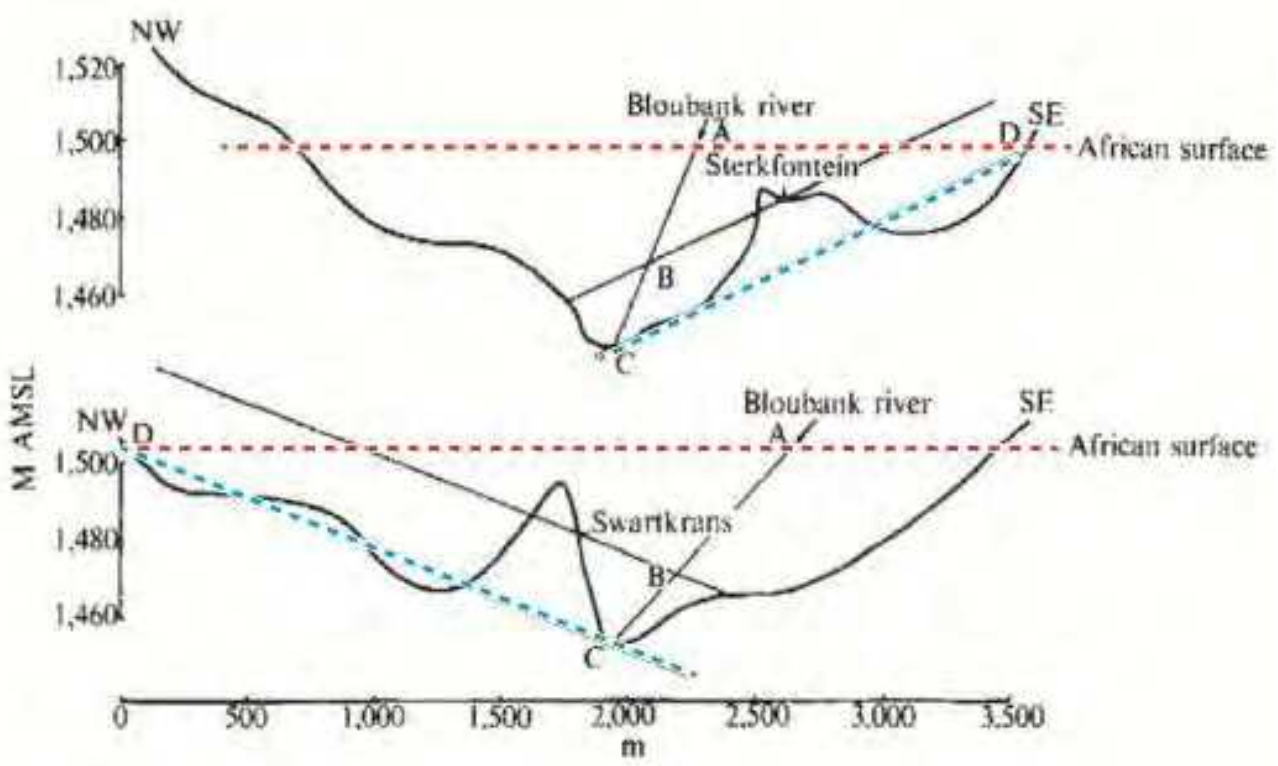


Figure 125 Dans la vallée de la Bloubank, à Sterkfontein et à Swartkrans la Surface Africaine (en rouge) est située vers 1500 m d'altitude pour Partridge (1973, modifié).

Sur la carte ci-dessous (Figure 126), nous avons mis en évidence, en les colorisant, les ravins rocheux ou gorges, en violet, puis les ravins de faible pente, en rose. Nous les interprétons comme des secteurs où la dolomie a été fantômisée, rendant ces secteurs plus facilement « creusés « par l'érosion. Nous expliquerons que ces formes morphologiques sont des couloirs de fantômisation et nous les décrirons au chapitre n°3 (p.424).
Nous avons aussi mis en couleur la plaine d'inondation, les terrasses alluviales anciennes et récentes. Notamment, Partridge (1973) a différencié plusieurs niveaux de terrasses (a, b et c) qui ne sont pas identifiés ici car illisibles sur la carte dont nous disposons.

Nous verrons au Chapitre n°3 que nous ne sommes pas d'accord avec l'altitude de la Surface Africaine dans le *CoH à 1500 m* d'altitude comme le dit Partridge. Les surfaces emboîtées de la Bloubank sont bien moins altérées que la surface principale, qui se situe plus haut. À notre avis, la Surface Africaine n'est pas située à 1500 m d'altitude dans la vallée de la Bloubank, mais plutôt vers 1560 m, voire 1580 m, car la vallée de la Bloubank se trouve en contrebas d'une autre surface beaucoup plus étendues. La Surface Africaine est ainsi beaucoup plus large, généralisée et presque exclusive.

Sur cette carte, , en rose sont indiqués les ravins de faible pente et en violet les ravins rocheux ou gorges, cartographiés par Partridge (1969). Nous les interprétons comme des secteurs où la dolomie a été fantômisée. Nous avons rajouté en noir quelques réseaux karstiques (Sterkfontein, *Rising Star*, *Bat cave*, *Antcave*). Nous avons ajouté l'inventaire des cavités du *SASA Cave Register* et les cavités majeures du *CoH*.

Nous avons aussi indiqué trois filons de roche intrusive, en jaune, avec un contour noir. Celui à l'est correspond au dyke de *Danielsrust* que l'on retrouve cartographié sur la carte géologique 2527DD au 1/50 000 de 1973 (Enslin *et al.*, 1973) et qui a été cartographié différemment sur la carte géologique 2527DD au 1/50 000 de 2010 (Ingram *et al.*, 2010). Nous verrons que ces structures ont joué un rôle dans la structuration des paysages et dans les écoulements des eaux souterraines. Ce qui pourrait avoir eu un impact pendant les phases de débourrage du fantôme de roche et la création des vides et donc sur la localisation des grottes.

Partridge (1969) a cartographié deux dolines, en jaune, au nord ouest de *Bolt's cave*. Elles sont assez rares pour être signalées.

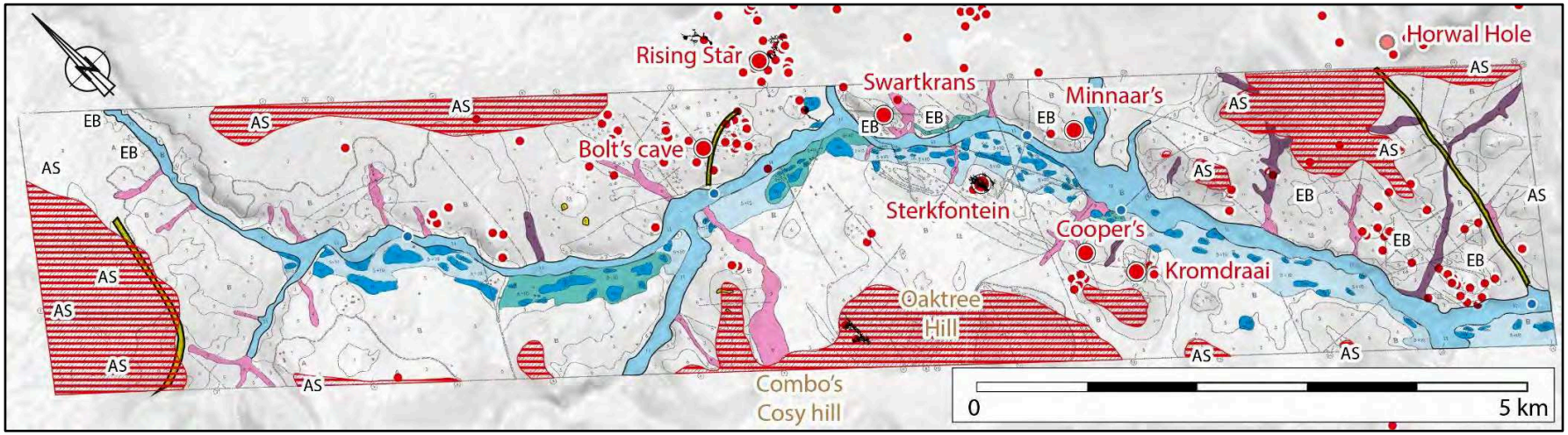
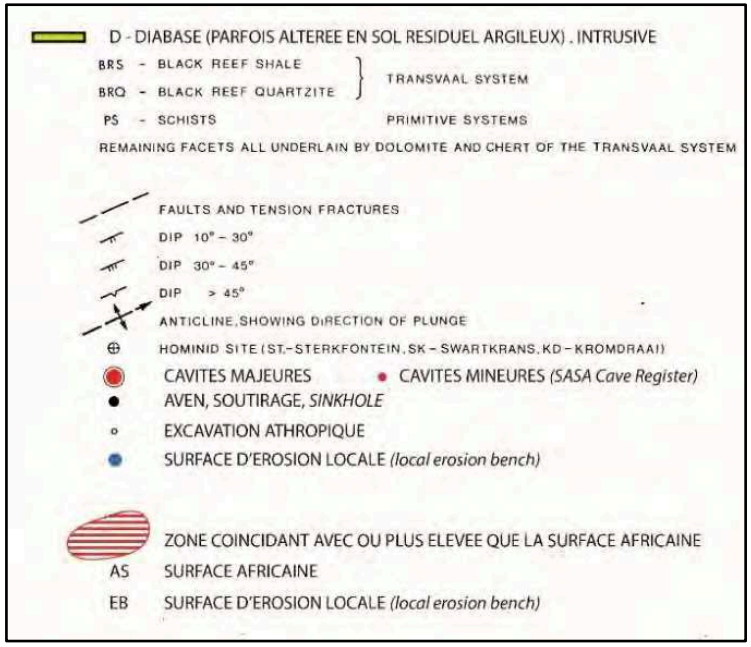


Figure 126 Carte géomorphologique du secteur de Sterkfontein, Swartkrans, Kromdraai , réalisée par Partridge (1969, modifiée), indique la Surface africaine (AS, en hachures rouges, ainsi que des surfaces d' érosion locales (EB), pour local erosion bench).



A. LEGENDE DU SECTEUR DE KAALFONTEIN

		FACIES		
1.	CRETE	VARIANT 1	:	DOLOMIES ET CHERTS LEGEREMENT ALTEREES AFFLEURANT
		VARIANT 2	:	SOL ACTUEL SABLEUX (CA 0.3 - 1.0 M.) DEVELOPPE SUR DES DEPOTS RESIDUELLES GRAVELEUX DE CHERTS (CA 1.5 - 5.0 M.)
2.	PENTE LATERALE CONCAVE		:	DEPOTS DE PENTES CONSTITUES DE SABLES LIMONEUX (CA 1.0 - 3.0 M.) SUR DES DEPÔTS GRAVELEUX DE CHERTS (CA 8.0 - 25.0 M.) RESIDUELS SUR LES DOLOMIES ET DE CHERTS LEGEREMENT ALTEREE
5.	BERGE CONVEXE DE RIVIERE	VARIANT 1	:	AFFLEUREMENTS DE DOLOMIES LEGEREMENT ALTEREE ET DE CHERTS
		VARIANT 2	:	SOL ACTUEL SABLEUX SUR DES DEPOTS GRAVELEUX RESIDUELLES DE CHERTS (CA 1.0 - 3.0 M.) SUR DE LA DOLOMIE ET DES CHERTS LEGEREMENT ALTEREE

B. LEGENDE DU SECTEUR DE KOMDRAAI

1.	CRETE ET DEPOT CONVEXE	:		DOLOMIES ET CHERTS LEGEREMENT ALTEREES AFFLEURANT
2.	TALUS EN PENTE		:	TALUS DE DOLOMIES ET DE CHERTS (CA 0.5 - 2.0 M.) SUR LES DOLOMIES ET LES CHERTS LEGEREMENT ALTEREE
3.	PENTE LATERALE		:	SURFACE DE DOLOMIES ET CHERTS LEGEREMENT ALTEREE
4.	RAVIN ROCHEUX OU GORGE		:	SURFACE DE DOLOMIES ET CHERTS LEGEREMENT ALTEREE
5.	PEDIMENT		:	DEPOTS DE PENTES CONSTITUES DE SABLES LIMONEUX (CA 0.5 - 2.0 M.) SUR DES DEPÔTS GRAVELEUX RESIDUELS DE CHERTS (CA 3.0 - 6.0 M.)
6.	PIED DE VERSANT DISSEQUE	VARIANT 1	:	SURFACE DE DOLOMIES ET CHERTS LEGEREMENT ALTEREE
		VARIANT 2	:	POCHES RESIDUELLES DE DEPOTS GRAVELEUX (CA 0.5 - 2.0 M.) SUR LA DOLOMIE ET LES CHERTS LEGEREMENT ALTEREES
8.	DOLINE		:	DEPOTS DE PENTES CONSTITUES DE SABLES LIMONEUX (CA 2.0 - 5.0 M.) SUR DES DEPÔTS GRAVELEUX RESIDUELS DE CHERTS (CA 3.0 - 6.0 M.)
9.	RAVIN DE FAIBLE PENTE		:	SABLES LESSIVES DE RAVIN (CA 1.0 - 3.0 M.) SUR LA DOLOMIE ET CHERTS LEGEREMENT ALTEREE
10.	TERRASSSE ALLUVIALE		:	ALLUVIONS GRAVELEUX (CA 1.0 - 4.0 M.) SUR DES DEPOTS GRAVELEUX RESIDUELS DE CHERTS (CA 3.0 - 6.0 M.)
11.	PLAINE D'INONDATION		:	ALLUVIONS ARGILO-SABLEUX AVEC DES LENTILLES GRAVELEUSES OCCASIONNELLES (CA 3.0 - 6.0 M.) SUR DE LA DOLOMIE ET LES CHERTS LEGEREMENT ALTEREES

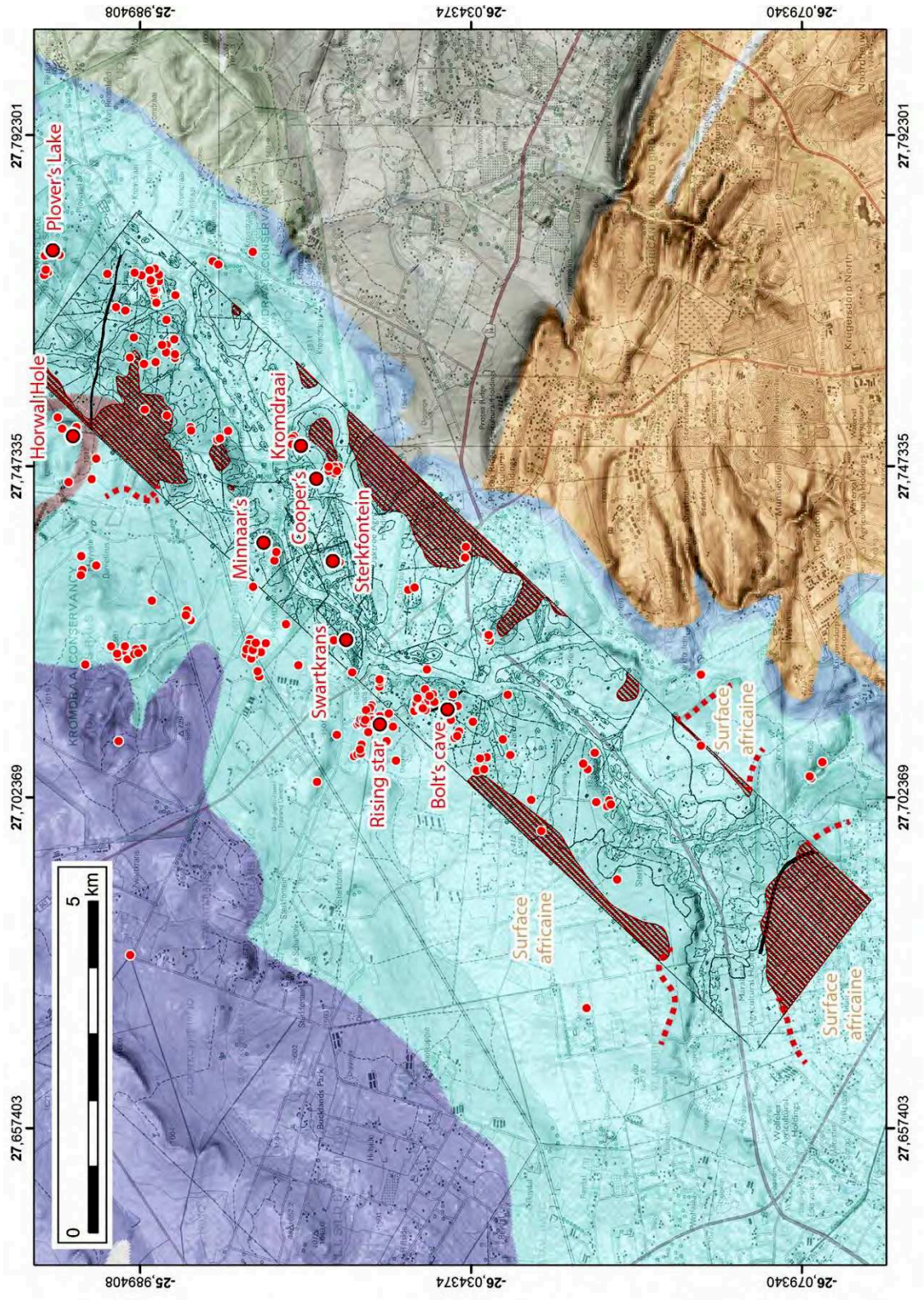


Figure 127 Report de la Surface Africaine, en hachures rouges dans l'emprise de la carte levée par Partridge (1969).

Nous avons prolongé en pointillés la cartographie des surfaces qui étaient limitées au cadre de sa carte. Nous rediscuterons en détail de l'altitude de la Surface Africaine dans le *CoH* dans le Chapitre n°3 (p.287) et sur la Figure 1171 (p.1195).

2.2.2.10.2. *Surface africaine à Makapansgat (Partridge, 1973)*

Partridge (1973) a identifié la Surface Africaine (en rouge) vers 1505 m d'altitude dans la vallée de Makapan (Figure 128).

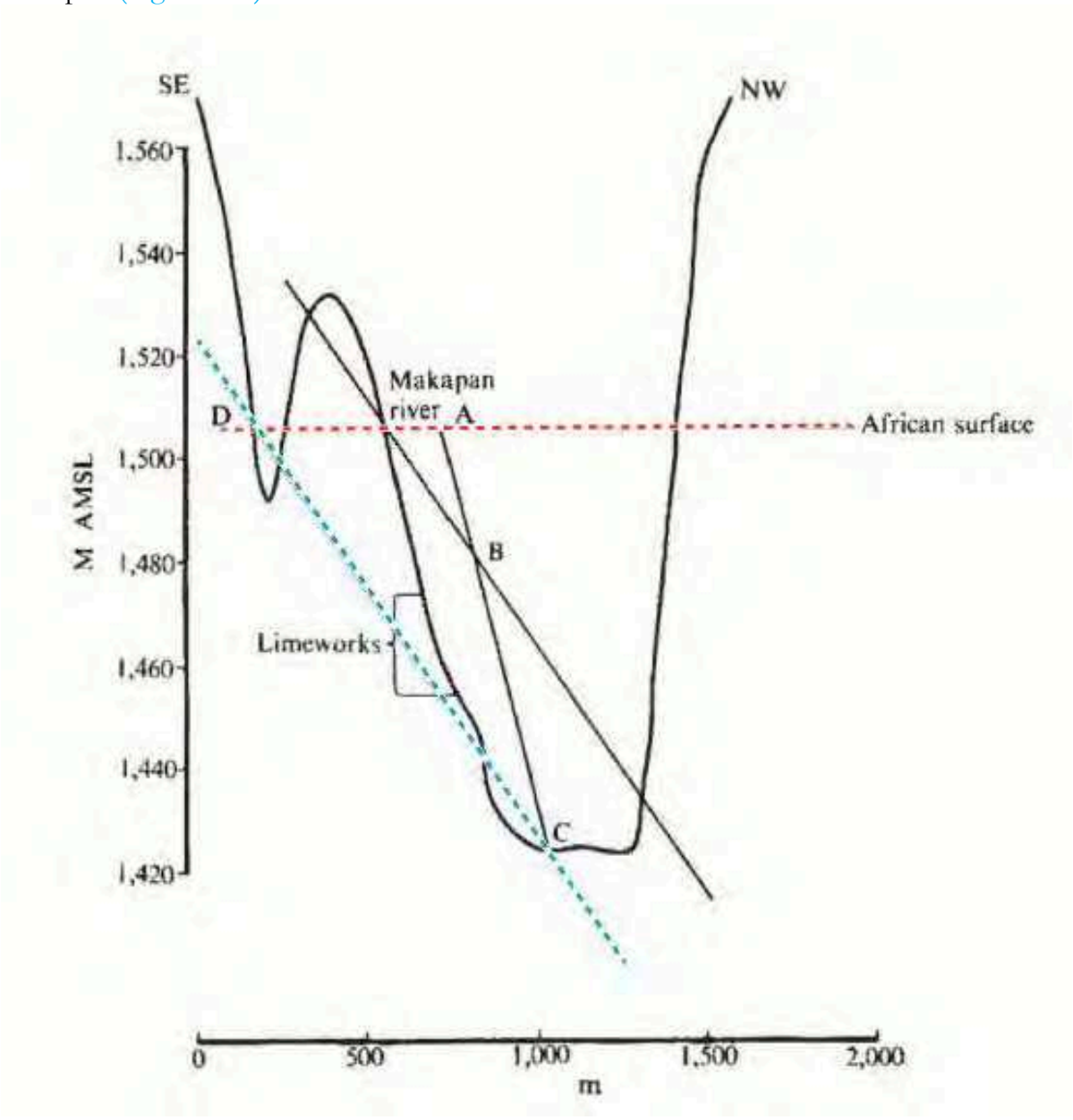


Figure 128 À Makapansgat, Partridge (1973) a calculé la position de la Surface africaine (en rouge) à 1505 m d'altitude.

Comme avec la Surface Africaine, située à 1500 m dans la vallée de la Bloubank, discutée juste avant, les reconstitutions de Partridge ne fonctionnent pas, pas plus que ses modélisations de la vitesse de recul de *knickpoints*, que nous avons mentionnées plus haut (p.181). Nous reviendrons plus en détail sur la vallée de Makapansgat au Chapitre n°5 (p.954).
En effet, à l'instar de Partridge, nous chercherons à établir des corrélations chronologiques entre les différentes paléosurfaces identifiées dans les différents karsts étudiés, et la Surface africaine se prête particulièrement bien à cet exercice. C'est précisément ce que Partridge et Maud (1987) ont tenté de réaliser dans le modèle que nous allons présenter.

2.2.2.11. Surfaces Africaines de Partridge et Maud, 1987

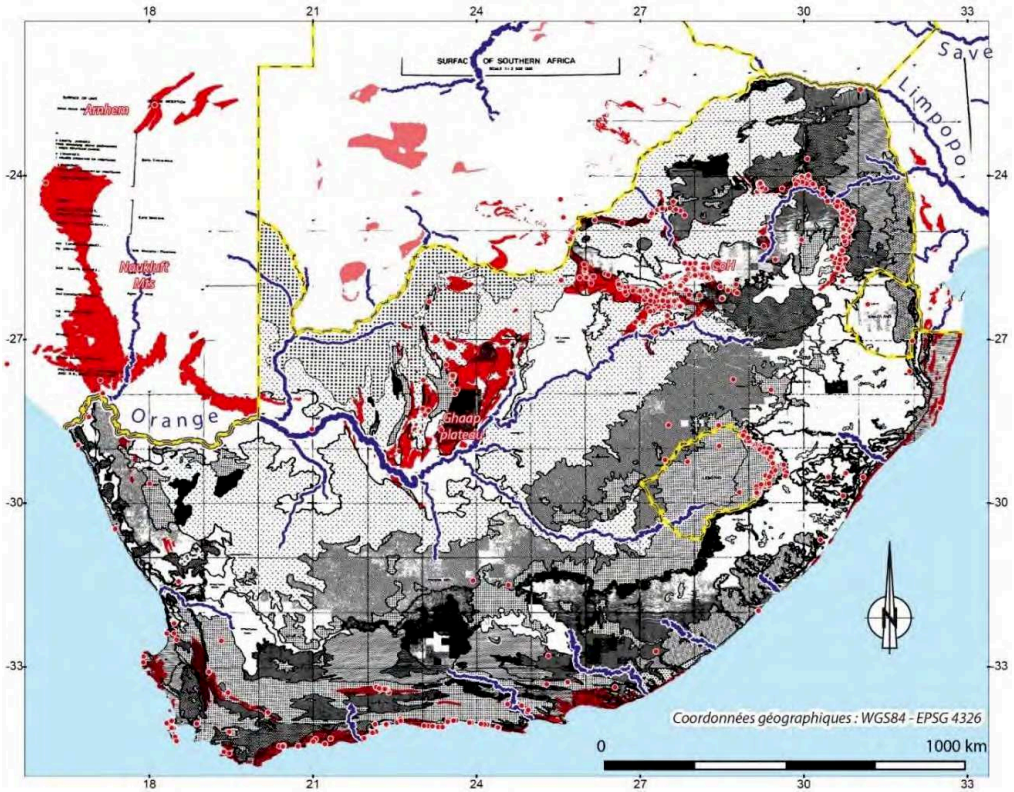
Présentons maintenant le modèle de Partridge et Maud (1987) à l'échelle de l'Afrique australe. La Figure 129 montre l'analyse des surfaces d'aplanissement pour l'Afrique australe selon Partridge et Maud (1987, 2000). Selon eux, ces cycles successifs d'érosion auraient été initiés par des soulèvements depuis le Trias.

La légende résume leurs interprétations chronologiques des surfaces d'érosion africaines :

- la Surface Africaine se met en place à partir du Crétacé inférieur ;
- la Surface Post-Africaine 1 date du Miocène inférieur ;
- et la Surface Post-Africaine 2 du Pliocène supérieur.

Il note la présence d'une surface néogène au sud de la plaine côtière du Mozambique et une surface pliocène au Zimbabwe.

Nous pouvons consulter la carte des surfaces de l'Afrique australe de Partridge 1998 *in* Partridge et Maud (2000, Fig.1-3 p.6) qui est nettement plus lisible.



SYMBOLE	SURFACE OU UNITE	DATE DE CREATION
	Relief au-dessus de la Surface Africaine	
	Surface Africaine	CRETACE INFERIEUR
	Surface Africaine (partiellement rabotée) Zones considérables restant au-dessus de la surface à pédiment, à contrôle structural majeur	
	Surface Africaine (abaissée) Surface d'origine généralement préservées sur les interfluves	
	Surface Africaine (disséquée) Surface d'origine parfois préservée sur les inter-fluves	
	Surface Africaine (plate-frome marine)	
	Surface Post-Africaine 1	MIOCENE INFERIEUR
	Surface Post-Africaine 1 (disséquée) Surface d'origine préservée sur les interfluves	
	Surface Post-Africaine 1 (plate-forme marine)	
	Surface Post-Africaine (indifférenciée) Principalement partiellement rabotée	MIOCENE INFERIEUR A PLIOCENE
	Surface Post-Africaine 2 (partiellement rabotée)	PLIOCENE SUPERIEUR
	Autres zones disséquée Contrôle structurel majeur généralement présent	AGES VARIES
	Grand Escarpement séparant l'intérieur élevé de l'arrière-pays côtier	
	Sédiments du Kalahari du Cénozoïque	
	Sédiments éoleins marins et côtiers du Néogène	

Préparait par Partridge T.C. Ph.D. & Maud H.R., ph.D, 1983

Figure 129 Analyse des surfaces d' aplanissement pour l' Afrique australe selon Partridge et Maud (1987, modifié). Nous avons indiqué les grands fleuves et rivières en bleu, la position des formations carbonatées potentiellement karstifiées en rouge et les cavités karstiques extraites du SASA Cave Register.

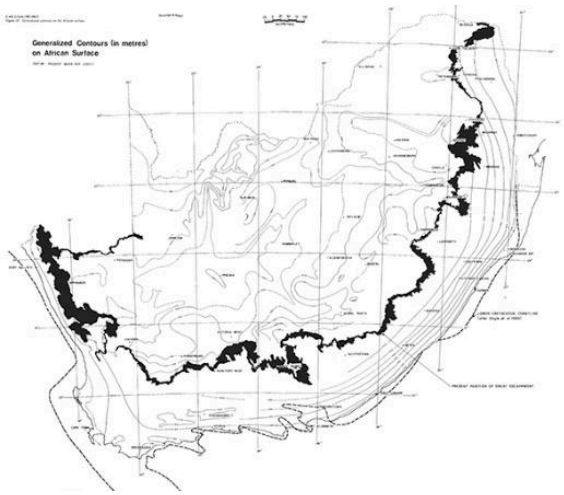


Figure 130 Courbes de niveau de la Surface Africaine selon Partridge (1998).

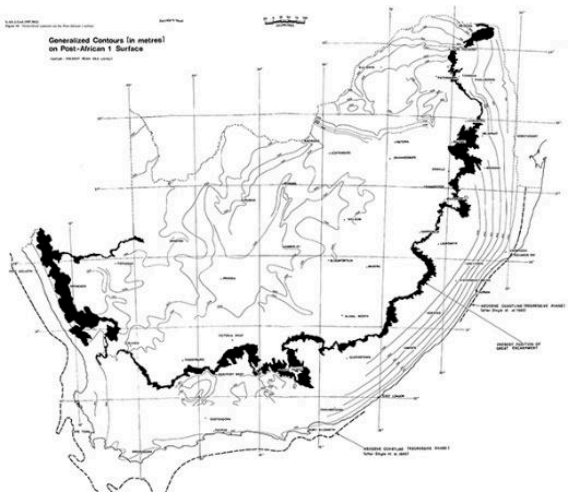


Figure 131 Courbes de niveau de la Surface Post-Africaine 1 selon Partridge (1998).



Figure 132 Le réseau hydrographique au Crétacé, selon Partridge (1998), se jette uniquement sur la cote est.

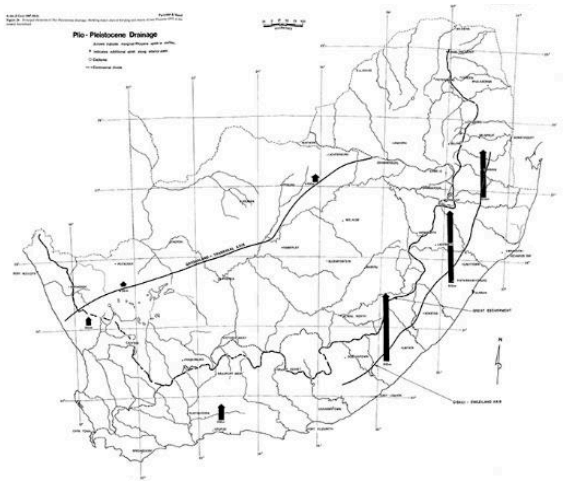


Figure 133 Réseau hydrographique du Plio-Pléistocène selon Partridge (1998).

2.2.2.12. Modèle de Moore et al. (2009b)

Sur la carte, ci-dessous, (Figure 134), nous avons indiqué les surfaces d'érosion principales de l'Afrique australe selon Du Toit (1933) modifié par Moore *et al.* (1999b, fig.11, p.80). Ces surfaces ont été reconnues au Malawi par Lister (1967), au Zimbabwe par Lister (1987) (synthétisée par Moore *et al.* (1999b, Fig.4, p.74) et en Afrique du Sud par Partridge et Maud (1987, 2000).

Nous avons compilé et indiqué sur cette carte la localisation de grands profils topographiques analysés par différents auteurs. Les profils morphologiques n°1 à 21, en noir, proviennent de Partridge et Maud (1987), le profil n°22 (Linol et De Wit, 2016, Fig.7.4) et les profils de AA' à DD' sont issues de la thèse de Baby (2017). Aucun de ces profils ne passe par le *Cradle of Humankind*.

Sur la carte de Moore *et al.* (2009b) ci-dessous (Figure 134) c'est bien la Surface Africaine qui présente dans le *CoH*. Il est même indiqué, en violet, que certains reliefs sont situés au-dessus de la Surface Africaine. Nous les présenterons dans le Chapitre n°3 (p.322).

Nous avons indiqué les cavités majeures par de gros cercles rouges, ce sont les karsts que nous étudions. Nous avons ajouté les cavités mineures de l'inventaire du *SASA Cave Register* par des cercles plus petits. Les limites de bassins versants ont été ajoutées en pointillés noirs. Nous remarquons la correspondance entre les secteurs où sont présents et conservés la Surface Africaine (en rouge) correspondant aux limites des bassins versants. Effectivement par définition, ce sont les secteurs les plus en amont qui sont préservés de l'érosion régressive qui a été très active en Afrique australe. Ceci entraîne une conséquence directe sur la préservation des sites à hominines du *Cradle of Humankind*.

Notons que la carte de Moore *et al.* (2009b) indique une surface africaine polyphasée. La légende distingue une Surface Africaine représentée en rouge et une Surface Africaine en rouge hachurée de caissons noirs. Nous retrouvons cette distinction à l'ouest du Limpopo, de part et d'autre du Grand Escarpement, comme le montrent les profils n°1 et n°2 de la Figure 135 (p.194)), ainsi que sur le littoral atlantique (Profil n°19 et 20).

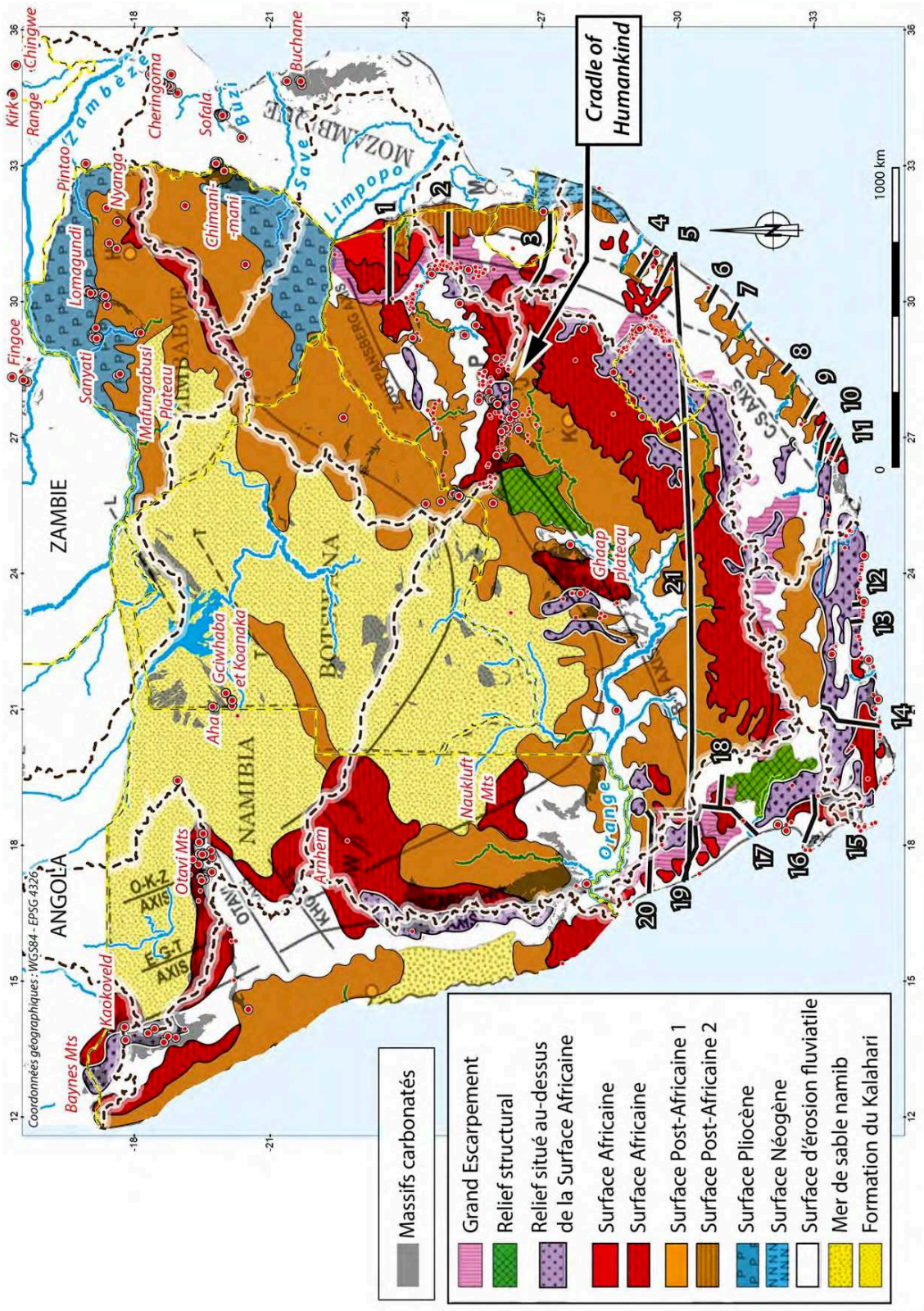


Figure 134 Surfaces d'érosion principales en Afrique australe selon Moore et al. (2009b, Fig.11, p.80, modifié) et positionnement des différents profils topographiques. Regardons les âges indiqués ci-dessous dans la version de Partridge (1998, (Fig.2, p.170) et voir aussi Partridge et Maud (2000, Fig.1-3 p.6).

2.2.3. Grands profils morphologiques à travers le continent sud-africain

Les profils morphologiques N°1, 2 et 3 de (Partridge et Maud, 1987), ci-dessous (Figure 135), et indiqués par des traits noirs, sont les profils les plus proches du *Cradle of Humankind*. La Surface Africaine est bien préservée dans le *Cradle of Humankind*. On remarque que le profil n°2 n'atteint pas le *Cradle of Humankind*, ni le Bassin du Transvaal et que Moore (2009) a cartographié des reliefs (en violet) au-dessus de la Surface Africaine.

2.2.4. Notre synthèse cartographique concernant la Surface Africaine

La carte des surfaces de l'Afrique australe, que nous avons réalisée ci-dessous (Figure 136), est une synthèse des données cartographiques et bibliographiques de Du Toit (1933), Partridge et Maud (1987, 2000, Fig.1-3 p.6), Moore (2009), Baby (2017), Linol et De Wit, 2016) pour l'Afrique du Sud, Lister (1967) pour le Malawi, Lister (1987) pour le Zimbabwe et Moore *et al.* (1999b, Fig.4, p.74) et Ponte (2018, p.175). La cartographie de la formation du Kalahari est issue d'Haddon (2005). Pour le Malawi, avec les données de Lister (1967), nous avons intégré la Surface Gondwanienne et la Surface post-Gondwanienne à la Surface Africaine comme proposé par Burke et Gunnell (2008).

Nous avons déterminé les surfaces pour la Zambie, le Mozambique, l'Angola et la République démocratique du Congo à partir du traitement hypsométrique du MNT du satellite JAXA, comme expliqué dans le Chapitre n°1 (p.36). Nous n'avons pas cartographié la Surface post-Africaine qui se situe au-dessous.

Les points noirs correspondent à des datations des surfaces, en million d'années selon Partridge (1998, Fig.2, p.170).

Peu importe l'âge précis de la surface africaine, la genèse de ces surfaces implique des phases d'altération puissante en surface qui engendre et entretiennent la fantômisation dans les secteurs de faible gradient hydraulique comme le *CoH* (Bruxelles, 2019). Nous en discuterons précisément dans le Chapitre n°3 (p.465).

L'analyse des reliefs, des formes morphologiques (surfaces d'érosion) et des formations sédimentaires (latérites, altération profonde) récapitulées sur les profils n°1 à 4 (Figure 135) (localisés sur la Figure 136 ci-dessous) ont permis à Partridge et Maud (1987) d'identifier la Surface Africaine (en rouge), des reliefs situés (en violet) et des latérites (en orange), associées à des profils d'altérations (D). Lorsque ces altérations profondes se produisent sur des formations carbonatées elles peuvent être à l'origine de la karstogenèse par fantômisation, comme nous l'expliquerons plus loin (p.214).

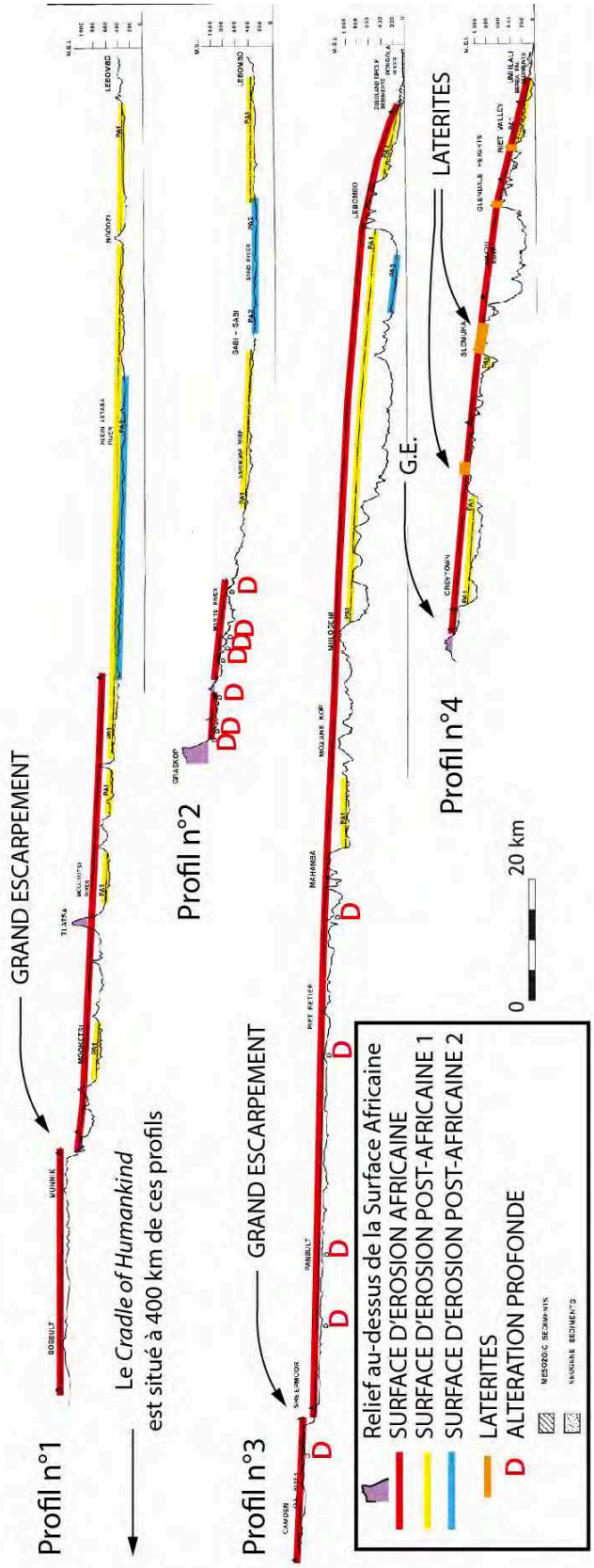


Figure 135 Profils morphologiques N°1, 2 et 3 de Partridge et Maud (1987, coloré et traduit).

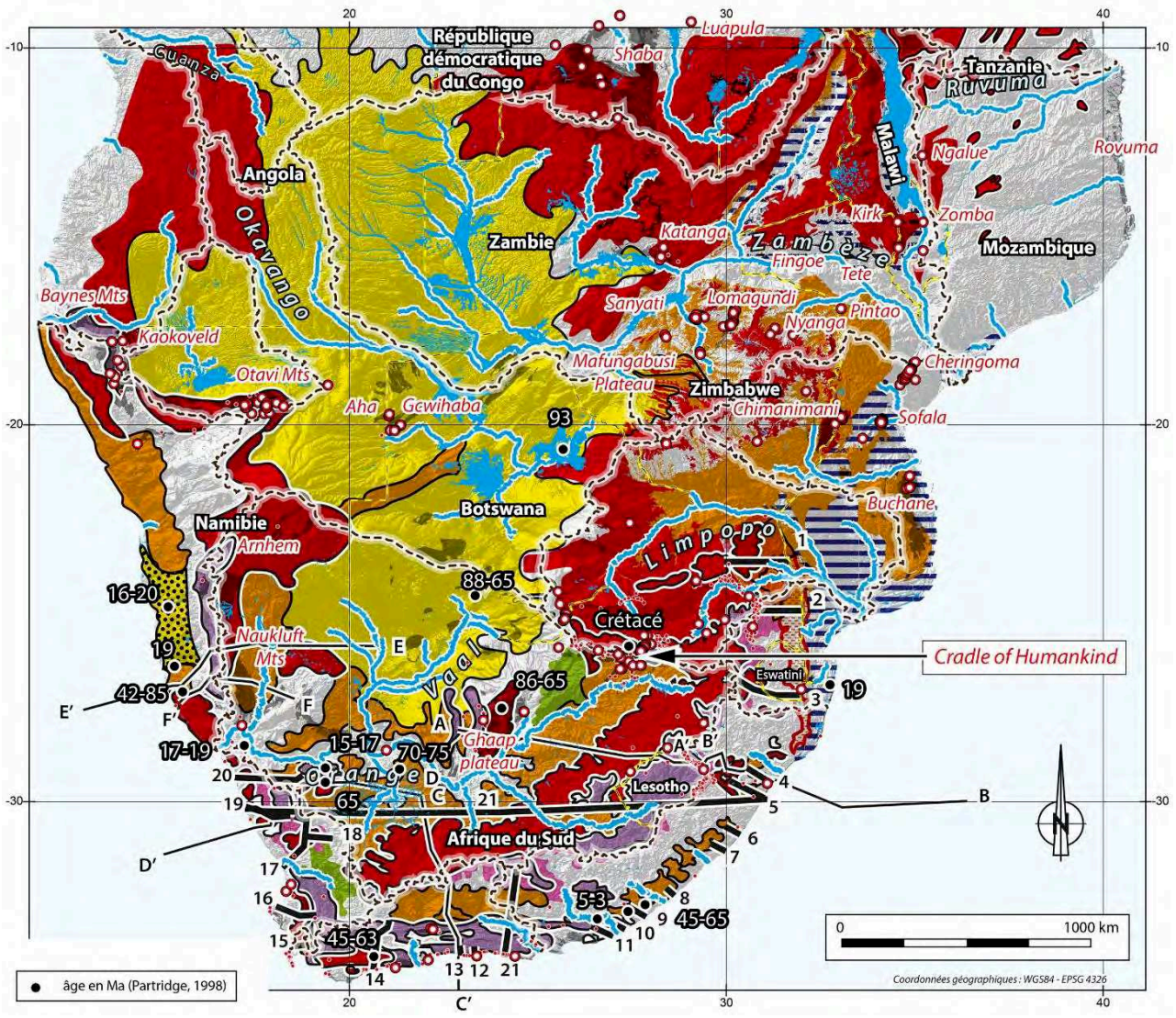


Figure 136 Surfaces d'érosion en Afrique australe.

Les points noirs correspondent à des datations des surfaces, en millions d'années selon Partridge (1998, fig.2, p.170).

Les profils topographiques de Partrigde et Maud (1987) sont indiqués en noir par les chiffres 1 à 21.

Les profils topographiques de Baby (2019) sont indiqués en noir par les lettres AA', BB',

2.2.5. Les données issues de la carte des sols (FOA/UNESCO) pour recherche la Surface Africaine

Nous avons ajouté à notre carte des surfaces la carte des sols (FOA/UNESCO) (Segalen, 1995 et Tardy et Roquin, 1998, Fig.47 p.122 ; Fig.51 p.136 ; Fig.53 p.138), ci-dessous (Figure 137) dans le but de localiser la **Surface Africaine** dans le *Cradle of Humankind* (p.287) notamment avec la présence de sols altérés (Tardy et Roquin, 1998 ; fig.22 p.48 ; fig.45, p.118 ; Jones *et al.* 2013, p.51 à 59). Nous avons prospecté et analysé les sols qui caractérisent la Surface Africaine dans le *CoH* au chapitre suivant (p.298).

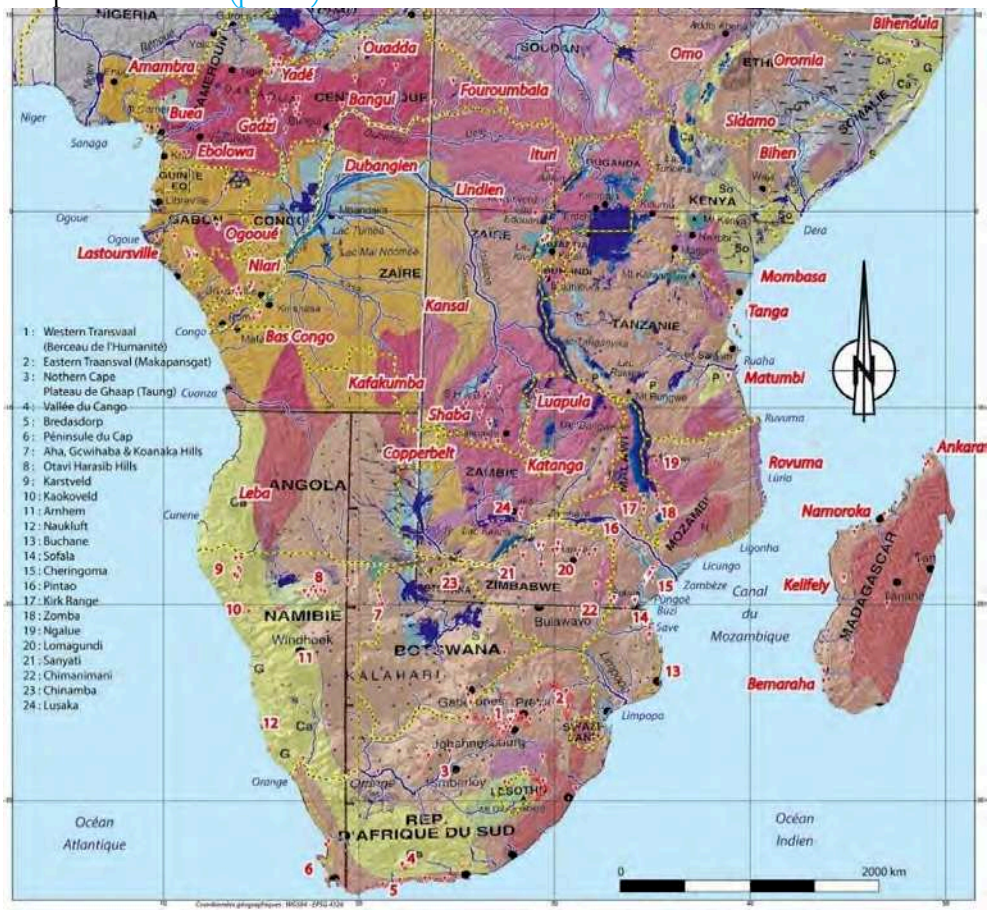


Figure 137 Sols de l'Afrique subsaharienne d'après les cartes FOA/UNESCO (Segalen, 1995 et Tardy et Roquin, 1998).



Figure 138 Légende (Segalen, 1995).

2.3. SYNTHESE GEOLOGIQUE ET LOCALISATION DES KARSTS DE L'AFRIQUE AUSTRALE

2.3.1. Carte géologique synthétique de l'Afrique subsaharienne

Nous présentons ici la carte géologique simplifiée des principaux bassins sédimentaires érodés par les principaux fleuves à l'échelle de l'Afrique subsaharienne, ci-dessous (Figure 139) et de l'Afrique australe, ci-contre (Figure 140). Les karsts sont représentés en rouge et les cavités connues par des cercles rouges et blancs. En gris, ont été regroupées toutes les roches du socle et les granites, où il n'y a pas de grottes.

Les cartes suivantes (Figure 139 à Figure 143) rendent compte de la localisation géologique et hydrographique particulière des karsts fossilifères sud-africains. Ils sont situés au niveau des dolomies paléoprotérozoïques, représentées en bleu ciel. Le *Cradle of Humankind* et Makapansgat appartiennent au **Bassin du Transvaal**, tandis que le karst de Ghaap se situe sur la bordure orientale du **Plateau karstique de Ghaap** (Figure 141, Figure 142 et Figure 143).

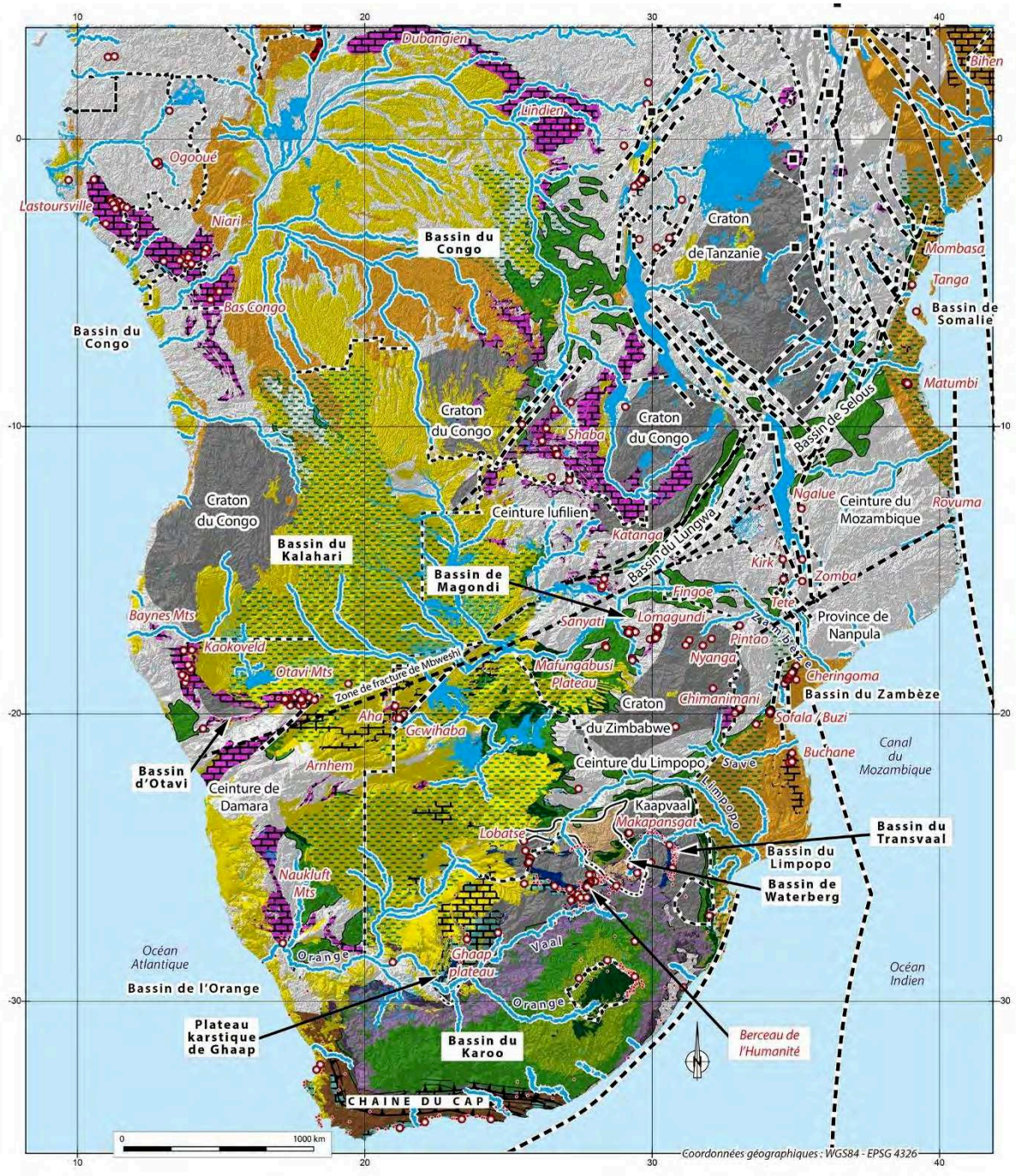


Figure 139 Carte géologique simplifiée des principaux bassins sédimentaires de l'Afrique subsaharienne érodés par les principaux fleuves. La légende est indiquée sur la figure suivante.

2.3.2. Carte géologique synthétique de l'Afrique australe

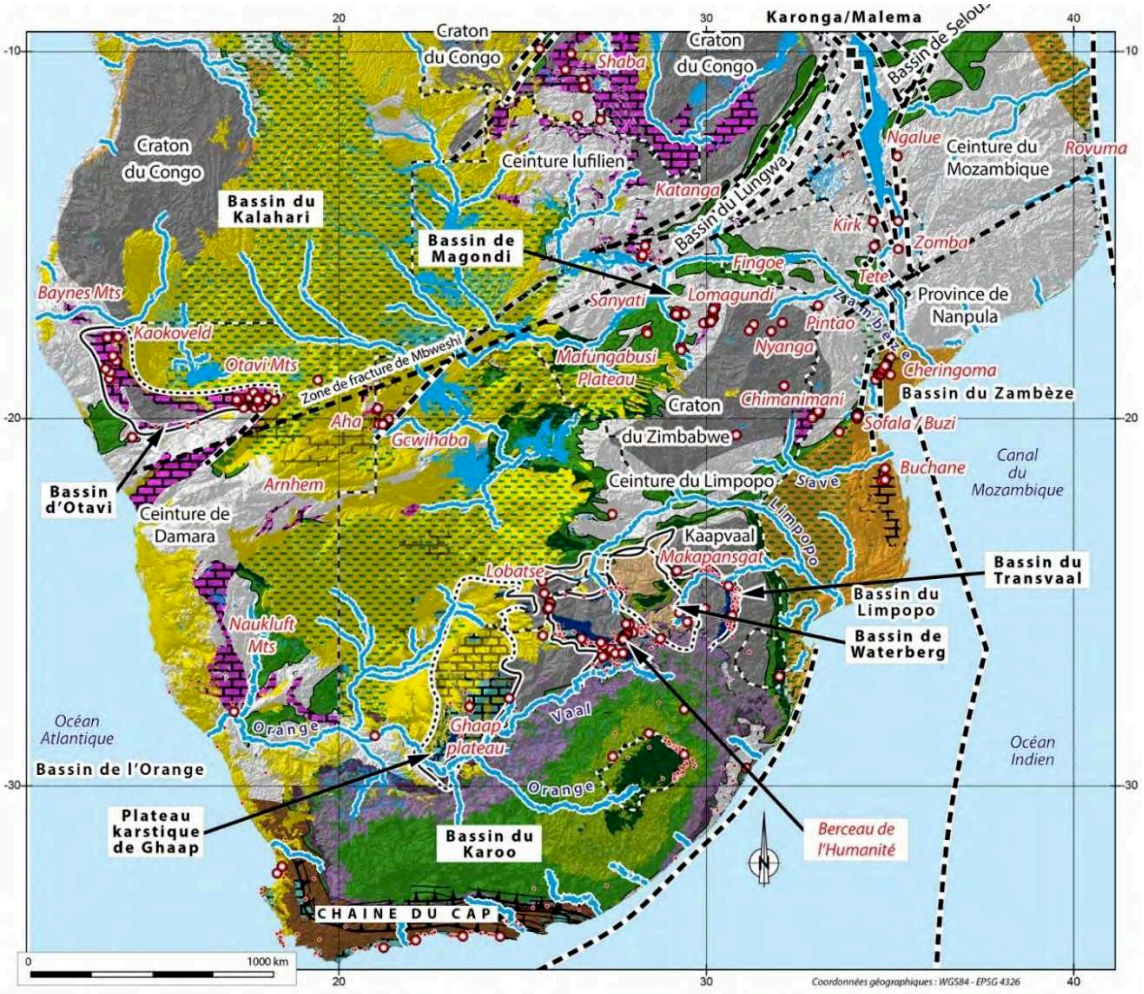


Figure 140 Carte géologique simplifiée des principaux bassins sédimentaires d'Afrique australe.

GEOLOGIE

- Groupe du Kalahari : dépôts fluvio-deltaïques et sables éoliens tertiaires à actuel (- 65 Ma)
- Bassin mésozoïque
- Bassin du Karoo (Drakensberg) (- 183 Ma)
- Bassin du Karoo (Stormberg) (- 230 Ma)
- Bassin du Karoo (Beaufort) (- 265 Ma)
- Bassin du Karoo (Ecca) (- 290 Ma)
- Bassin du Karoo (Dwyka) (- 350 à - 330 Ma)
- Karoo indifférencié sous couverture du Kalahari
- Chaîne du Cap datée de la fin du Permien (-359 à - 251 Ma)
- Bassin marin paléozoïque des Ahas Hills, de Gcwihaba et de Koanaka (- 544 Ma)
- Bassin marin néoprotérozoïque (Otavi en Namibie, Magondi au Zimbabwe) (- 850 à - 600 Ma)
- Bassin continental de Waterberg (-1900 à -1400 Ma)
- Quartzites Dolomies — Bassins marins paléoprotérozoïque (-2588 à - 2316 Ma) (Transvaal et Ghaap en Afrique du Sud, Lomagundi au Zimbabwe)
- SOCLE : Ceintures orogéniques : ceinture du Limpopo, ceinture de Damara, ceinture lufilien, ceinture du Mozambique, etc.
- SOCLE : Cratons hérités du Gondwana (>-3100 Ma) : craton du Kaapvaal, craton du Congo, craton du Zimbabwe, craton de Tanzanie, etc.

KARST

- Formation carbonatée
- Cavité inventoriée

RIFT ET TECTONIQUE

- Faille
- Site paléoanthropologique en contexte non karstique

Considérons maintenant la position du *CoH* (Figure 141).

Il est protégé de l'érosion des grands fleuves car il est situé sur les interfluves de l'Orange et du Limpopo. Cette particularité explique la préservation des paysages anciens dans ce secteur peu érodé ou pas érodé du tout, comme nous le verrons dans le Chapitre n°3 (p.268). Cette position hydrologique très reculée, en extrême amont des bassins versants et au contact de couvertures altérées anciennes, peu ou pas érodées, a favorisé la préservation des paysages anciens et des fantômes de roche. Nous le comprendrons d'autant mieux en expliquant le rôle du niveau de base dans le débourrage des fantômes de roche et la création des vides karstiques qui serviront de pièges à fossiles.



Figure 141 Localisation des karsts fossilifères sud-africains et notamment le CoH qui est préservé de l'érosion régressive initiée depuis les grands fleuves du Limpopo et de l'Orange.

Le karst de Makapansgat est aussi situé dans un contexte de relief élevé par rapport à la plaine actuelle et il a été déconnecté de l'érosion. La présence de paléosurfaces perchées en altitude explique la conservation de remplissages fossilifères anciens (p.955).

La carte ci-dessous (Figure 142) permet de détailler les discordances sédimentaires qui sont venues recouvrir, dans le passé, les territoires aujourd'hui karstifiés. Chaque phase d'érosion a pu favoriser la karstification des dolomies. On distingue le Waterberg (en beige), le Karoo (en violet puis en vert), puis le désert du Kalahari (en jaune). Les karsts fossilifères se trouvent, aujourd'hui en hauteur par rapport à ces bassins profonds et sont situés sur des secteurs profondément érodés ou ces couvertures ont disparu et sur lesquels s'est installée la Surface Africaine que nous venons de définir. Celle-ci est responsable de la karstification des dolomies par crypto-altération et fantômisation (Figure 142 et Figure 143), comme nous allons le décrire maintenant (p.214). La crypto-altération se produisant sous une faible épaisseur de sédiments meubles, imbibés d'eau.

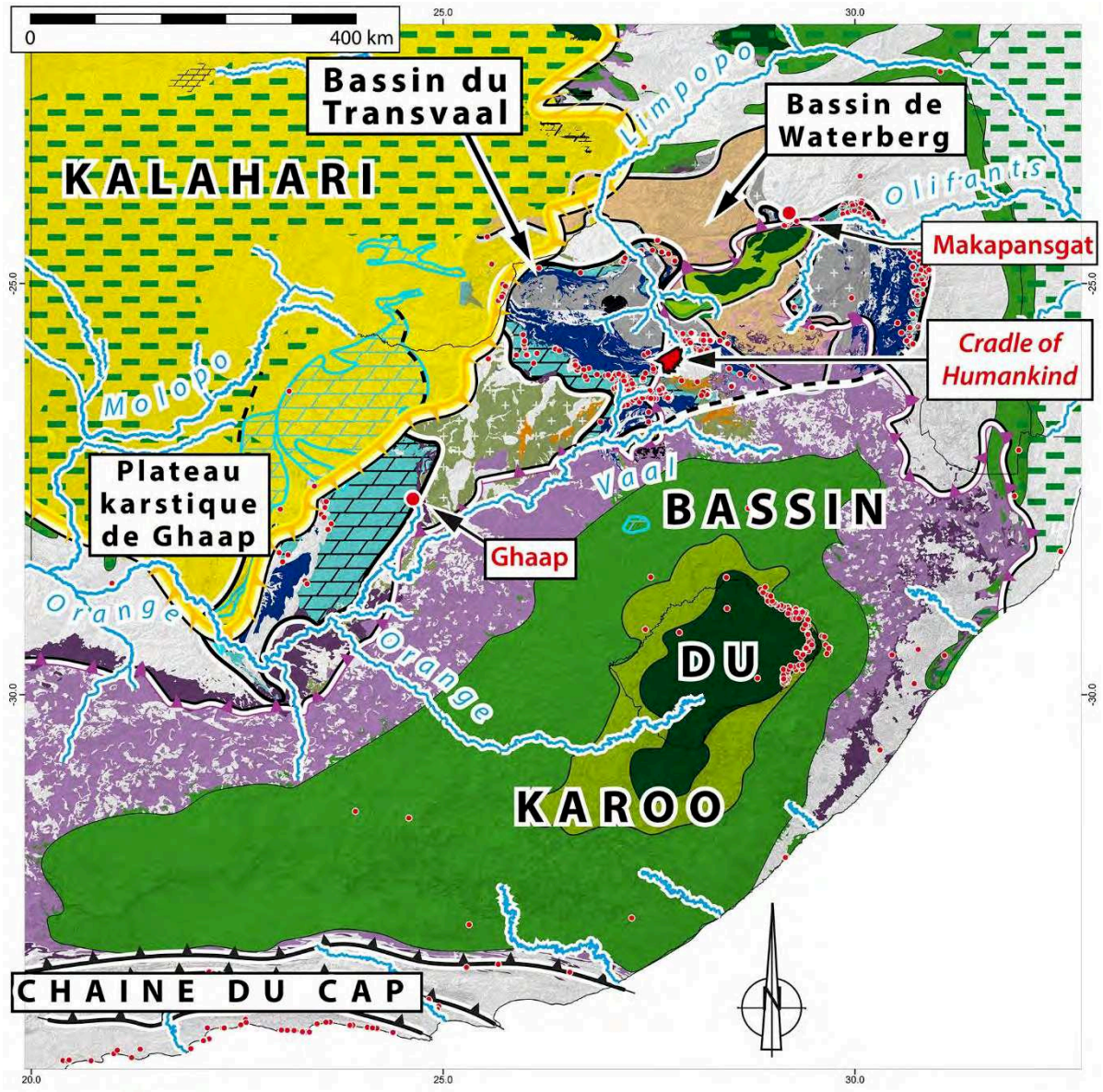


Figure 142 Plusieurs discordances sédimentaires ont recouvert les karsts fossilifères sud-africains.

Ce type d'analyse et de cartographie est essentiel pour déterminer les critères géologiques, géomorphologiques et hydrographiques nécessaires à l'établissement d'un karst fossilifère plio-pléistocène. Nous rechercherons ces critères afin d'identifier d'éventuels karsts fossilifères ailleurs. Dans le Chapitre n°4, nous réfléchirons à la position particulière des karsts du nord-ouest du Botswana, situés au cœur du Désert du Kalahari, sur le horst du Rift de l'Okavango, dans un contexte de subsidence extrêmement lente, qui pourrait être à l'origine des remplissages fossilifères anciens, riches en faune aquatique et hydrophile ne correspondant pas aux conditions désertiques qui y règnent actuellement.

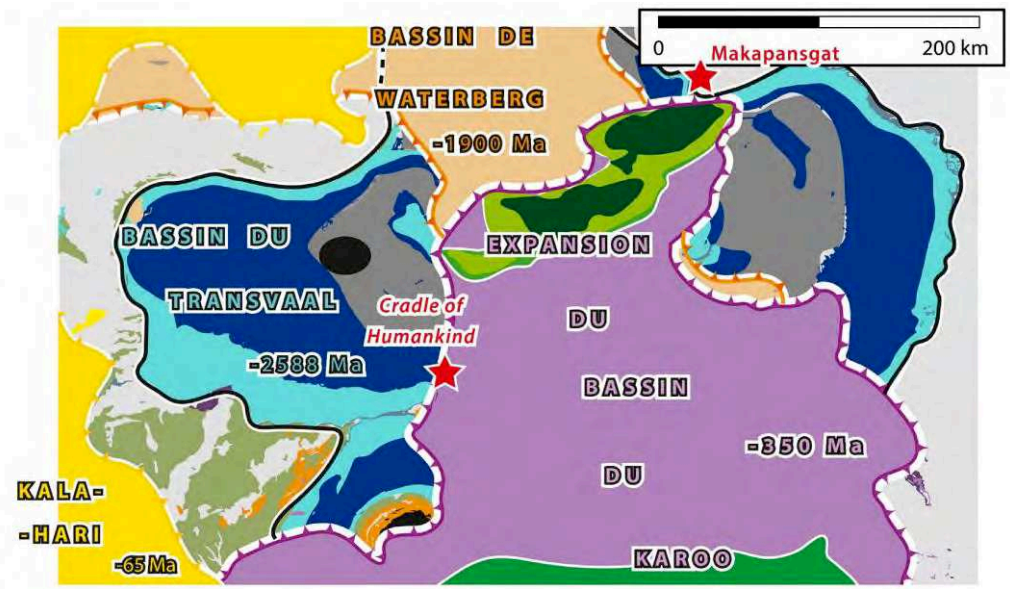


Figure 143 Mise en évidence cartographique des discordances sédimentaire ayant recouvert les dolomies du Cradle of Humankind et de Makapansgat, notamment celles du Karoo, en violet et vert, qui sont aujourd'hui partiellement érodées.

2.3.3. Le Bassin géologique du Transvaal : un bassin sédimentaire carbonaté karstifié

C'est un ancien bassin sédimentaire d'âge paléoprotérozoïque, fortement karstifié et altéré, qui mesure 600 km de longueur, 300 km de largeur et 15 km de profondeur (Button, 1986). Sur tout le pourtour du bassin, les dolomies sont karstifiées, stratigraphiquement elles sont surmontées par des quartzites, qui sont elles aussi karstifiées. Nous décrirons en détail dans le dernier chapitre, le Chapitre n°5, ces karsts mais nous pouvons déjà en livrer une brève description ici.
Ce bassin carbonaté marin paléoprotérozoïque est ensuite recouvert, au Permien, par le Karoo, composé des formations géologiques suivantes : la formation Dwyka en violet pâle, puis la formation Ecca en marron foncé, suivies par l'épisode volcanique du Karoo, allant du vert clair au vert foncé. Ces formations sont ensuite partiellement altérées et érodées mais pas karstifiées. Ensuite, ce sont les dépôts conglomératiques puis fluvio-deltaïques du groupe du Kalahari, représentés en jaune sur les cartes précédentes (Figure 140, Figure 141, Figure 142, Figure 144 et Figure 145), qui recouvrent l'ensemble du territoire dès la fin du Crétacé et pendant le Tertiaire. À leur tour, ces dépôts seront partiellement transportés et déplacés par le vent, recouvrant ainsi l'ensemble de l'Afrique australe sous forme de champs de dunes de sables rectilignes, appelés les Sables du Kalahari (p.507) et que nous retrouvons par exemple à Gcwihaba au Botswana. Aujourd'hui, tel qu'il est conservé, le **Bassin du Transvaal** couvre une superficie de 100 000 km², dont 20 000 km² de dolomies très largement karstifiées. Plus de 3700 cavités y sont répertoriées dans le *SASA Cave Register*[7] .

[7] SASA est l'acronyme du *Spelaeological Association of South Africa.*

Il existe également plus de 400 cavités près de la ville de Pretoria au sein des « Quartzites de Pretoria » qui forment la chaîne de relief du Magaliesberg. Cependant, la majorité des cavités du Bassin du Transvaal s'ouvrent dans les dolomies paléoprotérozoïques, décrites ci-dessus et dans lequel on trouve les karsts fossilifères à Hominines du *Cradle of Humankind* et de Makapansgat. Nous avons examiné en détail les dolomies où aucune cavité n'était répertoriée, comme à **Assen** (p.965) en Afrique du Sud et à **Ramotswa** (p.947) au Botswana, où nous avons recherché des formes karstiques en surface, indicatrices de réseaux karstiques en profondeur. Nous avons aussi étudié les karsts où aucun fossile n'a été découvert ou signalé, comme le karst de **Lobatse** (p.933), le karst d'**Ottoshoop** (p.947) au Botswana et celui de **Marble Hall** (p.960) en Afrique du Sud. Ces différents secteurs sont indiqués sur la carte géologique ci-dessous (Figure 144) et seront présentés en détail dans le 5 (p.899). Cette carte géologique se réfère aux cartes de Wellington (Wellington, 1929, Fig.1), de Foster (1988, Fig. 11, p.47) de Pietersen *et al.* 2012 (Fig. 1 p.454), etc.

2.3.4. Carte géologique inédite et log stratigraphique

La carte géologique simplifiée du Bassin du Transvaal (Figure 144), ci-dessous, insiste sur les discordances sédimentaires et stratigraphiques impactant les formations carbonatées. Elle permet de localiser les karsts du *Cradle of Humankind*, celui de Lobatse et celui de Makapansgat qui se développent dans les mêmes dolomies. Lors de la construction de la carte géologique simplifiée (Figure 144) , ci-dessous, nous avons élaboré la légende de la carte. Il nous est alors apparu évident d'organiser cette légende sous la forme d'un log stratigraphique, visible ci-dessous (Figure 171).Nous avons pu nous référer à de nombreux logs stratigraphiques de la géologie de l'Afrique du Sud (Schwarz, 1912, Fig.41, p.147, Fig.53, p.182 ; Martini, 1990, Fig.1 ; p.1173 ; Eriksson et al, 2001, Fig.2, p.207 ; Catuneanu et Eriksson, 2002, Fig.4, p.76). Ainsi, nous avons inclus préférentiellement les évènements géologiques jugés essentiels pour comprendre la karstification du *Cradle of Humankind*.

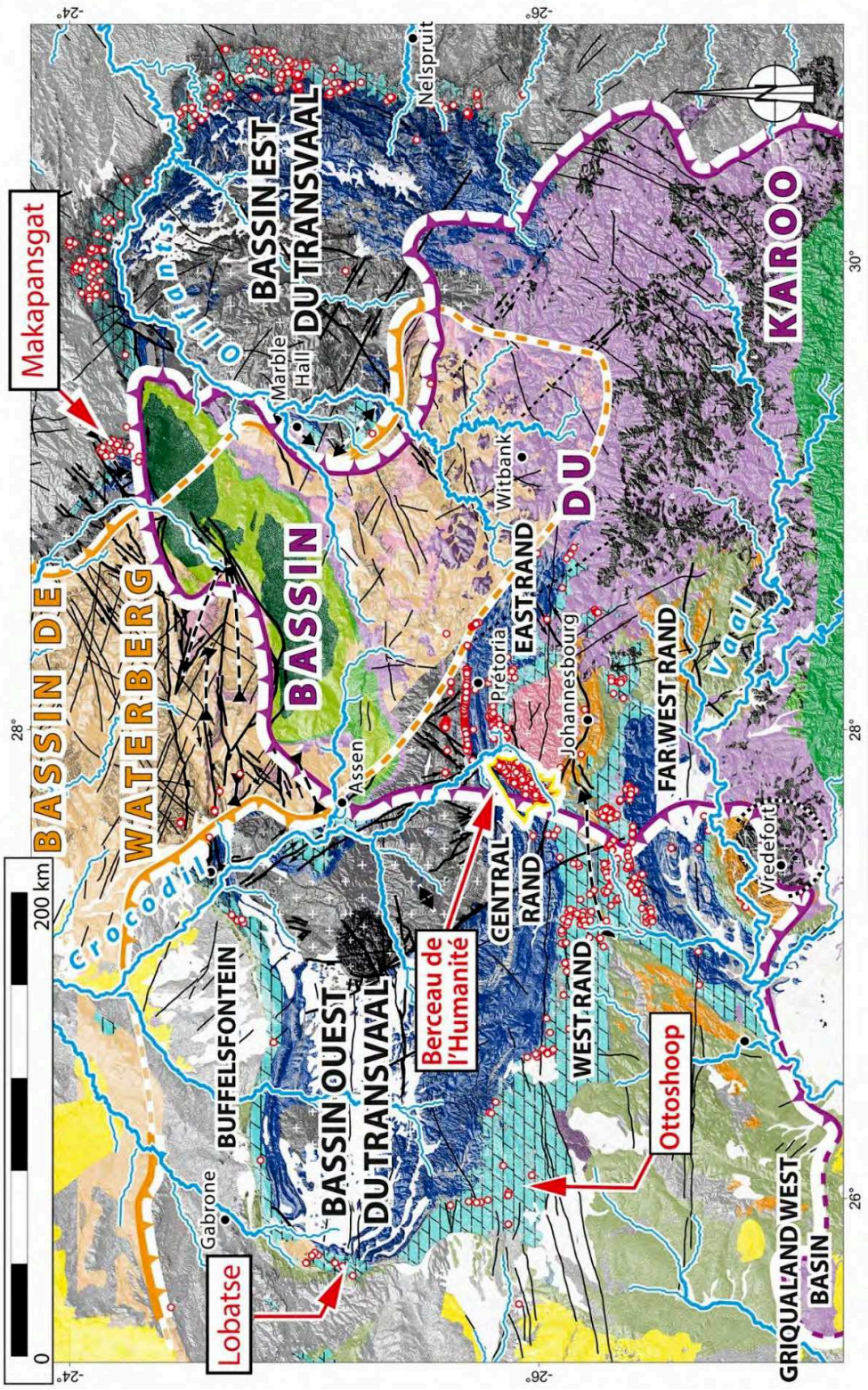


Figure 144. Bassin géologique du Transvaal. La légende se situe sur la page suivante. Les cavités sont indiquées par des cercles rouges et sont issues du SASA Cave Register.

Le log stratigraphique du **Bassin du Transvaal** traduit cinq grands évènements géologiques qui vont impacter les dolomies de Malmani.
(1) le dépôt des dolomies en discordance sur des formations plus anciennes (granite, Witwatersrand, Ventersdorp) ;
(2) l'intrusion plutonique du Complexe du Bushveld (en gris). Nous l'avons représenté comme un objet linéaire assez fin par rapport aux dolomies, mais c'est un objet de très grande dimension qui intrude une grande partie du Bassin du Transvaal ;
(3) un épisode qui fait basculer la région. Le pendage des dolomies est, aujourd'hui, de 25°N dans le *Cradle of Humankind*
4) la grande discordance sédimentaire du Permien avec le dépôt de la formation de Dwyka et celle d'Ecca qui recouvraient le *CoH*. Précédée peut-être d'une grande phase d'érosion glaciaire ;
(5) les épisodes des surfaces d'érosion africaine qui sont venus mettre sur un même plan topographique, située entre 1500 m d'altitude, l'ensemble des couches géologiques décrites dans le log, comme nous le verrons sur les coupes géologiques (Figure 349 p.395).
Le log stratigraphique n'est pas à l'échelle. Les épaisseurs des formations sont issues de publications (Ingram et Van Tonder, 2011, fig.36, p.61 ; Button et al, 2015 ; et pour Pretoria Eriksson *et al.*, 1995). L'âge des formations est issu de publications (Linol et De Wit, 2016 ; Ingram et Van Tonder, 2011) (*cf.* en annexe p.501). En annexe, un log plus complet illustre bien le mode de karstification par fantômisation des dolomies de Malmani dans la vallée de la Bloubank. (Figure 423 p.503). Une version plus complète est disponible en annexe (Figure 1204 p.1233).

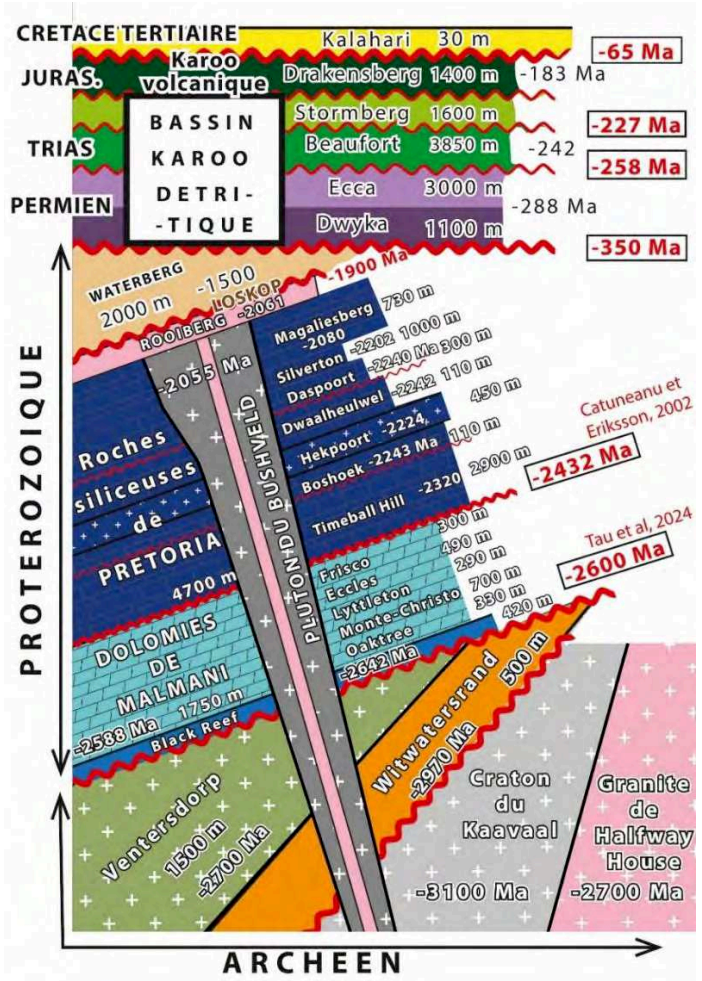


Figure 145 Log stratigraphique synthétique du Bassin du Transvaal et du Cradle of Humankind.

2.4. KARSTIFICATION ET SPELEOGENESE DES KARSTS FOSSILIFERES SUD-AFRICAINS

Cette partie porte sur la karstification et la spéléogenèse des karsts fossilifères sud-africains. Nous commencerons par rappeler (A) quelques définitions, puis nous présenterons les processus de karstogenèse (B) par crypto-altération et (C) par fantômisation. Nous aborderons ensuite successivement (D) le cas du *Cradle of Humankind*, (E) du karst de Makapansgat, puis (F) du Plateau karstique de Ghaap.

2.4.1. Définitions

Le terme "karst" désigne une région calcaire caractérisée par des grottes et des formes d'érosion en surface résultant de la dissolution de la roche carbonatée, telles que des dolines, des poljés (Figure 175), des lapiaz ou des canyons. Le site éponyme est le plateau de Kras, en Slovénie (*Karst* en slovène), où ces formes de relief ont été décrites pour la première fois. La karstification est un terme générique, qui désigne l'altération des formations carbonatées. La spéléogenèse correspond à la formation des vides au sein de ces formations. La karstogenèse regroupe l'ensemble des processus responsables de la formation d'un karst. Selon Quinif (1999), l'attaque chimique des roches carbonatées peut se dérouler selon trois modalités d'action :
L'attaque chimique sur roche nue, « le karst vrai » est le processus classique qui aboutit, avec l'existence d'énergie potentielle, chimique et mécanique (Schéma A de la Figure 162), à la formation d'un système karstique. C'est la karstification classique dite par enlèvement total, c'est-à-dire une grotte creusée par l'eau.
La crypto-altération est une attaque chimique du toit du massif calcaire sous une formation de couverture perméable par les eaux d'infiltration. Les formes résultantes sont des dépressions dans lesquels la formation de couverture s'enfonce petit à petit. Elle ne forme pas de galerie et de cavité, ce sont des formes qui affectent seulement le toit des roches carbonatées.

La fantômisation est une altération isovolumique *in situ* du calcaire par des eaux circulant très lentement. Ici, l'énergie potentielle est nulle ou presque, l'exportation de la matière dissoute pouvant se faire par diffusion. Les formes résultantes sont une succession de volumes altérés calés sur la fracturation où il ne subsiste que le squelette insoluble et une grande porosité calculée à + de 50% dans les dolomies fantômisées du *CoH* (Bruxelles, 2019, p.34), mais où la structure initiale du massif est conservée : stratification, accidents lithologiques, fractures, niveaux de silex. Plus bas, des pseudo-galeries (pseudo-endokarst) se forment dans lesquelles le volume entre des parois saines est occupée par une altérite résiduelle de la roche originelle. Nous décrirons ceux de la carrière de *Bolt's cave* à Sterkfontein, dans le *CoH,* découverts par Bruxelles (2019) (p.424).

La karstification par fantômisation et par crypto-altération remet en question un certain nombre de modèles et concepts antérieurs. Nous présenterons donc en premier lieu deux modalités de karstification du toit des massifs carbonatés par crypto-altération et par fantômisation qui sont à l'origine de la karstification du *CoH*. Ensuite, nous analyserons et réinterprétons des observations et des coupes géologiques issues de publications et que nous n'avons pas pu forcément visiter (p.249).

2.4.2. La karstogenèse par crypto-altération

Comme nous venons de le voir la crypto-altération est une attaque chimique du toit du massif calcaire sous une formation de couverture perméable par les eaux d'infiltration. Les formes résultantes sont des dépressions dans lesquels la formation de couverture s'enfonce petit à petit. Elle ne forme pas de galerie et de cavité, ce sont des formes qui affectent seulement le toit des roches carbonatées.

La crypto-altération est à l'origine du développement d'un profil d'altération (Nicod, 1975) situé à la base de la couverture sédimentaire et au toit des formations carbonatées, qui s'enfonce du haut vers le bas dans le massif carbonaté tant qu'il est alimenté en énergie chimique. Précisons qu'il n'y a pas de vide résultant de ce processus qui affecte le toit des dolomies. Cependant, en profondeur, il peut se prolonger par des fantômes de roche qui eux, lorsqu'ils seront évidés par suite de l'abaissement du niveau de base, formeront des réseaux de galeries. On parle de crypto-karst, crypto-lapiaz.

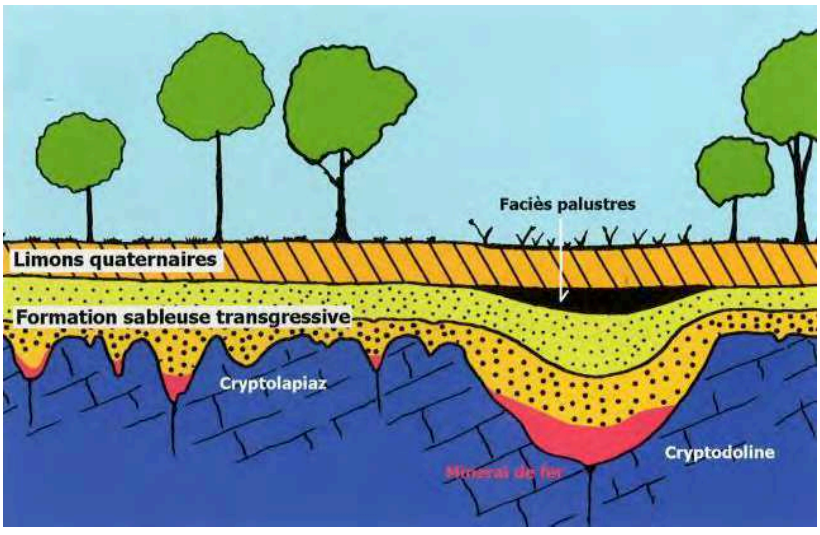


Figure 146 Coupe schématique d'une cryptodoline et de la crypto-altération selon Quinif (1999, Fig.2).

Martini (1987a) indique clairement que « les surfaces rocheuses à pinacles évoquant les lapiaz ne sont pas associées à un écoulement souterrain des eaux ». Il précise aussi que ces pinacles sont ubiquistes. On les trouve sur le *Black Reef* (Figure 349 p.395) (à Kaapsehoop près des grottes de Berlin) (p.1164) (Figure 1141 p.1165), sur les dolomies de Malmani (Figure 153 p.211) et sur les quartzites de Magaliesberg du groupe de Pretoria (à Belfast) et sur les couches du Waterberg.

> *« D'après les voyageurs qui ont fait ces trajets, le Drakensberg, avec ses sommets de plus de 2 000 mètres, ses vallées très escarpées et les brusques dépressions qui, sur son flanc Est, limitent avec lui le plateau du Karoo, dont il est la bordure extrême, présente de fort beaux paysages. Les dolomies et les diabases y sont parfois découpées par l'érosion d'une façon très imprévue et, suivant M. Schmeisser, on y aperçoit un curieux mélange de pics aigus avec les tables horizontales toujours caractéristiques des terrains du Karoo. Du côté de Pietersburg, on trouve, en outre, les dômes habituels des pays granitiques » (De Launay, 1896, p.10).*

À plusieurs endroits dans le Bassin du Transvaal affleurent des pinacles et des ruiniformes sur les dolomies de Malmani (Figure 153 et Figure 154) mais aussi sur le Black Reef (Figure 1141) à *Devil's Kantoor (Duivels-Kantoor*) et sur les quartzites de Pretoria (près de Waterval Boven).

2.4.2.1. Exemple d'un crypto-karst au toit des dolomies de Malmani entre Johannesburg et Pretoria lors des travaux du projet de la ligne Gautrain

Les dolomies de Malmani dans le secteur de Gautrain sont recouvertes d'une épaisse couverture d'altération (Figure 147), sous cette couverture on trouve un crypto-karst ayant atteint des couloirs fantômisées (Figure 148 à Figure 150) (Bounatirou *et al.*, 2009 ; Foucault et Viallon, 2015).



Figure 147 Épaisse couverture d'altérite au-dessus des dolomies (Source : Storry, 2010).



Figure 148 Crypto-karst (Source : Storry, 2010).



Figure 149 Détails des couloirs fantômisées (Source : Storry, 2010).



Figure 150 Morphologies du toit des dolomies après l'évacuation de la couverture d'altérite. On voit très bien le pendage des dolomies (Source : Storry, 2010).

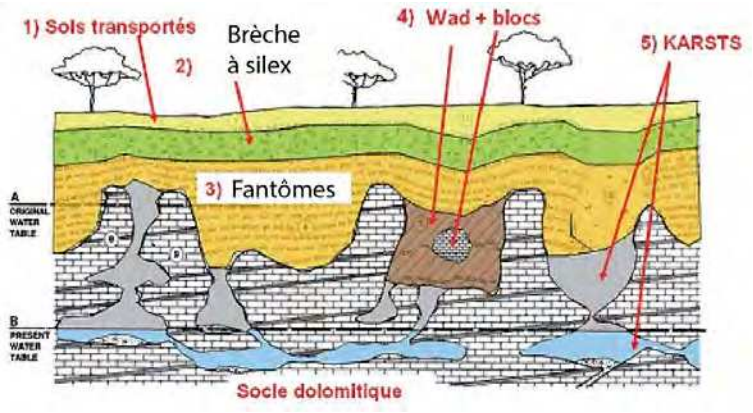


Figure 151 Coupe stratigraphique typique des dolomies fantômisées, recoupées par un crypto-karst (Source : Bounatirou et al. 2009, fig.1 p.55, modifié).

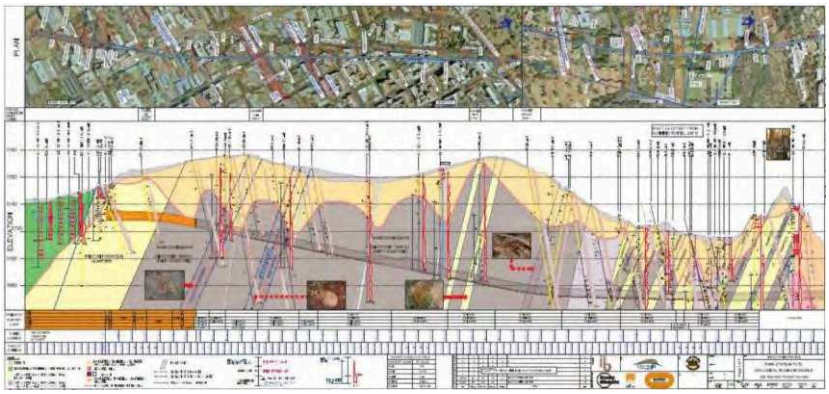


Figure 152 Coupe stratigraphique montrant la morphologie en pinacle des dolomies en gris. (Source : Storry, 2010).

2.4.2.2. Exemple d'un crypto-lapiaz près de la carrière de Centurion CBD

Ici, en photographie, ce sont les crypto-lapiez sur les dolomies de la formation Lyttelton, appartenant aux dolomies de Malmani, qui affleure près de la carrière de Centurion CBD (Figure 154) (Oosthuizen, 2013). La couverture rouge qui recouvre les ruiniformes est en train d'être évacuée montant un crypto-lapiez formé par la crypto-altération. Lorsque la surface topographique tronque horizontalement les dolomies, les sables rouges s'emboitent entre les pinacles au fur et à mesure de la dissolution de la dolomie.



Figure 153 Pinacles dolomitiques de la carrière de Lyttelton au nord de Centurion CBD (Source : Venter, 1981 in Oosthuizen, 2013, p.53).



Figure 154 Ruiniformes et pinacles dolomitiques correspond à la karstification par crypto-altération (Source de la photographie : Richardson, 2013).

Rappelons que ces pinacles ont été faussement interprétés comme le résultat d'une karstification à l'air libre, datée d'avant le dépôt du groupe Pretoria. Ce front d'altération est toujours trouvé en position subhorizontale, alors que les dolomies de Malmani et le groupe de Pretoria ont un pendage prononcé, cette morphologie de pinacle est donc plus récente que le basculement et ne peut pas être expliquée par une phase de karstification pré-Pretoria. C'est pourquoi nous proposons d'expliquer la présence de ces pinacles par la fantômisation pour les carbonates et par une crypto-corrosion sous couverture sédimentaire pour les substrats non carbonatés.

2.4.2.3. Autres exemples de crypto-karst

Les coupes stratigraphiques effectuées lors de travaux par Kleinhans (2002) (Figure 155 à Figure 157) montrent que sous la couverture d'altération (*residual dolomite, residual shale, residual dolomite WAD*), on trouve des cavités (notées « C ») et des ruiniformes comme des pinacles de dolomies.

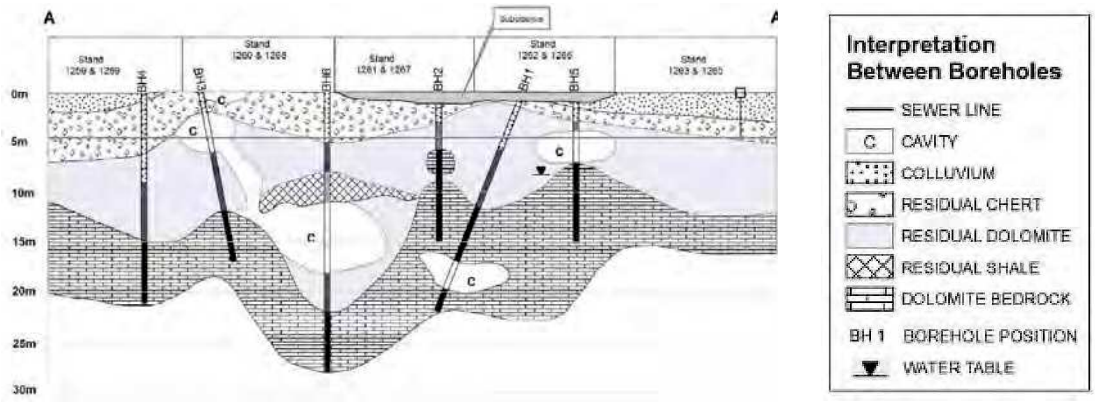


Figure 155 Coupe stratigraphique de morphologies karstiques (Source : Kleinhans, 2002, fig.D.2).

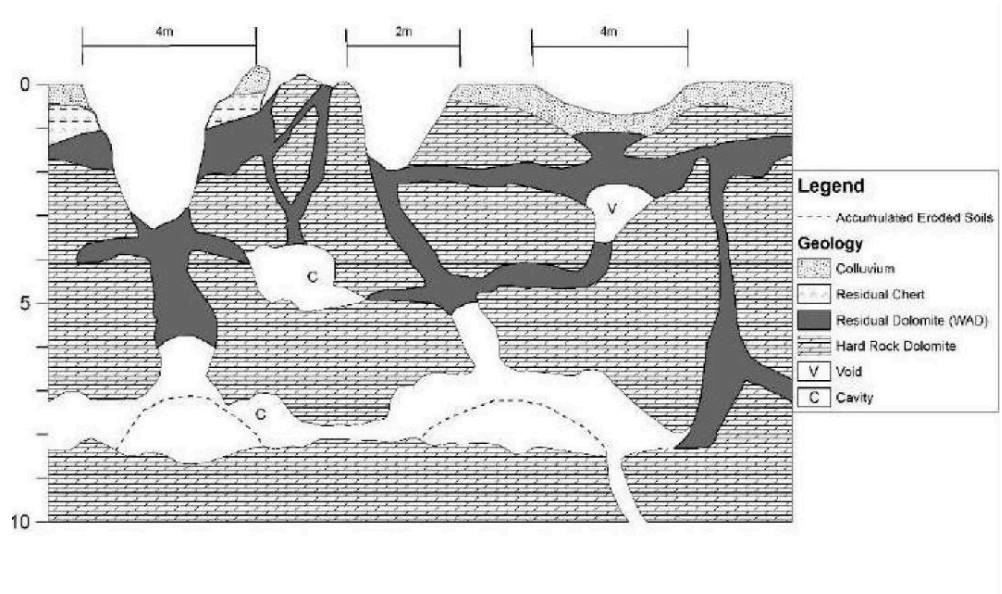


Figure 156 Modèle conceptuel des morphologies karstiques rencontrées sur les chantiers (Source : Kleinhans, 2002, Fig.47, p.147).

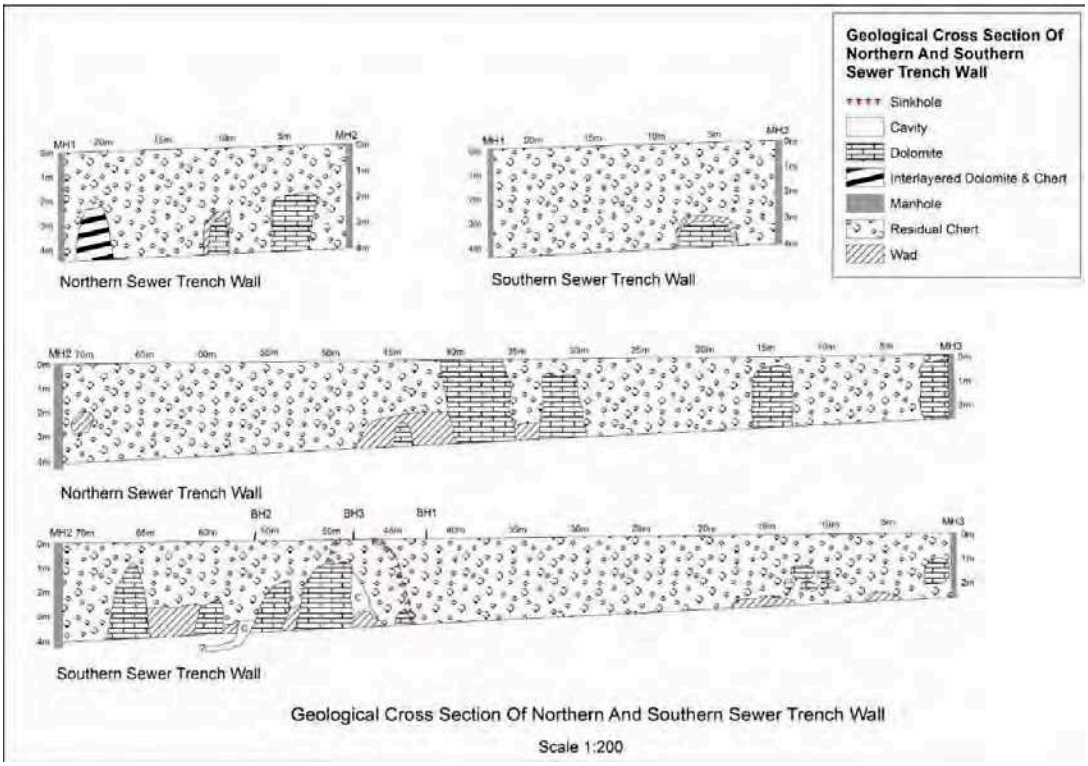


Figure 157 Morphologie karstique montrant des pinacles de dolomies sous la couverture d'altération (Residual Chert) (Source : Kleinhans, 2002).

2.4.3. La karstogenèse par fantômisation mise en évidence dans le CoH

« Le premier stade de la fantômisation est une altération isovolumique » (Quinif, 2010, p.49), provoquée par diffusion de protons dans un milieu saturé en eau et en absence d'énergie potentielle : le gradient hydraulique ou de pression étant nulle ou très faible (Schéma B de la Figure 162). Ce processus aboutit à la transformation *in situ* de la roche mère en altérite meuble, **le fantôme de roche**, comme défini plus haut. On parle, par exemple, de pseudo-karst quand la galerie est encore remplie d'altérite en place et qu'il n'a pas encore de vide.

Cette altérite, qui présente le plus souvent une forte porosité, peut s'effondrer sur elle-même à la suite d'une baisse du niveau de base dans le massif. Ce phénomène est responsable de la création du premier vide souterrain du massif. On remarquera qu'à ce stade les fantômes évidés présenteront un toit de roches saines, comme les pseudo-endokarsts de la carrière de *Bolt's cave* à Sterkfontein dans le *CoH* que nous décrirons (p.424).

La fantômisation s'effectue donc en deux étapes (Dubois *et al.*, 2014, Quinif, 1999) :

- la formation du fantôme de roche. L'altérite peut occuper toute la zone altérée ou s'être effondrée par suite de la baisse du niveau de base ;
- puis l'érosion mécanique du fantôme de roche, par érosion régressive consécutive à l'augmentation du gradient hydrodynamique et à la structuration du drainage souterrain.

2.4.3.1. Description du fantôme de roche de dolomies dans le CoH

Un matériau résiduel issu de l'altération des dolomies avait déjà été identifié dans les grottes en Afrique du Sud ou au niveau des mines situées sous la **Surface Africaine** au sud-ouest du *CoH* par plusieurs auteurs : Martini et Kavalieris, 1976 ; Buttrick, 1986 ; Martini, 1987 ; Martini et Horn, 1994 ; Pack, 1997 ; Van Niekerk *et al.*, 1999a ; Beukes *et al.*1999 ; Brink et Partridge,1965, in Marshall et Norton 2009 (p.11) ; Bumby *et al.,* 2012 (Fig.18 p.110). Ce matériau avait été désigné sous différents noms : ***« wad », « Westwits formation »*** ou encore ***« Waterval Saprolite »***. Il est décrit dans des mines, à ciel ouvert, situées sous la Surface Africaine au sud-ouest du *CoH*. Ces auteurs avaient compris que la composition des altérites variait selon la formation des dolomies de Malmani affectée mimant ainsi la roche initiale (nous décrirons ces différentes formations des dolomies du *CoH* après p.384). Ainsi, à *Westwits Mine*, c'est la formation *Oaktree* qui est altérée, à Klipkuil, la formation Lyttelton, tandis que dans le *CoH*, c'est la formation Frisco.

> *« Le **wad** est une matière terreuse très légère, à structure cellulaire, composée d'oxydes de fer et de manganèse, résultant de l'altération météorique de la dolomie » (Martini, 1987, p.49).*
>
> « L*es structures sédimentaires originelles ont été bien conservées : les lits de bancs, les structures de charriage. Dans la mine de Klipkuil, on observe une parfaite conservation et fossilisation des stromatolithes siliceux (en forme de doigts) qui ont été lessivés, rendus extrêmement poreux, et qui sont devenus par épigénie de la saprolite (silice et oxyhydroxydes de Fe-Mn) » (Van Niekerk et al., 1999a).*
>
> *« Le **wad** est composé de fer amorphe et d'oxyhydroxydes de manganèse, et présente une phase cristalline avec du quartz, de la kaolinite, de la muscovite, des hématites, ainsi que des traces d'oxydes de manganèse tels que la lithiophorite, de la cryptomelane, de la birnessite et du pyrolusite » (Van Niekerk et al., 1999a).*
>
> *Le **wad** de Ryedale est « très poreux, à grain fin avec une densité sèche de 0.95g/cm3. Il montre une zonation allant du brun rougeâtre au brun foncé et au noir. Il est finement laminé de teintes brun rougeâtres, brun ocre et brun foncé à noir, en lien avec le manganèse et le fer. L'hématite prédomine dans les lamines brun rougeâtres, la goethite dans les lamines brun ocre tandis que les lamelles brunes à noires contiennent de la cryptomélane. La majeure partie du **wad** semble être composée d'oxyhydroxydes amorphes de Fe-Mn, associés à de faibles quantités de kaolinite. » (Pack, 1997).*

Les travaux de Bruxelles (2019, p.42 ; 2022b), dans le *CoH* et plus précisément dans la grotte de Sterkfontein, montrent que cette altérite est du **fantôme de roche** de dolomies et qu'il correspond au résidu de la fantômisation (Quinif, 1999 et 2010 ; Bruxelles et Bruxelles, 2002 ; Quinif et Bruxelles 2011 ; Dubois *et al.*, 2014). Il est maintenu en place (parautochtone) par les interbancs de silex présents dans les dolomies (décrites. p.384), qui eux, ne sont altérés par la fantômisation ou que dans une moindre mesure (voir les analyses minéralogiques de Maire *in* Bruxelles, 2019, p.43) (Figure 377). Le fantôme est encore conservé dans les points bas de la cavité de Sterkfontein, comme en général dans le fond des cavités que nous avons étudiées en Afrique australe, où le fantôme de roche est encore d'évacuation par la nappe d'eau.
Bruxelles fait le lien entre ce processus d'altération et les réseaux de galeries développées dans ces dolomies. Il met aussi en évidence le lien entre le fantôme de roche, la karstification et les fluctuations du niveau de base pendant la lente incision de la vallée de la Bloubank dans le sud du *CoH*. Nous décrirons ces mécanismes en détail (p.439).

Sur les photographies ci-dessous (Figure 158), on observe à gauche les dolomies de couleur beige (carrière de *Bolt's farm* à Sterkfontein), avec des niveaux de silex de couleur bleue, et à droite les **dolomies fantômisées** (une grotte du *CoH* dont nous ne connaissons pas le nom), où, après évacuation de l'altérite, ne subsistent que des vides et des niveaux de silex et des fractures verticales silicifiées, qui n'ont pas été altérées par la fantômisation. Ces *box-works* soutiennent encore l'altérite *in situ* entre les cloisons de silice (p.439).



Figure 158 À gauche en carrière les dolomies non fantômisées (carrière de Bolt's farm à Sterkfontein) et à droite les dolomies fantômisées dans une grotte du CoH (Source photographie de droite : SEC Caving).

2.4.3.2. Coupe de Quinif (1999)

Sur la coupe ci-dessous (Figure 159) proposée par Quinif (1999, Fig.3), on distingue le développement de fantômes de roche de la surface jusqu'en profondeur (faciès n°4), la roche étant dissoute dans la masse suivant certains gradients liés à la position du niveau de base ou des exutoires. On y observe des blocs 'flottants » de roche non altérée dans le fantôme de roche, indiqués par une flèche rouge, ainsi que la préservation des structures comme les niveaux de silex, indiqués en vert (faciès n° 5), préservés et en place dans le fantôme de roche, qui forment les *boxworks* décrits précédemment dans les grottes et visibles sur la photographie de droite ci-dessus (Figure 158). Ce schéma ne présente pas la deuxième étape qui est l'exhumation des pinacles résiduels. Ensuite, le fantôme de roche est érodé, soutiré et évacué. C'est la création des vides et des grottes.

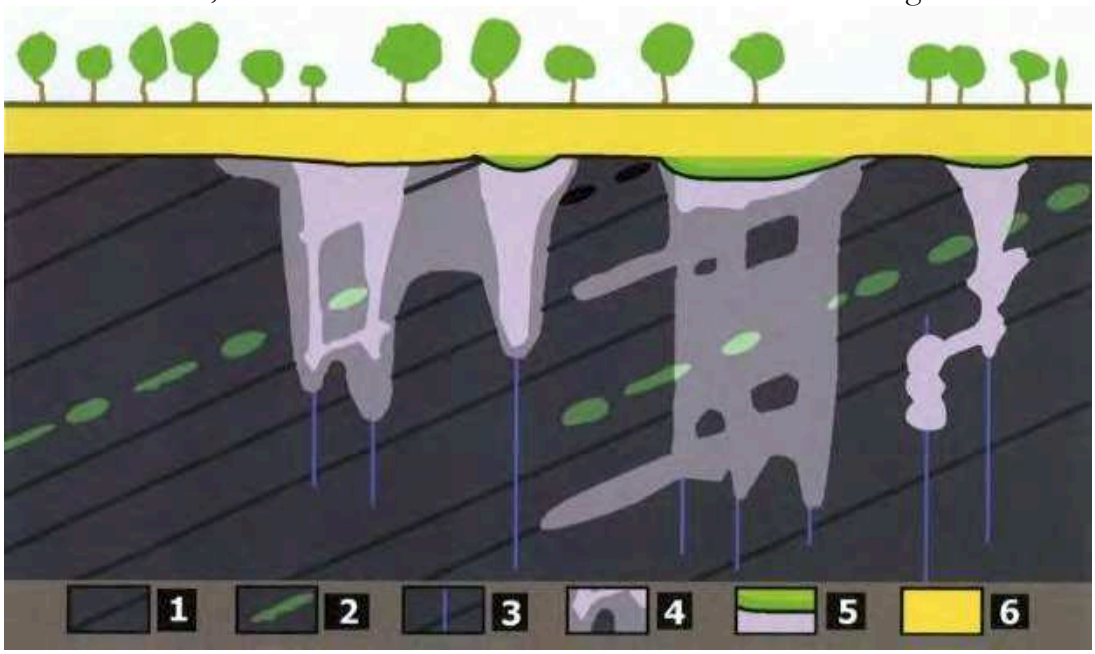


Figure 159 Coupe schématique d'un fantôme de roche selon Quinif (2010, Fig.3-17, p.61 et 1999, Fig.3, modifié).

Légende :
Faciès n°1 : joints de stratification des roches carbonatées
Faciès n°2 : niveaux de cherts
Faciès n°3 : diaclases verticales
Faciès n°4 : développement des fantômes en profondeur
Faciès n°5 : couvertures discordantes piégées dans les dépressions creusées lors de la transgression. Ces couvertures scellent les fantômes.
Faciès n°6 : Couverture transgressive postérieure qui fossilise cet ensemble fantômisé.

2.4.3.3. Schéma de Dupont et al. (2018)

Le schéma de Dupont *et al.* (2018) ci-dessous (Figure 160) montre le décolmatage des fantômes de roche (en vert) et la création de vide (de grottes) lorsque le niveau de base baisse et que la vallée se creuse. Il correspond au schéma B de la Figure 162 ci-dessus (p.220). Ces schémas, ci-dessous montrent l'érosion mécanique du fantôme de roche, par érosion régressive consécutive à l'augmentation du gradient hydrodynamique décrit par (Dubois *et al.*, 2014, Quinif, 1999).
Nous verrons que ce schéma sera différent dans la vallée de la Bloubank dans le *CoH* et au niveau des grottes de Sterkfontein, Kromdraai et Swartkrans, du fait du fort pendage de l'encaissant et des dolomies, de 25°N (comme le montre la Figure 170 et les schémas p.439).

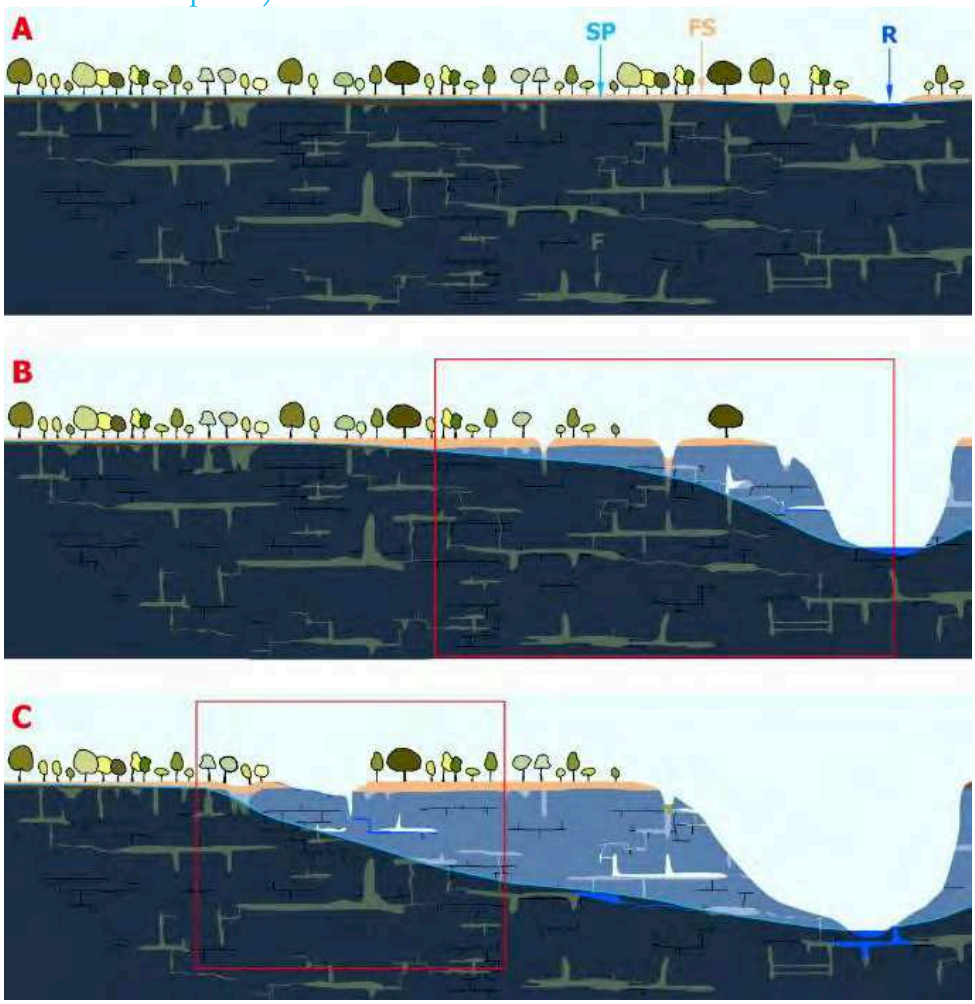
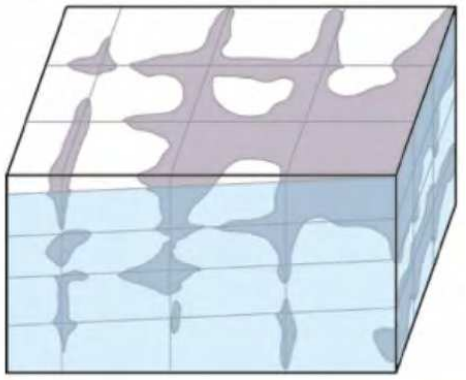


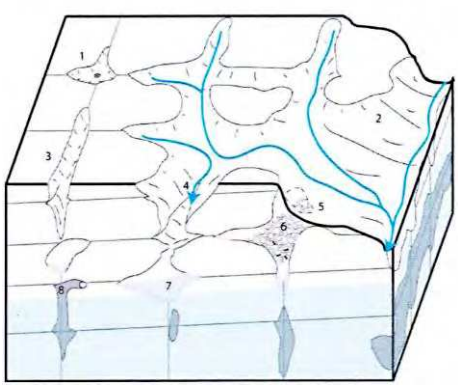
Figure 160 Schéma évolutif d'un massif karstifié par fantômisation selon Dupont et al. (2018, Fig.17a, p.19).

2.4.3.4. Schéma de la karstogenèse par fantômisation Bruxelles et Dandurand in FFS (2024)

Les schémas suivants (Figure 161), proposés par Bruxelles et Bruxelles (2002) et Bruxelles et Dandurand *in* FFS (2024), illustrent comment les dolomies fantômisées et crypto-altérées sous la Surface Africaine (Bloc n°1) sont exhumées en surface par suite de l'abaissement de la surface topographique et de l'incision du réseau hydrographique (Bloc n°2). Cependant, l'exhumation du cryptokarst et la vidange du fantôme sont deux choses différentes qui aboutissent à des formes différentes. L'incision de la Surface Africaine par ces réseaux hydrographiques entraîne l'abaissement du niveau de base et donc le tassement des fantômes (n°7), créant ainsi des vides puis l'exhumation des couloirs d'altération (n°3) au niveau des versants (n°2), l'ouverture de grottes en surface (n° 5), et leur comblement progressif par des éboulis, des colluvions et des fossiles (n°6).



Bloc n°1 :
Période de stabilité
Potentiel hydrodynamique faible à nul
▼
Échange chimique dans la zone saturée
Altération isovolumique
▼
Fantôme de roche
Labyrinthe d'altération



Bloc n°2
Le niveau de base local descend
▼
Période d'instabilité
Incision des vallées/ écoulement
Potentiel hydrodynamique moyen à fort
▼
Débourrage du fantôme
1 Soutirage / doline
2 Recul du versant
3 Couloir d'altération
4 Perte en surface/collecteur
5 Entrée naturelle de grotte
6 Éboulis/colluvions/faune
7 Fantôme de roche tassé
8 Fantôme de roche en place

Figure 161 Exhumation des surfaces karstifiées et ouverture des grottes en surface (Bruxelles et Bruxelles, 2002 ; Bruxelles et Dandurand in FFS, 2024, Fig.4, p.45).

2.4.4. Karstogenèse du Cradle of Humankind : crypto-altération et fantômisation comme processus dominant

Le schéma ci-dessous (Figure 162) proposé par Dubois et al., (2014) illustre les trois modalités de karstogenèse qui impactent les formations carbonatées. Elles peuvent être synchrones ou diachrones, et se succéder dans le temps en fonction du contexte morpho-structural, géologique et climatique qui va contrôler les modalités de dissipation de l'énergie chimique, potentielle ou mécanique du système. Par exemple, les auteurs expliquent qu'une tectonique en extension (énergie mécanique) associée à la présence d'un relief et d'une pluviométrie appréciable (énergie potentielle) aboutira à un « vrai karst ». Une énergie potentielle réduite et l'absence de tectonique en extension sur une formation de couverture donneront un cryptokarst. Une tectonique en extension importante (énergie mécanique), l'absence de relief (pas d'énergie potentielle) verront le développement des fantômes de roche.

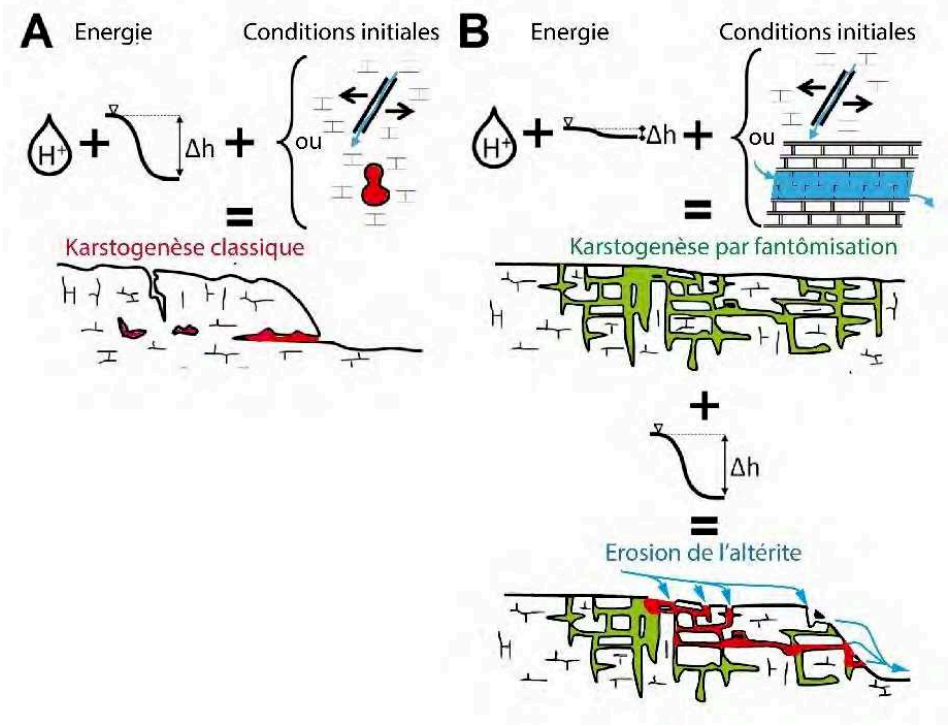


Figure 162 Modalité de karstogenèse selon Dubois et al.(2014). Le schéma A montre la formation d'un karst "classique". Le schéma B illustre la formation d'un karst fantômisé en deux étapes : formation du fantôme et son évacuation (Source : Dubois et al., 2014, modifié).

Étudions les deux modalités de karstogenèse qui s'attaquent au **toit des roches carbonatées** et aux paléosurfaces *per descensum* : la fantômisation et la crypto-altération. Ces deux modalités de karstification se produisent au toit des dolomies, en surface ou en subsurface. Lorsque ces surfaces karstifiées sont exhumées à l'air libre, il devient difficile de déterminer le type de modalité qui les a façonnées, d'autant plus qu'elles peuvent se produire ensemble au même endroit, au même moment, ou se succéder de manière diachrone, tout en entretenant mutuellement l'énergie chimique du système.

Résumé du contexte tectonique de la région du *Cradle of Humankind*

La région a connu un contexte tectonique en extension, à partir du rifting jurassique, comme en témoignent les dykes et les sills du Karoo (forte énergie mécanique).

Aucun signe de tectonique en compression depuis le Paléoprotérozoïque, époque marquée par la mise en place du pendage des dolomies et des chaînes de Witwatersrand et du Magaliesberg. La couverture sédimentaire du Karoo traduit une compression du sud vers le nord à partir du Permo-Trias, pulsée depuis le sud de l'Afrique du Sud et assez loin du *CoH*. Cette couverture a été largement érodée dans le *CoH*, on en trouve des témoins à 40 km à l'est.

Une absence de relief depuis au moins le Crétacé inférieur, les dolomies forment de vastes plateaux (à énergie potentielle nulle). Des surrections du plateau ont cependant eu lieu pendant le Tertiaire, réintroduisant de l'énergie potentielle et l'érosion du Karoo dans le *CoH*.

Depuis le Paléozoïque, le climat a connu des phases froides au Carbonifère (glaciers Dwyka), suivies d'un réchauffement au Mésozoïque. Le climat devient ensuite globalement chaud à semi-aride, avec des alternances humides au Tertiaire (énergie potentielle).

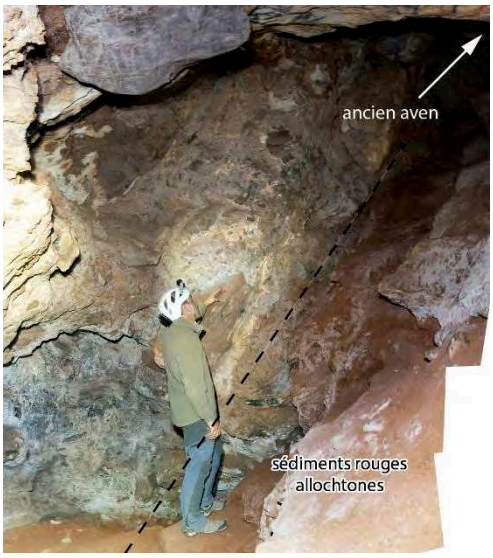
Ces contextes suggèrent que deux modalités de karstification ont affecté les formations carbonatées du *CoH* : la crypto-altération à partir du Permo-Trias (énergie potentielle réduite et absence de tectonique en extension) et la fantômisation peut-être dès le Jurassique lors du rifting (tectonique en extension, énergie mécanique forte) et absence de relief (énergie potentielle réduite). Ces processus sont renforcés par les surrections successives du Tertiaire, qui ont exhumé les crypto-karsts fantômisés, décolmatés progressivement les fantômes de roche et permis la genèse de cavités.

Nous y reviendrons dans le Chapitre n°3. Après avoir expliqué la formation des grottes du *CoH* par fantômisation, nous décrivons à présent les types de remplissages qui les ont comblées.

2.4.4.1. La formation de la brèche karstique

Les sédiments pénètrent dans les grottes principalement par des ouvertures en relation avec la surface topographique, soit par des processus gravitaires (colluvions dévalant le versant), soit apportés par l'eau. Ces dépôts sont hétérogènes et peuvent être constitués d'argiles, de limons, de sables, de cailloutis ou de blocs. À l'intérieur de la grotte, ils s'organisent généralement en talus à forte pente, depuis l'entrée, en hauteur, jusqu'au fond de la cavité.

Ces sédiments allochtones se mélangent alors aux altérites autochtones, qui peuvent être remaniées, ainsi qu'à des sédiments d'origine chimique, tels que les spéléothèmes et le guano. L'ensemble hétérogène se cimente et s'indure pour former une roche souvent très dure (Figure 167), appelée *brèche*, car elle est constituée de fragments de différentes roches (clastes) emballées dans une matrice de sédiments fins. Elle est qualifiée de *brèche karstique* car elles se développent à l'intérieur des grottes. Dans les grottes du *CoH*, au cours de ce processus, qui s'est déroulé au Plio-Pléistocène, des ossements de faune et d'hominines se sont également mêlés aux sédiments. On parle alors de brèches karstiques fossilifères ou ossifères. Les cavités constituent donc de véritables pièges à sédiments et à fossiles.



Cette photographie (Figure 163) de *Name Chamber* dans la grotte de Sterkfontein (Stratford *et al.*, 2012, fig.7 p.166) montre le pied du talus formé par les sédiments de couleur orangée, qui se sont déposés en pente, comme l'indique le trait en pointillé, depuis l'apex qui est situé au droit d'anciens avens s'ouvrant en surface et aujourd'hui comblés de sédiments.

Figure 163 Remplissage karstique allochtone présentant un fort pendage.

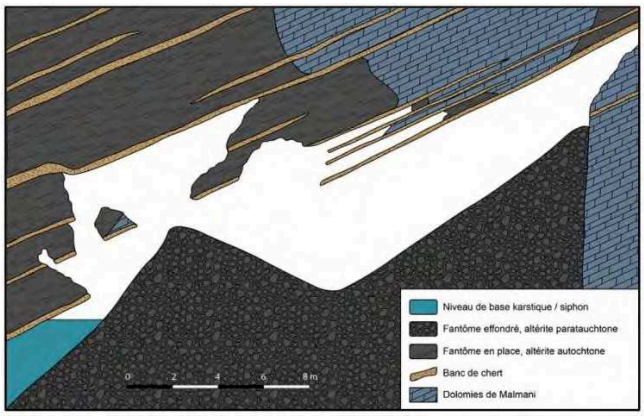


Figure 164 Profil vertical stratigraphique fond de la cavité de Sterkfontein montrant le fantôme de roche en place et effondré (Bruxelles, 2019, p.42).

2.4.4.1.1. Les brèches du Type-site de Sterkfontein

La fouille du *Type Site* au sommet de la grotte de Sterkfontein (Figure 165), a révélé, en 1947 le premier crâne complet d'un australopithèque adulte, *Mrs Ples*, dont la position est indiquée par la flèche rouge sur la Figure 165. Au total plus de 500 restes d'australopithèques ainsi que des outils lithiques ont été découverts. Ce gisement et l'ensemble de la cavité ont fait l'objet de nouvelles études stratigraphiques menées par Laurent Bruxelles et qui ont permis de mieux comprendre comment la grotte s'est formée et comment les fossiles ont pu être piégés et à quelle époque (Bruxelles, 2019 ; Granger *et al.*, 2022, fig.1). La majorité de ce que l'on voit sur la photographie ci-dessous (Figure 165) est de la brèche karstique, aujourd'hui présente à l'air libre. On discerne la dolomie grise, à gauche de la photographie, au niveau de la flèche rouge.



Figure 165 Le Type-Site (1482 m d'altitude) au-dessus de la grotte de Sterkfontein. La flèche rouge indique la localisation où a été trouvé le crâne de Mrs Ples en 1947.

Les brèches du Type Site, comme celles des grottes du *CoH*, sont majoritairement constituées de fragments de silex provenant du démantèlement des niveaux de silex des dolomies paléoprotérozoïques (décrites p.428). En effet, la silice est peu altérée par les processus de karstogenèse décrits précédemment. Dirks et Berger (2013) indiquent que l'on trouve également des fragments de roche provenant du démantèlement des grès du Karoo.



Figure 166 Brèches du Type Site de Sterkfontein, composées de clastes de taille variée, principalement constituées de dolomies.

Ci-dessous, la brèche du *Type Site* (Figure 167) est constituée surtout de fragments de silex. Dans une grotte, une brèche est cimentée par la calcite assez précocement. Ensuite, la brèche peut se décalcifier et les éléments qui la constituaient se déplacer à nouveau une fois meuble avant qu'une calcite secondaire se forme et colmate à nouveau le tout formant une nouvelle brèche.



Figure 167 Brèches calcitées du Type Site de Sterkfontein (Cradle of Humankind, Afrique du Sud).

Parfois, des concrétions de calcite (stalagmites, plancher de calcite) peuvent avoir été emballées ou remaniées dans une brèche d'âge postérieure, comme c'est le cas à Koanaka au Botswana sur les photographies ci-dessous (Figure 168).



Figure 168 Stalagmites prises dans une brèche rose à Koanaka Hills au Botswana (Source : Bruxelles L.).

2.4.4.2. Le problème de datations des spéléothèmes intra-bréchiques

D'autres fois, la calcite a pu venir remplir des vides (intrabréchique) au sein de la brèche (Figure 169) dont la datation de la calcite rajeunira l'âge de la brèche, comme à Sterkfontein où ces schémas, ci-dessous, expliquent ce mécanisme (flèches rouges de la Figure 170).

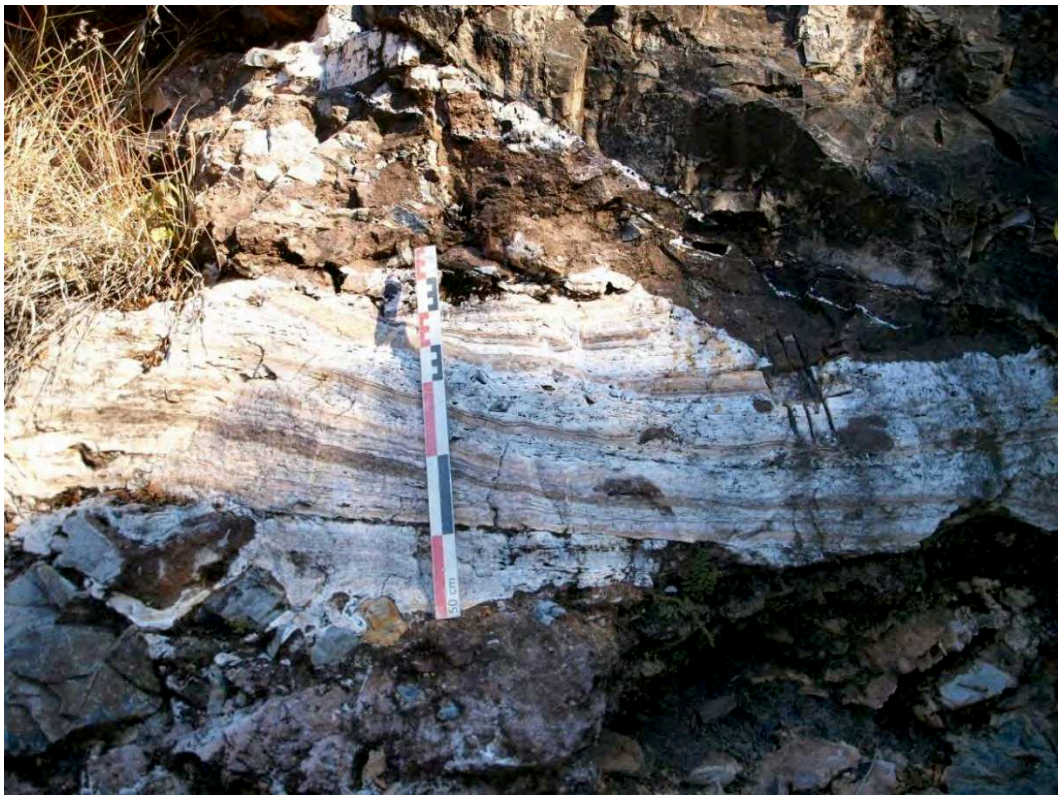


Figure 169 Vide intrabréchique (dans la brèche) comblée par de la calcite (Type Site).

Les datations de ces remplissages karstiques et des brèches fossilifères sont particulièrement intéressantes car elles permettent de connaître l'âge d'ouverture des cavités et de reconstituer le rythme d'évolution des vallées et des paysages.

2.4.4.3. Schéma montrant la formation des spéléothèmes intra-bréchiques dans la grotte de Sterkfontein dans la vallée de la Bloubank dans le CoH.

Le schéma suivant (Figure 170), proposé par Bruxelles (2019), illustre le creusement de la vallée de la Bloubank dans le *CoH*, ainsi que :

- la succession des paléosurfaces d'érosion dans le temps (S1, S2, S3 et S4) ;
- l'évacuation du fantôme de roche (en noir), à l'origine de la formation des cavités (en blanc), lesquelles seront ensuite comblées par des spéléothèmes (en jaune) et leur recouvrement par des brèches allogènes lors de l'ouverture de la cavité (en marron). Nous reviendrons sur ce schéma plus loin (p.439).

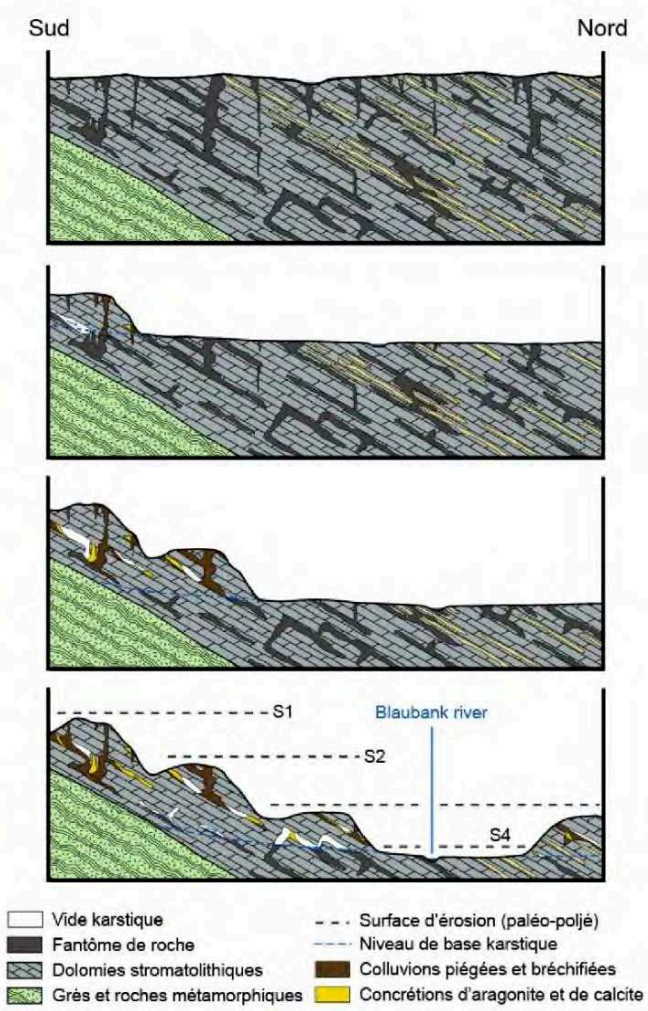
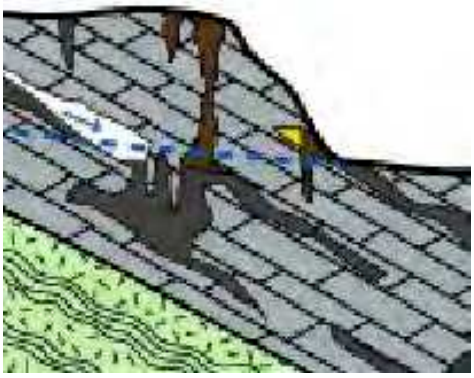
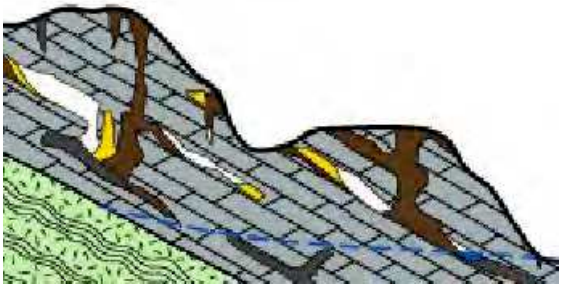
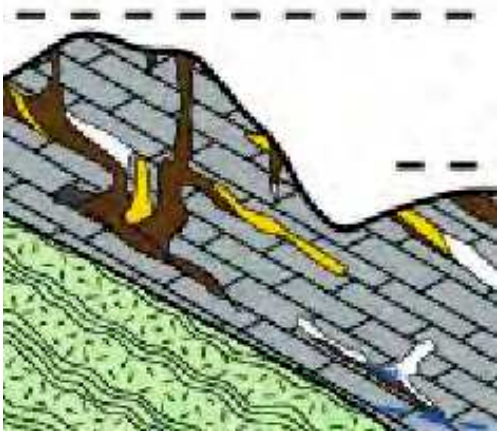


Figure 170 Schéma d'évolution de la vallée de la Bloubank et du creusement des grottes (sans échelle) (Bruxelles, 2019, p.51, modifié).







2.4.4.4. Présentation du karst du Cradle of Humankind

Nous présentons ici brièvement le karst du *Cradle of Humankind*, car nous lui consacrerons le Chapitre n°3 (p.268). Le karst du *CoH* se situe dans les dolomies (cf. encadré ci-dessous), délimitées entre les deux traits orange sur la Figure 171 et tel que le montre la carte géologique de la Figure 340 (p.379).

> Définition des dolomies : Les dolomies sont des formations carbonatées, au même titre que les roches calcaires, mais par rapport au calcaire une certaine proportion de carbonates de calcium a été remplacée par du carbonate de magnésium, produisant des dolomites. Ce qui fait que les régions dolomitiques montrent des formes karstiques beaucoup plus marquées que celles des régions calcaires.

Ces dolomies s'étendent sur tout le pourtour du Bassin du Transvaal où elles forment de vastes plateaux plurikilométriques et subhorizontaux, nommés *Central Rand*, *West Rand*, *Far West Rand* et *Est Rand* (Figure 144). Les quartzites, qui surmontent stratigraphiquement les dolomies, forment quant à eux de longs reliefs dénommés le Witwatersberg et le Magaliesberg. Ils ont une incidence sur l'organisation des cours d'eau et la karstification.

Dans le *CoH*, les dolomies forment de vastes surfaces planes faiblement incisées par les rivières : Bloubank et Skeerpoort (Figure 340, Figure 341 et Figure 342 p.379). La vallée Bloubank forme une faible dépression correspondant à un fluvio-poljé (définition p.90) et des vallons fluviokarstiques (voir encadré p.243 et Figure 175 et Figure 176) parsemés de faibles reliefs dolomitiques résiduels et karstifiés : les collines de Sterkfontein, Swartkrans, Cooper et Kromdraai (Figure 199, Figure 200 t Figure 165). Cette vallée creusée dans les dolomies est encadrée par de puissants reliefs en quartzites : le Magaliesberg, le Witwatersberg, indiqués sur la Figure 171, le relief de Krugersdorp et celui de Swartkop, que nous décrirons en détail dans le Chapitre n°3.

La majorité des sites fossilifères à Hominines se situe dans la vallée Bloubank, au niveau de ces collines karstifiées qui ont piégé et préservé des fossiles d'Hominines et de la faune, datant du Plio-Pléistocène et remontant à au moins -3.7 Ma (datation de *Little Foot* (Granger *et al.*, 2022)).

En plus des grottes inscrites au Patrimoine Mondial de l'Humanité dont nous venons de parler, nous nous sommes procuré un inventaire très complet, et confidentiel, des cavités recensées par les spéléologues, le *SASA Cave Register*, en vert sur la Figure 171, et pour lesquelles nous disposons de coordonnées géographiques et près d'une quarantaine de bulletins spéléologiques qui sont une véritable mine d'information pour situer les grottes et comprendre l'organisation de cette karstification particulière.

Le *SASA Cave Register (South African Spelaeological Association)* dénombre, à l'été 2023 :

- 2437 cavités et avens en Afrique du Sud ;
- dont 1875 situées dans le Bassin du Transvaal, cartographié sur la Figure 144 (p.204) ;
- 1287 dans la région du Gauteng ;
- 539 dans l'emprise du CoH.

Parmi ces 539 grottes du *CoH*, rappelons que 12 d'entre elles ont révélé la présence de fossiles d'Hominines et/ou de fossiles de faunes du Plio-pléistocène : *Sterkfontein, Kromdraai, Swartkrans, Cooper, Rising Star, Haasgat, Drimolen, Malapa, Gondolin et les grottes de* Bolt's farm (Dart, 1925 ; Broom, 1936 ; Clarke, 1985, Clarke, 1998 ; Vrba, 1982 ; Clarke et Tobias, 1999 ; Herries *et al.*, 2019 ; Gomery *et al.*, 2008, 2012, 2106 ; Dirks *et al.*, 2016 ; Edwards *et al.*, 2023 ; etc.).

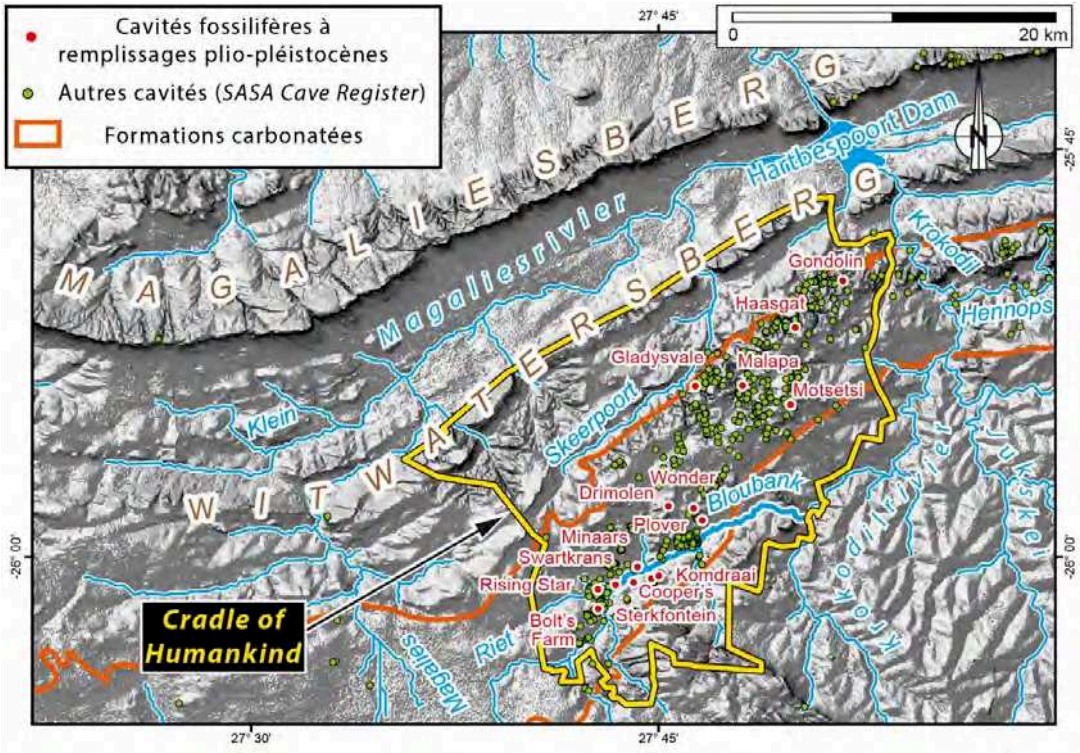
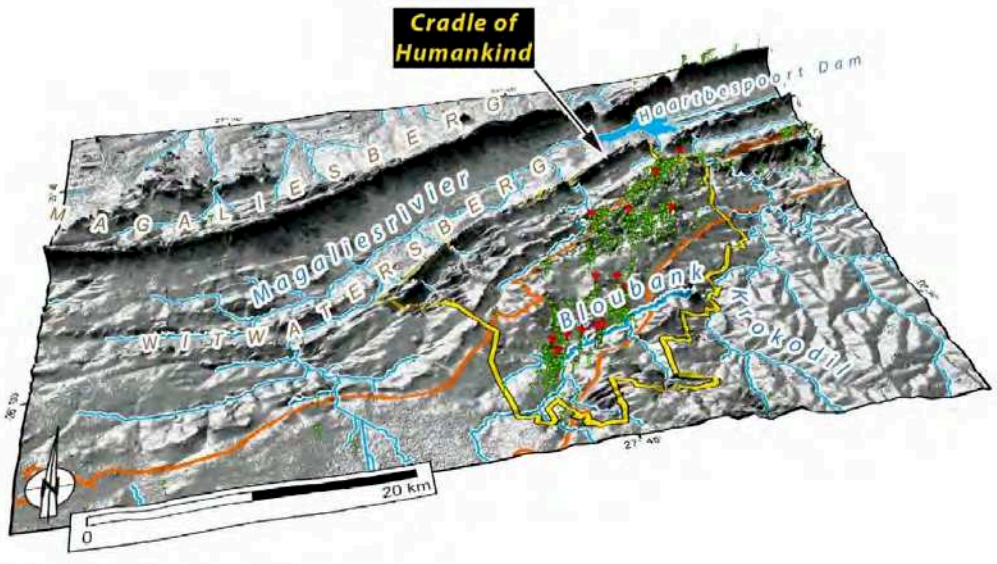


Figure 171 Carte orohydrographique du Cradle of Humankind et de la vallée Bloubank.



2.4.4.5. Exemple de la grotte de Sterkfontein et intérêt de la datation de Little Foot

Au cours des quinze dernières années, Laurent Bruxelles a exploré, dans le *CoH*, une cinquantaine de cavités et de gisements autour de la grotte de Sterkfontein (Alary, 2017 ; Bruxelles, 2017, p.2 ; Bruxelles, 2022) et dans la vallée de la Bloubank. Cette riche expérience fait de cette région le modèle de référence karstique sur lequel cette thèse est élaborée.

L'étude stratigraphique menée par Laurent Bruxelles de la grotte de Sterkfontein montre que l'interprétation du paléomagnétisme ou de la stratigraphie pose des problèmes. Les dates indiquées pour les sites fossilifères karstiques du Cradle of Humankind sont donc à prendre avec précaution, comme les tableaux d'Herries *et al.*, 2019, 2023. Il est donc primordial de bien maîtriser la stratigraphie des dépôts karstiques fossilifères, mais aussi de mieux comprendre le mécanisme et les rythmes de formation des grottes et du creusement des vallées, pour mieux définir la période des dépôts karstiques et de leurs remplissages fossilifères.

Par exemple, dans la grotte de Sterkfontein, Ron Clarke a découvert en 1996 un squelette complet d'australopithèque, STW 573 connu du grand public sous le nom de *Little Foot*. Une première datation des brèches emballant le fossile donne un âge de -4.17 ± 0.14 Ma (Partridge *et al.*, 2003, p.608) (méthode des cosmogéniques $^{26}Al/^{10}Be$) et une datation par paléomagnétisme indique un âge de -3.3 à -3 Ma (Mc Fadden *et al.*, 1979 ; Delson, 1984 *in* Bruxelles, 2019, p.103) puis des datations par U/Pb ont donné entre -2.8, -2.6 et -2.16 Ma, avec une date retenue de - 2.2 Ma pour *Little Foot* (Walker *et al.*, 2006 ; Pickering et Kramers, 2010 ; Herries et Shaw, 2011 ; voir Herries *et al.*, 2013) (Bruxelles *et al.*, 2014) (C*f.* résumé *in* Bruxelles, 2019, p.59).

La nouvelle étude stratigraphique des couches sédimentaires qui se sont déposées dans la cavité et plus particulièrement l'étude des couches qui ont livré *Little Foot* montrent que la calcite qui a été datée n'appartient pas à un plancher stalagmitique qui viendrait recouvrir la couche contenant le squelette, mais plutôt à un vide à l'intérieur même de la couche contenant le squelette (Bruxelles *et al.*, 2014). Ce vide étant ensuite comblé par la calcite intrusive, la datation U/Pb de cette calcite ne correspond donc pas à l'âge d'enfouissement de *Little Foot* qu'elle rajeunit de plus d'un million d'années.

Ce qui est en adéquation avec les datations cosmogéniques ($^{26}Al/^{10}Be$), une méthode qui ne date pas la calcite mais les brèches emballant le squelette de *Little Foot* et donne un âge de -3.67 ± 0,16 Ma (Granger et *al*, 2015 ; Granger *et al.*, 2022), pour la chute de *Little Foot* dans la grotte, presque 1,5 Ma plus vieux que les datations admises par la communauté scientifique jusque-là (Bruxelles, 2022, p.24).

- -2.24 à -2.17 Ma (U-Pb) Walker *et al.*, 2006 pour StW573;
- Herries et Shaw, 2011 ;
- -2.8 à -2.6 Ma (U-Pb) (Pickering et Kramers 2010) ;
- -4.17 à -3.3 Ma (cosmogénique $^{26}Al/^{10}Be$ et paléomagnétostratigraphique) (Partridge, 2005) ;
- Voir tableau de la Figure 172 (Pickering *et al.*, 2011a) ;
- 3.3 Ma (paléomagnétostratigraphique) (Partridge *et al.*, 1999) ;
- -3.5 Ma (corrélation faunique) (Partridge *et al.*, 2003, p.607) ;
- -3.2 à -1.3 Ma (U-Pb) (Pickering *et al.*, 2019) ;
- voir les datations de Murszewki *et al.*, 2019.

Les dates entre - 2,8 - 2,6 et - 2,16 Ma, avec une date retenue de 2,2 Ma pour *Little Foot* (Walker *et al.*, 2006 ; Pickering et Kramers, 2010 ; Herries et Shaw, 2011 ; voir Herries *et al.*, 2013) sont maintenant invalidées (Bruxelles *et al.*, 2014, résumé in Bruxelles, 2019, p.59 ; Bruxelles, 2022).

Ceci montre que l'étude stratigraphique des sites karstiques est primordiale et que la stratigraphie des couches sédimentaires et archéologiques de Sterkfontein n'a pas forcément été bien comprise avant les premières datations. Lorsque nous prendrons en compte l'évolution des paysages et l'âge des remplissages karstiques, il faudra toujours être prudent quant à l'utilisation des datations dont le contexte n'a pas été revu avec la même méthodologie.

La nouvelle datation de Little Foot (Granger *et al.*, 2015) , indiquée en rouge sur l'échelle chronologique en abscisse, vieillit les datations jusqu'ici acceptées des remplissages fossilifères des grottes du Cradle of Humankind et les rapprochent des dates de l'Afrique de l'Est. Une grande partie des datations utilisées dans ce graphique sont celles obtenues sur des planchers de calcite secondairement formés au sein des brèches. Les corrélations avec les fossiles sont donc totalement caduques.

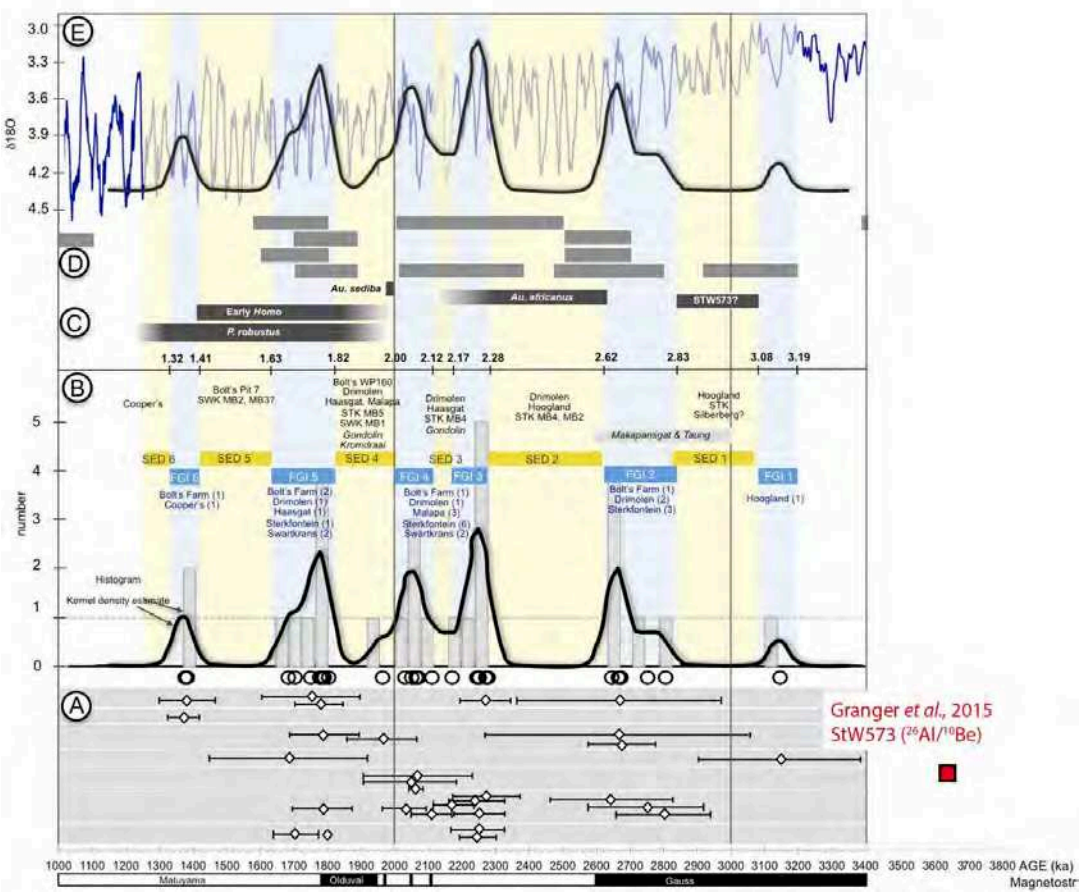


Figure 172 Position de la nouvelle datation de Little Foot (Granger et al., 2015) sur le tableau fourni par Pickering et al. (2019) (Source du tableau : Pickering et al., 2019, modifiée).

2.4.5. Le karst à poljés de Makapansgat

Nous présentons ici une brève introduction au karst de Makapansgat, que nous détaillerons plus loin (p.954). Il est situé dans le nord du Bassin du Transvaal, à 250 km au NNE du *Cradle of Humankind* (site n°2 sur la Figure 109), au niveau des mêmes dolomies protérozoïques que le *CoH*.

Le site a été découvert par Kitching en 1947, et en 1948 Dart y identifia des fossiles d'Hominines (Dart, 1948b). L'UNESCO (DACEL, 1999, p.49) reconnaît quatre sites paléontologiques majeurs à Makapansgat :

- *Makapansgat Limeworks* (n°11 de la Figure 173, Figure 174)
- Buffalo Cave (n°10) ;
- Peppercorn's Cave (n°9) et Katzenjammer Cave (n°8) ;

Ainsi que plusieurs sites archéologiques et paléontologiques :

- Cave of Earths (n°5) et Hyaena Cave ;
- *Ficus Cave* (n°7) et le site Ficus de l'âge du Fer ;

Et que de nombreux sites en plein air.

La particularité de ce karst est que les grottes se situent à des altitudes similaires à celles des cavités du *CoH*, et que les âges des remplissages fossilifères sont également comparables.
Demandons-nous si cela sera une constante ? Ce qui voudrait dire qu'il faudra chercher des brèches dans les grottes qui s'ouvrent à ces altitudes.
Le bassin versant de cette région (Mogalakwena) appartient aussi au Limpopo qui se jette dans l'Océan Indien, comme le *CoH*.

Les remplissages des grottes de Makapansgat ont été datés (certaines par paléomagnétisme) donnant plusieurs fourchettes d'âge :

- 3.3 à 2.8 Ma pour le membre 2 (Brock *et al.*, 1977) ;
- 3.32 à 3,06 Ma (Mc Fadden *et al.*, 1979) ;
- 2.90 Ma pour le membre 3 (Partridge, 1979) ;
- 3.03 à 2.58 Ma pour le membre 2 ouest et le membre 3 (Herries *et al.*, 2013) ;
- <3.60 à 3.03 Ma pour l'ancienne entrée (Herries *et al.*, 2013) ;
- 2.2 à 2 Ma (Dirks *et al.* 2010 *in* Adams *et al.*, 2010, p.690) ;

Les fossiles ont été datés de 3.07 à 3.00 Ma selon Thackeray et Dyke (2023).

Les membres 3 et 4, datés de 3.03 et 2.58 Ma, contiennent des fossiles d'Australopithèques et des fossiles non-humains (Herries *et al.*, 2013 ; Reed, 1996 in Gommery et al, 2016). Nous mesurons sur le MNT (Jaxa) que la grotte s'ouvre à l'altitude de 1506 m.

Le secteur et la grotte de « Cave of Hearts » ont fait l'objet de fouilles de 1996 à 2001 et d'un rapport complet rédigé par McC Nabb et Sinclair (2009).

En résumé, Makapansgat a livré parmi les plus anciens fossiles d'hominidés d'Afrique du Sud, âgés de 3 à 2.5 Ma (Herries, 2013 *in* Gommery, 2016) et de 3.07 à 3.00 Ma selon Thackeray et Dyke (2023).

Cette région a été prospectée en novembre 2023 et en juin 2024 par Jean-Baptiste Fourvel, Laurent Bruxelles, Clément Zanolli et Dominic Stratford. Nous avons préparé des cartes pour analyser les reliefs et localiser les cavités. Nous avons notamment identifié un paléo-poljé* (voir définition ci-dessous p.242) dont les cavités n'ont pas encore été prospectées (Figure 173). La mission de terrain a rapporté des informations importantes que nous traiterons plus loin (p.954).

Les inventaires de cavités (*DACEL*, 1998 ; *SASA Cave Register*) montrent deux aires de répartition des grottes : une surface à 1500 m d'altitude (hachures bleu clair de la Figure 173 et la Figure 174), qui correspond à un poljé (cf. définition p.243 et Figure 175 et Figure 176), et une surface à 1700 m (hachure bleu foncé) :

- les grottes à 1500 m d'altitude :
  - Makapan (1493 m, n°4 sur la Figure 173et la Figure 174) ;
  - Cave of Hearts (1520 m, n°5) ; Cold Air (1399 m, n°6) ;
  - Ficus (1426 m, n°7) ; Katzenjammer (1402 m, n°8) ; Peppercorn I (1402 m, n°9) ;
  - Buffalo (1417 m, n°10) ; Limeworks Makapansgat (1478 m, n°11) ;
  - Bat (1478 m, n°12) ; Porcupine (1493 m, n°13) ; De Hoop (1524 m, n°14) ;
  - Kraal (1395 m, n°15) ; Zwartkrans II (1463 m, n°16) ; Zwartkrans III (1469 m, n°17) ;
  - Zwartkrans IV (1469 m, n°18) ; Gutentight (n°19), Murzel's (n°20) ;

- les grottes vers 1700 m et au-dessus :
  - Abyss Pot (1706 m, n°21) ; Lusitania (1819 m, n°22) ; Lost World (1737 m, n°23) ;
  - Swallow Hole (1688 m, n°24) ; Swallow Hole II (1688 m, n°25) ;
  - Swallow Hole III (1685 m, n°26) ; Swallow Hole IV (1691 m, n°27) ;
  - Perseverance Pot (1706 m, n°28) ; Mulumogoto (1768 m, n°30) ;
  - Ken Pot (1712 m, n°31) ; Snake Pit Hole (1687 m, n°32) ; Glen Hole (1812 m, n°33) ;
  - Van Zyl's Pot (1875 m, n°34) ; Mogoto System (1760 m, n°35) ;
  - Little Mohoto (1830 m, n°36) ; Uppermost Mogoto (1782 m, n°37);

Un troisième groupe est identifié mais hors cadre de la carte de la page suivante (Figure 174). Ce sont les grottes qui s'ouvrent au-dessous de l'altitude de 1300 m :

- Van Zyl (1231 m, n°1) ; Little Ngolo Lagwacha (1274 m, n°2) ;
- Ngolo Lagwacha (1280 m, n°3).

D'un point de vue géomorphologique, on distingue une surface à 1500 m (représentée par des hachures bleu clair sur la Figure 173 et la Figure 174) qui forme un poljé * (défini p.243), dans les dolomies (délimitée par des bordures de corrosion en vert), ou plutôt un paléo-poljé car ils ne sont pas fermés et ne s'ennoient plus. Des vallons se développent dans les parties fantomisées (cf. 3.4 p.400) des dolomies, en violet. La limite des dolomies a été indiquée pour information, mais elle n'est pas précise car elle provient de la carte au 1/1 000 000e.

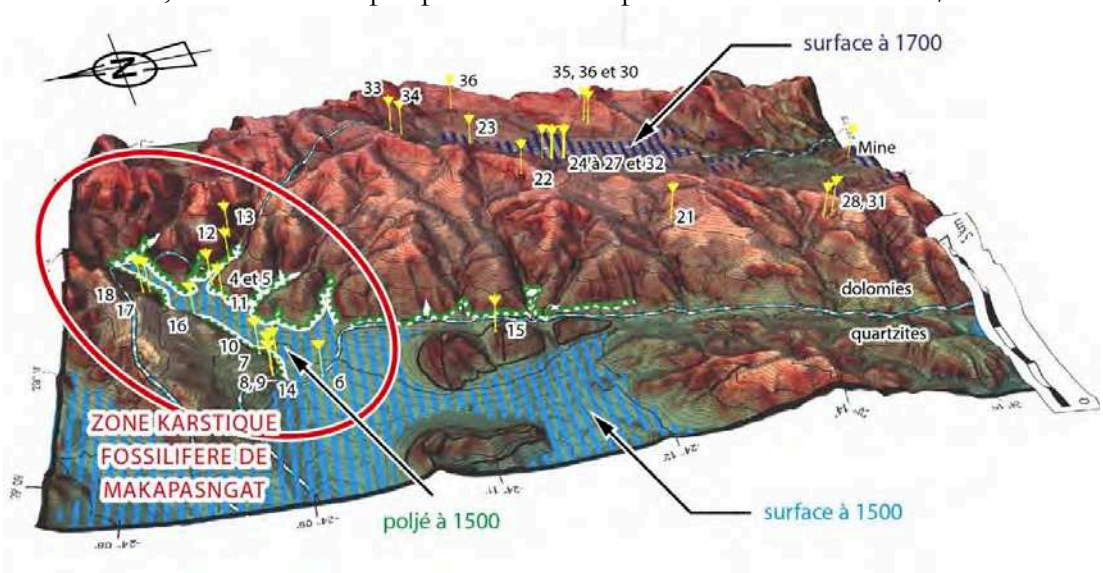


Figure 173 Karst de Makapansgat en relief (2.5 D) où l'on identifie deux paléosurfaces planes qui correspondent à des paléo-poljés (en vert). Les cavités sont représentées en jaune.

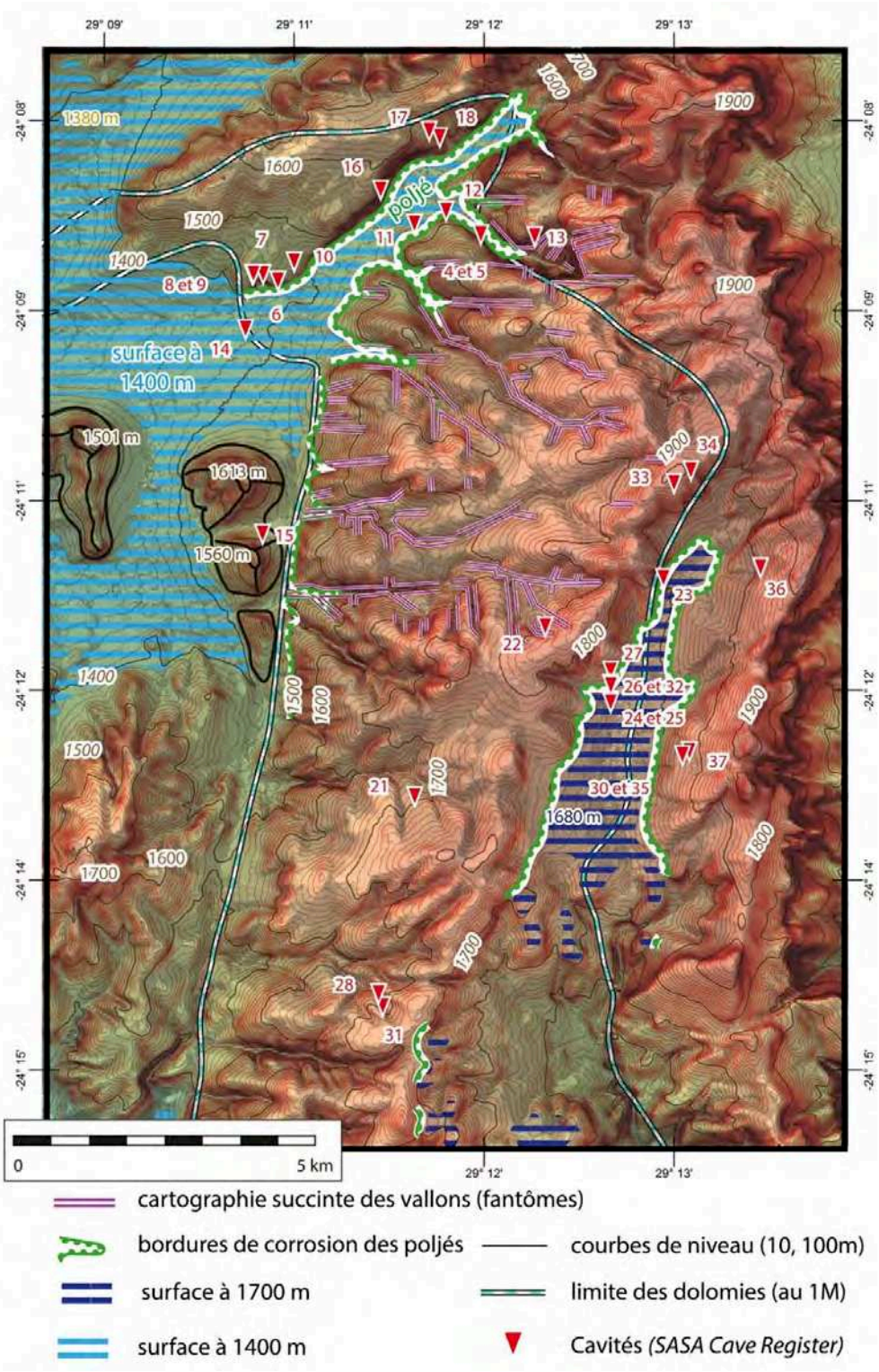


Figure 174 Analyse morphokarstique du karst de Makapansgat : grottes, surfaces planes, poljés et couloirs d'altération (fantômes).

Nom	X	Y	Z	Géologie (autre que dolomie)	Numéro
Van Zyl	29.22722222	-24.17194444	1231		1
Little Ngolo Lagwacha	29.16583333	-24.29750000	1274		2
Ngolo Lagwacha	29.16611111	-24.29694444	1280		3
Makapan	29.19957778	-24.14086111	1493		**4**
Cave of Hearts	29.19957778	-24.14086111	1520		**5**
Cold Air	29.17287222	-24.14696667	1399		6
Ficus	29.17091111	-24.14607500	1426		**7**
Katzenjammer	29.16963889	-24.14605000	1402		**8**
Peppercorn I	29.16951944	-24.14614722	1402		**9**
Buffalo	29.17500000	-24.14444444	1417		**10**
Limeworks Makapansgat	29.19083333	-24.13944444	1478		**11**
Bat	29.19500000	-24.13777778	1478		12
Porcupine	29.20666667	-24.14111111	1493		13
De Hoop	29.16861111	-24.15333333	1524		14
Kraal	29.17083333	-24.18027778	1395		15
Zwartkrans II	29.18638889	-24.13500000	1463		16
Zwartkrans III	29.19277778	-24.12722222	1469		17
Zwartkrans IV	29.19416667	-24.12805556	1469		18
Gutentight					19
Murzel's					20
Abyss Pot	29.19086944	-24.21487500	1706		21
Lusitania	29.20805556	-24.19250000	1819		22
Lost World	29.22361111	-24.18611111	1737		23
Swallow Hole	29.21666667	-24.20222222	1688		24
Swallow Hole II	29.21666667	-24.20250000	1688		25
Swallow Hole III	29.21666667	-24.20000000	1685		26
Swallow Hole IV	29.21666667	-24.19833333	1691		27
Perseverance Pot	29.18611111	-24.24083333	1706		28

Mine Pit	29.20973700	-24.25647800	1554		29
Mulumogoto	29.22611111	-24.20944444	1768	tuff	30
Ken Pot	29.18666667	-24.24250000	1712		31
Snake Pit Hole	29.21668889	-24.20025278	1687		32
Glen Hole	29.22500000	-24.17361111	1812		33
Van Zyl's Pot	29.14472222	-24.29305556	1875		34
Mogoto System	29.22611111	-24.20944444	1760		35
Little Mogoto	29.23638889	-24.18472222	1830	quartzite du Black Reef	36
Uppermost Mogoto	29.22703611	-24.20890833	1782	quartzite du Black Reef	37

Tableau 9 Cavités de Makapansgat. Les numéros de la sixième colonne font référence à la Figure 174. Les cavités en gras sont les cavités fossilifères ayant livré des hominines.

Les cavités fossilifères sont situées dans le registre inférieur au niveau d'un paléo-poljé (Figure 971 et Figure 174). Nous reviendrons ultérieurement à ce karst dans le Chapitre n°5 (p.954).

2.4.5.1. Définition d'un poljé

Un poljé est une dépression fermée ou semi-fermée, à fond plat et délimitée par des escarpements calcaires (Figure 175). Il se forme en surface des plateaux calcaires et caractérise les paysages karstiques (nous avons défini le karst p.5).
Il se forme lorsque l'eau est présente en surface mais ne peut pas s'infiltrer rapidement en raison de la proximité du niveau de base ou par la présence d'une couverture imperméable comme une éponte plus marneuse, ou par la présence d'argiles ou d'altérites. Cette stagnation favorise la dissolution latérale de la roche, créant des bordures de corrosion, comme représentées sur la Figure 176. Au niveau de ces bordures se situent des grottes jouant le rôle de ponors en absorbant l'eau à l'intérieur du massif calcaire. Les bordures de corrosion s'emboîtent au cours de l'évolution par abaissement du point d'infiltration en laissant des trottoirs de corrosion en position d'inversion de relief.

Nous avons vu chapitre n°1 que l'identification de poljés en surface des plateaux calcaires par analyse des MNT sera diagnostique de réseaux souterrains et de grottes en profondeur et donc de potentiels pièges fossilifères. Dans le Bassin du Transvaal, on en trouve en surface des plateaux dolomitiques (Martini *et al.*, 1976).

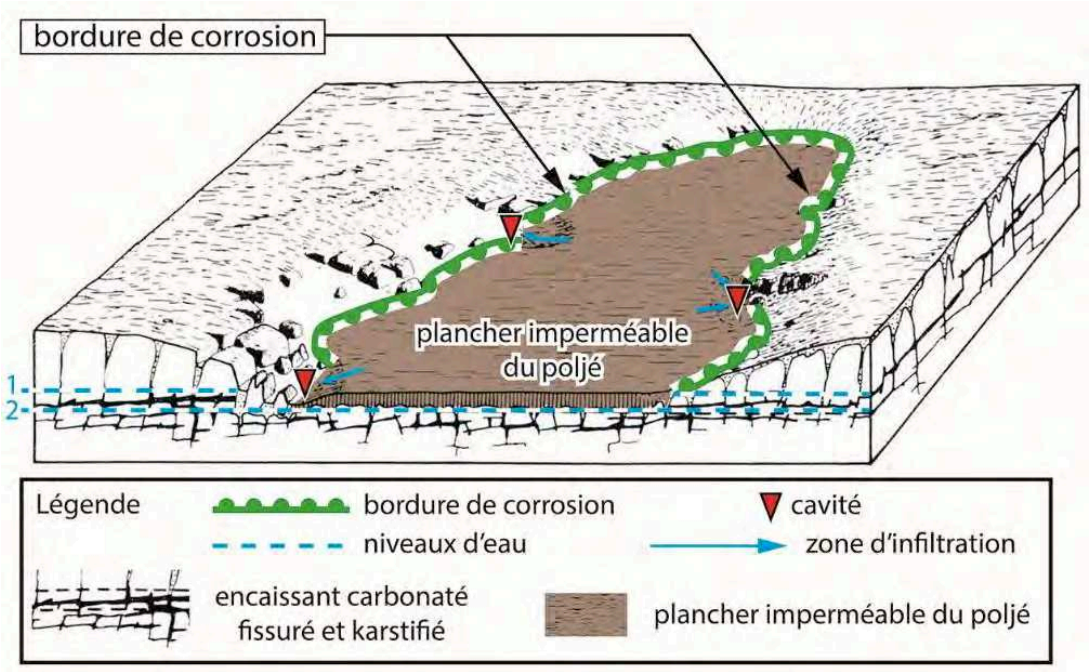


Figure 175 Diagramme de fonctionnement d'un poljé (Martini et al., 1976, Fig.4, p.236, modifié).

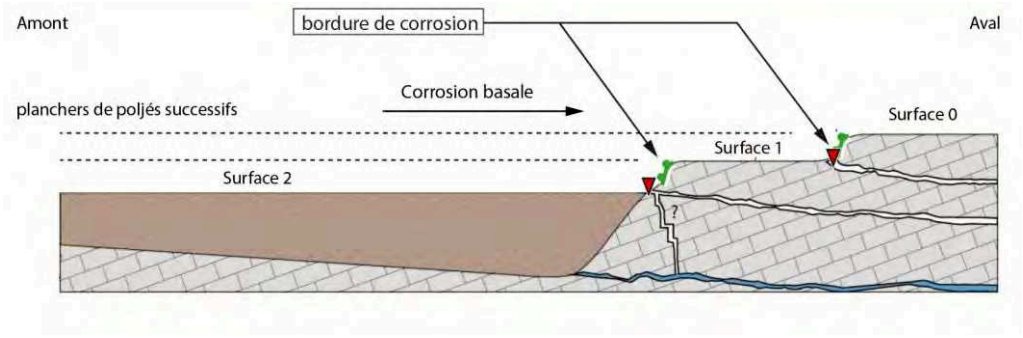


Figure 176 Profil schématique vertical montrant le fonctionnement d'un poljé, ses bordures de corrosion (en vert), les paléosurfaces associées et les réseaux karstiques en profondeur (Chadelle et Camus, 2018, modifié).

2.4.6. Un plateau karstifié incisé par des vallées : le Plateau de Ghaap

À 360 km au sud-ouest du *Cradle of humankind*, le Plateau karstique de Ghaap (écrit Kaap par Peabody (1954)) (numéro n°3 de la Figure 109 p.146) a livré un crâne d'australopithèque pris dans un massif travertineux exploité dans la carrière de *Norlim* (Dart, 1925b) (numéro n°14 de la Figure 177 ci-dessous). D'autres cavités sont présentes sur le plateau mais n'ont pas livré de fossiles.

Ici, les altitudes des cavités sont situées autour de 1150 m soit beaucoup moins élevées que dans le *CoH* ou Makapansgat à 1500 m.

2.4.6.1. La carrière de travertins abandonnée de Norlim à Buxton et le crâne de Taung

Le crâne australopithèque, connu sous le nom de l'enfant de Taung, avait été découvert en 1924 par M. de Bruyn, piégé au niveau d'un travertin dans la carrière de *Norlim*, photographié ci-dessous (Figure 177). Du Toit (1954) parle des travertins de Ghaap et il localise d'autres secteurs à travertin.

Ce crâne a été identifié comme un australopithèque par Dart en 1925 (Dart, 1925b ; *DACEL*, 1998 ; Hopley P.J *et al.*, 2013). Il serait vieux de -2.6 à -2.4 Ma (McKee, 1993 ; Partridge, 2000 ; Tobias, 2000 *in* Bailey *et al.*, 2011) et de -2.58 Ma (Thackeray et Dyke, 2023). Autour de ce travertin, préservé au milieu de la carrière (en plan Figure 179), il existe une soixantaine de cavités (Peabody, 1954) (en rouge) dont certaines ont livré des fossiles d'hominines (*DACEL*, 1998, Figure/ Map n°5a et 8 p.727 et 729). Nous présentons ce secteur dans le 5.6 (p.968).

Définition d'un travertin : Formation carbonatée se formant à l'air libre au niveau d'une exsurgence karstique (ou résurgence). On y trouve souvent des tubes formés autour des végétaux et, plus rarement, des fossiles, comme c'est le cas ici.

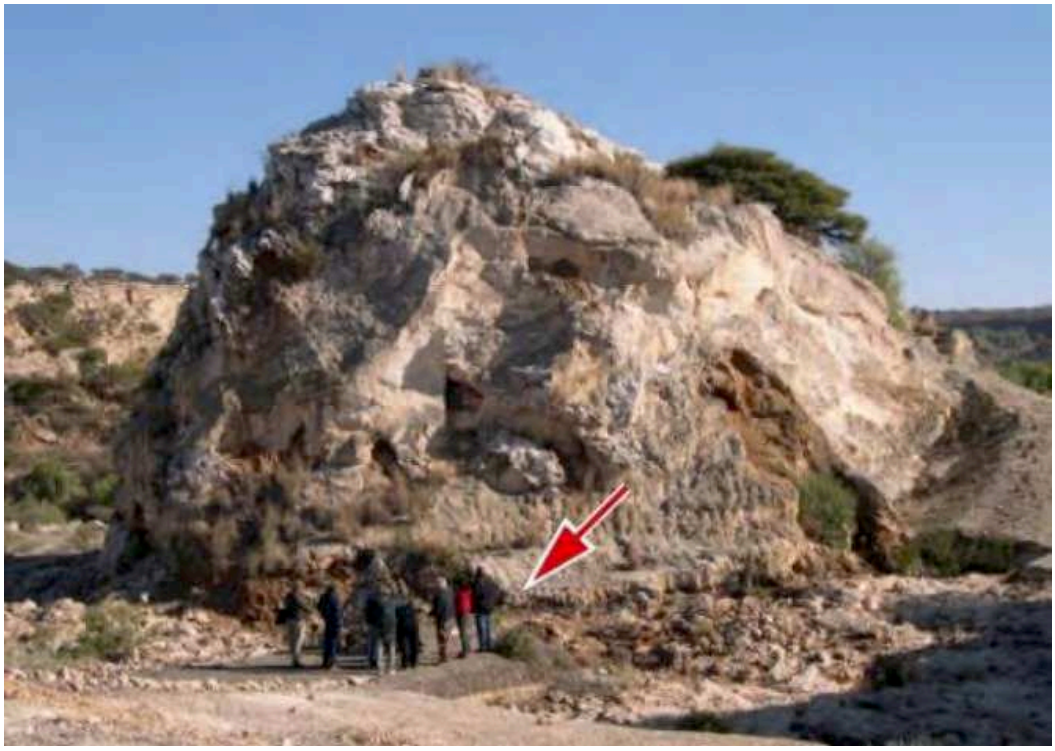


Figure 177 Anciens travertins fossilifères du plateau karstique de Ghaap, appelé le Pinacle de Raymond Dart, où le crâne d'un Australopithèque a été trouvé, indiqué par la flèche (selon Hopley P.J et al., 2013). (Source : DACEL, 1998, modifié).

L'UNESCO reconnait (DACEL, 1999, p.49) (Figure 179) 4 grottes majeures :

- Witkrans Cave ;
- Black Earth Cave ;
- Equus Cave (des os humains ont été trouvés, ils sont datés de 10 300 à 3000 ans (Grine, 2016, Table 7.4, p.338) ;
- Power House Cave ;

Et 19 autres sites paléontologiques, dont certains ont été décrits par Peabody (1954) (Figure 178) :

Dart Pinnacle ;
Hirdlicka's Pinnacle ;
Hirdlicka's Deposits ;
Dart Deposits ;
Tobias Pinnacle Deposits ;
Berger Cave Complex ;
Lucky Moon Cave ;
LSN Cave ;
Innominate Cave ;
Quinney Cave ;
Cut-through Alley ;
Black Earth Cave ;
Peabody's Equus Site ;
Equus Cave ;
Blom Cave ;
Alcove Cave ;
Oaxland Large Mammal Site et Acacia Cave.

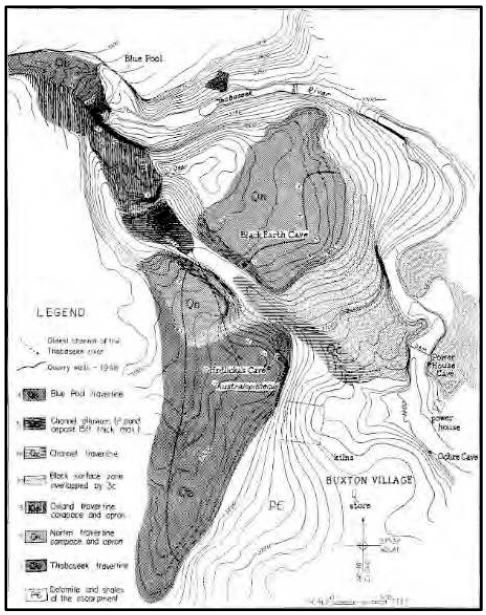


Figure 178 Carte de localisation des grottes de la carrière selon Peabody (1954).

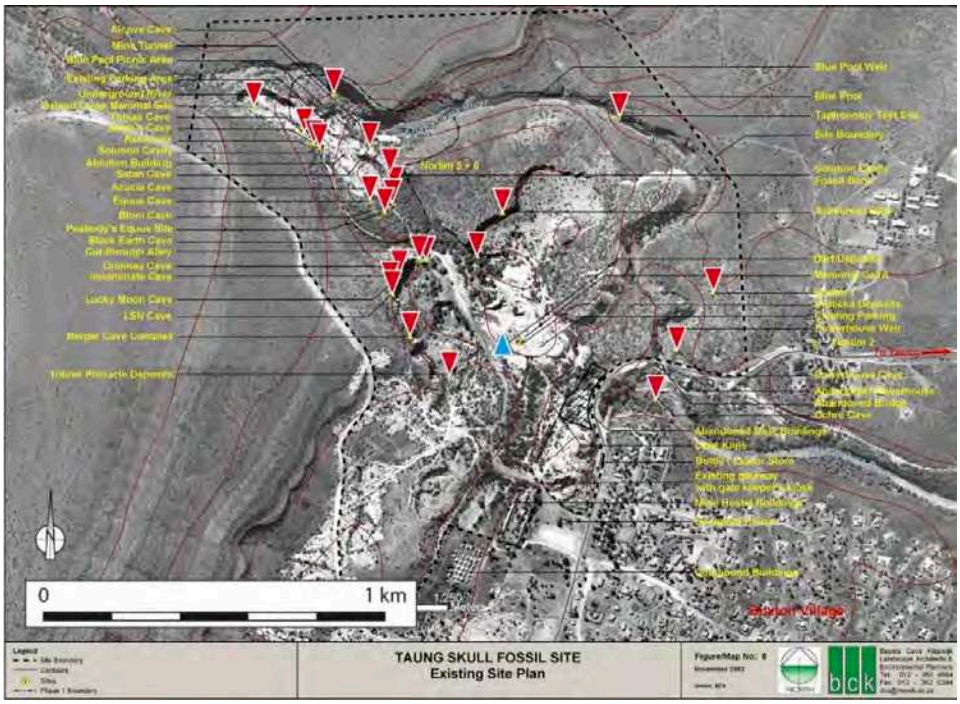


Figure 179 Localisation des cavités (par des triangles rouges) et du travertin (en bleu) dans l'ancienne carrière ayant livré un crâne d'australopithèque (Source : BSK 2003 in DACEL, 1998, modifié).

2.4.6.2. Les cavités du Plateau de Ghaap et la grotte de Wonderwerk

Sur le Plateau de Ghaap, les formations carbonatées affleurent sur au moins 20 000 km² tandis que plus de 35 000 km² de formations carbonatées sont recouvertes par les sables du Kalahari à l'ouest et au nord. Il existe ainsi une certaine continuité entre le Plateau de Ghaap et le Bassin de Kanye (350 km² de formations carbonatées affleurantes) (Figure 7 p.13). Une quinzaine de cavités sont connues sur le plateau (Figure 180) dont *Wonderwerk cave* qui a livré un foyer daté d'un million d'années (datation cosmogénique), plus précisément entre -1.27 ± 0.19 Ma et -0,98 ± 0.19 Ma (Goldberg *et al.*, 2015). Certains niveaux ont également été datés de -1.85 Ma à 0.85 Ma par paléomagnétisme (Berna *et al.*, 2012). La grotte a livré aussi de vieilles industries lithiques dont l'âge est discuté (>-1.78 Ma) (Chazan *et al.*, 2012 in Murszewski *et al.*, 2019). D'autres artefacts ont aussi été découverts dans le secteur (Mlilo, 2017 ; Fig.26, p.55). Nous analyserons plus en détail cette région karstique au Chapitre n°5 (p.968).

Nous avons réalisé cette carte géologique (Figure 180) en utilisant les données géologiques numériques au 1/1 000 000 du *Council of Geoscience (CGS_RSA1M Geological polygon)* et en comparant avec les cartes existantes, comme Altermann et Nelson, 1998, Fig.1, p.228.

N°	Nom des grottes
1	*Heuningvlei*
2	*Eye of Kuruman*
3	*H-cave, Kono Cave 1 à 3, Koning grotte, Slagyster Gat, eye Sinkhole*
4	*Franco's sinkhole*
5	*Wonderwerk cave*
6	*Boesmansgat*
7	*Rainbow 1 et 2*
8	*Sishen Mine*
9	*Schwarzkoft*
10	*Blinkklip Grot*
11	*Soetfontein*
12	*Hopefield*
13	*Koggelbeengrot*

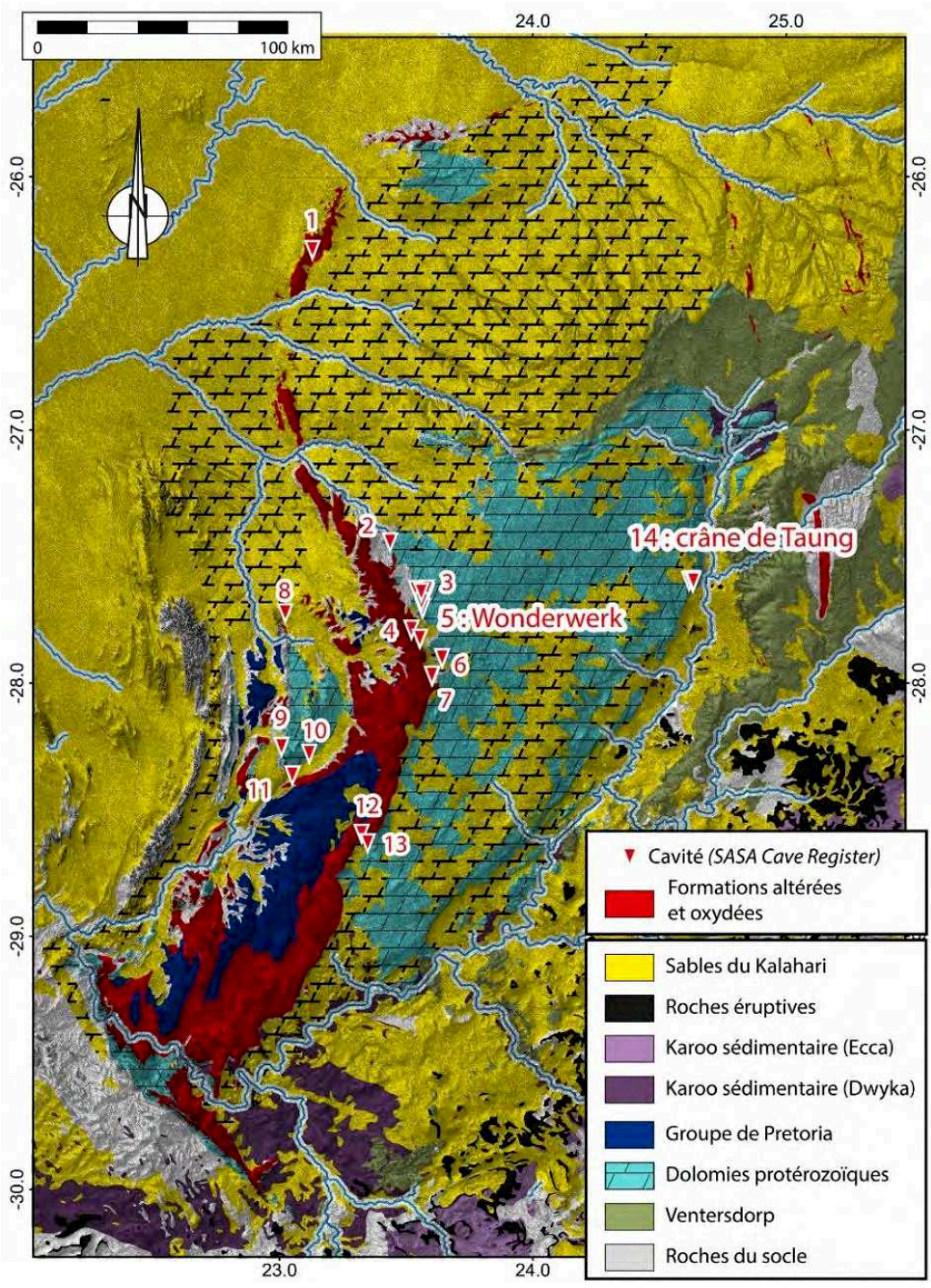


Figure 180 Carte géologique du Plateau de Ghaap où se situe la carrière de Buxton Norlim d'où provient le crâne de l'Australopithèque Taung et la grotte de Wonderwerk.

2.4.7. Exemples de karstification et observations de terrain issues de la bibliographie

Nous présenterons ici plusieurs descriptions de zones karstiques de la région issues de la littérature scientifique, pour lesquelles nous ne sommes pas allés sur le terrain, puis nous exposerons plusieurs modèles de karstification établis avant la découverte de la karstogenèse par fantômisation, qui expliquent la présence de grottes dans la région (Bruxelles, 2019).

2.4.7.1. Exemple de la mine de Ryedale

L'étude de la stratigraphie des gisements de manganèse situés dans les dolomies altérées (fantômisées) illustre parfaitement le processus de fantômisation et de crypto-altération tel que nous venons de le décrire dans le *Cradle of Humankind*. Au sud-est du *CoH*, à 40 km, dans le *Far West Rand*, les profils géologiques des gisements de manganèse de *West Wits*, Ryedale, Houtkoppies (Beukes *et al.*, 1999 ; 2016 ; Trollip 2006 ; Van Niekerk *et al.*, 1999, 2006) montrent un cryptokarst développé dans les dolomies (Figure 181 et Figure 154).

C'est un horizon condensé, pluri-centimétrique, caractérisé par des minéralisations oxydées de fer et de manganèse («wad») situé au contact entre des pinacles et la couverture, typique de la crypto-altération.
Nous utilisons le terme de minéralisation dans le sens « d'une concentration locale de substances métalliques » **(Foucault et Raoult, 2001)**. Cet horizon, qui délimite en bas les dolomies saines et en haut les altérites (en rouge sur la Figure 181), marque la limite basale de pénétration de la fantômisation, c'est un front d'altération. La dénomination « d'altérite résiduelle » est utilisée par Dubois (Dubois *et al.*, 2022).

Ce profil stratigraphique du gisement de Ryedale, près de Lichtenburg, permet d'identifier la limite basale du front d'altération, caractérisée par une topographie de pinacles de dolomie recouverte (1) par un horizon très fortement minéralisé (soft modern «wad», en rouge) et (2) du «wad» (en noir), correspondant à du fantôme de dolomies. Au-dessus, des formations allochtones (en gris) correspondent à la couverture soutirée et remaniée du crypto-karst. Elles contiennent des produits inaltérés riches en silice, en manganèse et en fer. Cet ensemble a pu subir un certain déplacement car les éléments sont bréchifiés. L'ensemble est recouvert par une formation superficielle sableuse et argileuse (en orange).

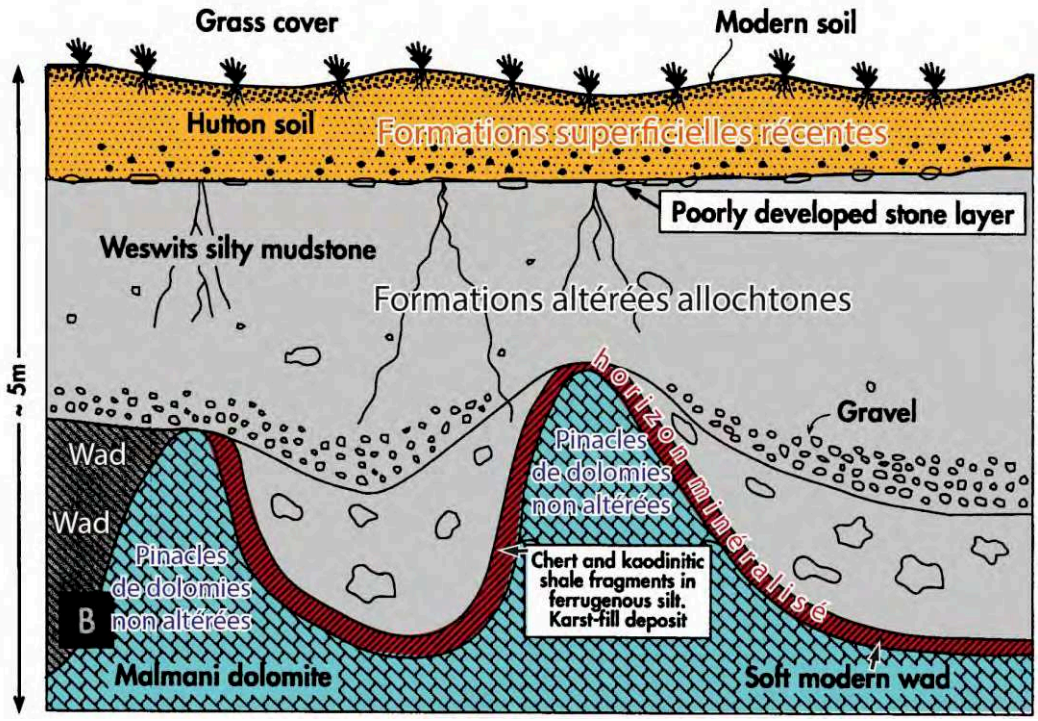


Figure 181 Analyse du crypto-karst de Ryedale, près de Lichtenburg (Source : VAN NIEKERK et al. 1999, modifié).

Ci-dessous (Figure 182), cette coupe géologique indique que des chenaux sont présents, matérialisés par une charge de fond (*gravels*), des dépôts fluviatiles ont recoupé le cryptokarst. L'altérite serait datée du Permien moyen à supérieur (formation de Bryheid, *Lower Beaufoort group*) (Van Niekerk *et al.*, 1999, 2000 : Van Niekerk, 2006, Fig.6, p.207) (Figure 183) à cause de la présence de fossiles de végétaux Glossopteris (*Glossopterts obovata*).

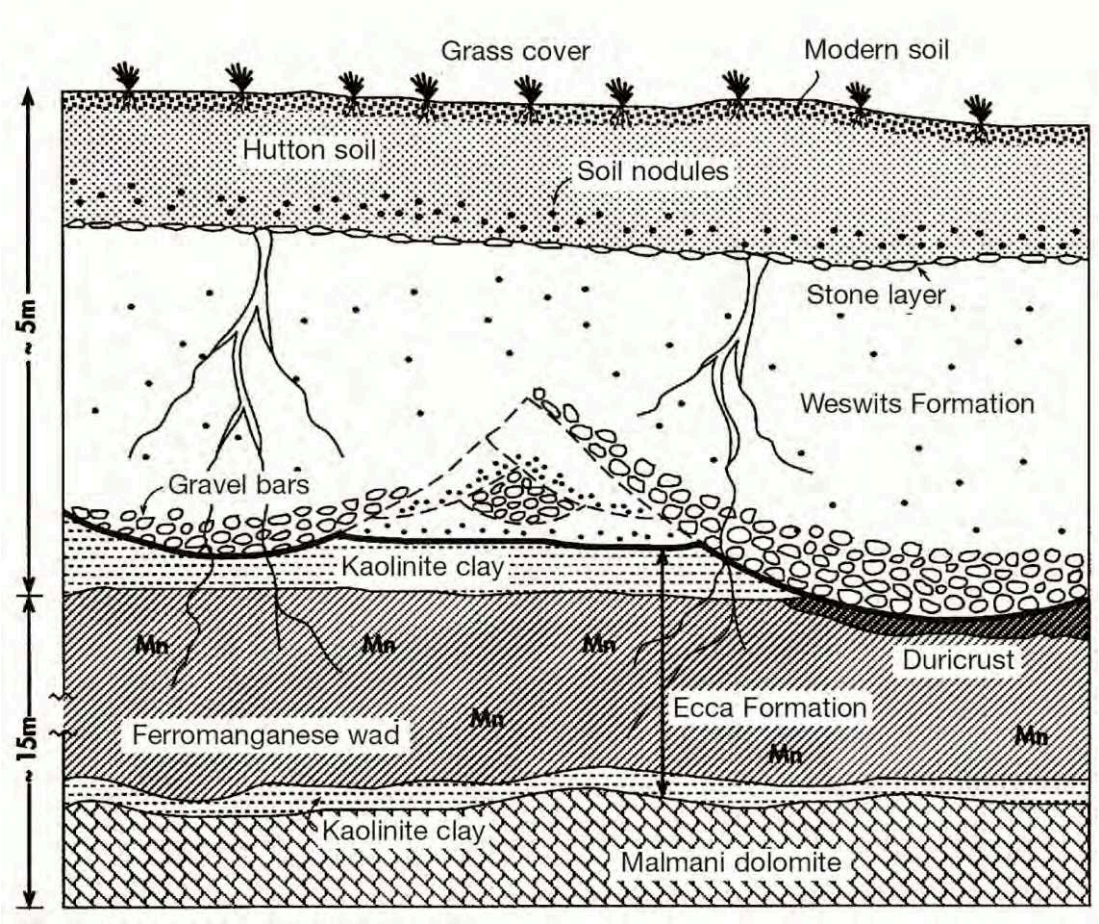


Figure 182 Coupe géologique du gisement de Ryedale (Source : Pack et al., 2000, Fig.3, p.205).

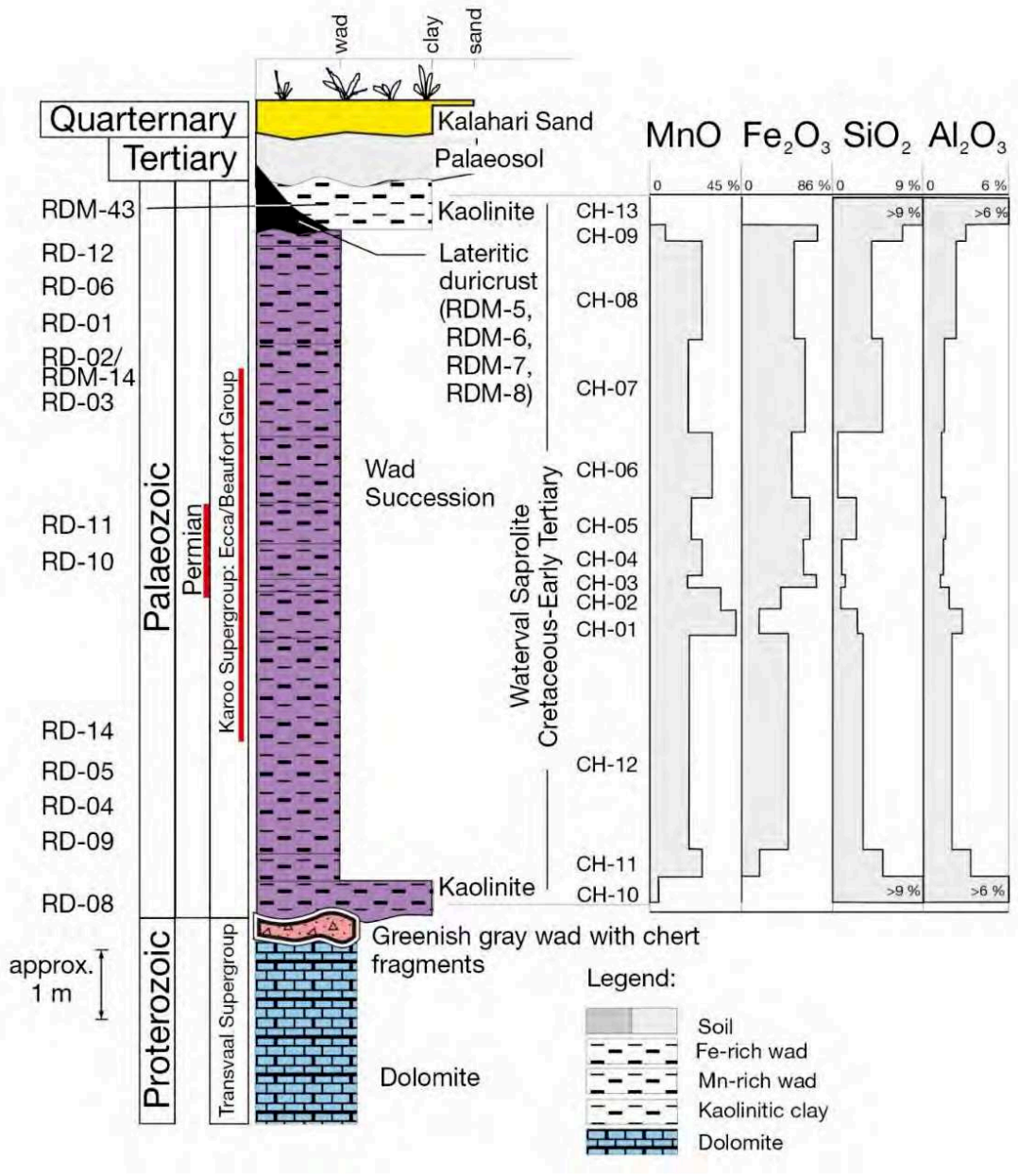


Figure 183 Interprétation des saprolites de Waterval, de la mine de Ryedale, comme permiennes (formation Ecca), soulignée en rouge selon Van Niekerk (2006, Fig.6, p.207, modifié). Notons la présence des brèches au toit des dolomies (en rose).

2.4.7.2. Altération latéritique des dolomies de Malmani à Ventersdorp (De Wit)

À Ventersdorp, les dolomies de Malmani montrent une altération latéritique profonde, à partir d'une couche de manganèse, mise en place pendant la Surface Africaine (De Wit, Conference Palaeozoic diamond deposit of the North West Province, South Africa, du 22 avril 2021, Wits Talk, lien 13'56" ; Marshall et Norton, 2009).



Figure 184 Affleurement des dolomies de Malmani à Ventersdorp (Source : De Wit, Conference Palaeozoic diamond deposit of the North West Province, South Africa, du 22 avril 2021, Wits Talk, lien 13'56'').

2.4.7.3. Altération des dolomies de Malmani à Lichtenburg (De Wit)

De Wit (2021, Wits Talk, youtube 13'56") ainsi que Marshall et Norton (2009) considèrent que les altérations de Lichtenburg correspondent à la mise en place de la Surface post-Karoo. Ces altérations qui sont riches en fossiles de plantes, en graviers diamantifères et en conglomérats sont interprétées comme des vestiges kaolinisés de la formation Karoo.



Figure 185 Affleurement des dolomies de Malmani à Lichtenburg (Source : De Wit, Conference Palaeozoic diamond deposit of the North West Province, South Africa, du 22 avril 2021, Wits Talk, lien 13'56'').

2.4.7.4. Remplissage Karoo dans la grotte de Blue Lagoon à Ventersdorp selon Martini (1998)

À 100 km, à l'ouest du *CoH*, à Ventersdorp, dans la grotte de Blue Lagoon, Martini (1998b) a identifié les formations Dwyka et Ecca. Il propose une coupe stratigraphique idéalisée (Figure 186 et Figure 187). Nous supposons que ce qui est indiqué « résidus karstiques pré-Ecca » correspond plutôt aux fantômes de roche issue de l'altération des dolomies.

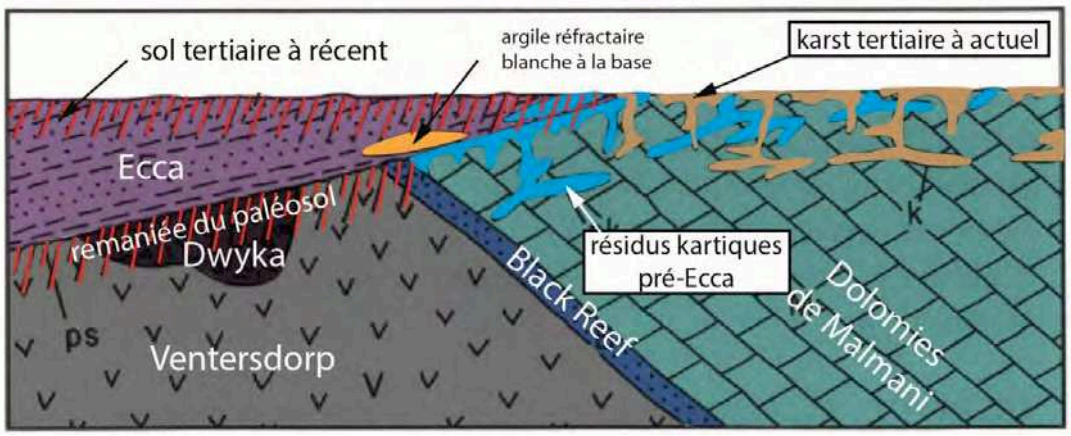


Figure 186 Coupe stratigraphique idéalisée (Martini, 1998b). La formation Ecca est constituée d'argilite, de grès, de charbons, à la base de lentilles d'argile réfractaire blanche (kaolinite et smectite) remaniées du paléosol et des résidus karstiques pré-Ecca.

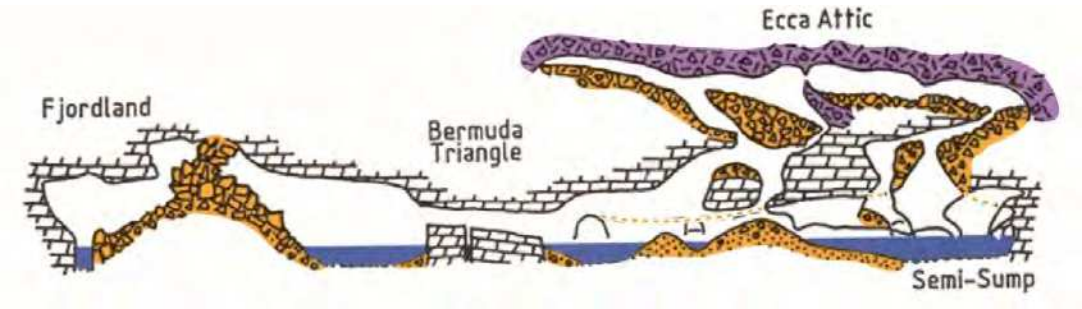


Figure 187 Le profil stratigraphique de la cavité montre la répartition de la brèche, en violet, qui serait pour Martini la formation Ecca (Martini, 1998b).

Martini cite plusieurs grottes à remplissage Ecca (Martini et Moen, 1998, p.29) :

- dans une carrière au sud de Pretoria (Marke 1974) ;
- et dans *Apocalypse cave* (Martini *et al.*, 1976).

Les dépôts du Karoo se sédimentent à plat sur des dépôts antérieurs, qui ont été basculés, comme illustré par le log stratigraphique de Schwartz ,1912 (Figure 188 p.256). Cette discordance angulaire est corrélative d'une longue période d'érosion et potentiellement d'une phase d'altération et de karstification, comme l'illustre la coupe stratigraphique de Martini (1998b) ci-dessus (Figure 186), qui indique :

- plusieurs phases d'altération indiquées par deux zones à hachures rouges : (1) une avant le dépôt d'Ecca qui affecte à la fois la formation Dwyka et la formation de Ventersdorp, et (2) une affectant la surface topographique actuelle correspondant à la mise en place d'un sol tertiaire à récent ;
- plusieurs phases de karstification (1) en bleu sont des résidus karstiques pré-Ecca et (2) en marron, des karsts tertiaires à actuels.

Les formations sédimentaires du Karoo (Dwyka et Ecca) sont datées de -350 à -260 Ma d'après les légendes des cartes géologiques (*Composite map* de Frick et Keyser (1997) et *Simplified map* de Johnson et Wolmarans (2008)) (cf. Tableau 58 p.1089). Le log de Catuneaunu *et al.* (2005, Fig.2, p.213) et celui de Tankard *et al.* (2021, Figure 23.2 p.871) détaillent aussi les âges des différentes formations qui constituent le Karoo.

Le Karoo s'est déposé sur une surface plate datée au minimum de -350 Ma mais qui pourrait être plus ancienne (rabotage glaciaire de Dwyka au Carbonifère, voire des glaciations plus anciennes comme celles du Protérozoïque).

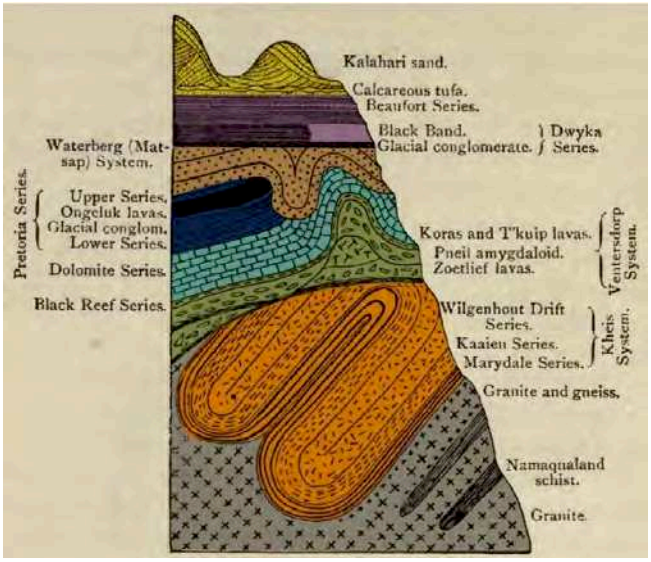


Figure 188 Log stratigraphique dans le Bassin du Transvaal d'après Schwartz (1912, fig.53, p.182, colorisé) montrant les épisodes de plissement antérieurs à la discordance du Karoo (en violet). Le Karoo lui-même n'étant pas déformé au contraire des formations sous-jacentes.

« D'une manière générale le sol du Transvaal comme celui de toute l'Afrique australe est constitué par un soubassement de terrains primaires fortement plissés recouverts en discordance par les épaisses formations des Systèmes du Cap et du Karoo » (Molengraaff, 1901).

2.4.7.5. Modèle de karstification de Dirks et Berger (2013) et surface

Présentons brièvement le modèle de karstification développé par Dirks et Berger (2013) qui ne prend pas en compte la karstification par crypto-altération et **fantômisation** que nous avons décrite précédemment (p.214).
Notamment ils considèrent ; comme Partridge (1969) (à Figure 127 p.184), que les formations siliceuses situées sur les sommets à 1505 et 1512 m d'altitude (Figure 1185 p.1212), au sud-est des gisements karstiques fossilifères de *Cooper's* (1505 m) dans le *CoH* correspondent à la **Surface Africaine**, alors que nous montrons que la Surface Africaine est située au-dessus, à 1560 m d'altitude. D'ailleurs la cartographie que nous avons faite du *CoH* montre que les formations siliceuses qui arment ces collines, et les protègent de l'érosion, sont liées à des discontinuités au sein des dolomies (des niveaux de schistes) que nous avons suivies et cartographiées sur plusieurs centaines de mètres depuis la grotte de Sterkfontein jusqu'à ces collines. Nous en rediscuterons dans le Chapitre n°3 (p.268).
Nous ferons une analyse morphokarstique du gisement de Malapa plus loin (p.432).

2.4.7.5.1. Présentation de la coupe stratigraphique régionale

La carte géologique du *Cradle of Humankind* proposée par Dirks et Berger (2013, Fig.2, p.112 ; Dirks *et al.*, 2015 Fig.1, p.3) montre que de nombreux dykes de roches mafiques, représentés en vert sur leur carte, traversent le *CoH*. Ils ont regroupé l'ensemble de ces dykes de roches intrusives pourtant de nature différente sous une seule appellation commune de « dykes mafiques ».

Leur coupe stratigraphique est plus détaillée (Figure 189) (Dirks et Berger, 2013) et permet de distinguer plusieurs éléments importants :

- des dykes et sills de dolérites (roches intrusives), en marron foncé (Figure 189). Certains sont verticaux (les dykes) et d'autres sont représentés concordants à la stratigraphie des dolomies (les sills) ;
- des dykes et sills de brèches *« breccia dykes and sills »* de la formation de la Rooihoogte, en orange (ce sont les brèches de type n°3). Dirks et Berger (2013) décrivent l'organisation de « ce système de fractures comblées de brèches » ;
- des zones de cisaillement *« shear zones »*, en rouge (ce sont les brèches de type n°4) ;
- des brèches de chert *« Chert Breccia »* (wad ; paleo-erosion surface), en rose (ce sont les brèches de type n°1).

D'après cette coupe (Figure 1148) Dirks et Berger (2013) mettent en relation :

- les « *shear zones* » (zone de cisaillement en rouge sur la Figure 189), les niveaux de schistes (en marron clair sur la Figure 189) et leurs faciès « e » dans la formation de Monte Christo ;

- les « *shear zones* », leurs faciès « f » et les sills de dolérites au toit de la formation de Lyttelton et à la base de la formation Eccles.

Les brèches de type n°3 (dykes de Rooihoogte) en orange « remplissent » des vides (paléokarsts) dont nous montrerons qu'ils correspondent aux zones fantômisées des dolomies.

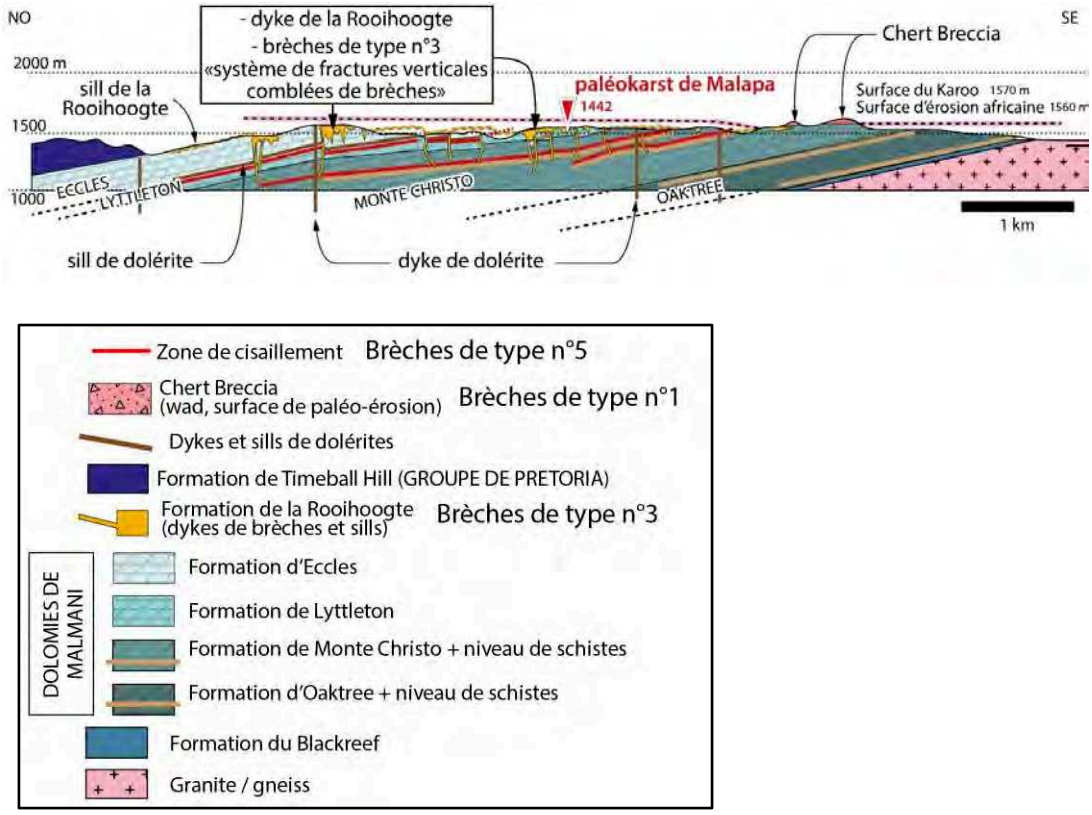


Figure 189 Coupe géologique du secteur du paléokarst de Malapa (Source : Dirks et Berger, 2013, Fig.4, p.114, modifiée). La position de la coupe est indiquée sur la Figure 392 (p.434).

2.4.7.6. Modèle de karstification de Catuneanu et Eriksson (2002) : Rooihoogte (Chert conglomerates) et Chert Breccia

À Makapansgat, les géologues intègrent stratigraphiquement la formation oxydée de la Penge (correspondant à des *Bif* et des Vieux Grès Rouge) et la formation de la Duitschland dans le groupe des dolomies de Malmani et avant le groupe de Pretoria (Button, 1973). Nous verrons un exemple de la formation de la Rooihoogte vers Ryedale, au sud-est du *Cradle of Humankind* plus loin (p.299). Eriksson indique que la formation de Rooihoogte se dépose sur une surface karstifiée pré-Prétoria (p.313), c'est-à-dire avant 2432 Ma. Nous en reparlerons plus loin (p.313). Ils indiquent que *mudstone* serait d'origine lacustre. La Rooihoogte pour Catuneanu et Eriksson (2002) ne correspond pas seulement à une altérite, on y trouve aussi de quartzites allochtones.

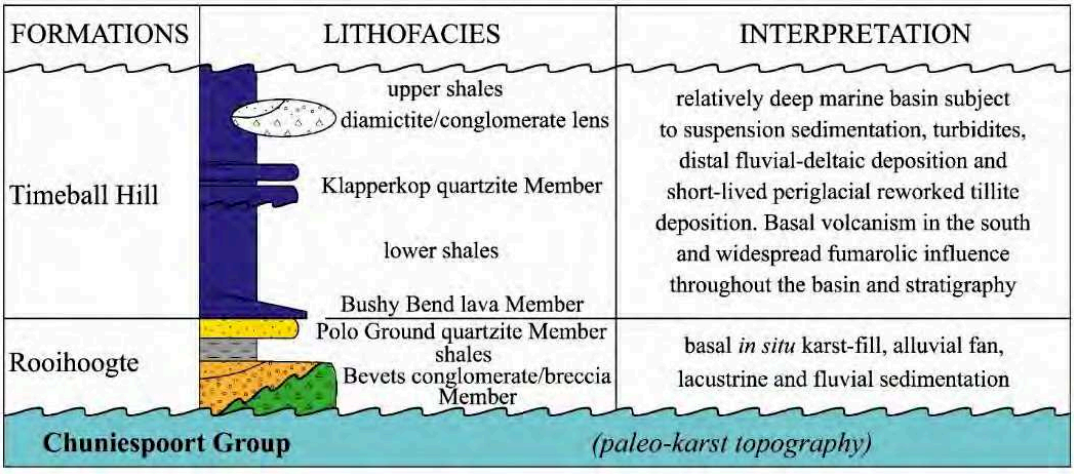


Figure 190 Analyse stratigraphique de la formation de Rooihoogte indiquant une phase de karstification pré-Pretoria, indiquée par un remplissage karstique à la base (basal in situ kart-fill). (Source : Catuneaunu et Eriksson, 2002, fig.4, p.78, colorisé).

La formation de la Rooihoogte est présente sur tout le pourtour du bassin du Transvaal où les dolomies de Malmani affleurent.
Elle est constituée de deux éléments différents contenant des clastes de chert (Figure 191 et Figure 192) :

- les *Chert Breccia* qui correspondent aux altérites résiduelles (*in-situ*) développées sur les dolomies de Malmani affleurantes mais ne sont plus conservés que de façon résiduelle du fait de l'érosion ;
- la Rooihoogte, composée par les *Chert Conglomerates*, qui sont des apports détritiques allochtones postérieurs.

Les *Cherts Breccia* et les *Cherts Conglomerates* appartiendraient à deux formations différentes, séparées par une discordance subaérienne (Catuneaunu et Eriksson, 2002, p.81).

Les *Chert Breccia* correspondent aux altérites *in-situ* produites par l'altération des dolomies de Malmani en surface. Catuneaunu et Eriksson (2002, Fig.7, p.80) estiment à une érosion de plus de 1000 m dans le *CoH*.
Les *Chert Conglomerates* de la Rooihoogte contiennent principalement des galets de chert (entre 7 et 15 cm de diamètre) pris dans une matrice sableuse et siliceuse. La rondeur des clastes qui va de mal arrondi, à bien arrondi, traduit que ces éléments ont été transportés sur de plus ou moins longues distances. Les épaisseurs plus importantes au nord permettent d'estimer ce transport comme l'indique la carte de Catuneaunu et Eriksson (2002, Fig.8, p.80).

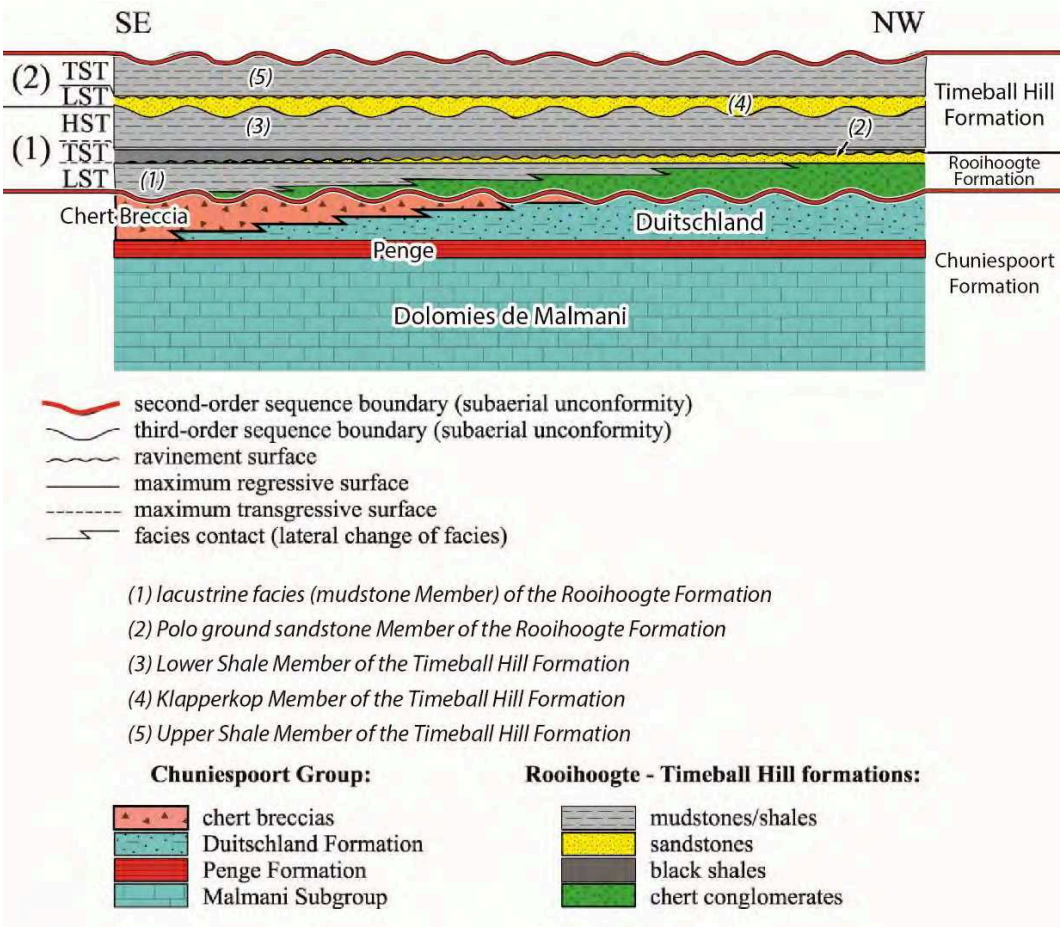


Figure 191 Interprétation en stratigraphie séquentielle des différents faciès au-dessus des dolomies de Malmani selon Catuneaunu et Eriksson, 2002 ; Eriksson et al., 2005. (Source Catuneaunu et Eriksson 2002, Fig.10, p.84, Eriksson et Reczko, 2005, Fig.7, p.59 colorisé).

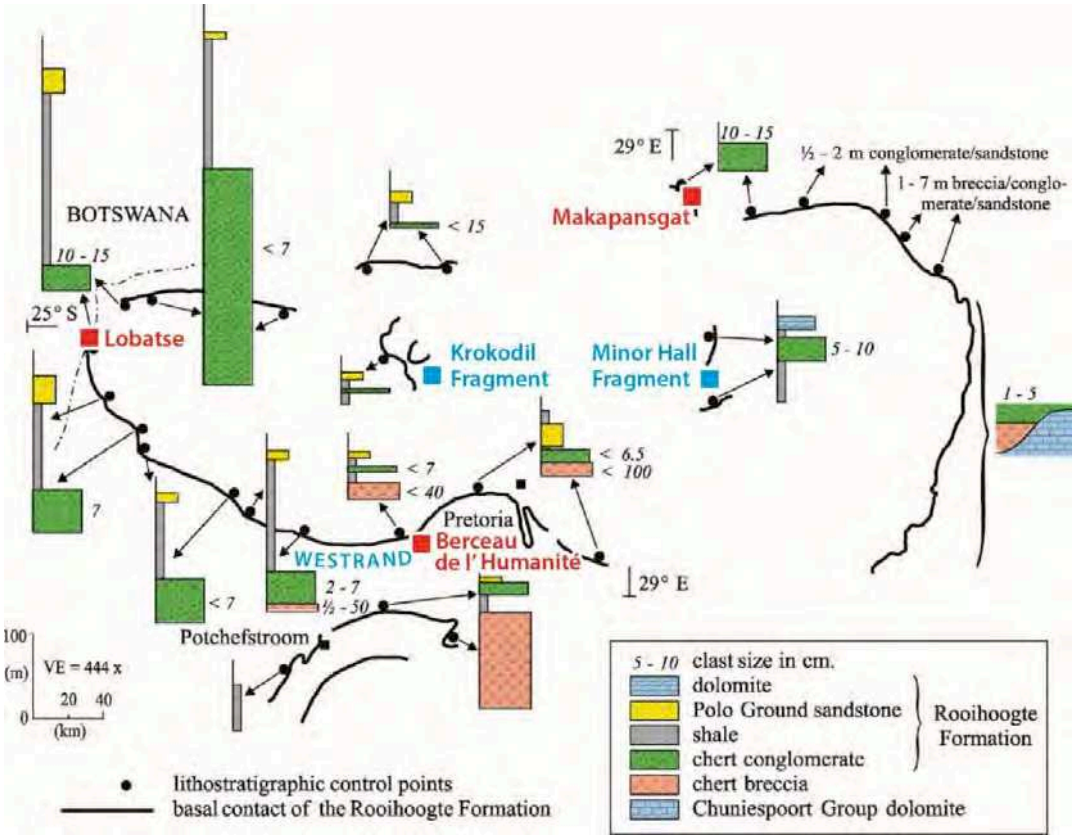


Figure 192 Répartition et différences de faciès de la formation Roohoogte dans le bassin du Transvaal selon Catuneau et Eriksson (2002). (Source : Catuneau et Eriksson, 2002, coloré et modifié, Fig.6, p.79). Nous avons localisé les différents karsts que nous étudions, en rouge ("Berceau de l'Humanité", Makapansgat, Lobatse) et en bleu (Krokodil Fragment, Minor Hall Fragment).

2.4.7.6.1. Vues 2.5 D de localisation des différents faciès de la formation de Rooihoogte dans le Westrand

Après avoir identifié par des observations directes la formation de la Rooihoogte dans le secteur de Ryedale, étudions sa répartition cartographique dans le bassin du Transvaal (Figure 193 et Figure 194).

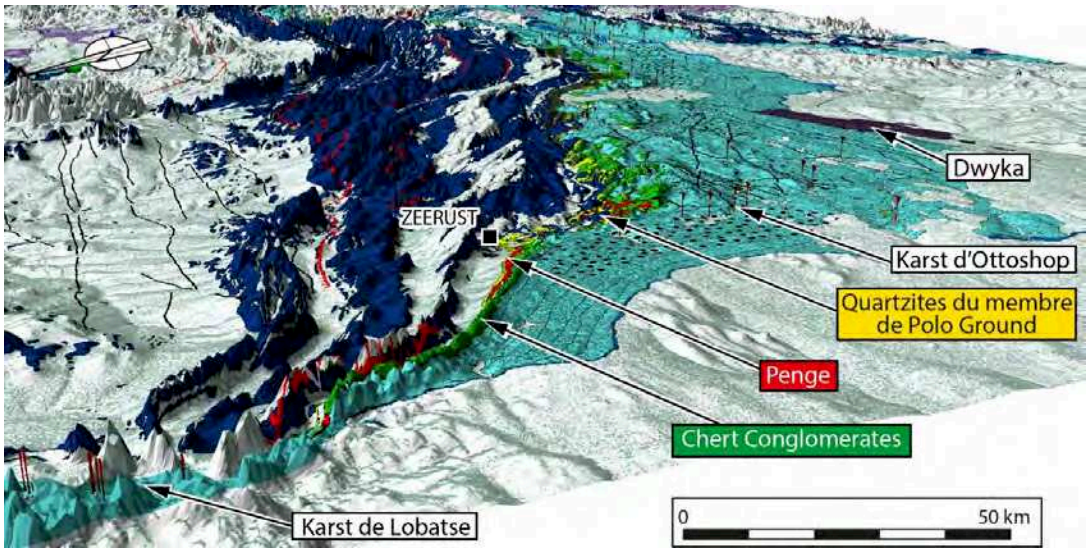


Figure 193 Vue 2.5D des formations altérées, oxydées, bréchifiées et conglomératiques dans les dolomies. Les couleurs font référence à la Figure 190 (p.259).

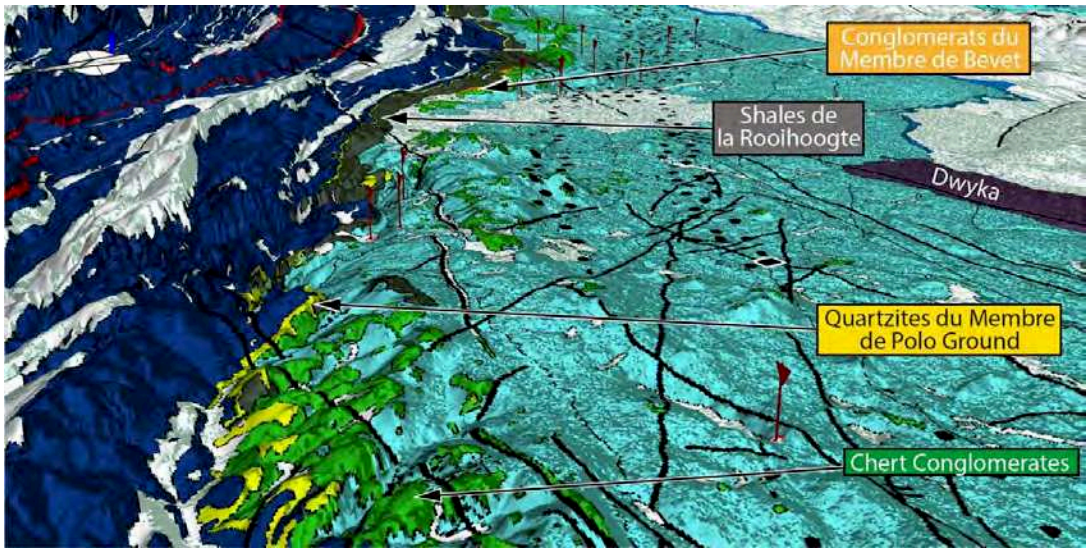


Figure 194 Zoom sur la carte précédente. Les traits rouges dans le groupe de Pretoria correspondent aux niveaux riches en fer qui n'ont pas d'importance ici.

2.4.7.7. Modèle de Van Niekerk et al. (1999)

Van Niekerk *et al.* (1999, Fig.6, p.16), s'inspirant de Partridge et Maud (1987) et de Burke (1996), proposent sur cette coupe schématique (Figure 195) de dater les altérites au toit des dolomies de Malmani, en fonction des **surfaces post-africaines I et II**. Ces formations contiennent certainement du fantôme de roche et des altérites parautochtones comme nous venons de le décrire dans la partie précédente. Notons qu'il interprète aussi, peut-être à tort, la préservation de dépôts de la formation d'Ecca (*shale*). Notons qu'il localise aussi les graviers diamantifères (Marshall et Norton, 2009).

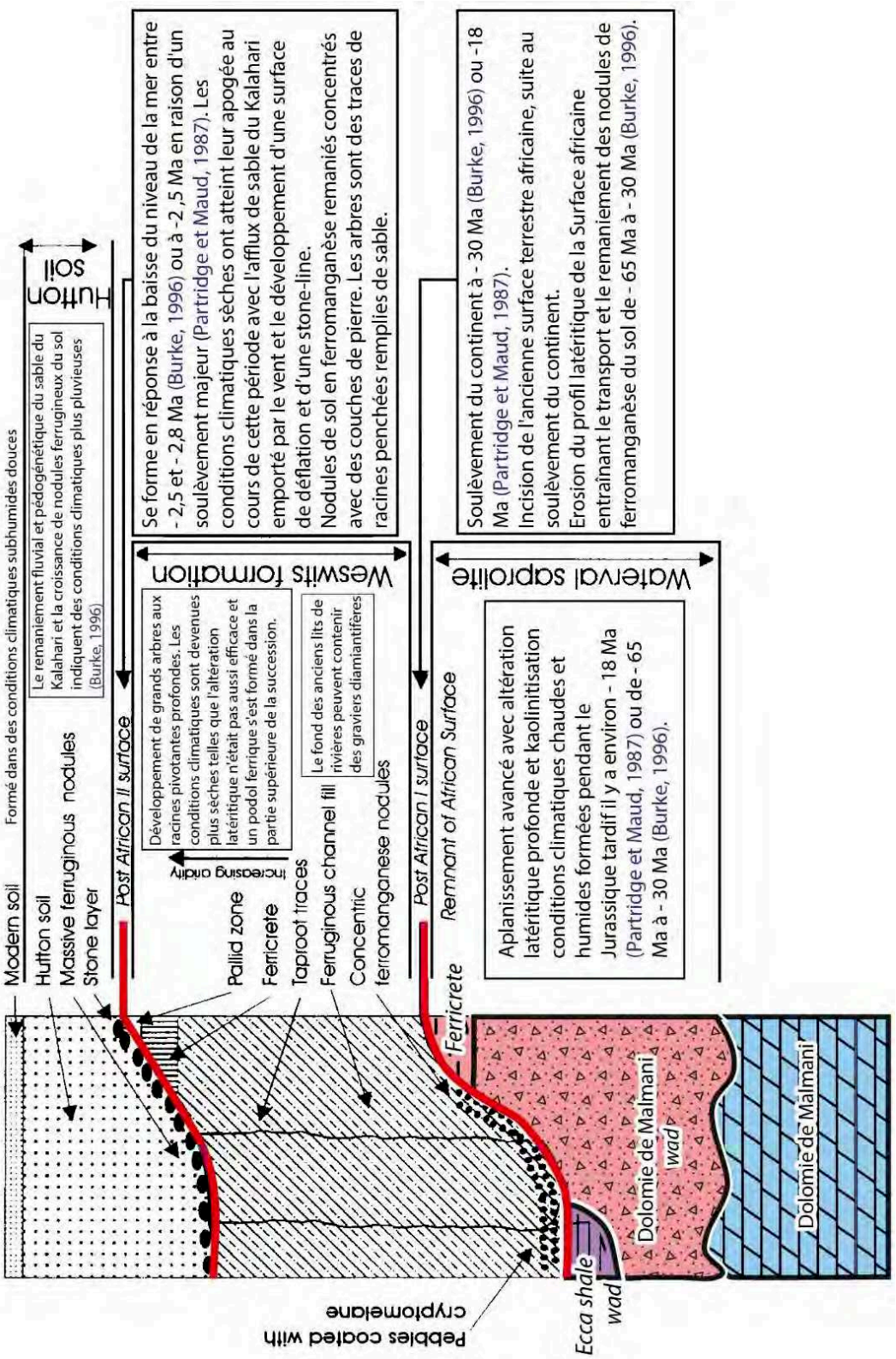


Figure 195 Modèle de Van Niekerk et al. (1999a, Fig.6, p.16, traduit et colorisé).

2.4.7.8. Réévaluation des tilles et diamictites de Dwyka à la lumière de la karstification par crypto-altération et fantômisation

La reconnaissance récente des processus de karstification par crypto-altération et fantômisation invite à réévaluer certaines formations géologiques classiquement interprétées comme des dépôts glaciaires (Molen *et al.*, 2022). En particulier, les tillites et les diamictites de Dwyka, traditionnellement attribuées aux glaciations du Protérozoïque, pourraient, dans certains cas, correspondre à des fantômes de roche. Ces altérites, issues de la désintégration *in situ* de dolomies, présentent des brèches de clastes qui peuvent rappeler, en apparence, des dépôts glaciaires consolidés (Bond, 1952, 1970 ; Visser, 1989, Fig.8, p.388). Une telle confusion n'est pas anodine. L'interprétation erronée de fantômes de roche « tertiaires » comme des tillites d'âge protérozoïque pourrait fausser la lecture paléoclimatique et tectonique de certaines régions. Elle risquerait notamment de conduire à des reconstructions inexactes de l'extension et de la chronologie des épisodes glaciaires précambriennes du Gondwana.

2.4.7.8.1. Exemple Klein et Beukes, 2013

Sur le schéma (Figure 196) de **Klein et Beukes (1993)** in Beukes *et al.*, (2016), indiquent des relations entre des brèches, du manganèse, la formation Penge et les glaciations. Nous pourrions envisager une autre interprétation : la karstogenèse par fantômisation.

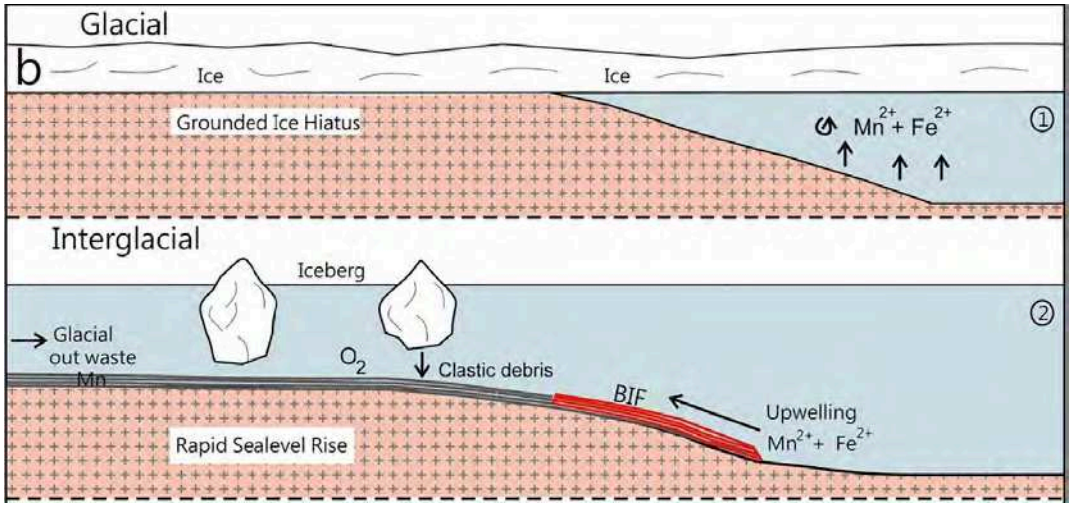


Figure 196 Interprétation glaciaire des brèches, du manganèse et de la formation Penge selon Beuke et al., 2016 (Source : Beuke et al., 2016).

2.4.8. Conclusion

En conclusion, de nombreux modèles de karstification et de spéléogenèse ont été élaborés pour expliquer la formation des grottes d'Afrique du Sud, et plus particulièrement celles du *Cradle of Humankind* (Button,1973 ; Martini, 1976 ; Catuneau et Eriksson, 2002 ; Trollip, 2006 ; Dirks et Berger, 2013 ; De Wit 1981, etc.). Ces approches faisaient intervenir différents facteurs, tels que le rôle du niveau de base de l'aquifère (trait bleu sur la Figure 197), la présence des roches intrusives (hypothèse C et D) (dykes verticaux ou sills horizontaux de dolérites en orange) (Martini) ou encore la karstogenèse par crypto-altération sous la couverture d'altérite, ou sous le Karoo (en violet, hypothèse B) (Marshall, 2009), comme indiquées sur la figure ci-dessous (Figure 197) de Foster (1988, Fig.5, p.23). Nous verrons que les structures karstiques de l'hypothèse A, en rouge, ressemblent aux couloirs de fantôme que nous mettrons en évidence dans l'ancienne carrière de Sterkfontein (p.424) ou au niveau de la géométrie des réseaux karstiques de Rising Star (**Figure 1200** p.1227) ou de *Nico cave* (**Figure 1203** p.1229) et sont liées à la karstogenèse décrite précédemment. D'autres modèles sont reproduits en annexe (p.1161).

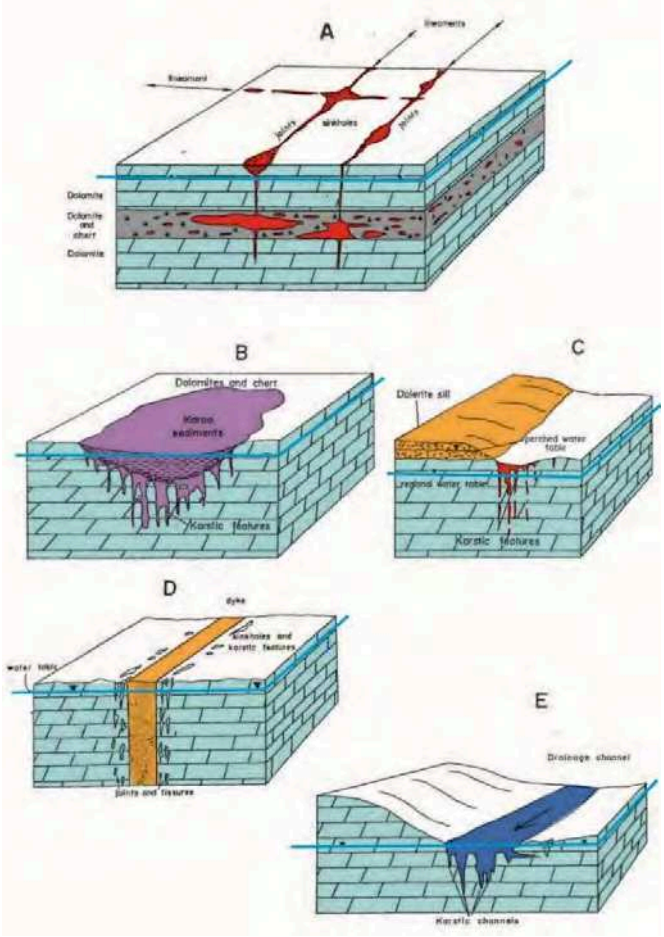


Figure 197 Hypothèses de karstification du CoH, selon Foster (1988, Fig.5, p.23).

Cependant, les travaux récents menés dans le *CoH* par Bruxelles (2019, p.33, 2022b) mettent en évidence le rôle majeur de la karstogenèse par fantômisation et par crypto-altération (Quinif, 1999 et 2010 ; Bruxelles et Bruxelles, 2002 ; Quinif et Bruxelles 2011 ; Dubois *et al.*, 2014), qui est initiée par la mise en place de la Surface Africaine (Bruxelles, 2019), que Baby (2017) date du Crétacé (~65 Ma). Contrairement aux modèles plus anciens qui situaient la karstification dès le Paléoprotérozoïque (~2588 Ma), il est hautement impossible que des fantômes de roche aussi anciens soient aujourd'hui conservés sans être recimentés par la calcite ou la silice compte-tenu de tous les évènements géologiques qui se sont succédé depuis (comm. orale Altermann W.). La fantômisation des dolomies doit être plus récente et elle est géométriquement associée à la Surface Africaine.

3. CHAPITRE 3 : LE *CRADLE OF HUMANKIND* : ETABLISSEMENT D'UN REFERENTIEL MORPHOKARSTIQUE POUR ETUDIER LES KARSTS EN AFRIQUE AUSTRALE

En introduction, nous avons expliqué la problématique de nos recherches, puis, dans le chapitre n°1, nous avons présenté la méthodologie ayant permis d'élaboration du **SIG des karsts de l'Afrique australe** et la production des premières cartes inédites, en vue de réfléchir à la genèse des **karsts fossilifères sud-africains**. Dans le Chapitre 2, nous avons traité du contexte géologique et morphokarstiques des principales régions géologiques, replacées dans une histoire géologique plus longue, celle des grands bassins marins et sédimentaires paléoprotérozoïques qui s'étendaient sur un seul continent, le Gondwana, avant sa séparation. Cette histoire permet de retracer les grandes phases de karstification ayant partiellement altéré, karstifié ou érodé ces bassins, conduisant à la formation des karsts. Enfin, nous avons présenté succinctement les karsts fossilifères d'Afrique du Sud (*Cradle of Humankind*, Makapansgat et le Plateau karstique de Ghaap). Dans ce Chapitre n°3, nous allons désormais décrire plus en détail le *Cradle of Humankind* et identifier les critères géologiques et morphokarstiques caractéristiques de ce karst fossilifère, qui constitue **le modèle de référence du SIG des karsts de l'Afrique australe**.

Cette thèse s'est concentrée plus particulièrement sur le *Cradle of Humankind* en Afrique du Sud, grâce notamment à un séjour de trois mois, du 18/06/2021 au 16/09/2021, dans le cadre d'un échange ERASMUS+ entre l'Université Jean-Jaurès de Toulouse et l'Université de Witwatersrand de Johannesburg, nous avons été chargés d'analyser les paléosurfaces du *CoH*. L'objectif était de déterminer s'il existait une corrélation entre l'altitude des remplissages fossilifères karstiques et leurs âges. À cette fin, nous avons levé une carte à haute résolution inédite du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai, en utilisant un modèle de terrain numérique (MNT LIDAR) de haute résolution fourni par Matthew V. CARUANA.

3.1. CONTEXTE SPELEOLOGIQUE DU CRADLE OF HUMANKIND 272

***3.2. IDENTIFICATION DES PALEO-SURFACES DE LA BLOUBANK ET DU CRADLE OF HUMANKIND* 287**

3.3. STRUCTURATION GEOLOGIQUE DU TRANSVAAL ET MISE EN EVIDENCE DE L'EROSION REGIONALE ET DES PALEOSURFACES D'EROSION374

3.4. INCISION DES VALLEES QUI EXHUMENT LES FANTOMES DE ROCHE ET OUVRE LES PREMIERES GROTTES ET PERMET LA FOSSILISATION DES REMPLISSAGES KARSTIQUES.....400

***3.5.* SYNTHESE DE L'ANALYSE MORPHOKARSTIQUE DU *CRADLE OF HUMANKIND*.....453**

3.6. SYNTHESE SUR LA SURFACE AFRICAINE ET LES PALEOSURFACES DANS LE CRADLE OF HUMANKIND AU NIVEAU DE STERKFONTEIN, SWARTKRANS ET KROMDRAAI.....465

3.7. CONCLUSION 470

Après avoir présenté le *Cradle of Humankind (CoH)* en introduction (p.232) continuons à en faire l'analyse. Le karst du CoH se situe en bordure d'un vaste plateau dolomitique, le *Central Rand* de la Figure 144 (p.204), recouvert d'altérites connues sous le nom de *Hutton Soil*, caractéristiques de **la Surface Africaine*** (voir définition dans l'encadré ci-dessous). Dans le *CoH*, ce plateau a été entaillé par les rivières Bloubank et Skeerpoort qui ont dégagé les altérites en surface et creusé les dolomies qui étaient au préalable fantômisées, comme nous le verrons dans le Chapitre 3.4. Ces processus, que nous allons décrire en détail, ont formé les collines karstiques fossilifères (Figure 199, Figure 200 et Figure 165).

Définition de **la Surface Africaine** : (voir p.161).

La Surface Africaine est le nom donné à la **surface fondamentale** d'érosion la plus élevée en altitude et visible dans les paysages africains, car elle a raboté tous les sommets des reliefs à la même altitude. Cette altitude correspond aussi à celle des vastes plateaux africains, qui s'étendent sur plusieurs centaines de kilomètres à travers tout le continent.
Quelquefois des reliefs en roche dure peuvent émerger de la Surface Africaine.

Les surfaces emboîtées dans la Surface Africaine et donc plus récentes, portent le nom de Surfaces post-africaines 1, Surface post-africaine 2, etc.
Dans le *Cradle of Humankind* la Surface Africaine est située à 1560 m d'altitude. C'est sous cette surface que se trouvent les grottes selon Bruxelles (2017, 2019, 2022) et comme nous allons le montrer.

Nous verrons que c'est au-dessous de cette Surface Africaine, au contact entre les formations carbonatées et les altérites, que s'est produit la fantômisation des dolomies (une pré-karstification des dolomies) Bruxelles (2019, 2022). Le creusement des vallées a dégagé les couvertures d'altérites, exhumé les fantômes de roche et mis à l'affleurement les premiers évidements et les premières grottes.

Dans ce chapitre, nous tenterons de comprendre et d'expliquer la répartition des cavités et la richesse de leurs remplissages fossilifères en faune plio-pléistocène et en Hominines. Cela nous permettra d'établir les paramètres et les caractéristiques nécessaires pour rechercher d'autres karsts, en remontant vers le débouché du Rift, à plus de 1800 km vers le nord où a été trouvé l'Hominine le plus proche, dans le gisement de Malema au nord du Malawi (Figure 109).

3.1. CONTEXTE MORPHOKARSTIQUE DU CRADLE OF HUMANKIND

Avec les outils de la géomatique, nous avons pu cartographier en 2.5D les collines karstiques fossilifères de la vallée de la Bloubank et faire des mesures de l'altitude des gisements, des entrées de grottes et des paléosurfaces.

Les limites des affleurements dolomitiques, en orange sur la Figure 198, correspondent aux limites du karst du *CoH* comme le montre la répartition des cavités. 160 cavités sont recensées dans la vallée de la Bloubank (Figure 198).

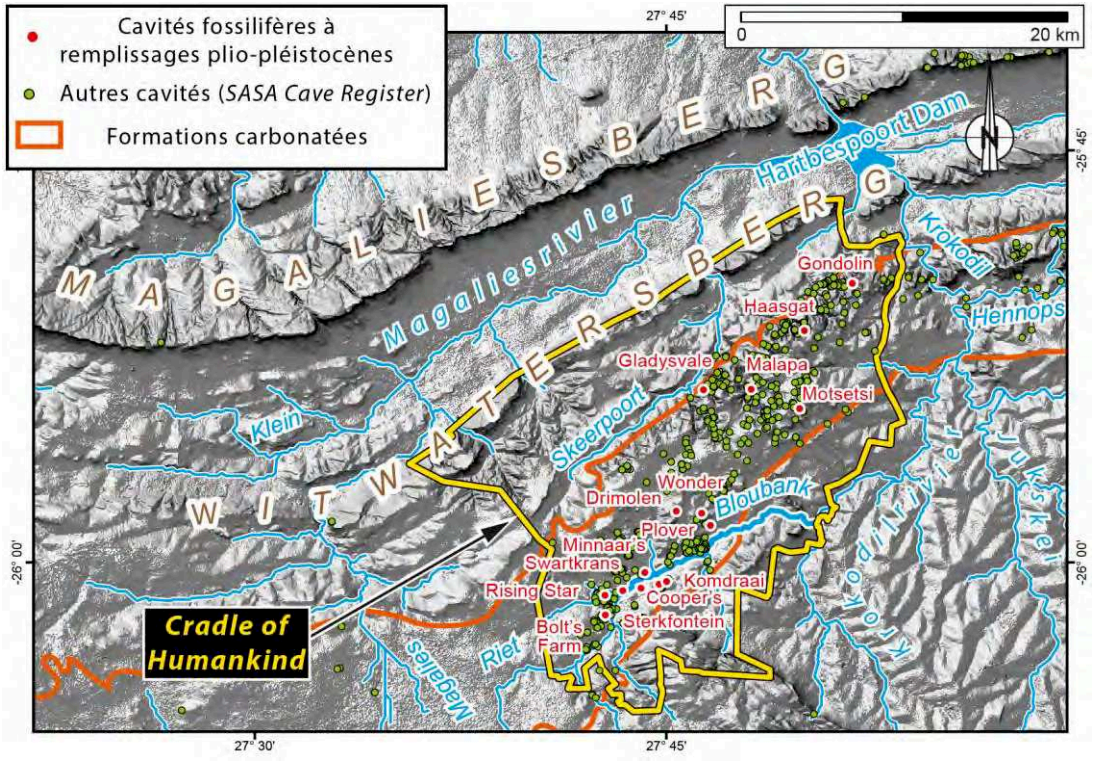
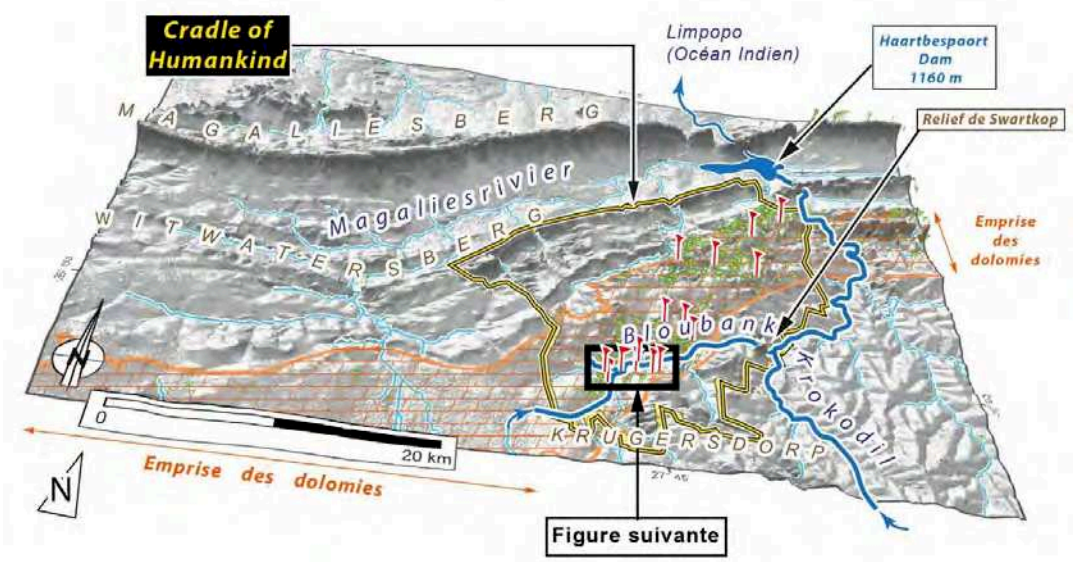


Figure 198 Carte orohydrographique du Cradle of Humankind et des cavités.



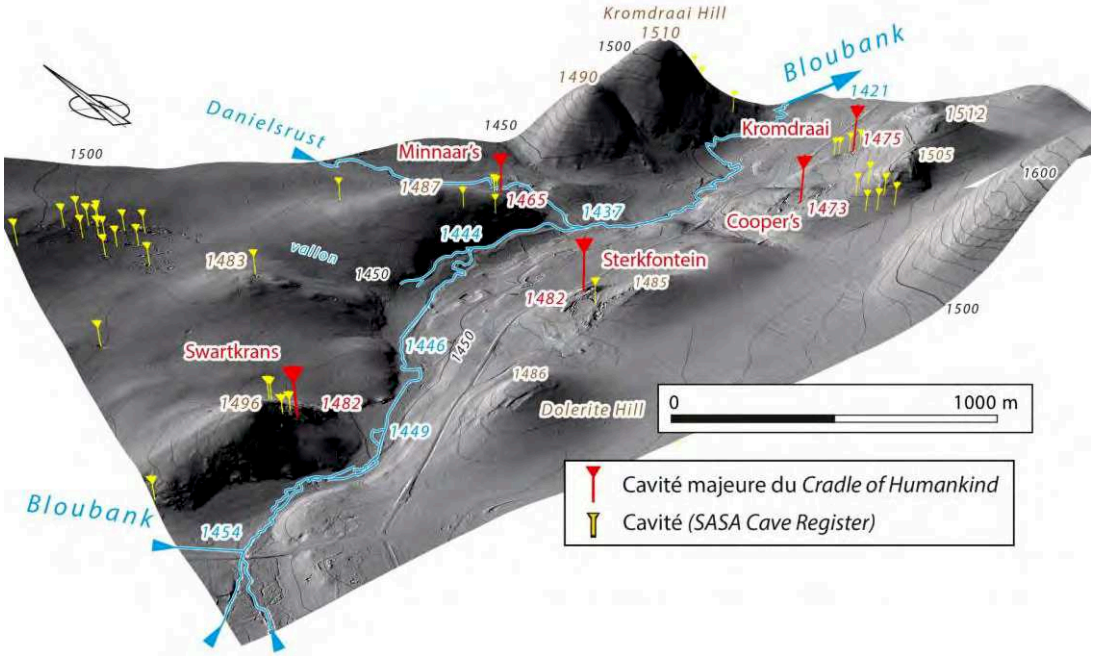


Figure 199 Collines karstifiées et fossilifères du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai dans la vallée de la Bloubank et situées dans le sud du Cradle of Humankind. (Vue 2.5D exagérée dix fois).

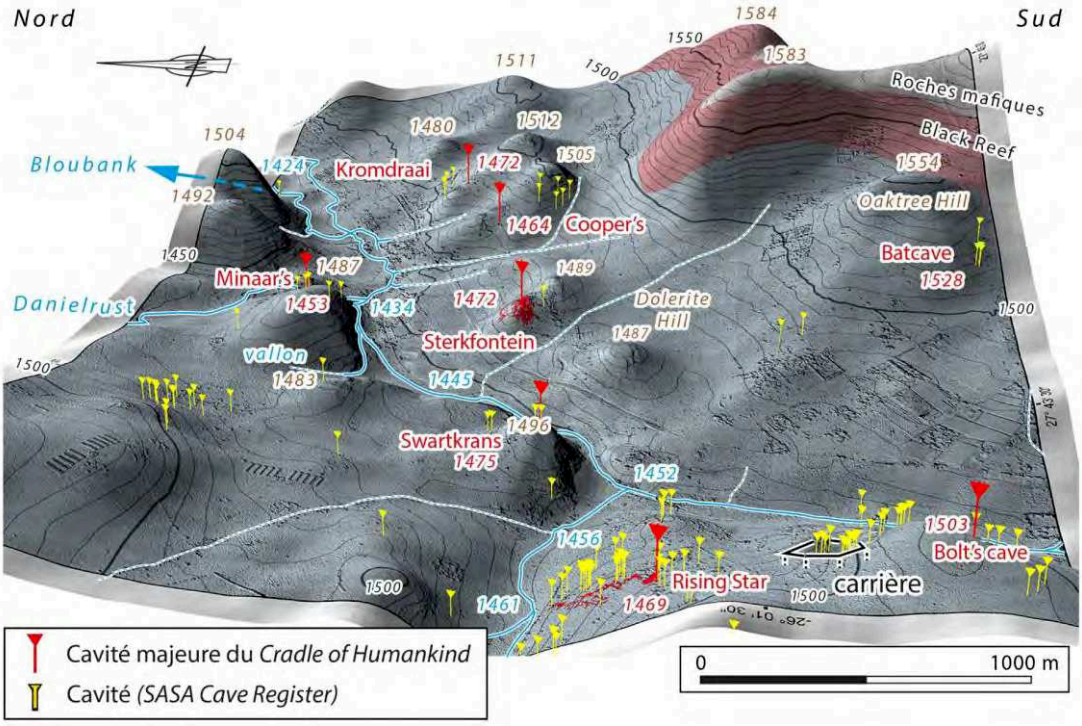


Figure 200 Autres vues des collines karstiques fossilifères. La vallée est creusée dans les dolomies paléoprotérozoïques, à l'exception du relief indiqué Black Reef et des roches mafiques de l'Archéen. (Vue 2.5D exagérée dix fois). Le fond de la carrière est à 1475 m et le sommet à 1500 m.

3.1.1. Source des données altimétriques et détermination des altitudes

Plusieurs sources de données altimétriques ont été utilisées (Figure 203) afin de mesurer et d'harmoniser les altitudes des sites fossilifères en surface, des entrées de grottes, des confluences de la Bloubank et des sommets des reliefs. L'utilisation des SIG nous permet d'accorder une grande confiance dans les altitudes synthétisées dans le Tableau 10 (p.279).

Les cartes topographiques raster du CDNGI, ainsi que les données topographiques vectorisées qu'il met à disposition, permettent de vérifier les altitudes, notamment grâce à la présence de points géodésiques (postes de triangulation - *Trig Beacons*).

Les cartes topographiques raster au 1 :50 000 suivantes ont été utilisées :

- 2627BA_2006_ED6_GEO.TIF (Randfontein) ;
- 2627BB_2007_ED7_GEO.TIF (Roodepoort) ;
- 2527DD_2001_ED5_GEO.TIF (Broederstroom) ;
- 2527DC_1996_ED4_GEO.TIF (Hekpoort).

Elles couvrent l'ensemble du *Cradle of Humankind* et indiquent l'altitude de certains sommets. Les courbes de niveaux figurant sur ces cartes ne sont toutefois pas suffisamment précises pour l'étude que nous souhaitons des paléosurfaces et des étages de karstification. Cette lacune a été compensée par l'utilisation des courbes de niveaux vectorisées téléchargées sur le portail du CDNGI (https://ngigeoportal.dlrrd.gov.za/cdngiportal/) :

2527_ITIS50V_HYPS_ELEVATION_LINES_EXP_2014_11.shp
2627_ITIS50V_HYDR_LINES_EXP_2013_12.shp

Ainsi que les données altimétriques ponctuelles suivantes :

2527_ITIS50V_HYPS_ELEVATION_POINTS_EXP_2014_11.shp
2627_ITIS50V_HYPS_ELEVATION_POINTS_EXP_2013_12.shp

Le portail du CDNGI permet également de télécharger plusieurs modèles numériques de terrains (MNT) :

LO27-025M-2627BA.asc
LO27-050M-2627BB.asc
LO27-050M-2527DD.asc

Ces dalles présentent toutefois plusieurs limitations. Le système de projection (EPSG :2052) est peu pratique à utiliser dans les logiciels SIG. De plus, le téléchargement des données depuis le portail présente des dysfonctionnements et la dalle LO27-050M-2527DC, correspondant à la partie nord-ouest du *CoH*, est absente (Figure 201).

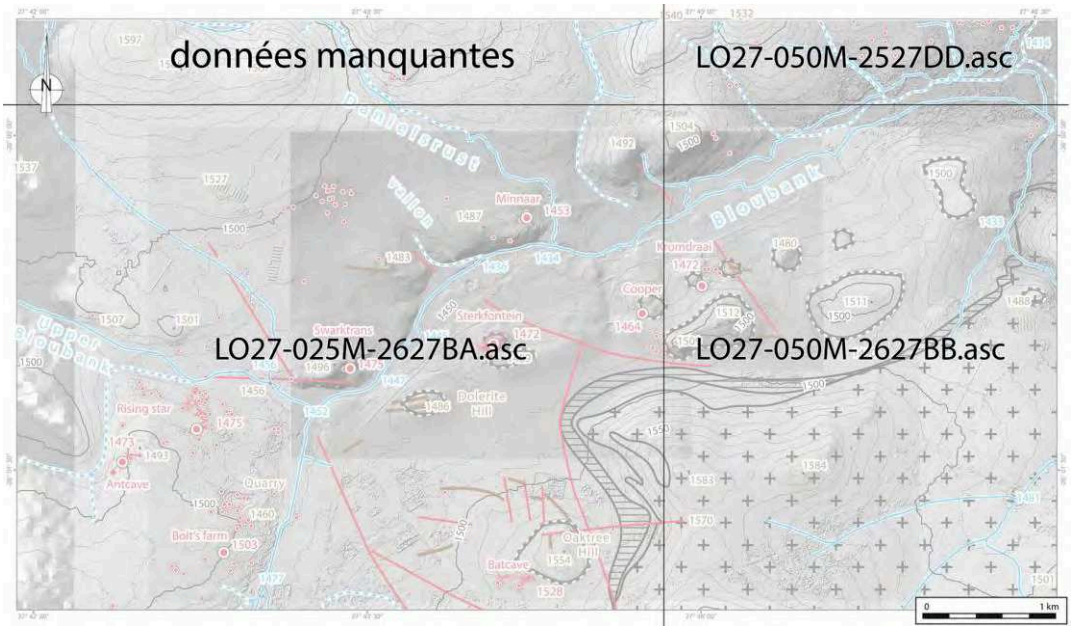


Figure 201 Répartition des dalles du MNT du CDNGI pour le secteur de Swartkrans, Sterkfontein, Kromdraai.

Heureusement, afin de pallier ce manque de données altimétriques, nous disposons d'un modèle numérique de surface (MNS) Pléiades d'une résolution de 50 cm, acquis en 2018 par Benjamin Lans, couvrant la partie méridionale du *Cradle of Humankind* (Figure 202).
Pour le secteur de Swartkrans, Sterkfontein, Kromdraai, nous disposons également d'un LIDAR fourni par Matthew Caruana (Bare_Earth_DEM1.tif) qui constitue actuellement la donnée altimétrique la plus précise disponible (Figure 203).

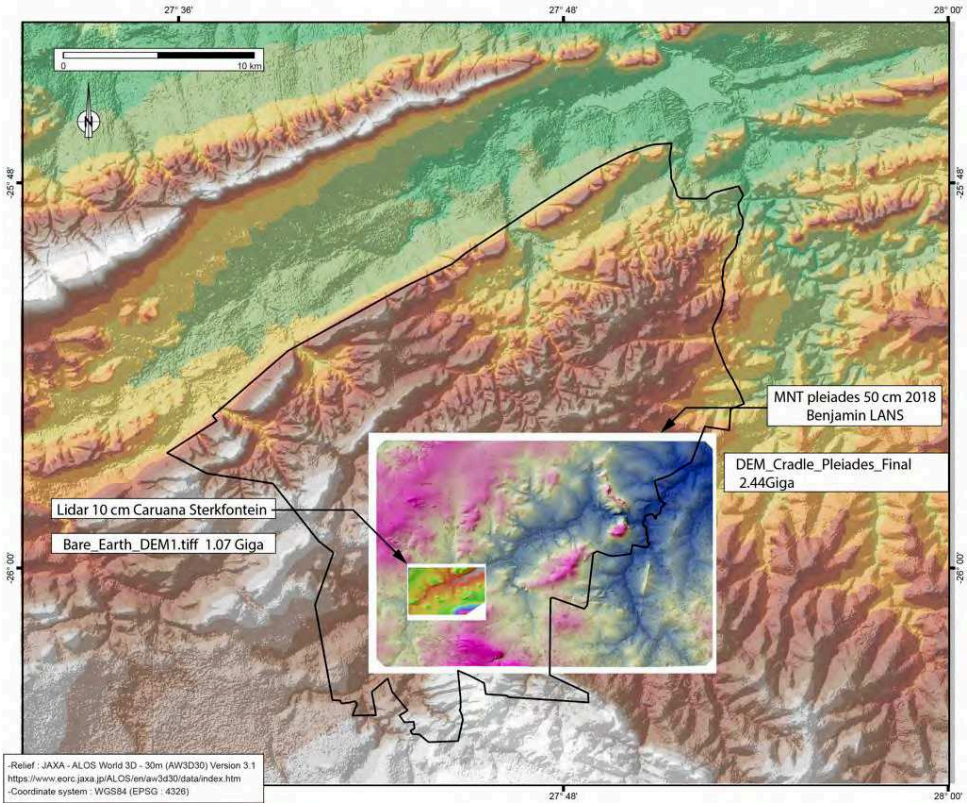


Figure 202 Emprise du MNS Pléiades de Lans et du LIDAR de Caruana.

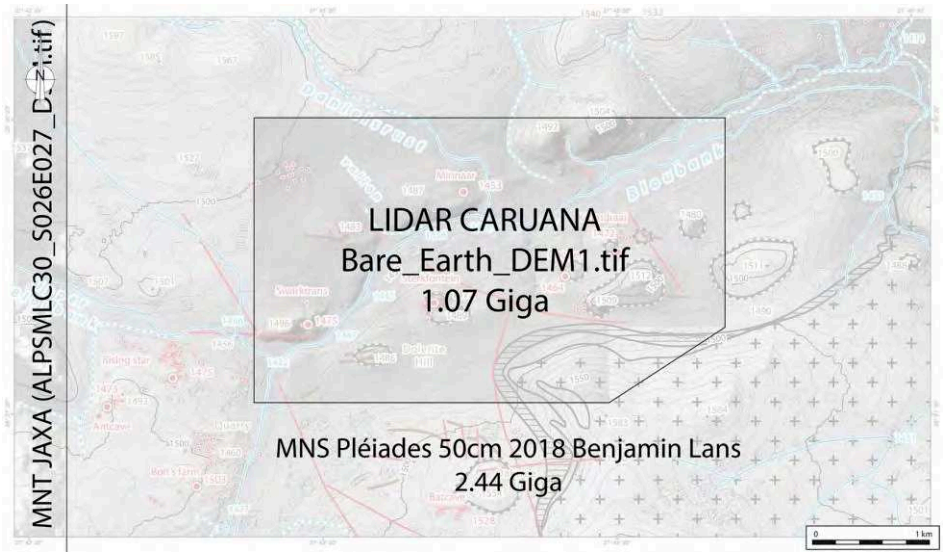


Figure 203 Emprise des différentes sources de données altimétriques pour le secteur de Swartkrans, Sterkfontein, Kromdraai.

Au cours des missions de terrain, nous avons également réalisé des mesures d'altitude au GPS. Toutefois, il convient de rappeler que ces mesures présentent généralement une erreur verticale de l'ordre de 30 m. La production de modèles ombrés à partir des MNT et des MNS permet néanmoins de localiser avec précision les entrées de grottes, les gisements de plein-air ainsi que les secteurs ayant fait l'objet de fouilles anciennes ou récentes.

Les altitudes publiées dans les travaux antérieurs sont présentées à titre de comparaison, notamment dans le Tableau 11 (p.280). Cependant, à l'exception des données vérifiées par analyse SIG et géomatiques, la plupart des altitudes publiées pour les sites du *Cradle of Humankind* sont imprécises, voire erronées. Il en est ainsi des altitudes des entrées de cavités du *SASA Cave Register*. Nous avons d'ailleurs mis en évidence une problématique similaire concernant la localisation géographique de certains sites, comme celui de Minnaar's.

En conclusion, la comparaison et l'harmonisation des différentes sources altimétriques permettent de fournir des altitudes fiables pour les sites du *CoH*, en particulier dans le secteur de Swartkrans, Sterkfontein, Kromdraai, où les données LIDAR offrent une très bonne précision. Les comparaisons entre l'altitude des sites fossilifères, celle des galeries des grottes, les niveaux de la rivière Bloubank et les différentes terrasses alluviales constituent ainsi une base pertinente pour les analyses développées dans cette étude sur les paléosurfaces et les niveaux de karstification.

Nous présentons à présent les données relatives aux sites fossilifères du *CoH* (p.281). Les positions géographiques et les altitudes de l'ensemble des sites ont été synthétisées dans le tableau récapitulatif final (cf. Tableau 59 en 7.3 p.1090).

Nom (entrée de grotte ou gisement en extérieur)	Altitude (en mètre)	Source
Grotte de Sterkfontein (entrée touristique)	1474	LIDAR CARUANA Bare_Earth_DEM1.tif
Type Site (gisement en surface) de la grotte de Sterkfontein	1472	LIDAR CARUANA Bare_Earth_DEM1.tif
Lincoln Fault (grotte) en lien avec la grotte de Sterkfontein	1464	LIDAR CARUANA Bare_Earth_DEM1.tif
Swartkrans (grotte)	1475	LIDAR CARUANA Bare_Earth_DEM1.tif
Minaar's cave n°1 (Gommery, 2012) (n°84 *Van Rooy's Cave* du *SASA Cave Register*) (grotte)	1459	LIDAR CARUANA Bare_Earth_DEM1.tif
Minaar's cave n°2 (Gommery, 2012)	1451	LIDAR CARUANA Bare_Earth_DEM1.tif
Old dump-site MVR1 (Gommery, 2012) *(gisement en surface)*	1453	LIDAR CARUANA Bare_Earth_DEM1.tif
Trench-site MVR2 (Gommery, 2012) *(gisement en surface)*	1457	LIDAR CARUANA Bare_Earth_DEM1.tif
Cooper's D (gisement en surface)	1464	LIDAR CARUANA Bare_Earth_DEM1.tif
Kromdraai B (gisement en surface)	1472	LIDAR CARUANA Bare_Earth_DEM1.tif
Rising Star	1475	Dirks *et al.*, 2015 (Fig. 2, p.5)
Rising Star	1469	MNT CDNGI LO27-025M-2627BA.asc
Rising Star	1481	SRTM30v2
Rising Star	1476	MNT JAXA ALPSMLC30_S027E027_DSM.tif
Bolt's cave	1499	MNT JAXA ALPSMLC30_S027E027_DSM.tif
Bolt's cave	1497	MNT CDNGI LO27-025M-2627BA.asc
Bolt's Farm : Elephant cave	1509	Herries *et al.*, 2019 Table 4 p.325
Bolt's Farm : Cobra cave	1478	Herries *et al.*, 2019 Table 4 p.325
Bolts Farm : Waypoint 160	1495	Herries *et al.*, 2019 Table 4 p.325
Bolt's Farm : Ave caves	1492	Herries *et al.*, 2019 Table 4 p.325
Batcave	1521	MNT CDNGI LO27-025M-2627BA.asc
Antcave	1497	MNT CDNGI LO27-025M-2627BA.asc

Tableau 10 Altitudes des entrées de grottes et des gisements fossilifères de la vallée de la Bloubank.

Fossil Site	Groundwater Compartment	Surface Elevation (m amsl)	Cave Base Elevation (m amsl)	Groundwater Elevation (m amsl)	Separation Distance[1] (m)
Bolt's Farm	Zwartkrans	~1480 – 1505	<1448[2]	~1448	0
Swartkrans		~1470 – 1480	<1465	~1440	<25
Sterkfontein		~1470 – 1485	<1437	~1437	0
Coopers		~1465 – 1475	~1460	~1435	<30
Kromdraai		~1470 – 1475	~1465	~1432	<35
Minnaars		~1455 – 1460	<1450	~1437	<20
Plovers Lake	Krombank	~1430 – 1440	<1425	~1420	<5
Wonder Cave		~1500 – 1510	~1440	~1422	>20
Drimolen	Danielsrust	~1545 – 1555	~1540	~1490	~50
Gladysvale	Uitkomst	~1415 – 1425	~1350	~1365	0
Motsetse	Motsetse	~1495 – 1505	~1490	~1415	>80
Haasgat	Diepkloof	~1470 – 1480	~1465	~1420	~45
Gondolin	Broederstroom	~1385 – 1395	~1380	~1340	~40
Malapa	Diepkloof	~1435 – 1445	~1430	~1375	~55

(1) Approximate distance between lowest surface elevation and current groundwater elevation.
(2) Associated with cave accessed from entrance in the western sidewall of Sterkfontein Quarry.

Tableau 11 Altitudes des sites fossilifères et du niveau de base actuel (lacs souterrains) du CoH (Hobbs, 2011, p.5, voir aussi p.192 à 194).

3.1.2. Liste des cavités fossilifères du Cradle of Humankind

Nous établissons ici la liste des cavités fossilifères (en rouge sur la Figure 198 (p.272), les autres grottes étant en vert) appartenant officiellement à l'aire du *Cradle of Humankind* (en jaune). Nous indiquerons des informations de base sur ces cavités telles que l'âge des remplissages, les méthodes de datation utilisées et les auteurs des études. Nous mentionnons parfois les différentes unités stratigraphiques, appelées « membres », pour lesquelles nous donnons une brève bibliographie.
Nous avons consulté plusieurs inventaires existants (*DACEL*, 1998, p.15 ; Herries *et al.*, 2013a, Table3.2 p.27 ; Herries et Adams, 2013b, p.677 ; Pickering *et al.*, 2011a, Fig.6, voir aussi Fig.2, Herries *et al.*, 2019, Fig.1, Fig.8, 2023, Table 1 p.3, Table 4; Hobbs *et al.*, 2011, Table 5, p.15 ; Hopley *et al.*, 2013 ; Hobbs *et al.*, 2022, Table 6 ; Thackeray, 2016, etc.).
Comme énoncé précédemment, il est important de noter que des études stratigraphiques récentes (Bruxelles *et al.*, 2014 , 2019a ; Granger *et al.*, 2015, 2022 ; Bruxelles, 2017, 2019, 2022 ; Kuman *et al.*, 2021) indiquent que toutes ces datations ne sont pas nécessairement fiables. Nous les présenterons donc de manière concise.
Nous dresserons également un inventaire des cavités du *CoH* (Tableau 10 p.279). Il est à noter qu'aucun fossile d'hominine n'a été trouvé sur les sites de Haasgat et de Minnaar. De plus, certaines grottes n'ont révélé aucun fossile paléontologique, comme *Wonder cave* et Motsetse, mais elles ont néanmoins été intégrées à cette liste. Une autre liste intéressante, réalisée par Hobbs (2011, p.5), fournit des informations sur les altitudes des entrées des grottes, les niveaux d'eau dans la grotte et la profondeur des réseaux (Tableau 11 de la page précédente).

3.1.2.1. Bolt's Farm Caves

Cet ensemble de plus de 23 grottes et paléokarsts (dont la principale *Bolt's Cave*) est situé sur un plateau dolomitique surplombant la vallée de la *Riet* en amont de sa confluence avec la Bloubank (Figure 200 p.274 ; Figure 218 p.299). Ces grottes ont livré de la faune ancienne, notamment de nombreux restes de primates (*Parapapio)* (Cooke, 1991 – voir plan ; Thackeray *et al.*, 2008). Des niveaux ont été datés entre 2.6 et 2.3 Ma (Herries *et al.*, 2019). Les remplissages du gisement de surface de *Waypoint 160* avaient été datés de -4.5 à -4 Ma (Gommery *et al.*, 2008, 2016), mais de nouvelles études suggèrent une datation plus récente, entre -2.27 à –1.70 Ma (Edwards *et al.*, 2023). Ce secteur est étudié dans le cadre du projet *HOMEN* de l'*IRL (International research Laboratory)* dirigé par Dominique Gommery (2019-2023).

Sur ce plateau se trouve l'ancienne carrière de *Bolt's farm*, où des **couloirs de fantômes de roche** ont été mis en évidence par Bruxelles (2019, 2022) et que nous

avons décrit plus loin (p.424). Grâce au *SEC Caving* et à Steven Tucker et Thilo Muler, nous avons visité les grottes de la carrière de *Bolt's farm* (*Heartbreak, Quarrymaster*, etc.), puis nous avons exploré *Bolt's cave* et certains des gisements alentour : *Baboon, Milo B, Cork-screw* (p.424).

3.1.2.2. Rising Star Cave

Des ossements d'une nouvelle espèce, *Homo naledi*, ont été découverts après un passage très étroit exploré par Steven Tucker en 2010 (Dirks *et al.*, 2015 ; Hawks *et al.*, 2017). Les premières datations indiquent un âge compris entre -414 000 et -236 000 ans (Dirks *et al.*, 2017 ; Berger *et al.*, 2017).
Nous avons étudié la surface du plateau, au-dessus de la grotte, où des structures karstiques (*Chert stockwork vein*) et leurs prolongements en profondeur ont été cartographiées par Dirk (Dirks *et al.*, 2015, fig.1, p.3, fig.2, p.5 ; Dirks *et al.*, 2017 ; Fig.1 p.4. On trouve plusieurs altitudes différentes pour l'entrée de la grotte de Rising Star qui peuvent varier jusqu'à une dizaine de mètres :

- 1474 m (Makhubela *et al.*, 2019, p.3) ;
- 1484 m (Herries *et al.*, 2019, Table 4 p.325)
- entre 1473 et 1476 m sur la coupe de Dirks *et al.*, 2015 (Fig. 2, p.5). Cette dernière fait aussi mention d'un puits d'entrée à 1480 m.

3.1.2.3. Swartkrans Cave

Ce site, découvert par Broom et Robinson en 1949 (Broom et Robinson, 1949) contient la plus grande collection de fossiles de *Paranthropus*, grâce à des fouilles bien documentées et aux analyses faunistiques par Brain (1981). Des preuves de l'utilisation d'outils en os et en corne, ainsi que l'usage du feu, y ont été identifiés. Les plus anciens outils lithiques d'Afrique du Sud y ont récemment été mis au jour (Kuman *et al.*, 2021 ; Pickering *et al.*, 2025). Ce site a livré plus de 500 fossiles d'hominines.
Datations des différents membres :

- Membre 1 : 2.3 Ma (Kuman *et al.*, 2021) ;
- Membre 1 : entre 2 et 1.8 Ma (Pickering et al., 2011a ; Curnoe *et al.*, 2001 in Herries et Adams, 2013b) ou 2.19 ± 0.08 Ma et 1.80 ± 0.09 Ma (datations cosmogéniques) (Gibbon *et al.*, 2014) ;
- Membre 2 : entre 1.7 et 1.1 Ma (Balter *et al.*, 2008);
- Membre 3 : entre 1.3 et 0.6 Ma (Blackwell, 1994, Balter *et al.* 2008) et à 0.96 ±0.09 Ma (datations cosmogéniques) (Gibbon *et al.*, 2014) ;
- Un *Homo erectus* est daté entre 1.80 à 1.90 Ma (Pickering *et al.*, 2011a).

3.1.2.4. Minnaar's

En 1936 Broom fait des découvertes dans le secteur de Minnaar's mais nous ne savons pas exactement où. Le secteur montre plusieurs excavations (Gommery *et al.*, 2012) :

- *Old dump-site MVR1 ;*
- *Trench-site MVR2.*

Ainsi que des grottes :

- Minnaar's cave 1 qui correspond à la grotte n°84 du *SASA Cave Register* nommée *Van Rooy's Cave* ;
- Minnaar's cave 2.

Elles n'ont pas livré de fossile d'hominines mais elles sont connues pour la découverte du crâne d'un chacal éteint *(Canis mesomelas)*. Les remplissages seraient datés vers 2 Ma d'après des études biostratigraphiques (Gommery *et al.*, 2012).

Le modèle ombré du LIDAR fourni Matthew Caruana permet de visualiser de nombreuses excavations anciennes. C'est dans ce secteur que se trouve le site de « Soetwater » (Bruxelles, 2019, p.96) où a été trouvé une mandibule de *Papio izodi*. Ce site correspond dans l'inventaire *SASA Cave Register* au n°1276 (*unnamed cave*) et n°1277 (*mummified mole hole*) et n°1278 (*spidermouse cave*). D'autres publications parlent de ce secteur (COHWHS, 2013 ; Hanon *et al.*, 2022 ; Linchamps *et al.*, 2023).
Minnaar's est souvent mal localisé sur les cartes des publications scientifiques, où elle est indiquée en rive droite de la Bloubank (De Ruiters *et al.*, 2009, Fig.1, p.498 ; Pickering, 2005, fig. 1.1, p.14, Berger et Lacruz, 2003, Fig.1 ; Makhubela *et al.*, 2017, fig.1, p.22, etc.) alors qu'elle est en réalité située en rive gauche. Elle s'ouvre autour de 1450 m d'altitude (LIDAR de Caruana), plus bas que Sterkfontein (1491 m).

3.1.2.5. Sterkfontein Cave, Lincoln Fault Cave et Fault Cave

La grotte de Sterkfontein, et son *Type Site* en surface (1472 m d'altitude selon le LIDAR de Caruana), constituent le site majeur du *Cradle of Humankin*d et il est de renommée internationale. Il a livré plus de 500 fossiles d'hominidés et plus de 25 000 fossiles de faunes identifiables. Il a été découvert par Broom (1936).
Un crâne d'un australopithèque (*Mrs Ples)* a été découvert par R. Broom et J.T. Robinson en 1949, suivi de la découverte d'un autre crâne d'australopithèque (*Mr Ples)* en 1989 par H. et P. Tobias. Enfin, le squelette quasi-complet d'un australopithèque *(Little Foot)* a été mis au jour par Ron Clarke en 1998. *Little Foot* a

pu être daté, par les études stratigraphiques de Laurent Bruxelles, de 3.67 Ma ±0.16 Ma (méthode des cosmonucléides $^{26}Al/^{10}Be$) (Granger *et al.*, 2015, 2022).
Une carte du *Type Site* a été réalisée par Pickering et Kramers, (2010, Fig.2, p.72), et plusieurs relevés topographiques de la grotte existent (Boshoff, 1990 ; Martini *et al.*, 2003) (p.1219). Un levé par camera thermique a également été réalisé permettant d'identifier l'aven par lequel a chuté *Little Foot* dans le fond de la grotte (Poirier, 2021 et Bruxelles) (p.1222). Quelques informations sur le site dont certaines datations sont encore débattues (Thackeray et Dykes, 2023) :

- Membre 2 (et chute de *Little Foot)* il y a 3.67 Ma ± 0.16 Ma (méthode des cosmonucléides $^{26}Al/^{10}Be$) (Granger et *al*, 2015 ; Granger *et al.*, 2022);
- Membre 2 vers 4.0 Ma (méthode des cosmonucléides $^{26}Al/^{10}Be$) (Partridge *et al.*, 2003) ;
- Membre 4 (où se situe *Mrs Ples*) à 2.4 et 2.8 Ma (**Vbra, 1985 ; Delson, 1988 ; Mc Kee *et al.*, 1995** par assemblages paléontologiques) ou 2.114 Ma (Curnoe, 1999, par résonnance spin électronique) et entre 2.62 ± 0.3 et 2.01 ± 0.05 Ma (Pickering et Kramers, 2010 ; Pickering *et al.*, 2011 ; Herries, 2011 ; Herries et Shaw, 2011, par U/Th de plancher stalagmitique), selon Bruxelles (2019)) ;sur *Jacovec Cavern* dans Granger *et al. (*2022);
- Membre 5 à 2.18 ± 0.21 Ma (Granger *et al.*, 2015) ;
- Membre 5b a 1.4 à 1.1 Ma (Curnoe, 1999 ; Pickering et Kramers, 2010 ; Herries and Shaw, 2011).

Le niveau du lac dans la grotte varie autour de 1437 m selon Hobbs (2011, p.5).

3.1.2.6. Cooper's A, Cooper's B, Cooper's C et Cooper's D

Des spécimens de *Paranthropus robustus* y ont été découverts.

- La présence d'*Equus* indique une datation plus récente que 2.36 Ma (Behrensmeyer *et al.*, 1997 ; Bernor et Armour-Chelu, 1999 in Bruxelles, 2019, p.95) et 1.4 Ma (De Ruiter *et al.*, 2009 in Bruxelles, 2019, p.95) ;
- *Cooper's D* : *Upper facies* A et C <1.4 Ma, *Lower Facies* A et C 1.6 à 1.4 Ma (De Ruiter *et al.*, 2009) ;
- *Cooper's D* : 1.6 à <1.4 Ma (Herries *et al.*, 2019) ;
- Os d'oiseaux (Pavia *et al.*, 2022) ;
- Datations U/Pb de deux planchers de calcite : 1.5 et 1.4 Ma (De Ruiter *et al.*, 2009 in Bruxelles, 2019, p.95).

Ce site correspondrait à un crypto-lapiaz creusé dans la brèche fossilifère (lire p.207) (Bruxelles, comm. orale). Il est situé à 1464 m d'altitude selon le LIDAR de Caruana.

3.1.2.7. Kromdraai A, B, C

Un hominine a été identifié par Broom sur du matériel découvert par Gert Terblanche en 1938 (Brain, 1981, 1993). C'est l'un des premiers sites à avoir été étudié. Il a livré à la fois des restes de *Paranthropus robustus* et d'*Australopithecus*. Des fouilles récentes ont été reprises par Braga *et al.* (2022) ; Braga et Moggi-Cecchi (2025).

- Membre 2 : 2.5 Ma (Braga *et al.*, 2017 ; Bruxelles *et al.*, 2017 ; 2018 ; Fourvel *et al.,* 2018) ;
- Kromdraai B, Membre 3 : 1.8 à 1.6 Ma (Thackeray *et al.*, 2002, Herries *et al.,* 2009).
- Kromdraai B, Membre 3 : 2 à <1.8 Ma (Herries *et al.*, 2019) qui se situe à 1472 m d'altitude (LIDAR de Caruana).

3.1.2.8. Plover's lake

Ce site a été étudié par Brophy (2004) et daté à 1 Ma par Herries *et al.* (2019). Il a livré des brèches anciennes (<1 Ma) mais aucun reste d'hominine n'y a encore été découvert (Hobbs *et al.*, 2011, Table 5, p.15). Cependant, des fossiles humains y ont été trouvés, datés entre 8900 à 6300 ans (Grine, 2016, Table 7.4, p.338).

3.1.2.9. Wonder cave

Cette cavité ne devrait pas figurer dans cette liste de grottes fossilifères, car aucun fossile n'y a été découvert. Cependant, étant une des rares grottes ouvertes au public (avec Sterkfontein et Motsetse) elle appartient à la liste officielle des cavités du *Cradle of Humankind*.

3.1.2.10. Drimolen

L'âge de ce gisement, découvert en 1992, est estimé par la faune entre 2,0 et 1.4 Ma (Keyser, 2000 ; Keyser *et al.*, 2000 ; Herries et Adams, 2013) et entre 2.7 Ma ; <2.6 à >1.7 Ma (Herries *et al.*, 2019). Ce gisement de surface a livré environ 75 spécimens de *Paranthropus robustus* et cinq d'*Homo sapiens*, ainsi que des outils en os et en corne.

3.1.2.11. Motsetse Cave (Motsetsi)

Cette grotte a fourni de nombreux fossiles paléontologiques, mais aucun d'hominine (Berger and Lacruz, 2003).

3.1.2.12. Malapa

En 2008, à Malapa de nombreux gisements fossilifères ont été découverts en surface. Dans l'un d'eux, des restes d'*Australopithecus sediba*, appartenant à au moins six individus, ont été mis au jour et datés de 1.98 Ma (Pickering *et al.*, 2011).

- 1.977 ± 0.002 Ma (Berger 2010 ; Dirks 2010 ; Pickering 2011a *in* Dirks et Berger, 2013) (Dirks *et al.*, 2016, p.23 ; Holt *et al.*, 2016) ;
- paléomagnétisme 1.95 à 1.78 Ma ou 1.98 Ma ;
- U/Pb 2.05 à 1.91 Ma ;
- faune 2.36 à 1.5 Ma ;
- une datation de l'encaissant donnerait 1964 ± 13 Ma à -476 ± 13 Ma (Makhubela *et al.*, 2017).

Il existe plusieurs estimations de la profondeur du gisement de surface de Malapa : 40 m (Dirks *et al.*, 2010), 7 m ou 16 m (Dirks *et al.*, 2016) qui ne fait aujourd'hui que quelques mètres de profondeur.

3.1.2.13. Gladysvale Cave

Également connu sous le nom d'Uitkomst, ce site a été découvert en 1936. Il a livré plusieurs milliers de restes de faunes mammifères du Pléistocène, y compris quelques dents d'hominidés *(Australopithecus africanus)*.

- Datation estimée entre 2.4 Ma et 0.6 Ma (Lacruz *et al.*, 2002 ; Herries, 2013a ; Herries *et al.*, 2019) ;
- 2.4 à 2.0 Ma ;
- 2.53 à 2.01 Ma (ESR) ;
- < 2.36 à <1.89 Ma (daté par la faune).

3.1.2.14. Haasgat

Ce gisement en surface n'a pas pourvu de fossiles d'hominines mais a livré 83 fossiles craniodentaires de *Papio angusticeps*, une espèce éteinte de la famille des *Cercopithecidae (Old World monkeys)* apparentée à *Papio ursinus* (Babouin chacma) (*in*

Hobbs *et al.*, 2011, Table 5, p.15) (Keyser, 1991 ; Keyser et Martini, 1991 ; Plug & Keyser, 1994 ; Adam, 2012 ; Leece *et al.*, 2016).

- datation entre 2.3 à 1.9 Ma (Herries *et al.*, 2019).

3.1.2.15. Lucheche

Des fossiles ont été découverts dans cette grotte (Adams et al., 2007, 2010) proche du site de Gondolin, au nord du *CoH*. Pour des raisons pratiques, nous n'avons pas indiqué ce site sur les cartes.

3.1.2.16. Gondolin (1992)

Ce site a été découvert en 1992 et a livré, en 1997 des spécimens de *Paranthropus robustus*, datés de 1.8 Ma (Herries, 2006 ; Herries *et al.*, 2019 ; Adam, 2008) (Adams *et al.*, 2005, 2006, 2007 ; Herries et Adams, 2013).

3.2. Identification des paléosurfaces dans le Cradle of Humankind

Les paysages africains, et plus particulièrement l'Afrique du Sud, présentent une succession de surfaces morphologiques planes et emboîtées, correspondant à des paléosurfaces d'érosion et à des cycles d'érosion. La surface la plus élevée est baptisée la **« Surface Africaine »**. (Wellington, 1929 ; King, 1967 ; Partridge et Maud 1987 (voir p.189), 1988, 2000, Fig.1-3 p.6 ; Tardy et Rouquin, 1998 ; Moore, 1999 ; Moore et Broderrickt, 2002 ; Moore *et al.*, 2009, 2012 ; Moore et Larkin, 2001 ; Burke et Gunnell, 2008, Partridge *et al.*, 2010 ; Linol et De Wit, 2016, Baby, 2017, Bruxelles, 2019).

Dans la région du *Cradle of Humankind,* la Surface Africaine correspond au grand plateau de Carletonville, le *Central Rand* de la Figure 144 (p.204), situé à **1560 m** d'altitude (Bruxelles, 2019). Il est recouvert de sols oranger rouge connus sous le nom de sols Hutton (*Hutton Soil)* et d'altérites. Nous les décrirons avec attention juste après (p.299).

Dans le *CoH*, ce plateau du *Central Rand* a été entaillé par les rivières Bloubank et Skeerpoort, qui ont érodé les sols *Hutton* et creusé les dolomies. Ces paléosurfaces correspondent à des surfaces d'érosion et d'altération, voire à des surfaces de karstification lorsqu'elles ont affecté les dolomies. Ces paléosurfaces s'incisent au fur et à mesure du temps et forment alors de grands paliers, comme le montre la coupe schématique (p.466).
Nous verrons que c'est au-dessous de cette Surface Africaine, au contact entre les formations carbonatées et les sols orangers rouges (qui sont nous le verrons des altérites), qu'a eu lieu la karstification par fantômisation des dolomies, une pré-karstification des dolomies (que nous avons décrit dans le Chapitre n°2) (Bruxelles, 2019, 2022). Les rivières ont creusé les couvertures d'altérites qui recouvrent les dolomies, ce qui a exhumé les fantômes de roche et mis à l'affleurement les premiers évidements et les premières grottes. Nous allons décrire en détail ce processus. C'est lui qui a formé les collines karstiques fossilifères du *CoH* (Figure 199, Figure 200 et Figure 165).
Il est convenu que la vallée de la Bloubank, située plus bas, vers 1450 m d'altitude, est l'expression de la **« Surface post-africaine »** (Wilkinson, 1973, p.3). Ici, nous analyserons les paysages du *CoH* afin de déterminer s'il existe une corrélation entre l'altitude des paléosurfaces, l'altitude des remplissages fossilifères karstiques et leurs âges.

Pendant une mission de trois mois en Afrique du Sud, nous avons parcouru ces paysages et ces paléosurfaces. Sur le terrain, il est aisé de voir les surfaces d'aplanissement et de les analyser sur des panoramas photographiques, mais il est plus difficile de faire des corrélations entre ces surfaces sur de grandes distances. Grâce au SIG et aux modèles numériques de terrain, il est plus facile de rendre compte de ces aplanissements, de les corréler et de réfléchir à leurs relations sur de grandes distances, couvrant ainsi toute l'étendue de l'Afrique australe. Pour cela, nous utilisons les outils des géographes et des géologues (profils topographiques, coupes géologiques, vue 2,5D) que nous réalisons avec les techniques de la géomatique, que nous avons détaillé dans le Chapitre n°1 (p.19). Nous utilisons les modèles numériques de terrain (MNT) pour réaliser des cartes hypsométriques, mesurer facilement les altitudes de n'importe quel point du MNT, réaliser des courbes de niveaux.

De cette façon, nous avons pu identifier les paléosurfaces de la région du *CoH*. Ensuite, nous avons prospecté chacune de ces surfaces pour identifier les formations sédimentaires conservées en place, dans le but d'essayer de dater ces surfaces et l'incision des paysages.

Un autre point important c'est que les cavités ont conservé des remplissages contemporains des surfaces topographiques antérieures, aujourd'hui démantelées et complètement érodées ou altérées par la surface topographique actuelle.

Nous avons cherché à comprendre le lien entre ces paléosurfaces, notamment la Surface Africaine, et la karstification par fantômisation des dolomies sous-jacentes. L'objectif est de trouver des critères morphologiques permettant d'identifier des karsts. Si ces grands replats ont effectivement une origine commune avec la présence de cavités, cela représenterait un enjeu majeur pour la recherche de nouveaux karsts en Afrique australe.

Nous verrons également que certains de ces aplanissements sur les dolomies sont en réalité d'anciens poljés ou des vallons fluviokarstiques (voir définition p.242) et qu'ils correspondent exactement aux formes karstiques que nous cherchons à identifier sur les reliefs et les MNT (Chapitre n°1).

3.2.1. Analyse des paysages du Cradle of Humankind par panorama photographique

Les paysages qui se développent sur les dolomies sont très plats comme le montrent les photographies ci-dessous (Figure 205 et Figure 204), à l'exception de la barre rocheuse en quartzite de Swartkop en arrière-plan, dans les sommets sont matérialisés par des triangles marrons. Ce relief est incisé par le cours d'eau de la Bloubank et a bloqué l'érosion de la vallée en amont du relief (knickpoint) comme nous le verrons (p.446).

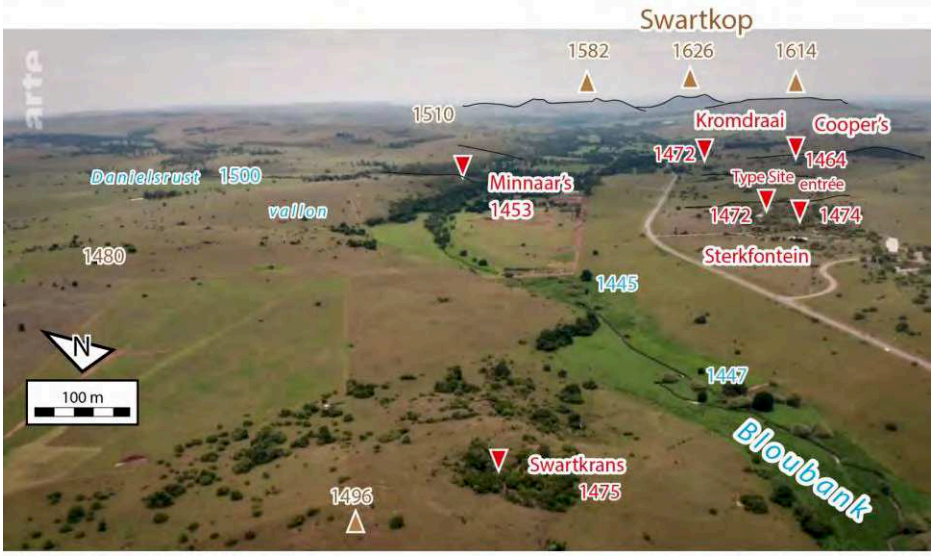


Figure 204 Amont de la Bloubank montrant les reliefs et les nombreux gisements fossilifères karstiques (Source : Arte).

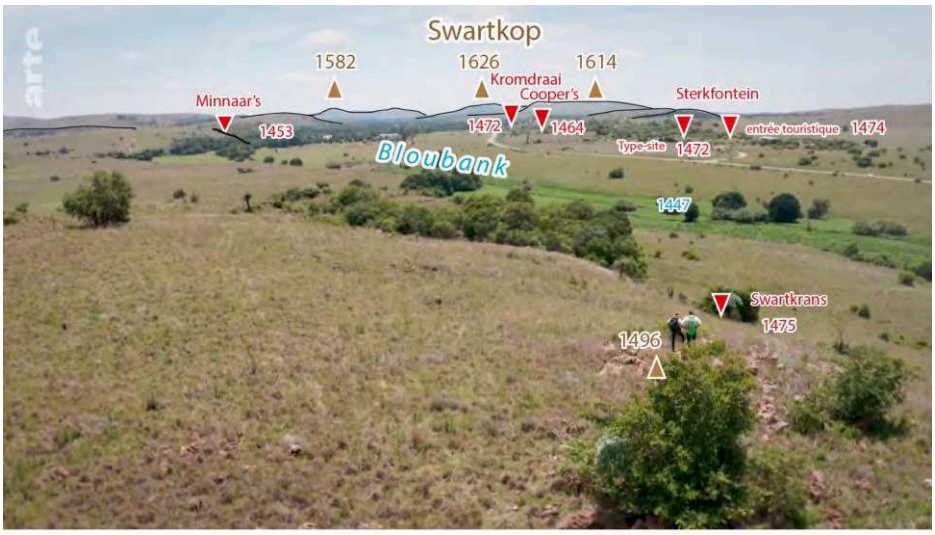


Figure 205 Depuis le sommet du gisement fossilifère de Swartkrans, en rive gauche. (Source : Arte).

En exagérant verticalement les reliefs du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai, dans la vallée de la Bloubank, au sud du *CoH*, nous mettons en évidence, sur la vue 2.5D supra (Figure 199), les morphologies karstiques et les gisements fossilifères, indiqués en rouge.
Le paysage montré par cette vue 2.5D est inscrit dans les dolomies, à l'exception du relief situé au premier plan, à droite, culminant à 1600 m d'altitude. De longs dykes plurikilométriques de roches volcaniques (dolérites) recoupent les dolomies et forment de faibles escarpements, comme la *Dolerite Hill*, plus résistantes à l'érosion.

Nous décrirons plus loin en détail (p.268) ces reliefs ainsi que le poljé* (voir définition p.243), circonscrit dans cette vallée (p.348).

Les cavités du *Cradle of Humankind* sont situées au sommet ou à mi-pente de petites collines carbonatées. On y trouve les grottes et les gisements fossilifères de Sterkfontein (1472 m d'altitude), Swartkrans (1475 m), Kromdraai (1472 m), *Cooper's* (1464 m), *Minnaar's* (1453 m), *Bolt's cave* (1503 m) et *Rising Star* (1469 m), etc. Les collines de Sterkfontein, Swartkrans, Kromdraai et Cooper's sont situées à une trentaine de mètres au-dessus du cours d'eau actuel, à la fois en rive gauche et en rive droite de la vallée de la Bloubank (Figure 206).
La présence de collines karstiques sera une récurrence dans les karsts que nous étudierons en Afrique australe, comme les *Aha Hills*, *Gcwihaba Hills* et *Koanaka Hills* au Botswana, que nous décrirons dans le Chapitre n°4 (p.473).
Le panorama suivant (Figure 206) depuis le sommet de la colline de Swartkrans (à 1496 m d'altitude), en rive gauche de la Bloubank, montre la vallée peu encaissée de la Bloubank où la rivière coule à 1445 m d'altitude.

On distingue, en rive droite :

- *le Type Site* de Sterkfontein à 1472 m, où a été trouvé le crâne de *Mrs Ples* (Granger *et al.*, 2022, Fig.1) ;
- l'entrée touristique de la grotte de Sterkfontein à 1474 m ;
- le gisement de *Cooper's* à 1464 m ;
- le gisement de Kromdraai à1472 m.

Et en rive gauche :

- le gisement de *Minnaar's* à 1453 m.

L'analyse des surfaces de ce panorama est réalisée ci-dessous (Figure 207).

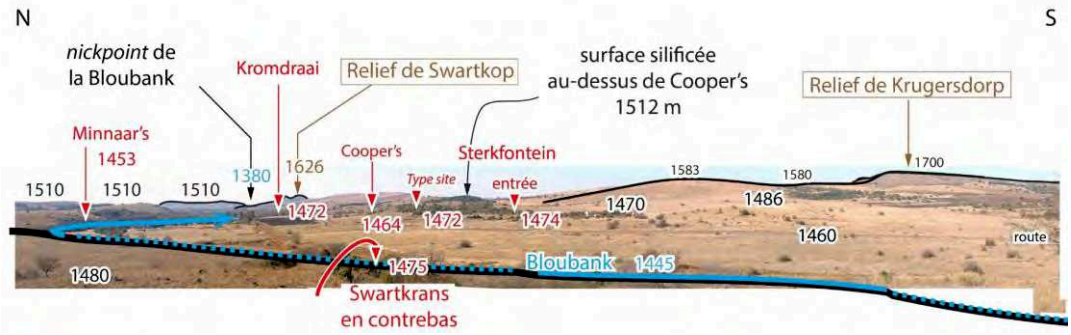


Figure 206 Vallée de la Bloubank depuis Swartkrans vers l'aval et le knickpoint de Swartkop.

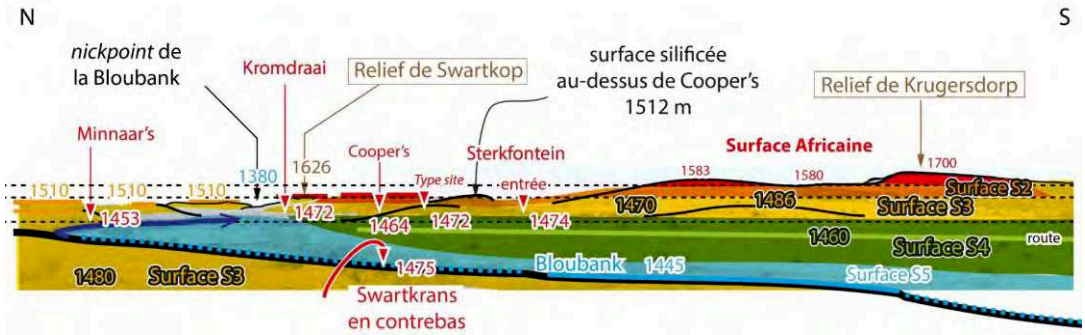


Figure 207 Analyse morphokarstique du panorama.

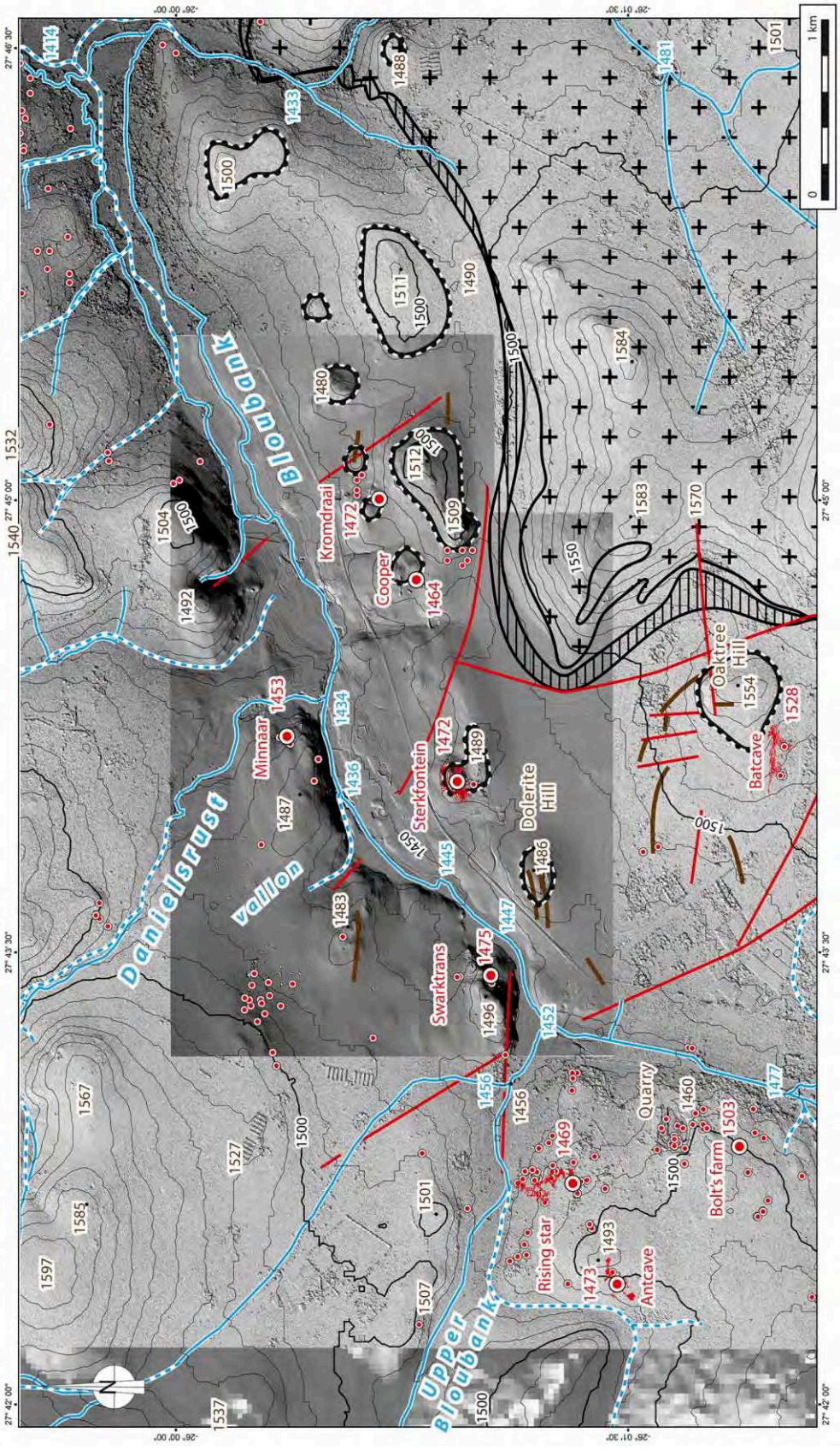


Figure 208 Carte du Cradle of Humankind (secteur de Sterkfontein) (MNT Caruana, MNS Pléiades Benjamin Lans et CDNGI).

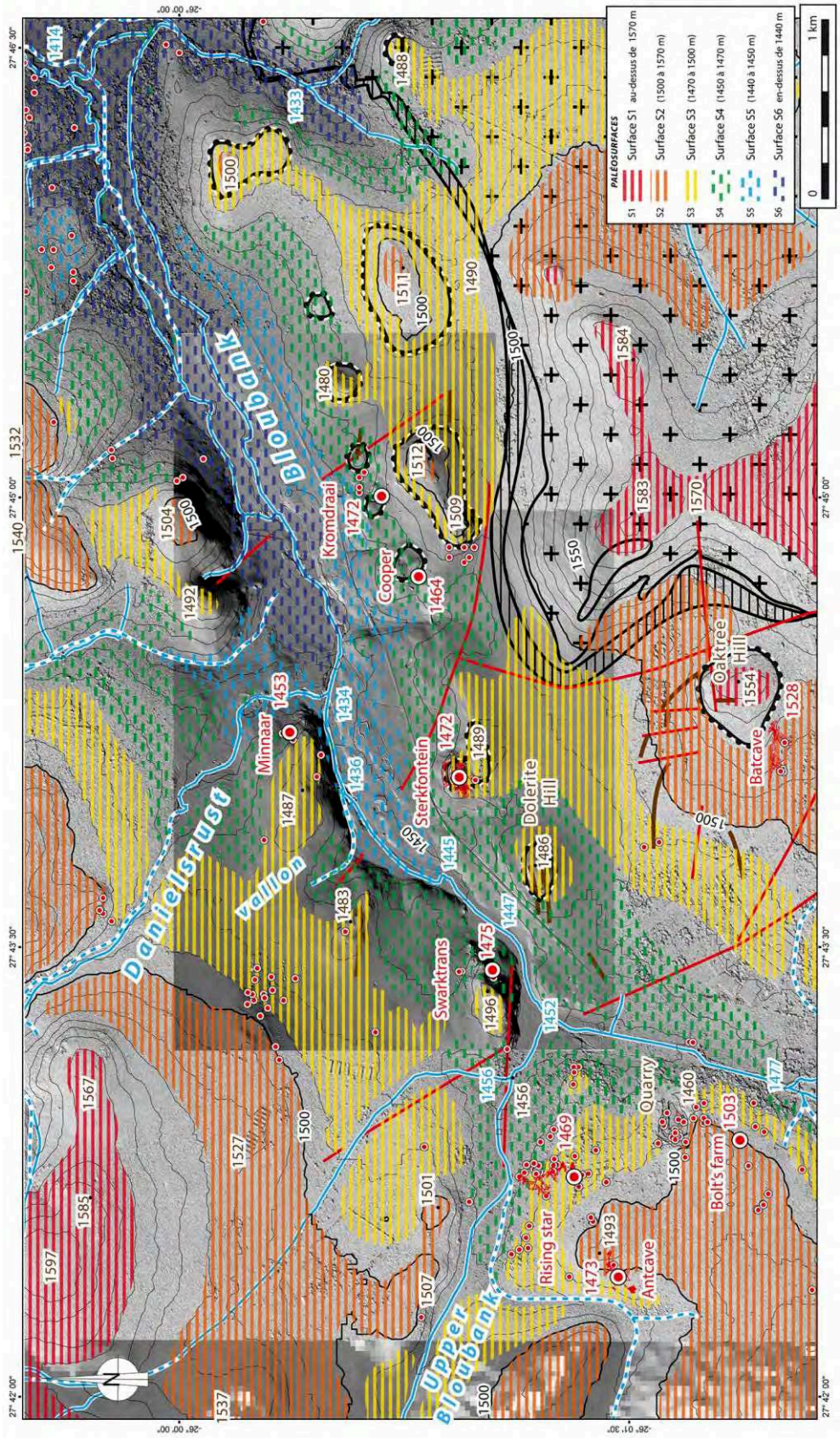


Figure 209 Cartographie des paléosurfaces du Cradle of Humankind (secteur de Sterkfontein) (MNT Carvana, MNS Pléiades Benjamin Lans et CDNGI).

Le panorama, ci-dessous, (Figure 210) de la vallée de la Bloubank visible depuis la grotte de Sterkfontein montre uniquement des carbonates, hormis le relief de Swartkop et les reliefs de la Rietgat Fm, soulignés en noir.

Plusieurs surfaces d'aplanissement sont distinguées (Figure 211) :

- la surface **S3** à 1470 m ;
- la surface **S2** à 1510 m ;
- la surface **S1** à 1600m.

La surface **S1** à 1600 m est érodée par un vallon à gauche (au NNO) avec la grotte de Nico 2 et la surface **S2** à 1510 m est érodée par le vallon *Daniëlsrust* où se situent les gisements de *Minnaar's*. La surface **S3** est érodée par la Bloubank, où se trouvent la grotte de Sterkfontein et les gisement de Kromdraai et de *Cooper's*.

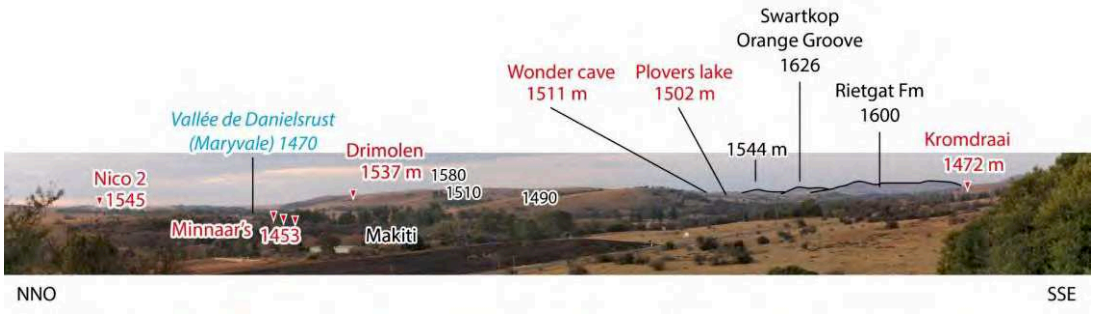


Figure 210 Panorama depuis la grotte de Sterkfontein.

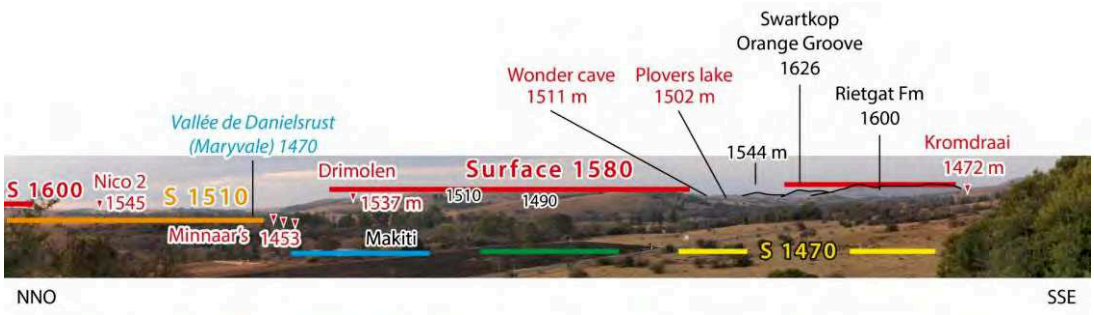


Figure 211 Analyse morphokarstique du panorama.

3.2.2. Statistiques des altitudes des paléosurfaces et statistiques sur l'altitude des entrées de grottes

Le classement des altitudes du MNT du bassin versant de la Bloubank (Figure 212) montre que la surface S2 qui s'étage de 1500 à 1570 m d'altitude est dominante, puis vient la surface S3, qui s'étage de 1470 à 1500 m. On repère la surface S1 qui s'étage de 1570 m jusqu'à 1600 m.

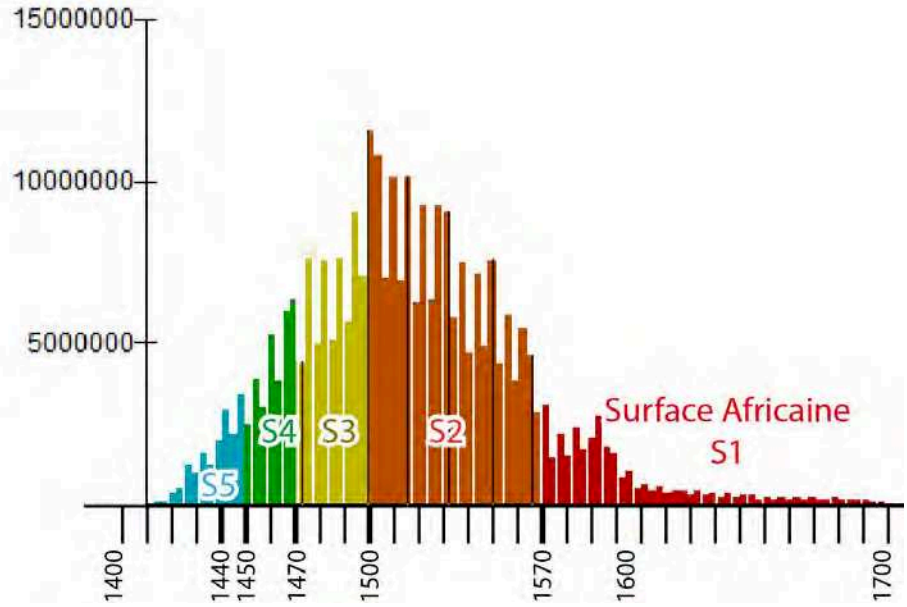


Figure 212 Classes des altitudes du MNT du bassin versant de la Bloubank. Les valeurs d'altitude sont représentées en abscisse et leur fréquence d'occurrence en ordonnée.

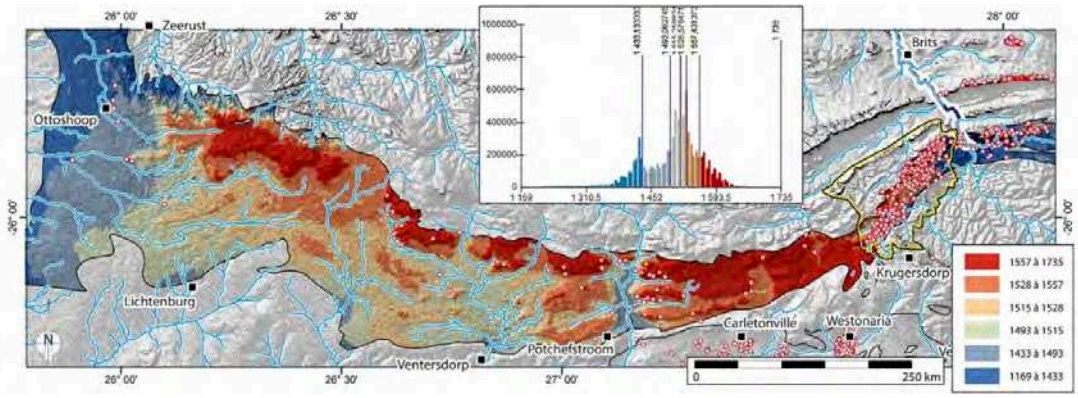


Figure 213 Identification des paléosurfaces des dolomies du West Rand Transvaal Basin *à l'ouest du CoH.*

Ces cartes ci-dessous (Figure 214 et Figure 215) indiquent les altitudes des entrées de grottes connues dans le sud du bassin du Transvaal et dans le *CoH*. Le « Pendant du Berceau » est indiqué (Alary et Bruxelles, 2017).

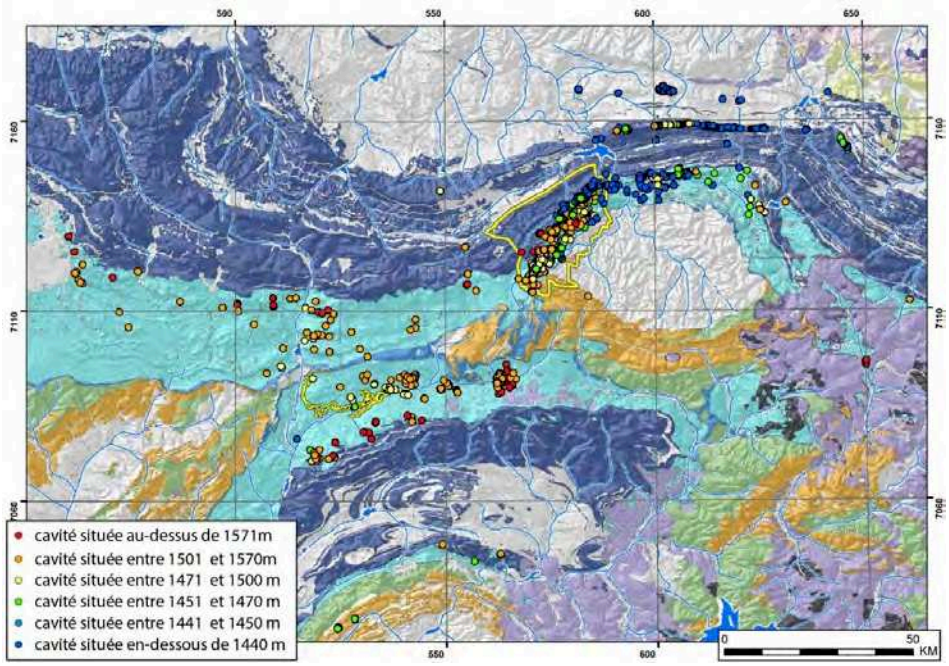


Figure 214 Classe des altitudes des entrées de grottes connues sur un fond géologique.

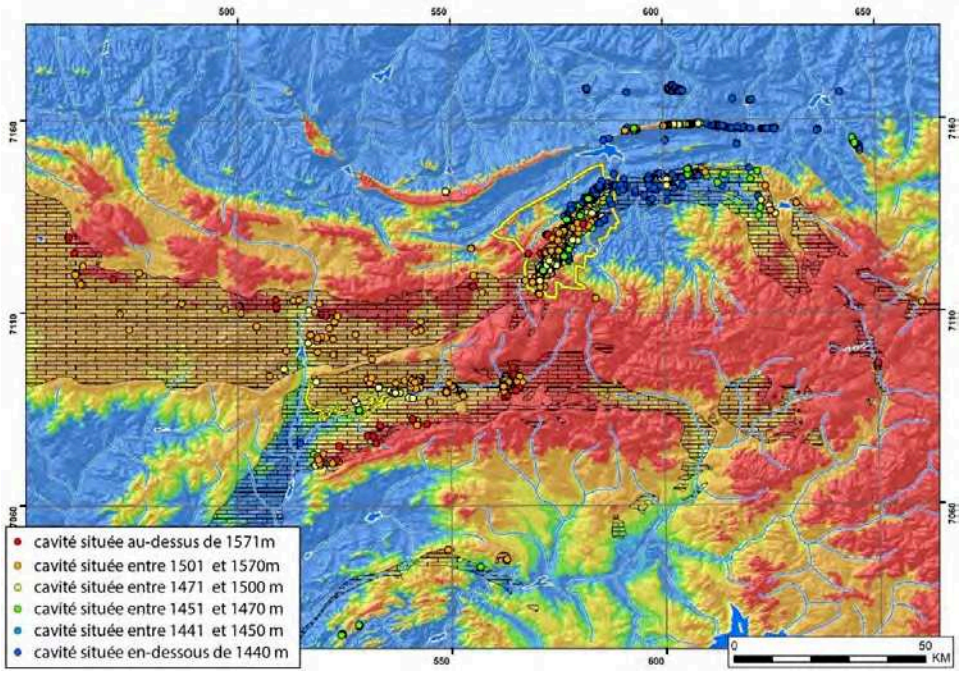


Figure 215 Classe des altitudes des entrées de grottes sur un fond hypsométrique.

3.2.3. Typologie des paléosurfaces

Les trois mois sur le terrain nous ont permis de faire la typologie des surfaces du *Cradle of Humankind*.

3.2.3.1. La Surface Africaine à 1560 m d'altitude sur le West Rand et le Central Rand

Le Plateau du Central Rand est recouvert par une couverture d'altérites, appelée *Hutton Soil* (Figure 236 p.307). Ils n'ont pas été cartographiés par les géologues car ils sont ubiquistes sur les dolomies et sont considérés comme des formations superficielles. Ils peuvent faire plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Ils sont très nettement visibles sur les images satellites car ils ont une couleur orange et rouge. Cependant, l'altération n'est pas allée jusqu'à produire des bauxites. Ces altérations correspondent à la Surface Africaine.

Définition de la Surface Africaine : c'est le nom donné aux vastes surfaces subhorizontales qui forment les plateaux africains et qui s'étendent sur plusieurs centaines de kilomètres formant le continent africain austral en dehors de tout phénomène de convergence tectonique. Elles sont l'expression de plusieurs surfaces d'érosion et d'altération (de karstification sur les formations carbonatées) qui se superposent dans le temps (Surface Gondwana, surface pré-Karoo, etc.). Dans le *CoH*, la S1 est située vers 1580 m selon Bruxelles (2017, 2019, 2022) et vers 1500 m selon Partridge (1973, Fig.4, p.78).

Les secteurs karstiques sont situés où la rivière Bloubank a érodé les dolomies et les altérites, comme le montre la Figure 338 ci-dessous.

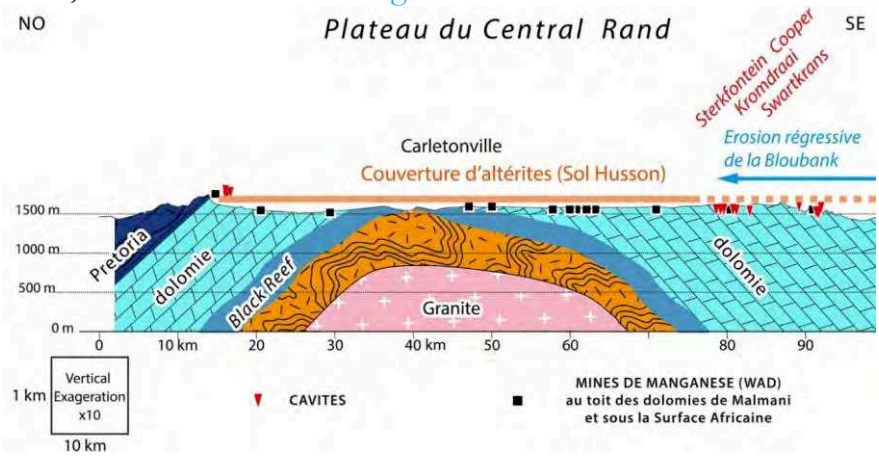


Figure 216 Profil vertical (exagéré dix fois) du plateau dolomitique du Central Rand. (Cf. Figure 349 et localisation du profil sur la Figure 348 p.394).

3.2.3.1.1. Observations sur le terrain : caractérisations sédimentaires des altérites du plateau

Nous allons présenter l'état d'altération des sols sur les dolomies du Plateau du Central Rand au sud ouest de la vallée de la Bloubank que nous avons observé sur le terrain et noté sur la carte ci-dessous (arrêt n°1 à 5 de la Figure 218).

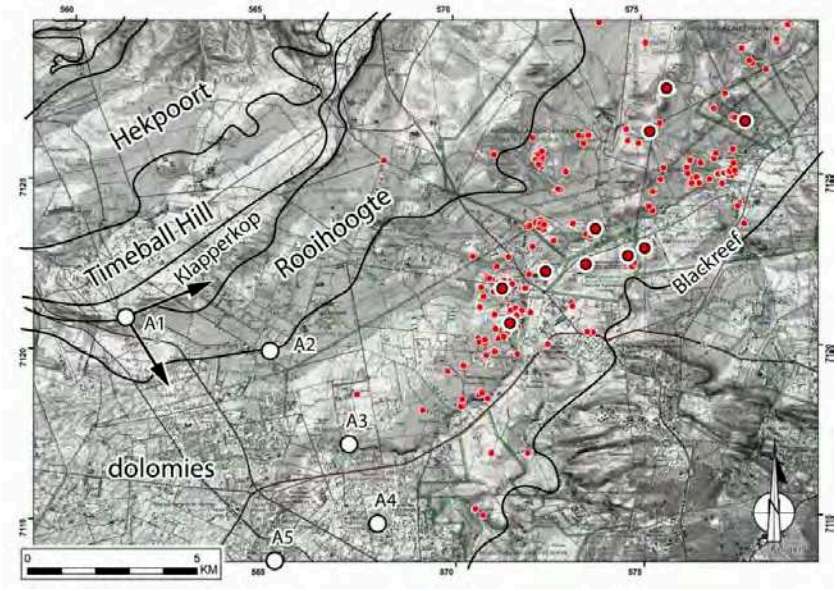


Figure 217 Observations géologiques (arrêt n°1 à 5) des couvertures des altérites sur les dolomies. Ces formations superficielles n'ont pas été cartographiées par les géologues.

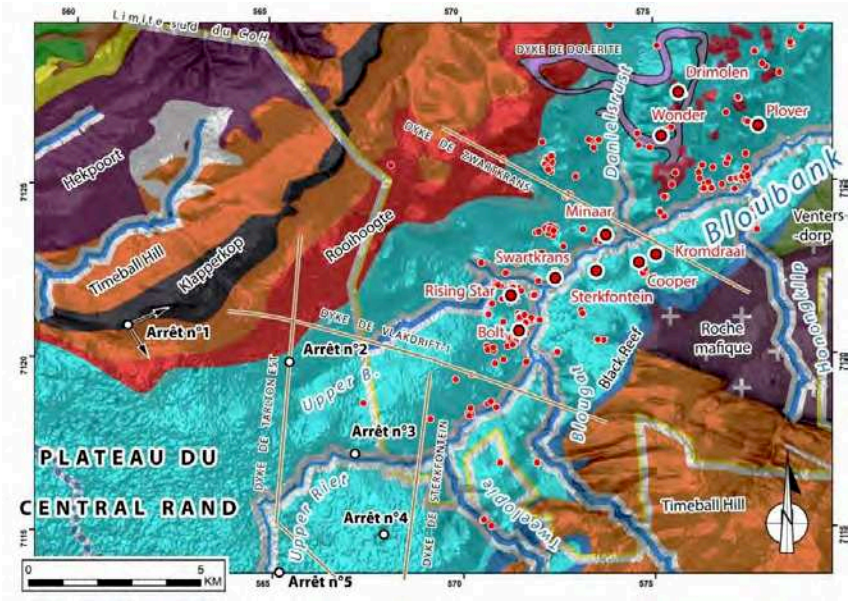


Figure 218 Localisation géologique des observations.

Les dolomies forment de vastes plateaux monotones, érodés et altérés, recouverts de sols orangés à rouges qui peuvent être épais, même s'il est rare de pouvoir les observer en coupe. Nos prospections sur le terrain ont permis d'identifier plusieurs affleurements intéressants, localisés sur les cartes précédentes (Figure 217 et Figure 218), notamment des coupes en amont de la rivière *Upper Riet* (Arrêt n°3 et 5 de la Figure 218). Présentons ces sols que nous trouvons à l'ouest du *CoH*, s'étendant entre 1550 et 1600 m d'altitude et caractérisant le *Central Rand* et le *Far West Rand.*

Les secteurs étudiés sont :

- Arrêt n°2 (noté A2 sur les cartes), à Ryedale (Tarlton) ;
- Arrêt n°3 (A3), au niveau de la *Upper Riet* au nord de *Marabeth Agricultural Holdings* (Valkdrift 163 IQ) ;
- Arrêt n°4 (A4), à *Eljeesee Agricultural Holdings* (Valkdrift 161 IQ).

L'arrêt n°2 (A2), à Ryedale, montre que les sols sont constitués de **conglomérats** pris dans une matrice argileuse rougeâtre qui est décrite comme des *shales* carbonatés par Catuneanu et Eriksson (2002) voire des *mudstone*s (boues carbonatées selon la classification de *Dunham*).

> *« Le mot anglais shale désigne toute roche sédimentaire litée à grain très fin, en général argileuse ou marneuse, et qui s'applique aussi à des schistes argileux ou à des argiles schisteuses (argilites) » (Foucault et Raoult, 2001).*

Ces conglomérats sont constitués de blocs présentant plusieurs lithologies. Il y a des dolomies (formation de Malmani où l'on trouve les grottes), des microgrès de la formation de la *Timeball hill*, des quartzites de la formation de *Klapperkop Quartzite* (photographiés sur la Figure 222). Ce qui correspond aux formations géologiques présentes dans le secteur tel que le montre la carte géologique (Figure 220).
Il s'agit d'une **couverture superficielle d'altération** produite par l'altération des roches sous-jacentes. Elle pourrait aussi contenir des fragments des autres types de roches présentes dans ce grand bassin versant (quartzites de Krugersdorp, grès du Karoo, etc.).
Cependant, ces altérites contiennent principalement une grande proportion de silex qui proviennent du démantèlement mécanique des niveaux de silex présents dans les dolomies de Malmani sous-jacentes, que nous décrirons p.384, **«** par concentration résiduelle sur les surfaces érodées à la suite d'une exposition subaérienne » (Button, 1968 ; Eriksson, 1971).
On utilise communément le terme d'**altérites** pour parler de ce type de formations superficielles. Nous ne parlerons pas de latérites car les processus d'altération et le climat n'ont pas été très puissants pour produire des latérites.
Ces altérites peuvent être comparées, par leur origine et leur contexte géologique, aux argiles à silex du Périgord par exemple (**Trauth *et al.*, 1985 ; Gourdon-Platel et Dubreuil, 1992 ; Platel et Gourdon-Platel, 2012** *in* Bruxelles, 2019, p.17).

1. Arrêt n°1

Cet arrêt est indiqué sur les cartes (Figure 217 et Figure 218).



Figure 219 Localisation des affleurements A1 et A2 sur la photographie aérienne. Les flèches noires indiquent l'orientation du panorama.

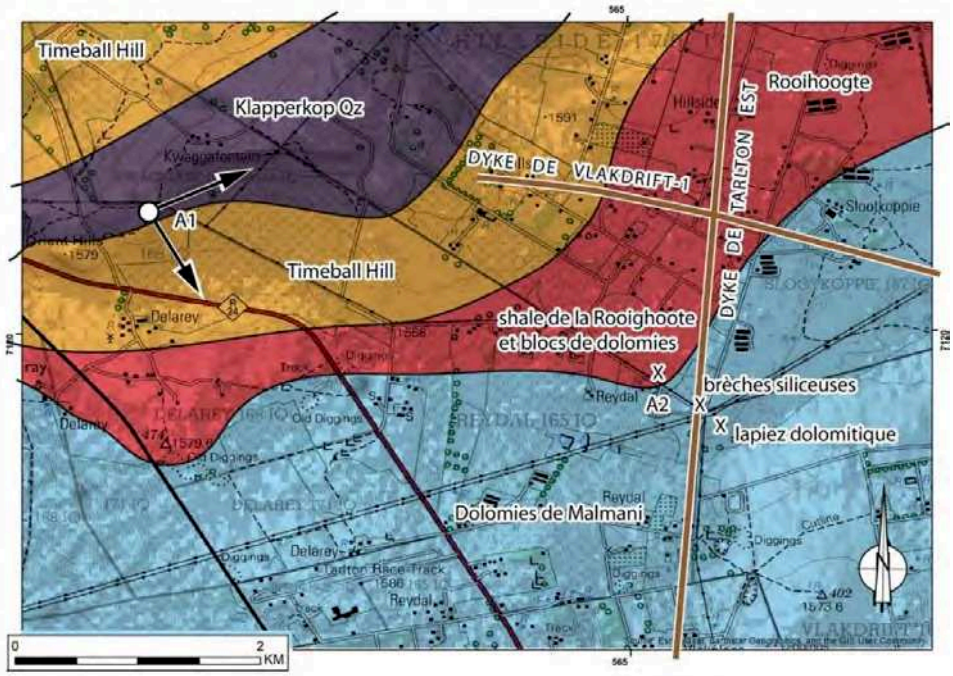


Figure 220 Localisation des affleurements A1 et A2 sur la carte géologique. Les flèches noires indiquent l'orientation du panorama.

2. Argiles à chailles de Tarlton (Arrêt n°2)

Les dolomies sont recouvertes d'une altérite superficielle (Figure 221) constituée de clastes issus du démantèlement des roches affleurantes dans le secteur (Figure 222) comme le montre la carte géologique ci-dessus (Figure 218).



Figure 221 Altérites remaniées sur le bord de la route.

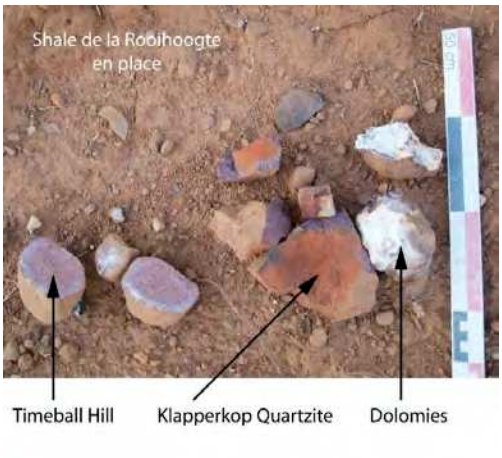


Figure 222 L'altérite est constituée de clastes de différentes lithologies.



Figure 223 Claste de dolomie enrobé par des oxydations de fer et de manganèse.



Figure 224 Claste de dolomie blanche et poreuse (décalcifiée? désilicifiée?). Pas de cortex d'altération. Les dolomies ont été démantelées et broyées par l'érosion.



Figure 225 Clastes à angles aigus, peu transportés, constitués majoritairement de dolomies blanches, pris dans l'altérite (shale de la Rooihoogte?).



Figure 226 Microgrès (formation Timeball Hill) arrondi en raison de son évolution au sein de l'altérite.

En poursuivant vers le sud-est, les altérites ont été entièrement érodées. On passe alors sous la Surface Africaine et l'on rencontre un lapiaz dolomitique sur un versant situé à 1560 m d'altitude. À cet endroit, les dolomies apparaissent non altérées (Figure 227). (Coordonnées : -26.043612334873863, 27.655154181145164).



Figure 227 Détail sur les dolomies non altérées.



Figure 228 Lapiaz dolomitique sur le versant.

3. Formation de Rooihoogte au niveau de l'Upper Riet (Arrêt n°3)

Au sud de l'aéroport de Ryedale, on trouve une couverture d'altérite à 1580 m d'altitude. Le long de la *Upper Riet river*, au nord de *Marabeth Agricultural Holdings* (Valkdrift 163 IQ), une coupe permet d'observer la formation de Rooihoogte (Figure 229 à Figure 231), notée A3 sur la Figure 217 et la Figure 218.
(-26.063588 ; 27.669126, 1550m; https://maps.app.goo.gl/qJHY6Lch2si6ZuMj9).



Figure 229 Coupe stratigraphique de la formation de Rooihoogte incisée par la rivière Upper Riet.



Figure 231 Dans la formation de Rooihoogte, on trouve un conduit karstique d'un diamètre d'un mètre rempli d'un ciment oxydé rougeâtre et délimité par un enduit noir qui pourrait être du manganèse.



Figure 230 Conglomérats de la formation de Rooihoogte.



Figure 232 Interbanc de chert préservé dans la formation de Rooihoogte.

4. Hutton soil et croûtes de fer à Eljeese (Arrêt n°4)

Au sud du secteur précédent, vers *Eljeesee Agricultural Holdings* (Valkdrift 161 IQ), arrêt n°4 sur la Figure 218 on trouve la formation de Rooihoogte coupée par une grande tranchée de plus de 500 m de longueur, indiquée A4 sur la Figure 217 et la Figure 218 et indiquée sur les cartes suivantes (Figure 233 et Figure 234).

(-26.090173, 27.678146; https://maps.app.goo.gl/NuLqSGqZTPniykbZ7).

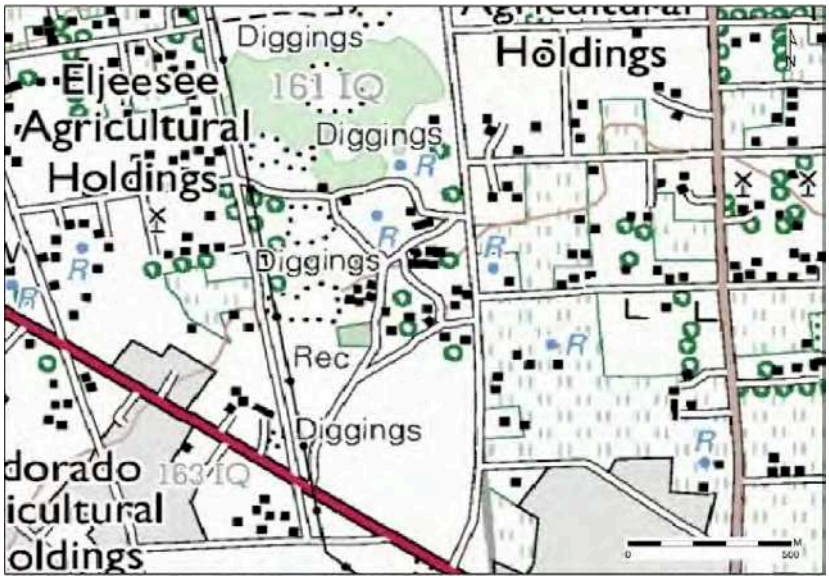


Figure 233 Carte topographique indiquant d'anciennes exploitations : "diggings".

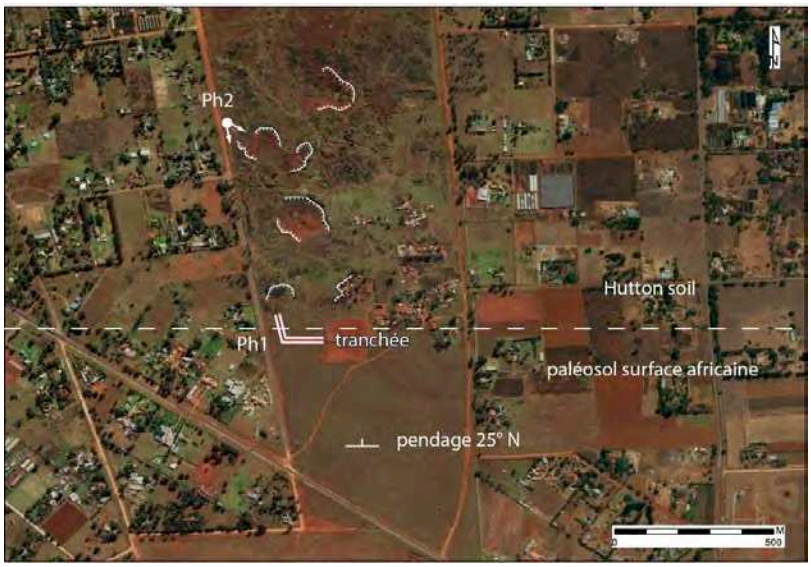


Figure 234 Localisation de la tranchée observée sur une image satellite. Nous remarquons qu'une couverture sédimentaire orange recouvre les dolomies.

À *Eljeesee Agricultural Holdings* (Valkdrift 161 IQ) on observe la Surface Africaine caractérisée par des formations altérées au sommet des dolomies à 1595 m d'altitude.
(-26.084535 ; 27.677524 ; https://maps.app.goo.gl/EW72uf3LnBYtitk87).
La stratigraphie suivante est observée au niveau de tranchées (Figure 238 à Figure 240) et de dépressions anthropiques, de haut en bas :

- sols Hutton (*Hutton soils*) (Figure 237) (Marshall, 2009 ; Boshoff, 2019, p.85) ;
- altérites, contenant des blocs de brèches fortement minéralisés ;
- croûtes minéralisées et pisolites ;
- toit des dolomies.



Figure 235 Paysage du secteur de Valkdrift 161 IQ, constituée de sols Hutton en surface, puis d'altérites et enfin des dolomies de Malmani.

Dans les dépressions anthropiques, au nord, les croûtes ne sont plus trouvées, on est passé au-dessus stratigraphiquement (voir le trait blanc en pointillé sur l'image satellite et le pendage des croûtes sur la Figure 234). Ici, ce sont des éléments fins, sans stratigraphie et stratifications. Cela ressemble à ce qui est appelé ***Hutton Soils*** et qui sont décrits au niveau de la grotte d'Armageddon.

> *« La raison pour laquelle ces grottes n'ont pas été découvertes ou ouvertes à la surface peut être trouvée dans le fait que le régolithe de terra rossa sus-jacent est épais, comprenant une mince couverture de sols récents suivis des sols Hutton (éoliens), du produit d'altération de surface post-africain 2 (alluvions) et des schistes de la formation Timeball Hill du groupe de Pretoria jusqu'à une profondeur de + ou - 50 m avant de rencontrer les dolomies du bassin de Malmani. » (Boshoff, 2019, p.166).*



Figure 236 Hutton soil.

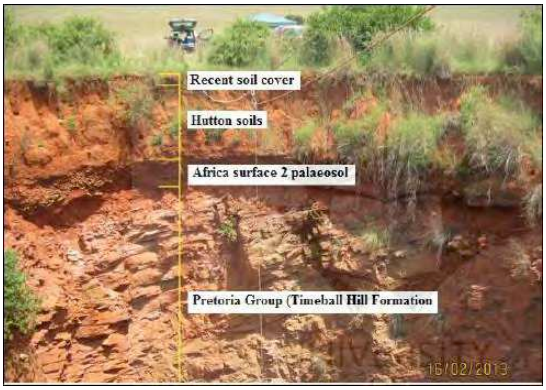


Figure 237 Séquence stratigraphique du puits d'entrée de la grotte d'Armaggedon selon Boshoff, 2019, p.85.



Figure 238 Tranchée observée près de la ligne de haute tension.

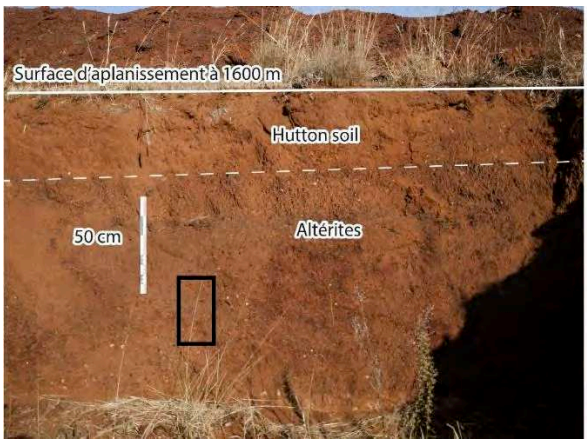


Figure 239 Photographie et analyse de la tranchée d'Eljeesee Agricultural Holdings montrant la surface d'aplanissement à 1600 m, une couverture sédimentaire altérée composée au sommet par les sols Hutton puis par des altérites. Le cadre noir correspond à la photographie de droite.

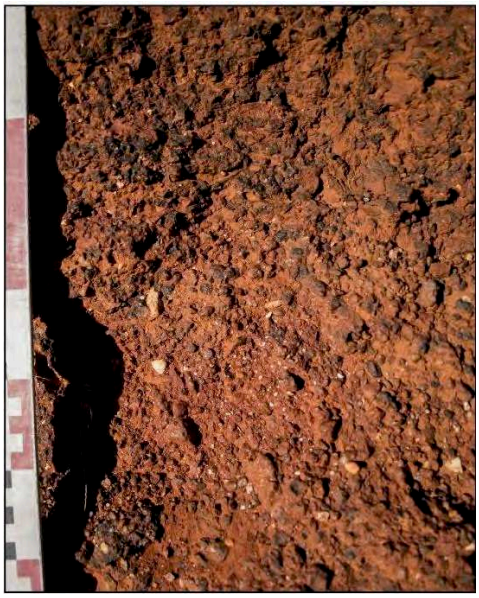


Figure 240 Altérite remaniée (pisolithes de fer, roulés, de taille homogène et cimentés) qui montre un certain pendage, de gros blocs de substrat emballés et des petits gravillons roulés de quartzite blanc.



Figure 241 Croûte de fer caractéristique du front d'altération.



Figure 242 Agglomérats de pisolites formant la croûte de fer, caractérisant le front d'altération.



Figure 243 Front d'altération entre l'altération et l'encaissant. Il est caractérisé par des minéralisations.



Figure 244 Encaissant visible sous la saprolite.



Figure 245 Encaissant dolomitique altéré au niveau du front d'altération.



Figure 246 Dolomie moins altérée sous le front d'altération.



Figure 247 Plusieurs blocs de brèches minéralisés extraits de l'altérite lors de la réalisation des tranchées.



Figure 248 Bloc de brèche emballé dans l'altérite.

5. Hutton soil et croûtes de fer à Steilte (Arrêt n°5)

À l'altitude de 1590 m, on rencontre une couverture altéritique rougeâtre minéralisée. C'est l'arrêt n°5 sur la Figure 218.
(https://maps.app.goo.gl/t8Xzij7h6zJsX4Mb8; -26.092815 ; 27.653438)
https://maps.app.goo.gl/jb3nrjhyzy7UzwJB7



Figure 249 Sol altéré.



Figure 250 Sol altéré.



Figure 251 Sol latéritique.



Figure 252 Le sol est constitué d'une accumulation de blocs de fer.



Figure 253 Minéralisation caractérisant le front d'altération.



Figure 254 Croûte de fer.

3.2.3.1.2. Âges des altérites sur la Surface Africaine et âges de la karstification des dolomies dans le CoH

1. Remarque sur la formation Rooihoogte

Seule une partie des altérites a été cartographiée sur les cartes antérieures – notamment la formation de Diepkloof, le membre de Bevets et le membre de Leeuwenkloof – probablement parce qu'il s'agit des unités les plus indurées, les plus silicifiées (quartzites) et les plus bréchifiées (comme la *Chert Breccia* ou le *Giant Chert*). Ces unités ont été regroupées sous le nom de **« formation Rooihoogte »** (voir modèle de Catuneanu et Eriksson (2002) que nous avons décrit page 259) et des **« sols Hutton »**. Par exemple, les altérites rencontrées sur le terrain ne sont pas cartographiées sur les cartes consultées (Figure 218 p.299), bien qu'elles semblent correspondre « aux *shales* de la Rooihoogte » ou au *mudstone*. En effet, cela dépend de l'échelle à laquelle les cartes ont été réalisées, et il était probablement plus pertinent de faire apparaître sur les cartes la présence des dolomies en sub-surface, par exemple pour des forages à des fins d'approvisionnement en eau, plutôt que d'y faire apparaître des altérites. Maintenant que la karstification par crypto-altération et fantômisation est bien comprise (p.214), il serait pertinent de recartographier avec précision ces différents types d'altérites.

2. Remarque sur l'âge pré-Pretoria de la formation Rooihoogte et sur l'âge pré-Pretoria de la karstification des dolomies du CoH

Une autre information importante est fournie par Murszewski *et al.* (2019) *:*

> *« La formation Rooihoogte se compose de mudstones et d'une unité d'arénite supérieure. Ce matériau, comme le fer des formations de Timeball Hill et de Strubenkop, a été identifié dans les paléokarsts de Sterkfontein et de Rising Star et a permis d'obtenir une datation 40Ar/39Ar ».*

Ces datations ont donné des âges très anciens : 1597 Ma, 1960 Ma et 2081 Ma (Makhubela *et al.*, 2017 in Murszewski *et al.*, 2019), correspondant à des âges anté-Waterberg et post-Pretoria, comme indiqué sur le log synthétique du Bassin du Transvaal (p.205).
Dirks et Berger (2013 : pp.113) s'appuient sur ces dates pour expliquer que la formation Rooihoogte s'est probablement développée en réponse à l'extension du paléo-plateau et à l'ouverture du bassin dans lequel les sédiments du groupe de Pretoria ont ensuite été déposés. C'est-à-dire antérieurement à l'âge du groupe de Pretoria de 2432 Ma (log p.205 et dates en annexe p. 1159).
Il est vrai que la plupart des auteurs (Button, 1973, 1986 ; Obbes, 2000 ; Eriksson et al., 2001 ; Catuneanu et Eriksson, 2002; Ingram et van Tonder, 2011) considèrent depuis longtemps que les brèches qui recouvrent les dolomies (formation Rooihoogte) et la karstification des dolomies du C*oH* se sont produites **avant** les dépôts du groupe de Pretoria, avant 2432 Ma et ils précisent pendant un hiatus de 80 Ma (Eriksson et Reczko,1995).

> *« Bien qu'elle ne fasse pas partie du groupe géologique des dolomies de Malmani, la formation basale de la Rooihoogte, qui appartient au groupe de Pretoria, recouvre en discordance les dolomies de Malmani et est communément évoquée lors de la karstification des dolomies ». (Eriksson, 1998).*

3. Âge de la karstification des dolomies dans le CoH

Nous ne savons pas exactement quel type de remplissage karstique a été prélevé pour la datation dans la grotte de Rising Star, mais nous pensons que ces altérations et la karstification du *CoH* sont plus récentes et liées à la mise en place de la **Surface Africaine** (Bruxelles, 2019), datée du Crétacé par Baby (2017) à partir de la stratigraphie séquentielle des marges *offshores* du Canal du Mozambique.

De plus, des datations ($^{40}Ar/^{39}Ar$) sur des croûtes minéralisées riches en manganèse (cryptomélane, manganomélane, todorokites), situées à l'interface des dolomies crypto-altérées (à pinacles) et des altérites, ont fourni des âges d'environ **12 à 15 Ma** (Van Niekerk *et al.*, 1999; Pack *et al.* 2000) et de **70 M**a (Pharoe *et al.* 2020) (Gutzmer *et al.*, 2012) (Figure 1136 p.1158). Ces âges correspondraient alors aux phases de karstification des dolomies et des grottes du *CoH* (Bruxelles, comm. orale).

4. Informations apportées par les diamants alluviaux

Les cartes suivantes (Figure 255 à Figure 257) du *Central Rand, du CoH* et du *Farwest Rand*, que nous avons produites et synthétisées, s'appuient sur des méthodes géomatiques modernes de représentation des reliefs, comme la méthode RRIM décrite (p.76). Ces cartes enrichissent nos connaissances sur la Surface Africaine qui est en partie érodée dans le *CoH*.
Cette surface, recouverte d'altérites que nous venons de décrire, présente également d'autres particularités morphologiques et sédimentaires qui nous permettent de mieux la comprendre et d'affiner sa datation.
Cette surface est notamment caractérisée par d'anciens remplissages alluviaux (traits orange des cartes suivantes), aujourd'hui en inversion de relief, appelés *« runs »*.
Il existe trois types de gisements :

- des dépôts alluviaux ou glaciaires, sous forme de crêtes, appelés « runs » ;
- dans des vallées fluviatiles ou glaciaires ;
- dans du karst.

Ces remplissages sont riches en diamants alluviaux (Helgren, 1979 ; **Stratten, 1979** *in* Lageat, 1989, Fig.89, p.316 ; Marshall et Norton, 2009) qui proviendraient de kimberlites **crétacées** situées plus au nord et démantelées par d'anciennes rivières, avant d'être transportées jusqu'ici. La présence de ces dépôts indique que des rivières ont circulé sur ces plateaux après le Crétacé. La hauteur du niveau de base à cette époque peut donc être calculée.
Les mesures sur les MNT (JAXA et SRTM3V2) donnent autour de **1560 m** d'altitude à 45 km à l'ouest du *CoH*, soit exactement l'altitude de la Surface Africaine dans le *CoH* (voir la synthèse Figure 425 p.466).
Les altérites et les anciens dépôts sédimentaires (que nous venons de décrire) recouvrent les dolomies, qui sont en-dessous très fortement fantômisées. Lorsque les rivières érodent les altérites et atteignent les dolomies fantômisées, les fantômes sont rapidement évacués, ce qui conduit à la formation de grottes. La spéléogenèse par fantômisation et le niveau de base sont donc très étroitement liés. Nous décrirons ces mécanismes plus loin (p.432). Ceci confirmerait donc que les grottes du CoH seraient post-Crétacé et non post-Pretoria. Ces cavités sont ensuite des pièges où s'accumulent sédiments et fossiles, qui deviennent ensuite des brèches fossilifères, comme le montrent les schémas (p.422).

Remarques :

Sur les cartes ci-dessous, nous avons indiqué le "Pendant du Berceau" qui correspond à un secteur où les dolomies ont les mêmes altitudes que dans le CoH et où pourraient se trouver des grottes du même âge (Alary, 2017, sous la direction de Bruxelles).

En dehors des gisements situés sur les dolomies de Malmani, on trouve des diamants au sein de la formation glaciaire de Dwyka où ils sont mélangés à des agates. Ces dernières proviennent du démantèlement (1) de la formation volcanique d'Hekpoort ou (2) de la formation volcanique de *Bushy Bend Chalcedony and Carnelians* située stratigraphiquement au-dessus de la Rooihoogte (De Wit, 2016) et appartenant à la formation de Timeball Hill (Lenhardt *et al.*, 2020, p.656).
Des graviers contenant des diamants sont trouvés dans des « *runs* » sur les dolomies de Malmani, ce sont des élévations de 5 à 10 m de hauteur, qui font jusqu'à 35 m de large et parfois 35 km de longueur (*Bakerville Run, Vlakplaats Run, Manana Run, Nooitgedacht Run*, etc.) (De Wit, 2016a, Table 3, p.595). Ces placers ont été mis en inversion de relief par l'érosion.

Certains graviers diamantifères ont aussi été piégés dans le karst (Keyser et Martini, 1989 ; à Ventersdorp (Marshall et Norton, 2009), comme à *Pienaar's Pothole* (De Wit, 2016a, Fig.9, p.597). Nous avons déjà présenté le modèle de karstification développé par De Wit (1981) à partir de l'étude de ces gisements.
D'autres sont conservés dans d'anciennes vallées *(Mooi rivier valley, Harts valley*) fluviatiles (Du Toit, 1951, Cooks, 1968 *in* Martini et Kavalieris, 1976, p.233 ; Lageat, 1989) ou glaciaires (Visser, 1995) imprimées sur les dolomies de Malmani, au sud-ouest du « Berceau de l'Humanité » et que nos analyses de MNT révèlent parfaitement.
Les graviers contiennent de nombreux clastes de silex provenant du démantèlement des interbancs des dolomies de Malmani et peu de clastes de dolomies. On trouve aussi des clastes de quartzites de Pretoria et des éléments altérés de la formation Ecca.
Les diamants proviendraient de l'érosion de kimberlites datées de 500 Ma (datation $^{40}Ar/^{39}Ar$ sur des inclusions de clinopyroxène) (Philipps *et al.*, 1998, 2009) et érodées postérieurement soit par d'anciens fleuves pré-Karoo comme la paléo-Vaal, soit par le rabotage des glaciers protérozoïques (tillites de Dwyka) (Visser, 1995) ou bien ils se sont accumulés sur les paléo-rivages de la mer Ecca (localisés à 1350 m d'altitude à *Rk mine* (Comm. orale De Wit) où ils se seraient alors mélangés à des minéraux lourds. Effectivement, on distingue plusieurs types de gisement de graviers diamantifères et on observe une usure relative des surfaces des diamants montrant un transport plus ou moins long.

Quelle que soit la raison pour laquelle les sédiments circulaient en surface (fleuve ou glacier) nous pensons que ces graviers diamantifères ont pu être soutirés dans le karst à cause de la fantômisation.

Pour Marshall et Norton (2009, p.117) les remplissages karstiques à graviers et diamants correspondraient à la formation de Waterberg.

5. Cartographies du Central Rand et du Farwest Rand

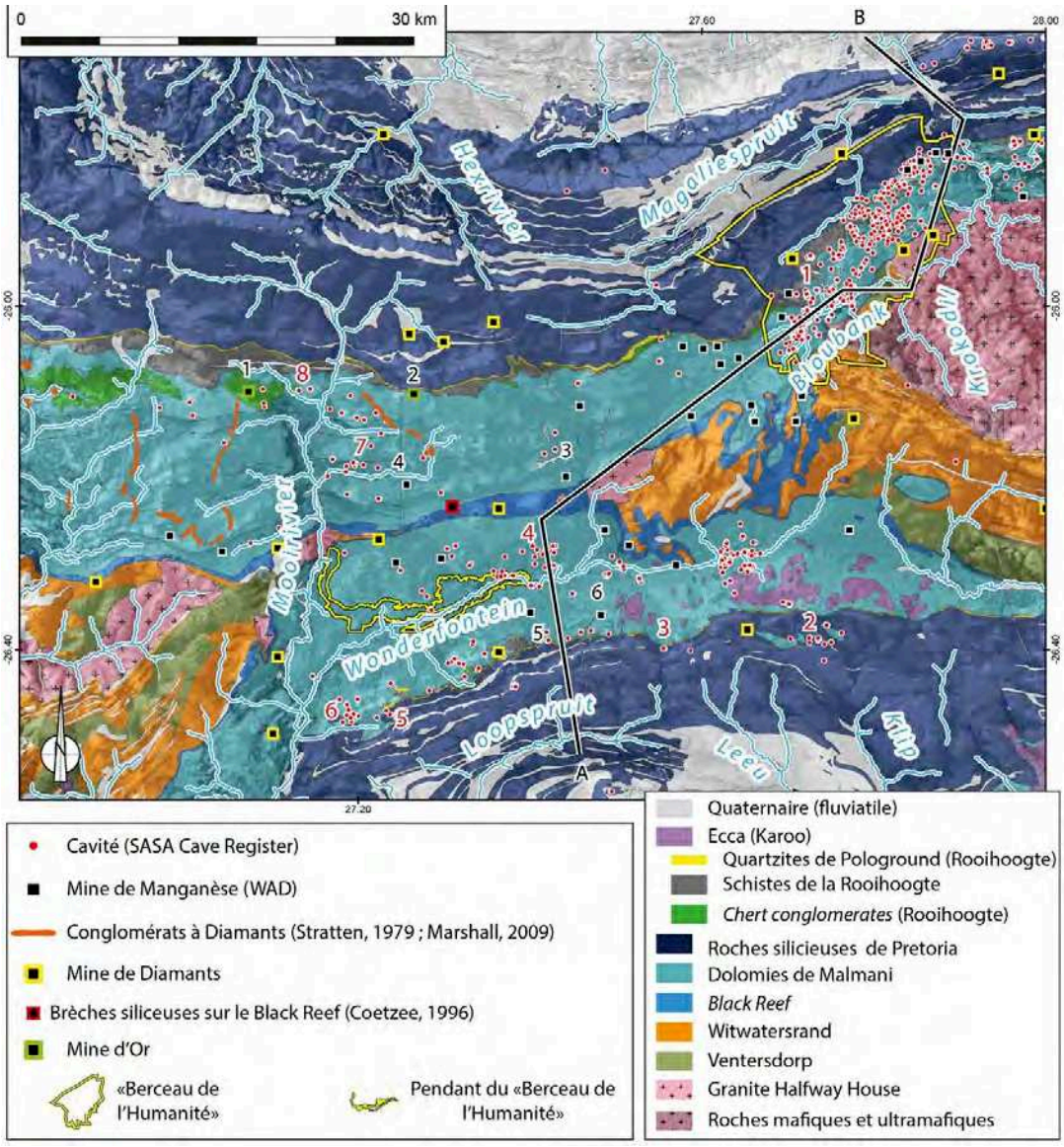


Figure 255 Carte géologique du Central Rand, du CoH et du Farwest Rand.

Noms des cavités majeures (et numéro d'inventaire SASA Cave Register) :

1 : Sterkfontein, Swartkrans, *Cooper's*, Kromdraai, etc.

2 : Armageddon cave (n°725) et Stinkhole cave (n°764)

3 : Apocalype pothole

4 : Limequarry cave (Goldfields)

5 : Hut caves (Deelkraal / Lepalong caves)

6 : Jaws cave (n°), Chaos cave (n°65)

7 : Skilpad cave (n°97)

8 : Porcupine - Boons cave (n°51) et Owl cave (n°218)

Numéro des mines majeures :

1 : Krugersdal (diamants)

2 : Goedgedacht (diamants)

3 : Houtkoppies ;

4 : Ryedale ;

5 : General nice Manganese ;

6 : Wes Wits

Cette représentation pertinente des reliefs est effectuée à l'aide de la méthode RRIM, que nous avons décrite (p.76).

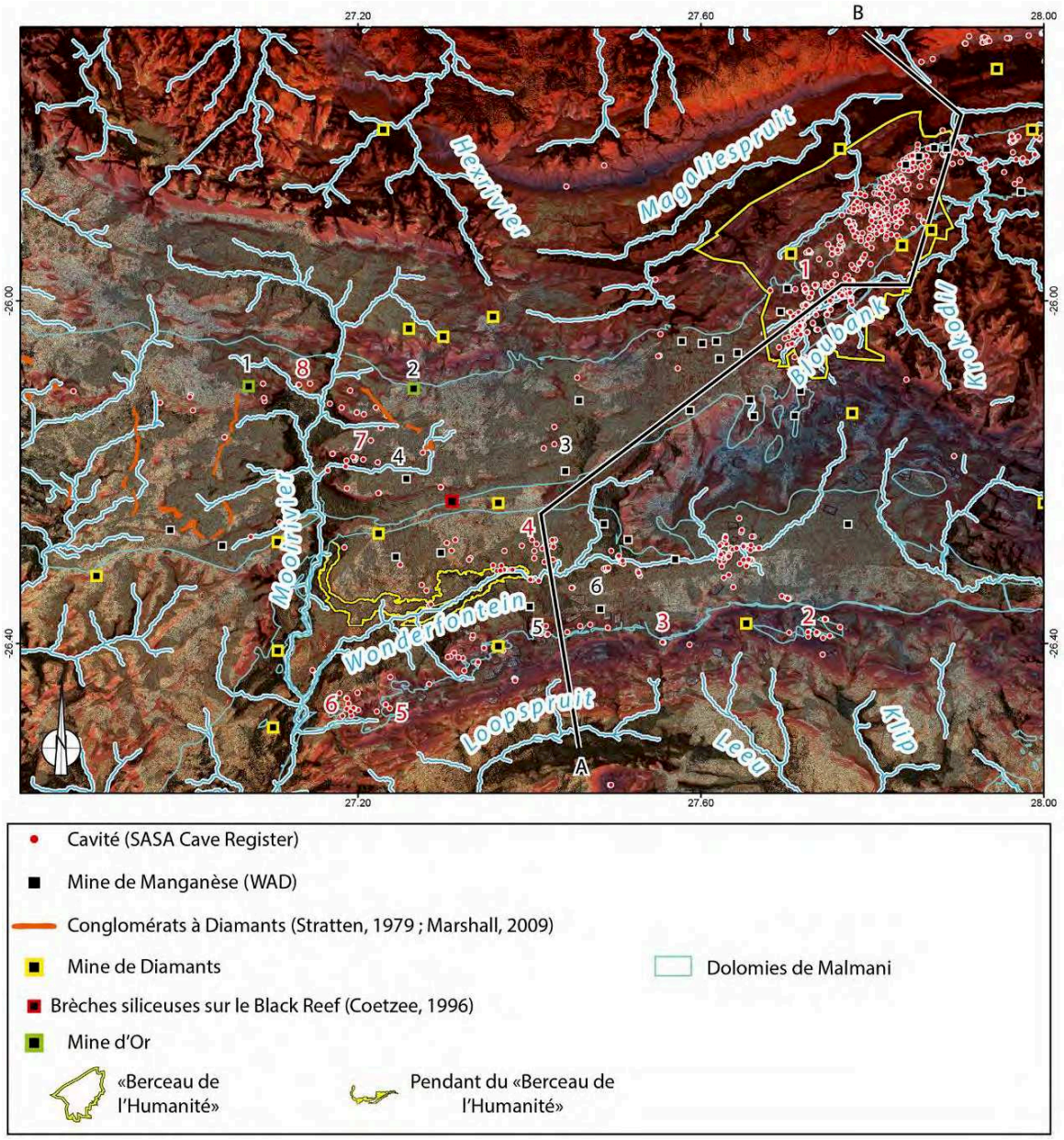


Figure 256 Visualisation des reliefs avec la méthode RRIM.

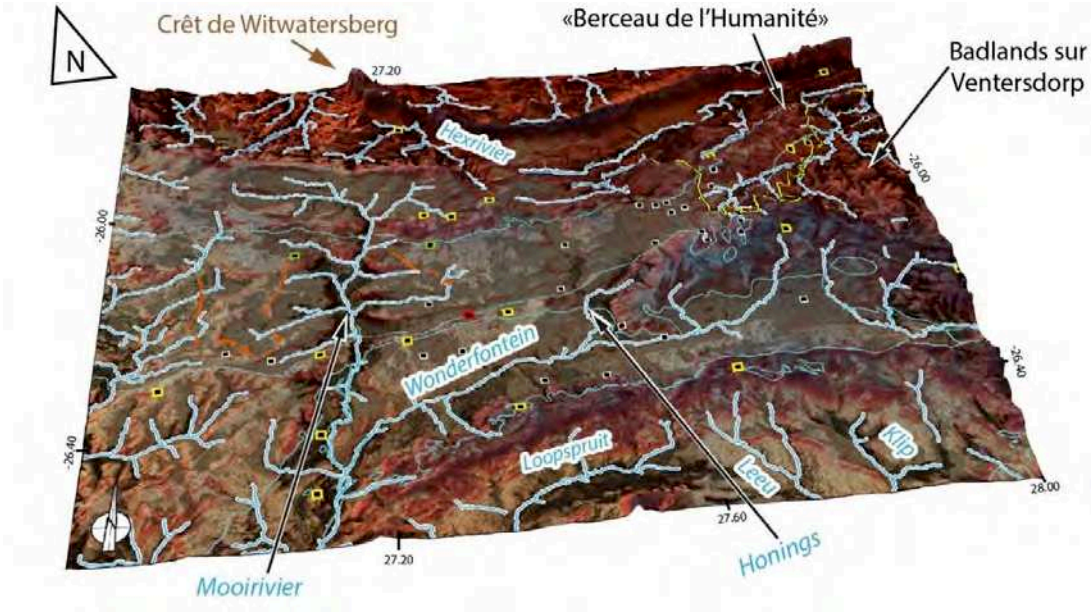


Figure 257 Bloc 2.5D (exagéré) du Central Rand, du CoH et du Farwest Rand.

6. Carte de la profondeur du toit des dolomie entre Carletonville et Fochville

Cette carte du secteur de Carletonville montre des courbes de niveau indiquant la profondeur du toit des dolomies et donc l'épaisseur des altérites, d'après Eriksson (1972).

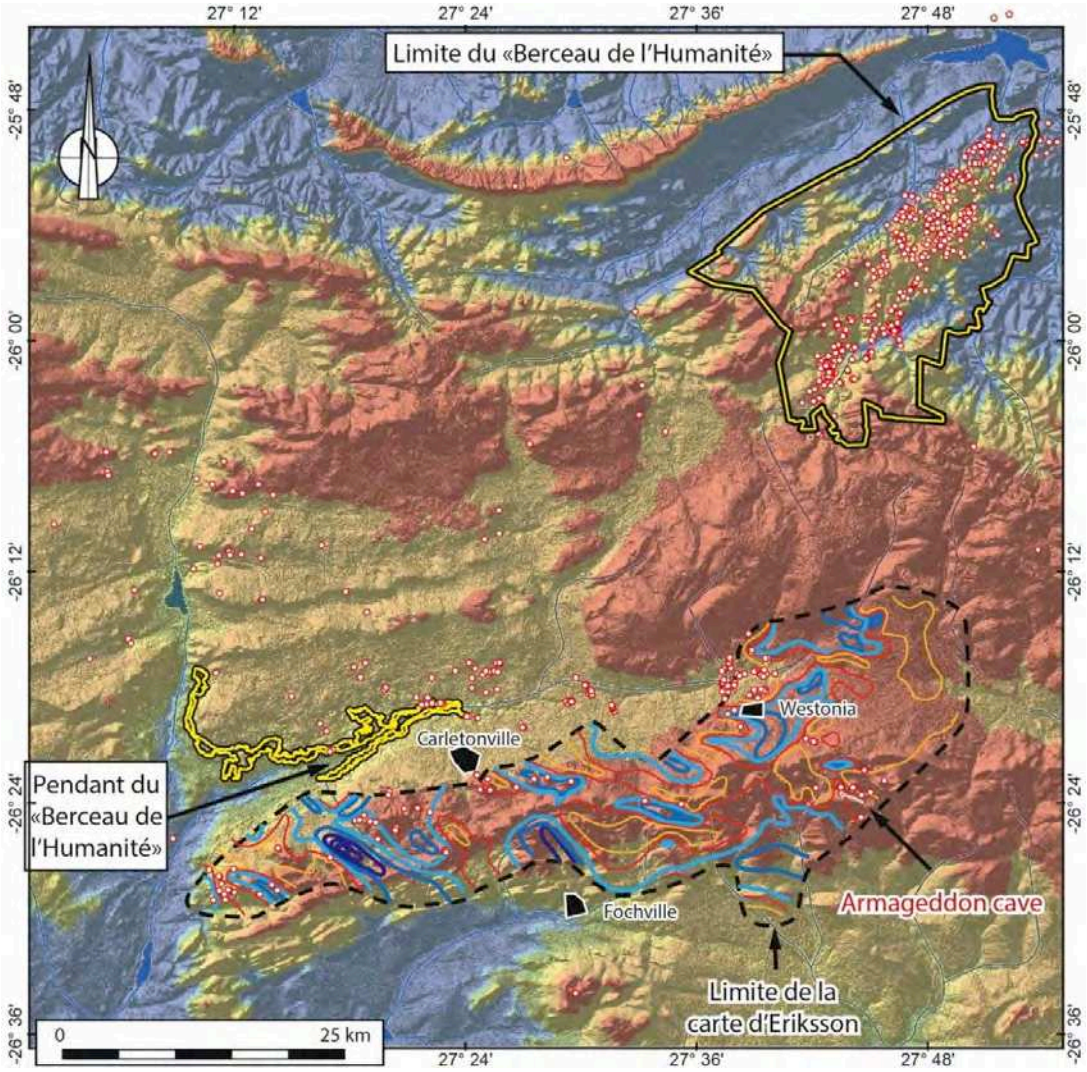


Figure 258 Profondeur du toit des dolomies entre Carletonville et Fochville et hypsométrie.

Intervalle des courbes de profondeur du toit des dolomies: 4 m : bleu foncé -20 m, orange -4 m.

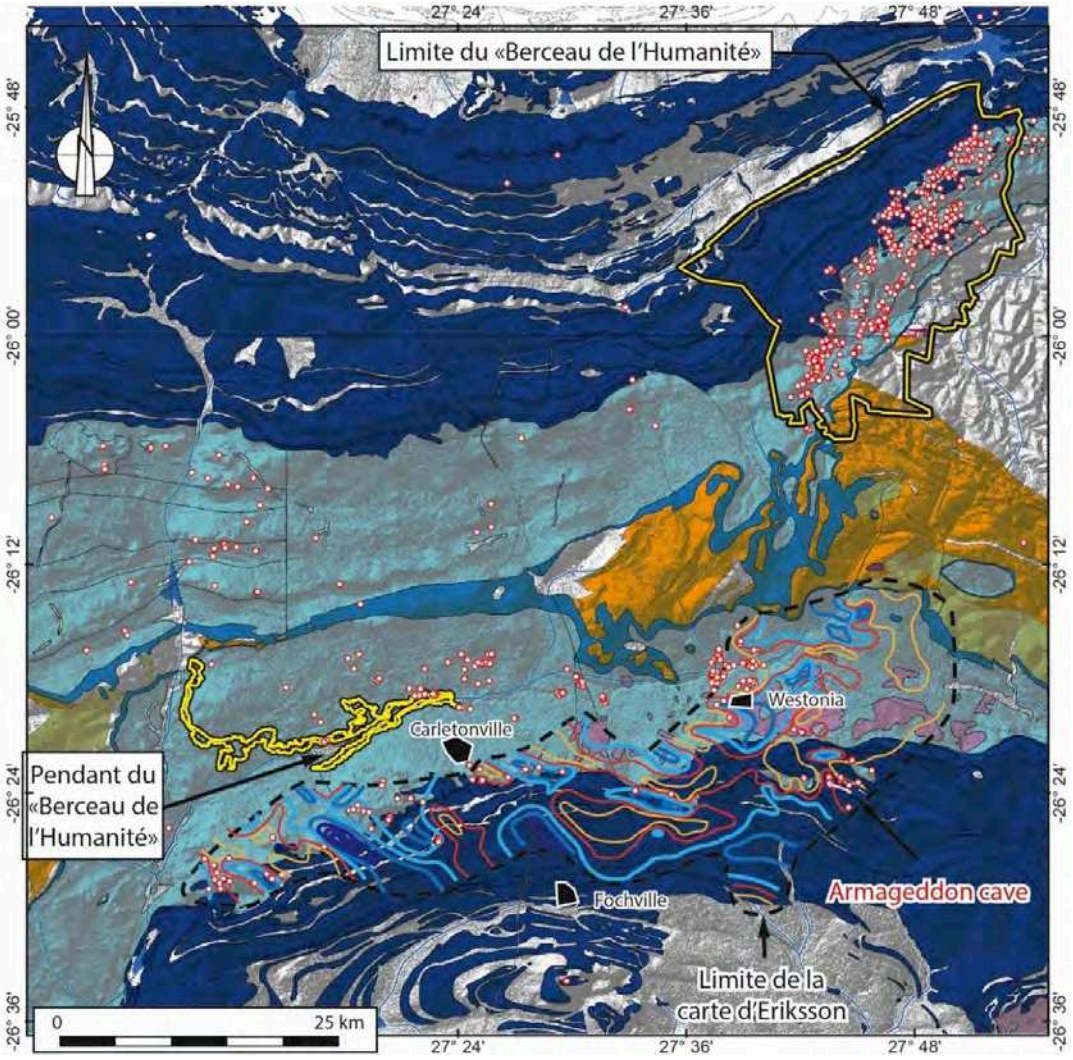


Figure 259 Profondeur du toit des dolomies entre Carletonville et Fochville et géologie.

Intervalle des courbes de profondeur du toit des dolomies: 4 m : bleu foncé -20 m, orange -4 m. Légende de la géologie supra (Figure 255).

3.2.3.2. Brèches siliceuses au sommet d'Oaktree (1554 m)

La cartographie des paléosurfaces à l'échelle de la vallée (Figure 209 p.294), l'image satellite[8] et les observations de terrain mettent en évidence une particularité au sommet de la colline d'Oaktree, située à 155 m d'altitude, qui pourrait correspondre à la surface S1 (Surface Africaine) ou à la surface S2. Des éléments similaires ont été observés au sommet d'autres collines du *Cradle of Humankind* : une dalle silicifiées au sommet de Swartkrans (p. 341) et des brèches silicifiées au-dessus de *Cooper's* (p.363).
À *Oaktree*, les observations de terrain révèlent la présence de brèches silicifiées au sommet de la colline. Nous avons cartographié de longs sills pluridécamétriques (Figure 260 et Figure 261) qui aboutissent, au sommet, à d'importantes volumes de brèches silicifiées (Figure 262 à Figure 264). Les sills se distinguent par l'absence de bancs de dolomies et par la présence de roches siliceuses (cargneules).

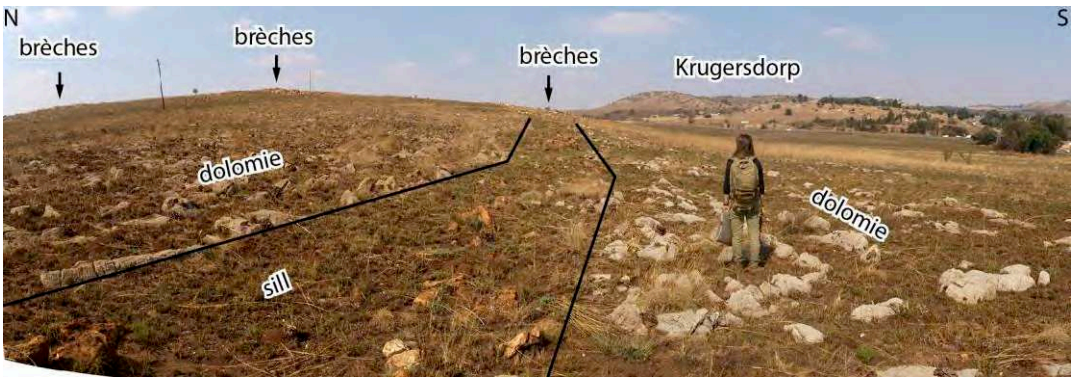


Figure 260 Sill de la colline d'Oaktree.

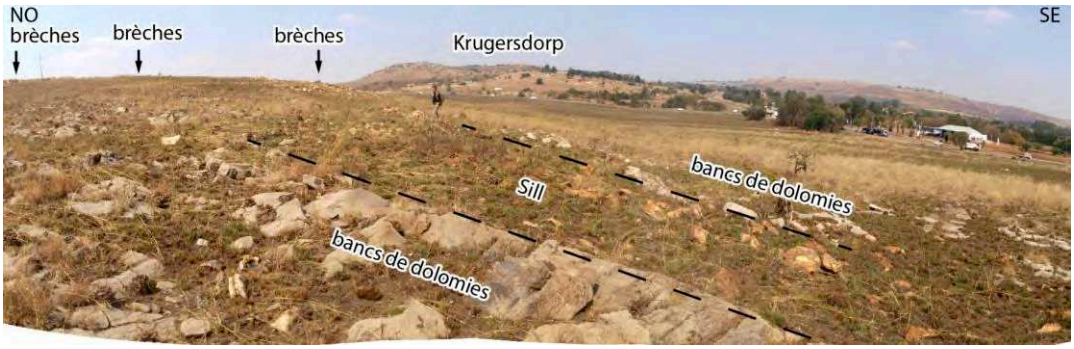


Figure 261 Idem.

[8] ERDAS APOLLO Catalog CDNGI Imagery 25 cm MOSAIC 2018



Figure 262 Idem



*Figure 263 Volumes de brèches importantes au sommet de la colline d'*Oaktree.



*Figure 264 Brèches à mi-pente de la colline d'*Oaktree.

L'image satellite (Figure 265), au pied de la colline d'Oaktree et au-dessus de la grotte de Batcave, montre des structures particulières (Figure 266) correspondant à une absence de bancs de dolomies. Ceux-ci ont pu être détruits par des fluides hydrothermaux. C'est aussi le cas pour la grotte de Sterkfontein.

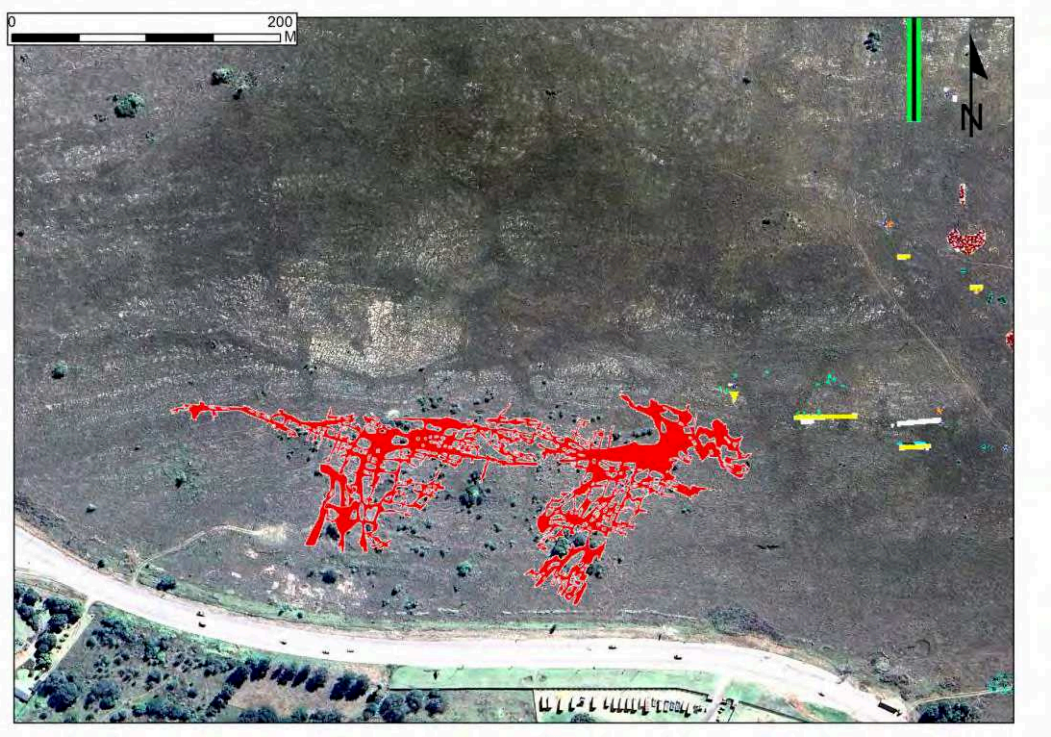


Figure 265 Détail de l'image satellite à Batcave montrant des sols sombres correspondant à une absence de dolomies.

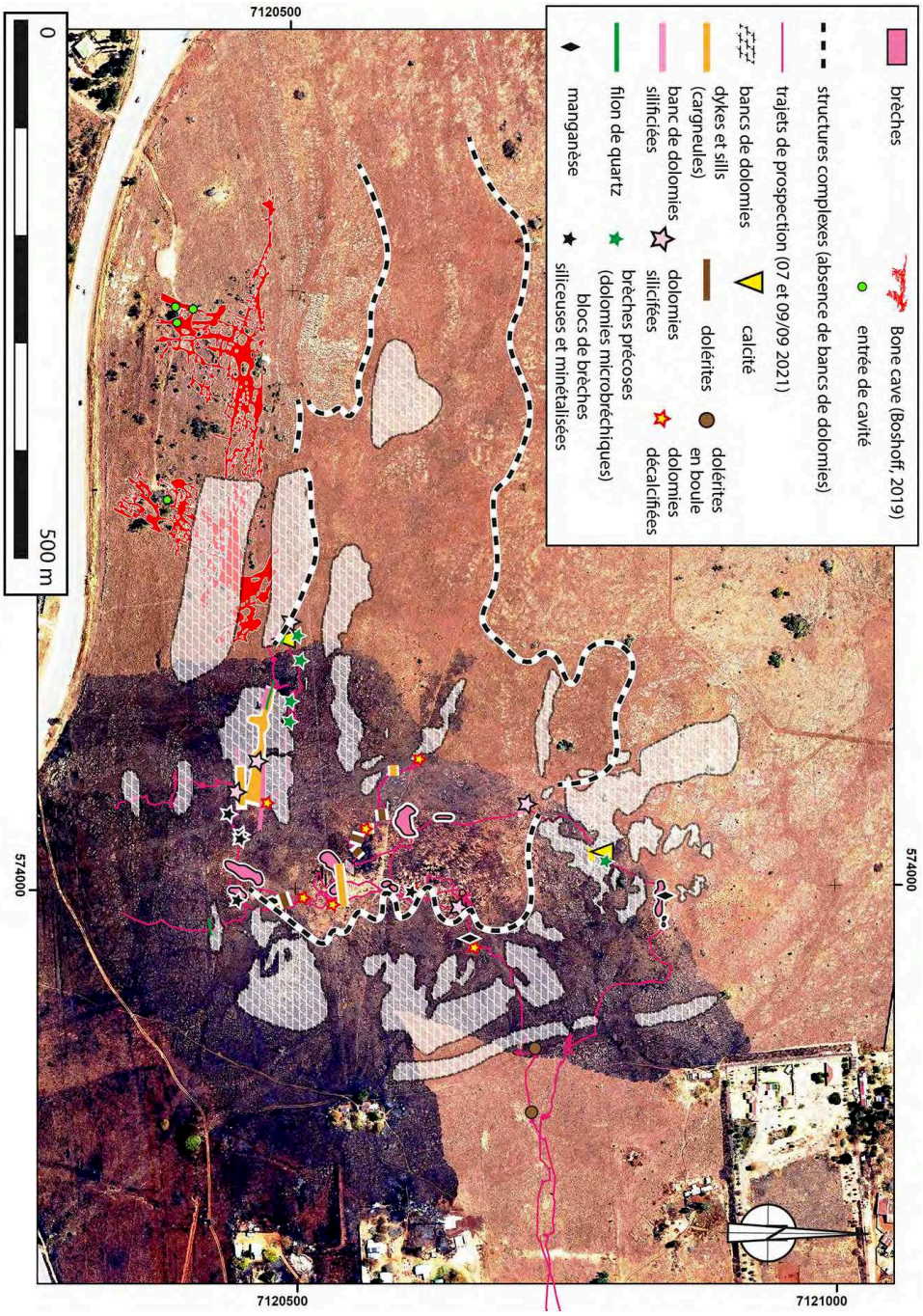


Figure 266 Cartographie succincte de la structure complexe à Oaktree.

3.2.3.3. Les reliefs au-dessus de la Surface Africaine

Étudions maintenant les surfaces situées au-dessus de la **Surface Africaine**, qui devait donc émerger de la surface topographique du Crétacé.

3.2.3.3.1. Relief de Krugersdorp (quartzites de Witwatersrand) (1700 m)

Un des reliefs majeurs du *Cradle of Humankind*, où se trouve la ville de Krugersdorp, à 1700 m d'altitude, est constitué des formations de Witwatersrand (sub-groupe de Johannesburg, du sub-groupe d'*Hospital Hill* et de la formation d'*Orange Groove*). Les schistes forment des vallées peu profondes qui sont armées par les quartzites de la formation d'Orange Groove. Comme celle que l'on observe à *Protea Ridge*, à 1676 m d'altitude (et localisée sur la Figure 1173, p.1199) en quittant Krugersdorp pour aller à la grotte de Sterkfontein (Figure 267 et Figure 268).



Figure 267 Panorama de Protea Ridge montrant une vallée à Krugersdorp, à 1676 m d'altitude caractérisée par des sols orangés de la formation d'Orange Groove.



Figure 268 Image satellite montrant le vallon de Protea Ridge.

Ce relief de Krugersdorp forme un escarpement d'une centaine de mètres entre *Cradlestone* et Krugersdorp le long de la route R28 (https://maps.app.goo.gl/MZG3Jme9wdZFmYtMA) d'où l'on peut observer un panorama instructif sur les paléosurfaces et la géologie du *Cradle of Humankind*, que l'on domine de plus de deux cents cinquante mètres, nous le décrirons ci-après (Figure 350 et Figure 405).

3.2.3.3.2. Crêts[9] formés par la chaîne de reliefs de Magaliesberg (1700 m d'altitude) et de Witwatersberg (1600 m) en quartzites du groupe de Pretoria et entonnoir de percée cataclinal d'Hekpoortspruit

L'érosion régressive est à l'origine des reliefs en crêt.

1. Analyse des surfaces du panorama vers le nord depuis Weltevreden

(-25.959393, 27.673743 ; https://maps.app.goo.gl/z8sTEuh6LwmyDmw28)
Le paysage suivant (Figure 269) et son analyse (Figure 271) permettent d'identifier plusieurs surfaces d'aplanissement correspondant à d'anciennes surfaces d'érosion toutes situées sur les formations géologiques du groupe de Pretoria (cf. Chapitre 1). La vue est prise depuis la bordure sud de l'entonnoir de percée cataclinale formé par le cours d'eau d'*Hekpoortspruit* en érodant la formation géologique de Hekpoort et *Timeball Hill*. Cet entonnoir est indiqué par le n°10 sur la Figure 1158 p.1181 et est indiqué aussi sur la carte géologique de la Figure 270 ci-dessous. Lorsque cet entonnoir s'est formé, tous les produits de démantèlement ont été évacués par la rivière à travers cette percée. Cette barre rocheuse a joué un rôle de *knickpoint* lors de l'érosion. L'érosion régressive est venue buter contre la chaîne de relief de Weltevreden (formé par les quartzites de Klapperkop) culminant à 1650 m d'altitude.



Figure 269 Panorama vers le nord depuis Weldevreden.

La photographie ci-dessus (Figure 269) du panorama vers le nord depuis Weldevreden, à 1630 m d'altitude, en direction des chaînes de relief de Magaliesberg (que l'on distingue mal en arrière-plan et qui culmine de 1700 à 1800 m d'altitude) et de la chaîne de relief de Witwatersberg (en avant plan et que l'on distingue bien). Des replats morphologiques sont observés au sommet de ces reliefs armés par des quartzites du groupe de Pretoria (Formation de Magaliesberg pour la chaîne de Magaliesberg et formation de Daaspoort pour la chaîne de Witwatersberg). Au premier plan, on distingue une vaste plaine, à 1600 m d'altitude, formée par la formation de Timeball Hill du groupe de Pretoria et qui correspond à la **Surface africaine**.

[9] Le « relief en crêt » implique un fort pendage comme le révèlent les coupes géologiques.

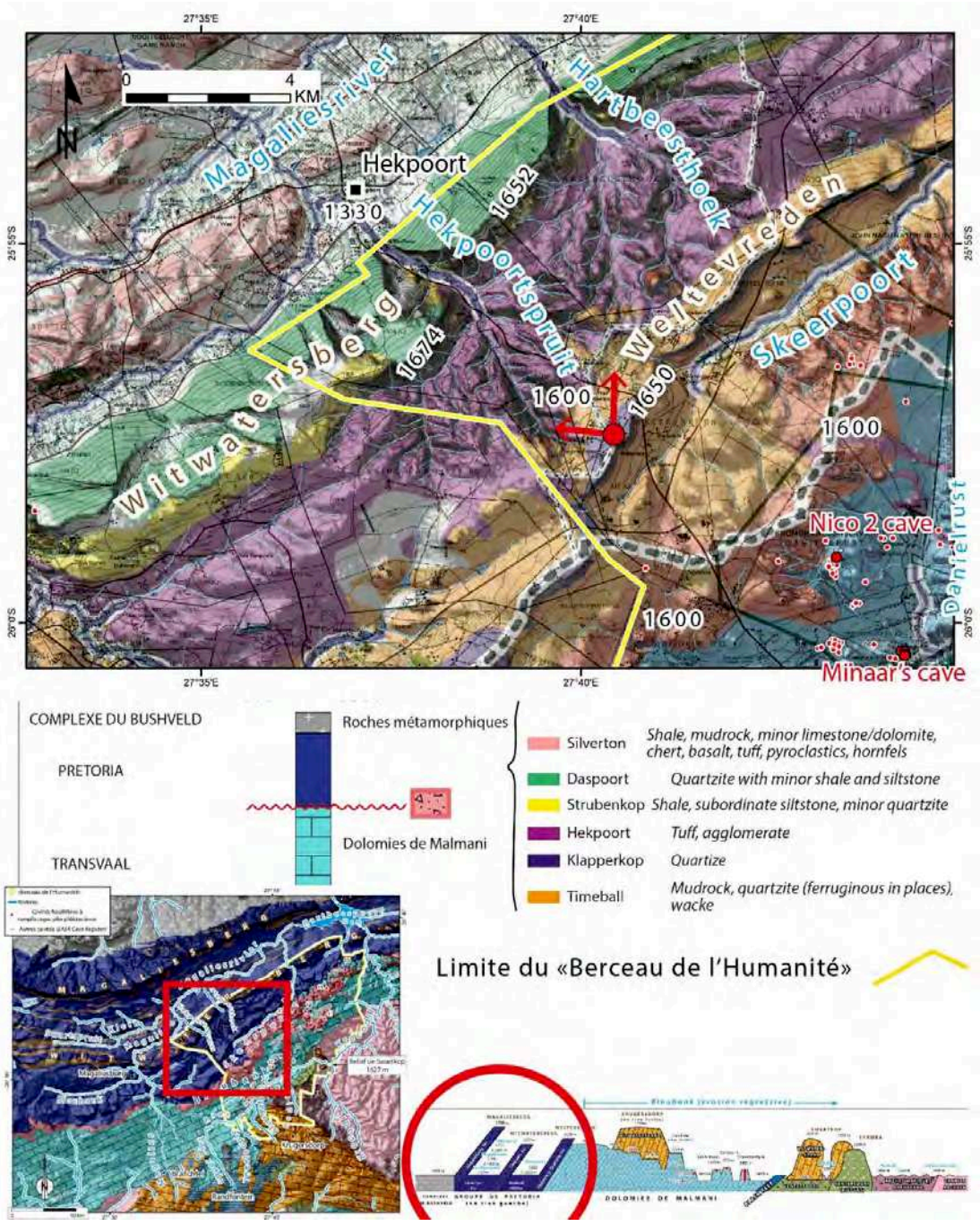


Figure 270 Carte géologique en relief de l'entonnoir de percée cataclinale d'Hekpoortspruit. Le panorama précédent (Figure 269) est indiqué par le point rouge et les deux flèches. Le cercle rouge sur la coupe en bas à droite localise les crêts en quartzites de Pretoria. Cette figure est disponible en grand (p. 467).

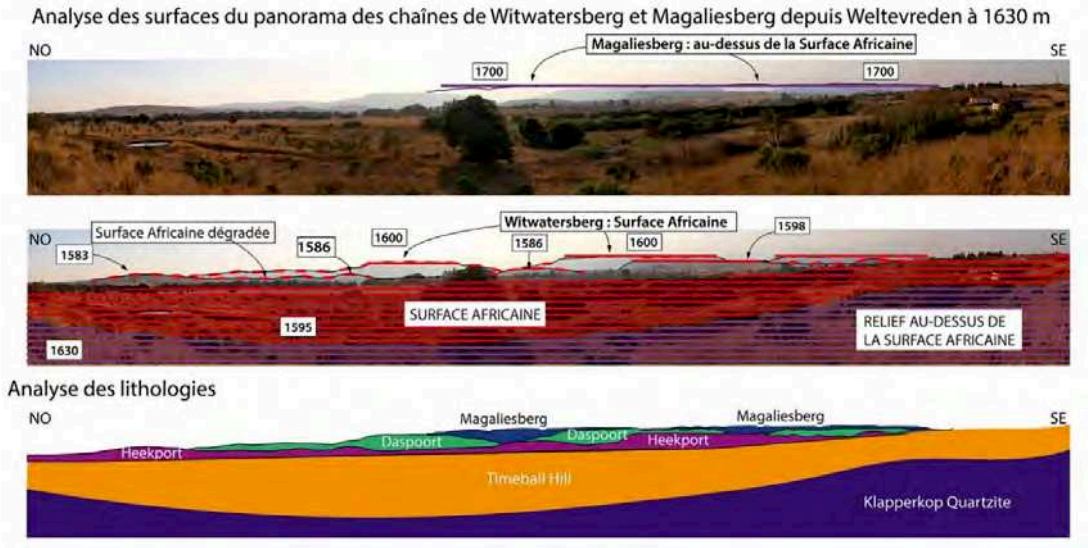


Figure 271 Analyse hypsométrique et lithologique du panorama depuis Weltevreden. Au premier plan, la formation de Timeball Hill est dégradée par la rivière Hekpoortspruit et forme une cuvette. Cette rivière est un affluent de la Magaliesrivier qui traverse la chaîne du Witwatersberg.

[Position GPS de la photographie indiquée sur la carte suivante : -25,959766 ; 27,674087 ; 1660 m asl

Localisation googlemaps : https://maps.app.goo.gl/QAyoW7acjos36kFS9].

Ce secteur est situé sur la partie à droite de la coupe de la Figure 408. On distingue sur ce panorama, ci-dessous (Figure 271) de haut en bas :

- des replats au sommet de la chaîne de relief de Magaliesberg à 1700 m d'altitude (quartzites de la formation de Magaliesberg) indiqués par un trait violet sur la première photographie et correspondant à la surface « S0 » ;

- des replats au sommet de la chaîne de relief de Witwatersberg, à 1600 m d'altitude. Ce sont les quartzites de la formation de Daspoort (avec des schistes argileux et des microgrès (*siltstones*)). Ces aplanissements sont indiqués par un trait rouge sur la deuxième photographie et correspondraient certainement à la Surface Africaine « S1 » que l'on retrouve à la même altitude sur les dolomies de Malmani au sud-est. On repère aussi, plus proche, une chaîne de relief de la formation d'Hekpoort, dont les sommets sont aplanis à 1600 m d'altitude (1598 m sur la deuxième photographie) ;

- la vaste surface plane au second plan, hachurée en rouge sur la deuxième photographie, culmine à 1600 m et correspond aussi à la Surface africaine (« S1 »), la même que celle visible à l'horizon, qui tronque les sommets de la chaîne de relief de Witwatersberg. Ici, elle est établie sur la formation de Timeball Hill, formée de pélites (*mudrock*), de quartzites ferrugineux et de grès (*wacke*) ;

- enfin, sous nos pieds, nous sommes en haut d'un petit relief d'une vingtaine de mètres formé par les quartzites de Klapperkop : le Weltevreden qui culmine vers 1630 à 1650 m. On observe un état d'altération très avancé de ces roches qui montrent des encroûtements et de nombreuses fissures (voir les photographies Figure 273 et Figure 274).

La Surface Africaine a donc arasé à 1600 m d'altitude ces différentes lithologies :

- les pélites, les quartzites et grès de la formation de *Timeball Hill* (Figure 271) ;
- les laves de la formation d'Hekpoort ;
- les dolomies de Malmani à l'ouest du *Cradle of Humankind* masquées par des altérites (les Sols Husson).

En conclusion, nous remarquons que la Surface Africaine qui recoupe, à la même altitude, différentes formations lithologiques est donc bien une surface d'érosion et non une surface structurale. En revanche la surface à 1630 – 1650 m, formée par les quartzites de Klapperkop, pourrait être une surface structurale.

> *« Les lignes de crête régulières du Magaliesberg et du Witwatersberg peuvent être étroitement corrélées au contour original de la surface terrestre pré-Karoo qui est censé représenter une pénéplaine, qui se serait étendue jusqu'au Witwatersrand » (Kynaston, 1929 in Ingram et van Tonder, 2011, p.10).*

Nous pouvons supposer que les reliefs de Magaliesberg, aujourd'hui à 1700 m d'altitude, c'est-à-dire 100 mètres plus haut que la surface à 1600 m, devaient émerger de la Surface africaine dans le passé (au Crétacé, au Permien et au Carbonifère). Cela devait être aussi le cas pour la partie sommitale de la chaîne de Weltevreden qui culmine aujourd'hui vers 1630 à 1650 m. Nous avons vu précédemment que le relief de Krugersdorp, vers 1700 m, au sud du *Cradle of Humankind* émergeait aussi de la Surface Africaine (p.411).

3.2.3.3.3. Percée cataclinale d'Hekpoortspruit

Plus au nord, on traverse la percée cataclinale du cours d'eau d'*Hekpoortspruit* à travers la barre rocheuse formée par les quartzites de Daspoort (Groupe de Pretoria), appartenant à la chaîne de relief de Witwatersberg (localisée sur la carte de la Figure 270). Lorsque la cuvette d'*Hekpoortspruit* (localisée par le n°10 sur la Figure 1158 p.1181) s'est formée, tous les produits de démantèlement ont été évacués par la rivière à travers cette percée. Cette barre rocheuse a joué le rôle de knickpoint lors de l'érosion régressive en amont de ce relief. L'érosion de cette cuvette se termine au pied de la chaîne de relief de Weltevreden (quartzites de Klapperkop) culminant vers 1650 m d'altitude.



Figure 272 Percée cataclinale d'Hekpoortspruit.

3.2.3.3.4. Crêt de la formation de Klapperkop Quartzite à Weldevreden

Les quartzites de la formation de Klapperkop forment la barre rocheuse de Weltevreden, dont l'altitude maximale est 1671 m d'altitude. Morphologiquement, c'est un crêt.



Figure 273 Quartzites de la formation de Klapperkop Quartzite.



Figure 274 Faciès d'altération important des quartzites de Klapperkop : présence de cortex d'altération (croûte blanche) et de fissures.



Figure 275 Cortex d'altération en profondeur des quartzites de Klapperkop.

3.2.3.3.5. Surface Gondwana, Surface antérieure « S0 », Surface Pré-Karoo, 1700 m

Elle est représentée par un trait en pointillés en violet sur la Figure 426. C'est la surface plane conservée la plus élevée du *Cradle of Humankind*, la « Surface fondamentale », et elle est considérée comme la plus ancienne. Nous verrons que ces reliefs exprimant la surface « S0 » sont de très vieux reliefs qui émergeaient déjà au Crétacé, au Permien voire au Carbonifère.
Au niveau du *CoH*, on trouve ces aplanissements à 1700 m d'altitude (p.327) (cf. fig. de synthèse p.467):

- au sud, au niveau du relief où est située la ville de Krugersdorp (quartzites de la formation géologique de Witwatersrand) dont nous avons déjà parlé ;
- au nord, au niveau des replats au sommet de la chaîne de relief de Magaliesberg, au niveau des crêts en quartzites de Magaliesberg et des crêts formés par la formation géologique de Daaspoort (p.327).

1. Dôme de Johannesburg, à 1700 m

Notons la présence du granite archéen du Dôme de Johannesburg, à 1700 m comme le montre le panorama de la Figure 350 (p.399) mis en place il y a -2710 Ma. Il est très altéré et érodé. Il forme l'amont des rivières *Krokodil* et *Jukskei*. On retrouve un large aplanissement sur les mêmes roches à *Len's Den* à 1430 m d'altitude. Nous en reparlerons plus loin (p.362).

3.2.3.3.6. Paléokarst sur la surface à 1700 m à Krugersdorp et stone-line

Des paléokarsts ont été découverts à 1716 m d'altitude à Krugersdorp (Figure 276 et Figure 277).
Localisation googlemaps : https://maps.app.goo.gl/cC2PmJd7sfbwxtWC7
Ils sont comblés et recouverts par ce qui semblerait être au premier abord une formation alluviale de galets altérés (Figure 278) de la formation sous-jacente d'*Hospital Hill,* dans laquelle les paléokarsts sont creusés.
Ces roches arrondies pourraient aussi être des éléments du *Black Reef* (datés de -2640 Ma) qui affleure à proximité immédiate.
Cependant, le remplissage de ces paléokarsts, comme la couverture sédimentaire qui recouvre le secteur, pourrait plutôt être lié à la résidualisation et à la formation d'une *stone-line* (*voir définition p.336), ce qui invaliderait l'origine alluviale de ces formations. De plus, ces roches arrondies ne ressemblent pas à des alluvions : elles présentent une auréole d'altération au niveau du cortex et un cœur de la roche non altérée.
Étudions toutefois le bassin versant de la Honingklip, représenté en jaune sur la Figure 1159 (p.1182), pour déterminer l'origine des alluvions. Nous nous trouvons en amont de la terrasse alluviale datée à -3.55 Ma (Darryl Granger in Bruxelles ,2019, p.30) de l'ancienne mine d'or de Kromdraai, qui sera évoquée plus loin (p. 354).

Nous avons cartographié cette paléosurface à 1700 m (en rouge sur la Figure 209 p.294). Elle est caractérisée par une couverture altérée de couleur rouge correspondant à l'altération des quartzites de la formation *Orange Groove* ou bien appartenant au *Black Reef*. Nous remarquons que cette surface est partielle et a été érodée par des rivières dont nous avons déjà noté que certaines d'entre elles avaient perdu leur aval (*Upper Riet, Magalies, Tweeloopie*) (Figure 1161).

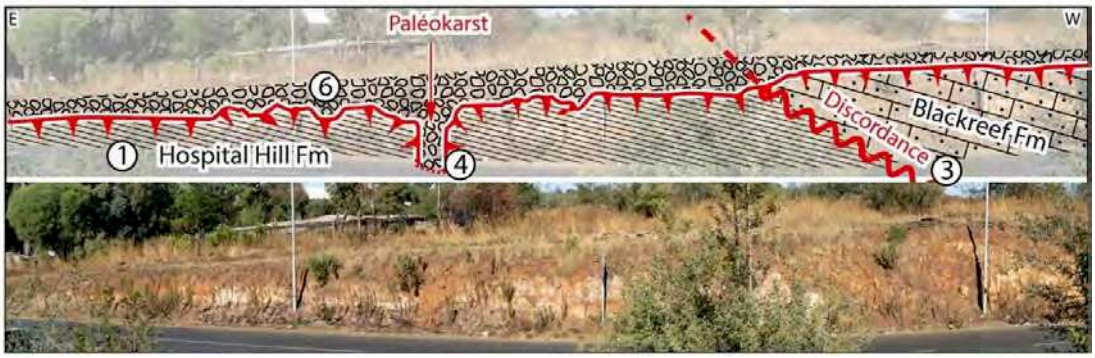


Figure 276 Sur le relief de Krugersdorp, on trouve un paléokarst à 1716 m d'altitude.



Figure 277 Photographie montrant les blocs remplissant le paléokarst (indiqué par le n°4 sur la figure précédente). Cette nappe de blocs recouvre une grande superficie de cette surface plane (indiquée par le n°6 sur la figure précédente). Ce sont plutôt des éléments issus du démantèlement d'une stone-line que des alluvions.



Figure 278 Frange d'altération autour des blocs formés dans la lithologie Hospital Hill montrant qu'ils sont plutôt issus du démantèlement d'une stone-line que d'une rivière.

Définition d'une stone-line :

Les *stone-lines* se rencontrent dans les environnements tropicaux (Bourgeat et Petit, 1966). C'est, selon Riquier (1969, p.73), une formation constituée d'une nappe de matériaux grossiers (quartz, concrétions, morceaux de roche, etc.) enterrée sous 1 à 5 m de matériaux beaucoup plus fins, plus homogènes, formant couverture, que l'érosion actuelle peut faire apparaître en surface. Tous ces éléments accumulés correspondent aux éléments inaltérables des substrats comme l'indique la citation ci-dessous. La *stone-line* est donc liée à l'altération des sols et à l'érosion.

> « Les matériaux les plus fréquents sont les blocs de quartz provenant des filons de la roche-mère (gneiss, schiste, etc.), des cherts siliceux provenant de la dissolution de certains calcaires, des galets provenant de poudingues, des concrétions ferrugineuses lorsque la zone d'altération est, ou était, hydromorphe (concrétions ferrugineuses globuleuses renfermant des grains de quartz sur les grès et les sables, plaquettes ferruginisées ou l'on reconnaît encore le litage des micas sur les argilites), des morceaux de roches altérés en gibbsite et enveloppés d'une pellicule de fer (pseudoconcrétions), etc. Tous ces éléments sont le plus souvent inaltérables » *Riquier (1969, p.80).*

Lorsque les roches sont altérées sur une longue période de temps, certains minéraux se transforment en d'autres substances, comme l'argile. Cependant, certains minéraux, tels que les silicates (par exemple le quartz, composé à 100% de silice), sont beaucoup plus résistants à l'altération que la roche qui les contient. Ces minéraux ont tendance à s'accumuler sur place en formant une ligne, une couche résiduelle que l'on peut qualifier de *stone-line*.
Sur la Figure 279, on observe un des filons de quartz qui composent cette roche. Ce filon explique la présence d'une *stone-line* principalement constituée de clastes de quartz à bords anguleux provenant du démantèlement de ces filons.
En géoarchéologie, nous devons veiller à bien distinguer des accumulations anthropiques de blocs de ces niveaux d'accumulation naturelle qui pourraient avoir le même faciès.

On trouve de nombreuses « *stone-lines* » dans le *Cradle of Humankind* qui montrent que l'altération et l'érosion ont été intenses notamment sur les roches mafiques et ultramafiques de l'Archéen et les granito-gneiss d'Halfway House. Il semblerait qu'on n'en trouve pas sur les roches vertes de Ventersdorp, comme nous l'avons observé à Muldersdri. On trouve une formation altérée sur les granites de Ventersdorp, mais en général, on les trouve sous leur forme d'altération caractéristique en boule.

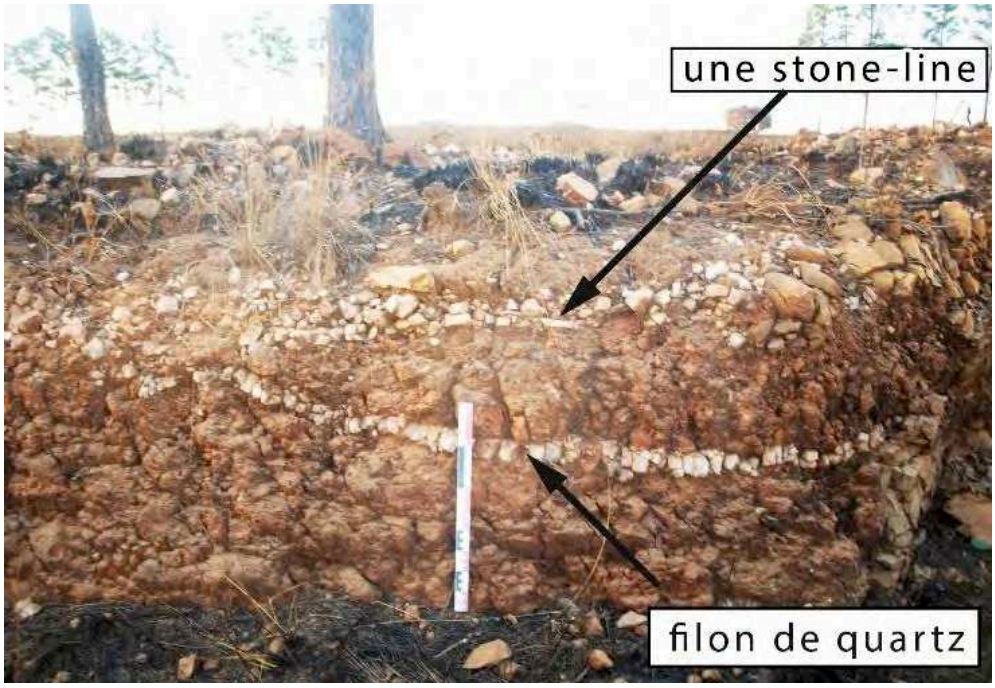


Figure 279 Résidualisation et stone-line des roches mafiques Dans le bassin versant de la Krokodil River, vers Hennebech, près de Cradlestone, le long d'Utopia Road.

3.2.3.3.7. Surface à 1580 m au pied de Protea Ridge et sur les roches mafiques et ultramafiques de l'Archéen

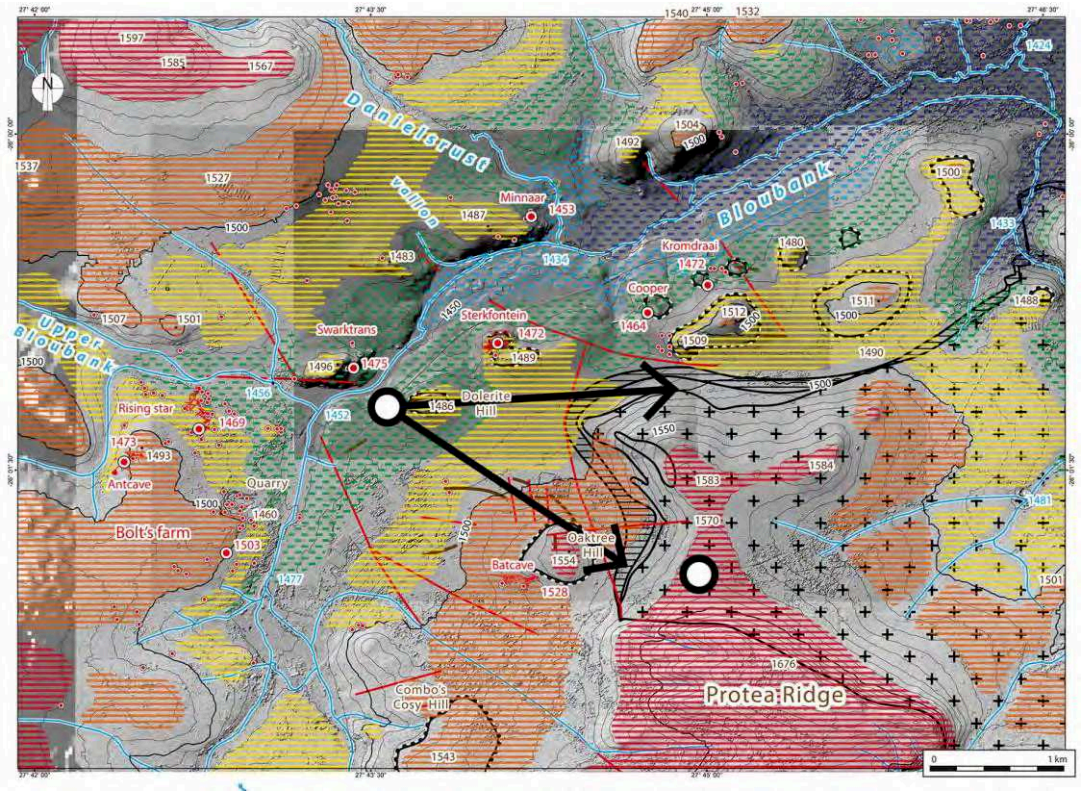


Figure 280 Localisation de Protea Ridge.



Figure 281 Surface d'érosion S1 sur des roches mafiques à 1580 m (Source : Google Maps).

La photographie ci-contre (Figure 281) montre la surface d'érosion, située à 1580 m d'altitude, au niveau des roches mafiques et ultramafiques, constituant le relief de Krugersdorp, indiqué par un cercle noir ci-dessus (Figure 280).

Localisation Google Maps : https://maps.app.goo.gl/ZrV2Tx9Hp5WyttPx5



Figure 282 Panorama vers le sud-est depuis Sterkfontein.



Figure 283 Panorama depuis Sterkfontein montrant Protea Ridge et la surface à 1580 en-dessous.

La prise du vue a été prise à Sterkfontein (-26,019956 ; 27,726467 ; 1468 m) indiqué ci-dessus (Figure 280)

3.2.3.4. La Surface Post-Africaine 1 : S2 à 1500 m

Topographiquement, sous la Surface Africaine (S1 sur la Figure 428), se trouve la Surface Post-Africaine 1 (S2), que nous avons représentée en orange sur nos cartes et figures.

3.2.3.4.1. À 1500 m sur les roches mafiques et ultramafiques de l'Archéen

On trouve une surface à 1500 m sur les roches mafiques et ultramafiques de l'Archéen près de l'église d'Hennebeth (Figure 284). Elle est caractérisée par des *stone-lines* (définition p.336).

Localisation googlemaps : https://maps.app.goo.gl/qfLcRCkYi74e2mVk6



Figure 284 Panorama de l'église d'Hennebeth.

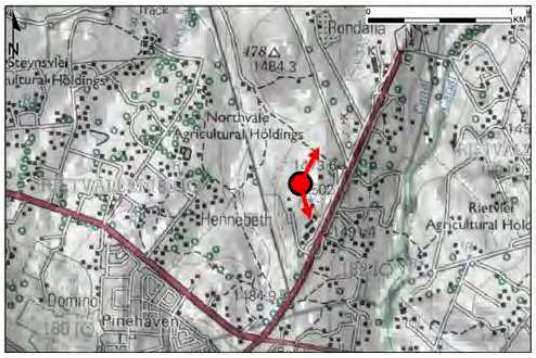


Figure 285 Localisation du panorama.



Figure 286 Tranchée montrant des stone-lines.

3.2.3.4.2. Surface à 1500 m sur les dolomies (lapiaz dolomitique)

Cette surface est représentée en jaune sur nos cartes (Figure 287). C'est la surface où s'ouvre la grotte de *Wonder Cave* dans le parc de *Rhino & Lions Park*. C'est sur cette surface à 1520 m d'altitude qu'est trouvé le gisement fossilifère de Malapa. À *Bolt's Farm*, cette surface est caractérisée par un lapiez dolomitique (Figure 288) qui indique que la Surface africaine a été érodée dans ce secteur.

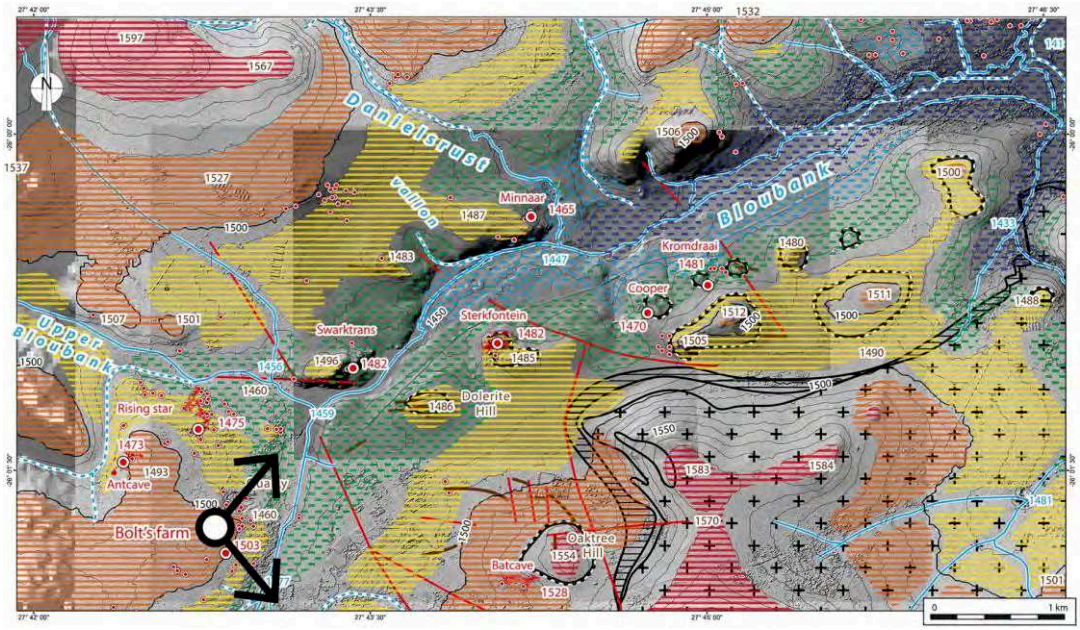


Figure 287 Localisation du panorama de Bolt's Farm*, ci-dessous.*



Figure 288 Le lapiaz dolomitique à 1510 m d'altitude, à Bolt's Farm.

3.2.3.4.3. Dalles silicifiées en cours de démantèlement au-dessus des dolomies (à 1500 m au-dessus du gisement de Swartkrans)

Au-dessus du gisement de Swartkrans, à l'altitude de 1496 m, de puissantes dalles siliceuses sont en cours de démantèlement, on y voit de nombreuses fractures (Figure 289 et Figure 290).



Figure 289 Dalle siliceuse.

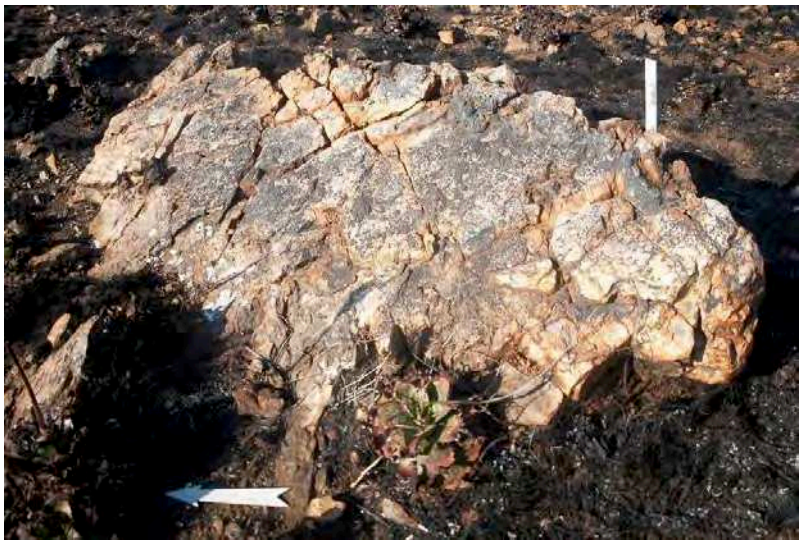


Figure 290 Dalle siliceuse vue sous un autre angle.

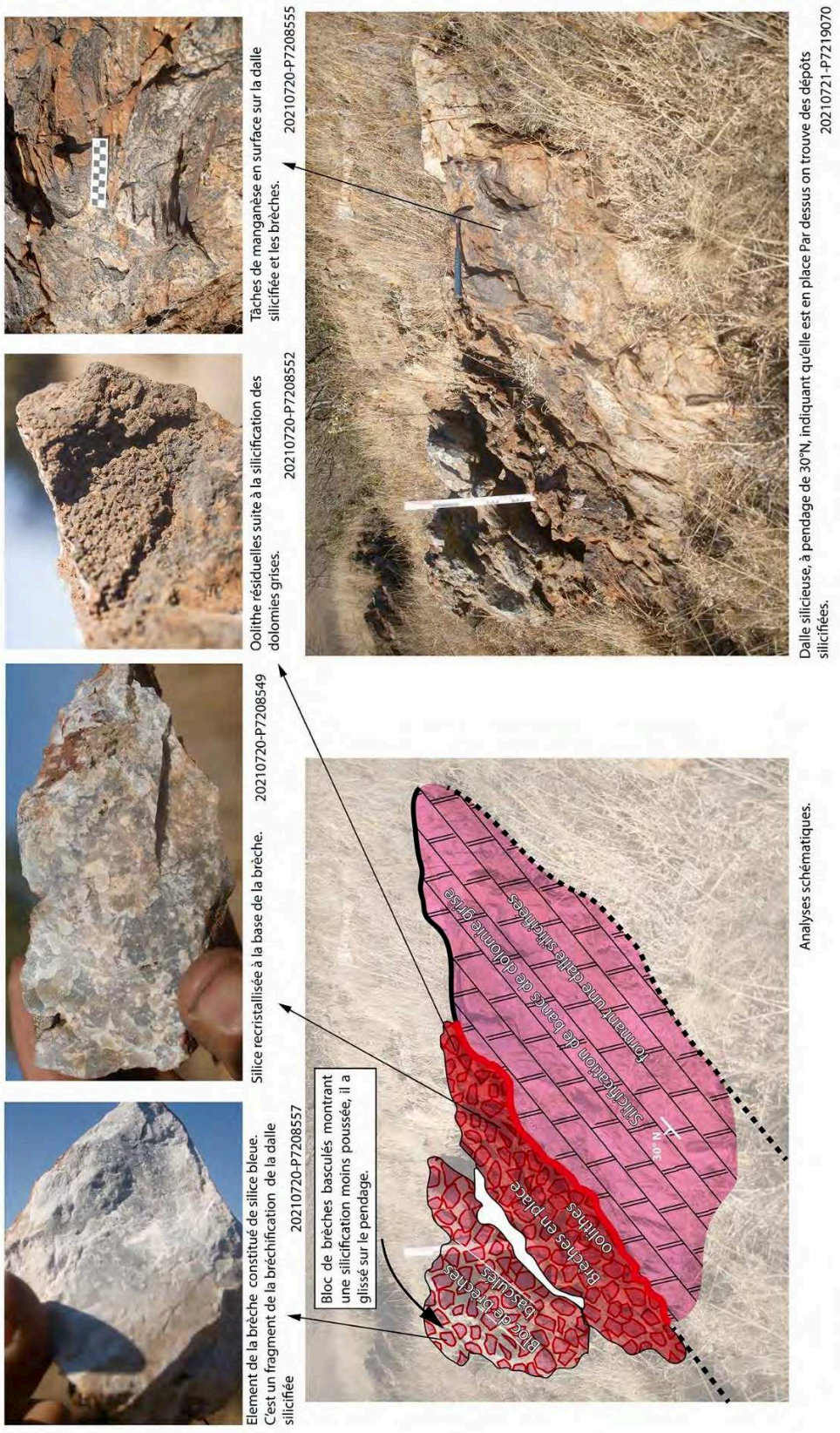


Figure 291 Contacts stratigraphiques : silicifications et bréchification dolomie grise, dalle siliceuse, brèches. On observe ici le passage de la silicification des dolomies grises à la bréchification de la dalle silicifiée. X = 572454 (UTM 35S) ; Y = 7122289 ; Z=1477 m.

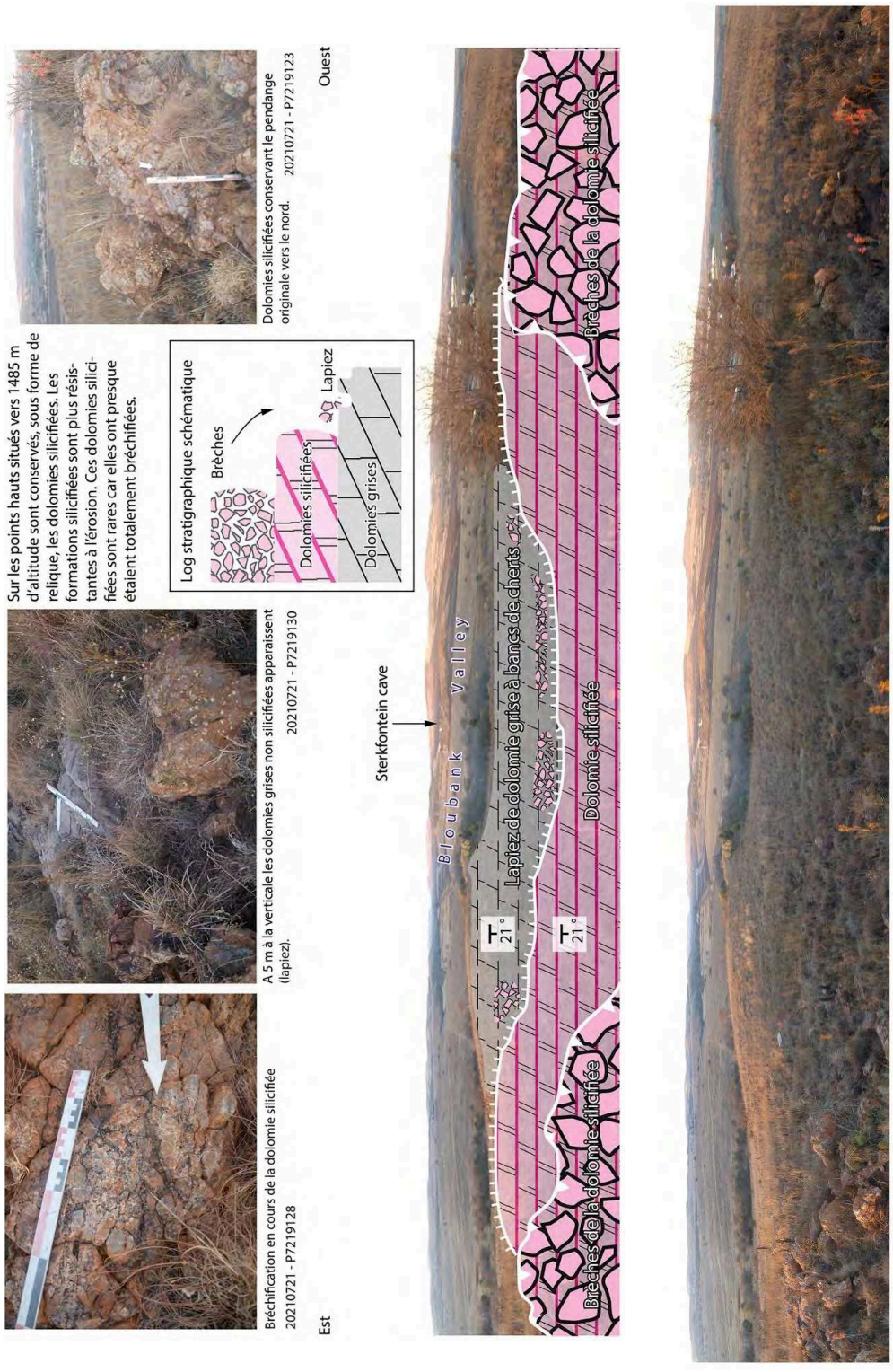


Figure 292 Au sommet de Swartkrans, situées vers 1485 m d'altitude sont conservées, sous forme de relique, des dolomies silicifiées. Les formations silicifiées sont plus résistantes à l'érosion. Ces dolomies silicifiées sont rarement en place car elles ont été totalement

1. Schémas hypothétiques de la mise en place des altérations en surface des dolomies (1485 m)

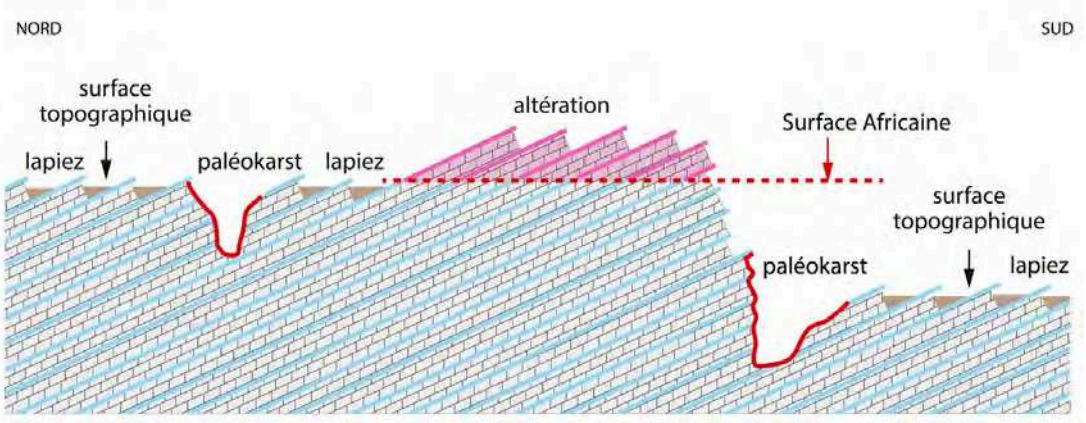


Figure 293 Etape 1 : Altération correspondant à la Surface Africaine.

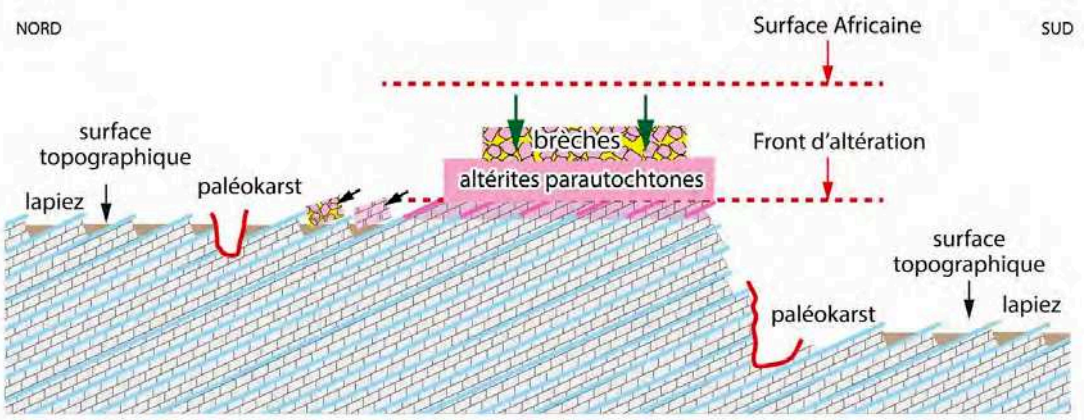


Figure 294 Etape 2 : Abaissement de la surface topographique, démantèlement et bréchification.

3.2.3.5. La Surface Post-Africaine 2 : S3 – 1470 m

C'est la surface qui correspond à la base des buttes de Sterkfontein et de Swartkrans (Figure 428), c'est un paléo-poljé. Une datation cosmogénique, par $^{26}Al/^{10}Be$, de la surface au-dessus de la grotte de Sterkfontein indique que cette surface est à l'air libre depuis au moins 5,725 Ma ± 0.267 (Partridge *et al.*, 2003, Table 2, p.608).

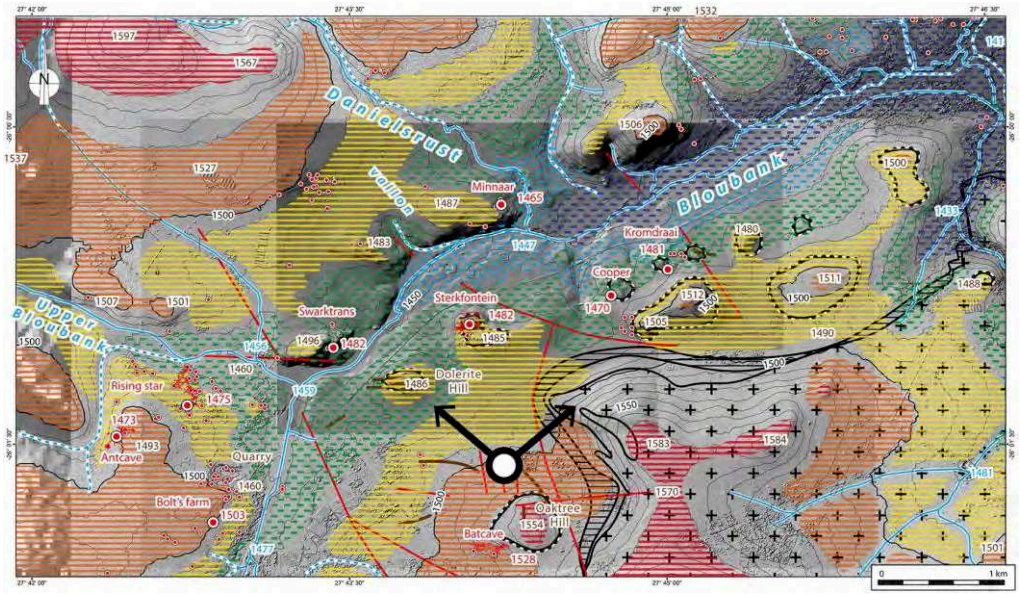


Figure 295 Localisation du panorama ci-dessous.



Figure 296 Surface d'aplanissement des dolomies, à 1470 m d'altitude, en contre-bas de Sterkfontein, au sud. On y distingue une formation superficielle sombre pouvant être du fantôme de dolomie résiduelle.



Figure 297 Panorama depuis le sud, de la surface en contre-bas de Sterkfontein (paléo-poljé).

3.2.3.5.1. Lapiaz dolomitique au-dessus des gisements de Cooper (altitude 1477 m.)

Au-dessus du gisement de Cooper le lapiaz dolomitique montre une accumulation d'altérites parautochtones.



Figure 298 Lapiaz dolomitique au-dessus du gisement de Cooper.



Figure 299 Altération différentielle du bloc. Silicification et cavité au cœur du bloc.

3.2.3.5.2. Description d'un bloc d'altérite

On observe sur un bloc d'altérite, photographié ci-dessus (Figure 299), une altération différentielle, caractérisée par une silicification gris bleu au centre, avec présence de cavités tandis que le pourtour du bloc montre une frange d'altération claire. Ici, ce bloc semble avoir été attaqué par l'altération de la surface vers le cœur. C'est typique des blocs emballés dans les couvertures d'altération. Ce bloc provient de la colline au sud-est des paléokarsts de Cooper (Figure 325 p.363).

3.2.3.6. Surface S4 - 1450 et en-dessous

Cette surface correspond à l'altitude à laquelle circule la rivière Bloubank à Sterkfontein et Swartkrans, précisément à 1442 m (T0), comme l'illustre la carte supra (Figure 207). Cette surface est indiquée en bleu sur les panoramas suivants (Figure 300 et Figure 301). Elle est caractérisée par des alluvions en rive droite (Makiti -26.008654, 27.740071, 1445 m, lien Google Maps)correspondant à la terrasse T1 et en rive gauche à Sterkfontein, notamment la route menant à la grotte a recoupé un ancien plaquage alluvial T3 (Bruxelles, 2019, p.29) (-26.017365, 27.730628, 1468 m lien Google Maps).

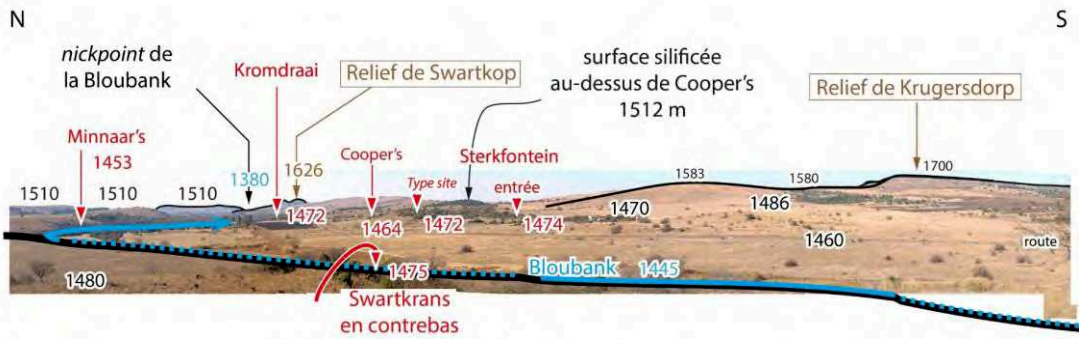


Figure 300 Vallée de la Bloubank depuis Swartkrans vers l'aval et le knickpoint de Swartkop.

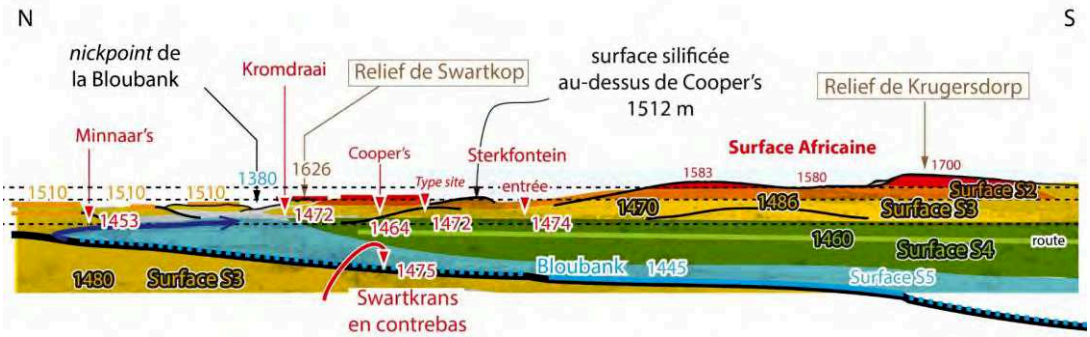


Figure 301 Analyse morphokarstique du panorama.

3.2.3.6.1. Paléo-poljé de la Bloubank

Nous pensons que cette surface plane qui incise les dolomies et où l'on trouve des alluvions correspond à un paléo-poljé (p.242), comme à Makapansgat (Figure 173 p.239).

Rappelons la définition d'un poljé.

> Un poljé est une dépression fermée ou semi-fermée, à fond plat et délimitée par des escarpements calcaires (Figure 175). Il se forme en surface des plateaux calcaires et caractérise les paysages karstiques (nous avons défini le karst p.5).
>
> Il se forme lorsque l'eau est présente en surface mais ne peut pas s'infiltrer rapidement en raison de la proximité du niveau de base ou par la présence d'une couverture imperméable comme une éponte plus marneuse, ou par la présence d'argiles ou d'altérites. Cette stagnation favorise la dissolution latérale de la roche, créant des bordures de corrosion, comme représentées sur la Figure 176. Au niveau de ces bordures se situent des grottes jouant le rôle de ponors en absorbant l'eau à l'intérieur du massif calcaire. Les bordures de corrosion s'emboîtent au cours de l'évolution par abaissement du point d'infiltration en laissant des trottoirs de corrosion en position d'inversion de relief.

La présence d'un poljé nécessite une certaine stagnation de l'incision, un certain endoréisme qui pourrait être expliqué par la présence de *knickpoint* (p. 446).

Dans le Bassin du Transvaal, on en trouve en surface des plateaux dolomitiques (Martini *et al.*, 1976).

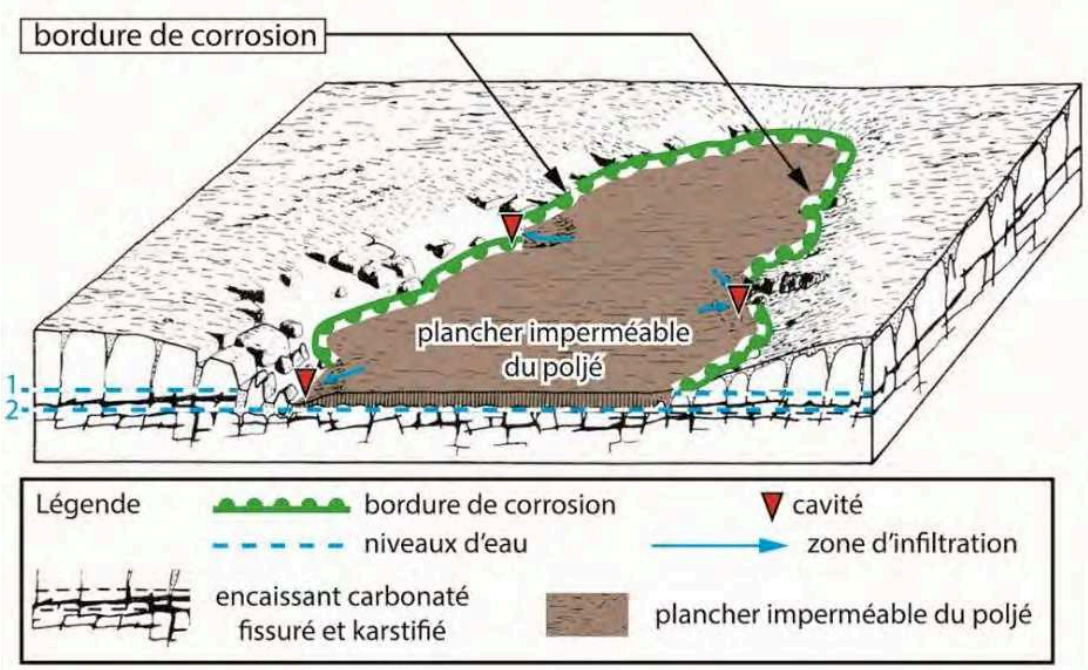


Figure 302 Diagramme de fonctionnement d'un poljé (Martini et al., 1976, Fig.4, p.236, modifié).

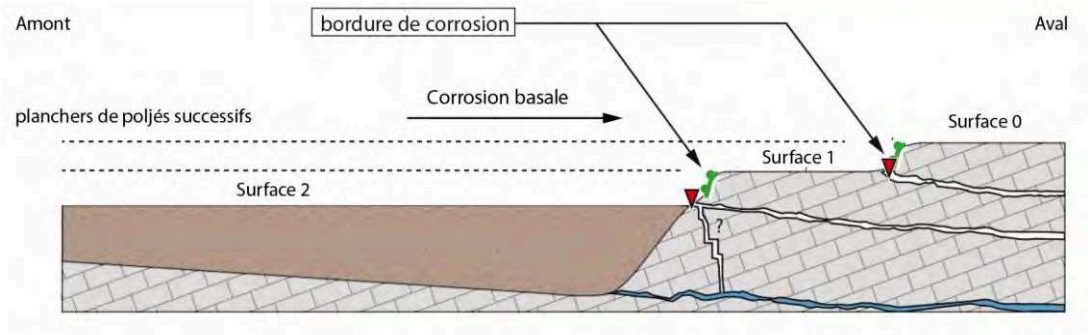


Figure 303 Profil schématique vertical montrant le fonctionnement d'un poljé, ses bordures de corrosion (en vert), les paléosurfaces associées et les réseaux karstiques en profondeur (Chadelle et Camus; 2018, modifié).

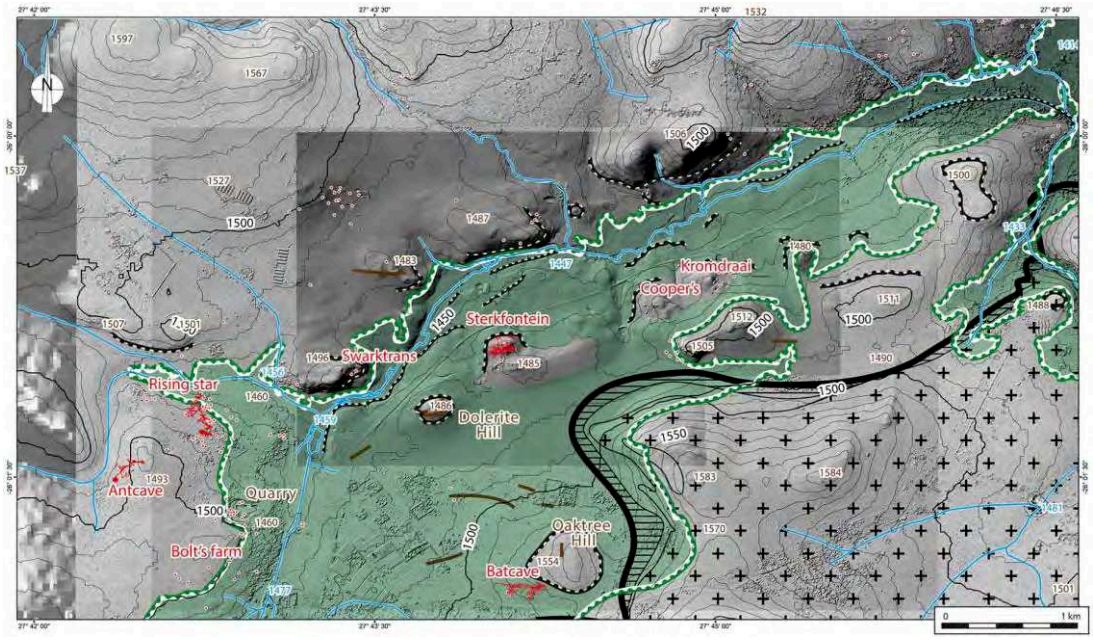


Figure 304 Paléo-poljé de la Bloubank à Sterkfontein et Kromdraai et éléments lithostructuraux.

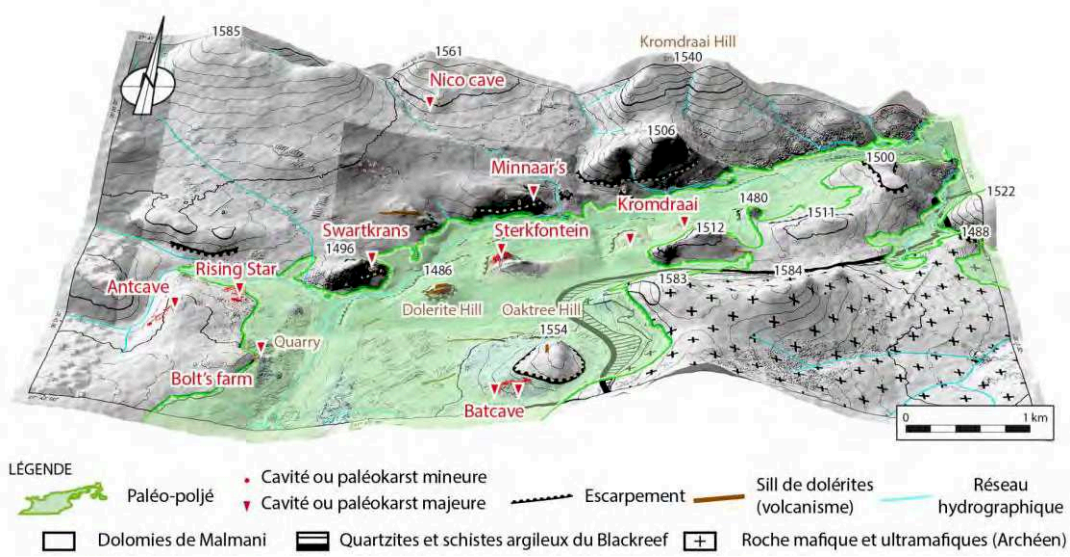


Figure 305 Vue 2.5D du poljé de la Bloubank (exagérée 5 fois).

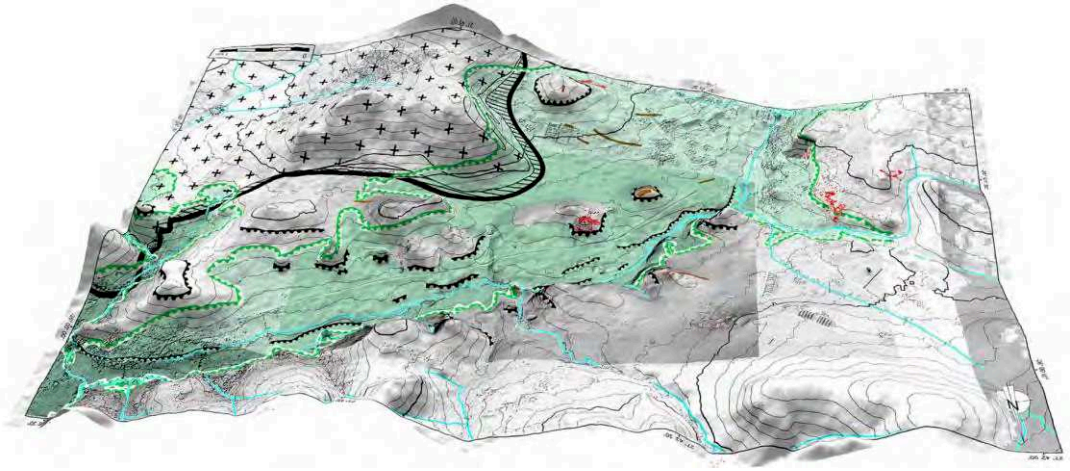


Figure 306 Vue 2.5D du poljé de la Bloubank (exagérée 5 fois).

La méthode géomatique *Red Relief Image Map (RRIM)* (Chiba *et al.*, 2008 ; Yokoyama et al, 2002), décrite dans le Chapitre n°1 (p.78), permet de localiser les replats (en jaune) et les morphologies karstiques. Lorsque ces replats sont situés sur des dolomies nous pouvons penser qu'il s'agit de paléo-poljés (en vert) comme celui de la vallée de la Bloubank dans le secteur de Sterkfontein et Kromdraai (Figure 304 et Figure 307).

Nous avons cartographié un grand nombre de vallées sèches (en orange) qui sont situées sous la **Surface Africaine** (~ 1560 m) caractérisée par les formations altérées, bréchifiées et silicifiées (Rooihoogte et *Chert Breccia*) (Figure 1155 p.1178, Figure 1165 p.1188 et sur le profil synthèse p.466). Elles sont majoritairement situées en rive gauche de la Bloubank et avant le bassin de la rivière Skeerpoort. Leurs présences pourraient être liées au pendage nord-ouest (20°) des dolomies à cet endroit-là.

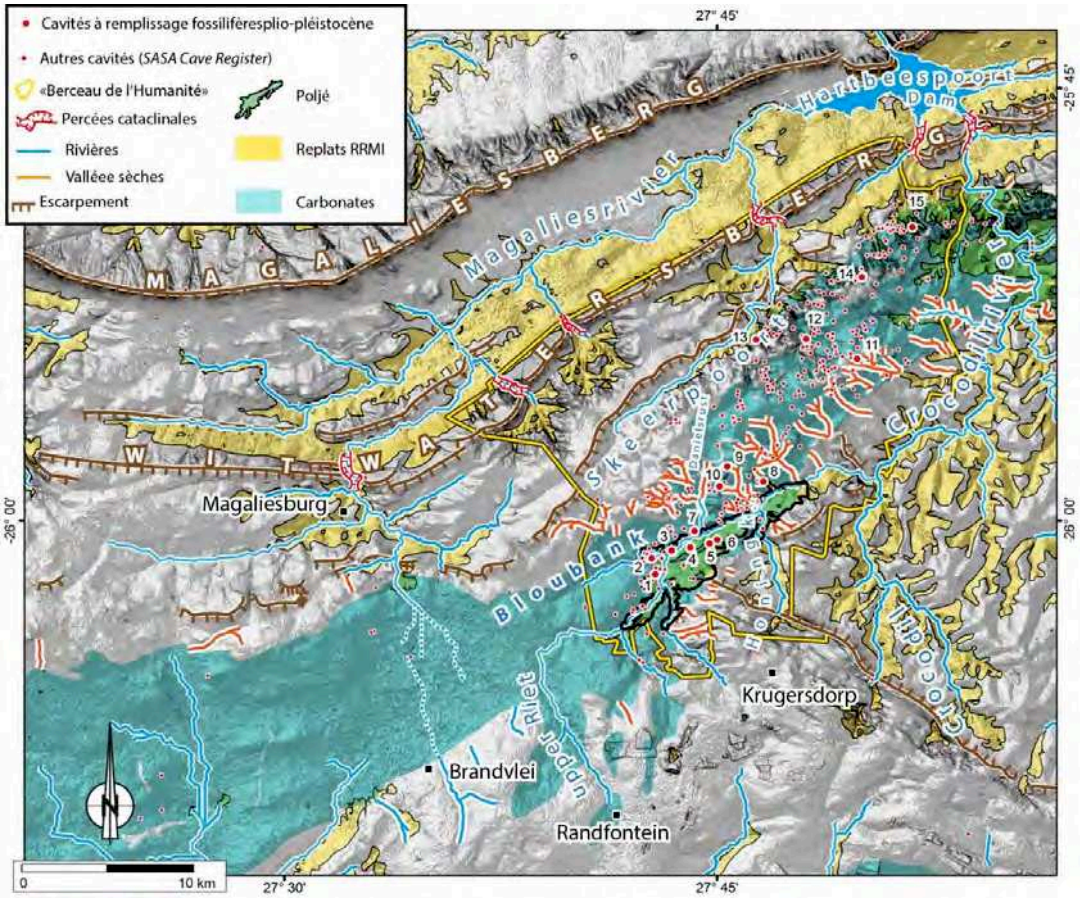


Figure 307 Grand replat, en bleu, qui correspond à un paléo-poljé lorsqu'il se développe sur les dolomies (en vert) c'est-à-dire surtout dans la vallée de la Bloubank.

Sur cette vue 2.5D, nous avons indiqué le paléo-poljé de la Bloubank par rapport aux autres bassins versants et aux sites fossilifères. Nous tenterons plus loin de faire la chronologie de mises en place de ces bassins (p.452) notamment en fonction des datations des sites fossilifères (synthétisées p.281) et de la datation inédite, par des cosmogéniques $^{26}Al/^{10}Be$, des alluvions de la Honingklip identifiées au niveau de l'ancienne mine d'or de Kromdraai de **3.55 Ma** (Darryl Granger *in* Bruxelles (2019, p.30)).

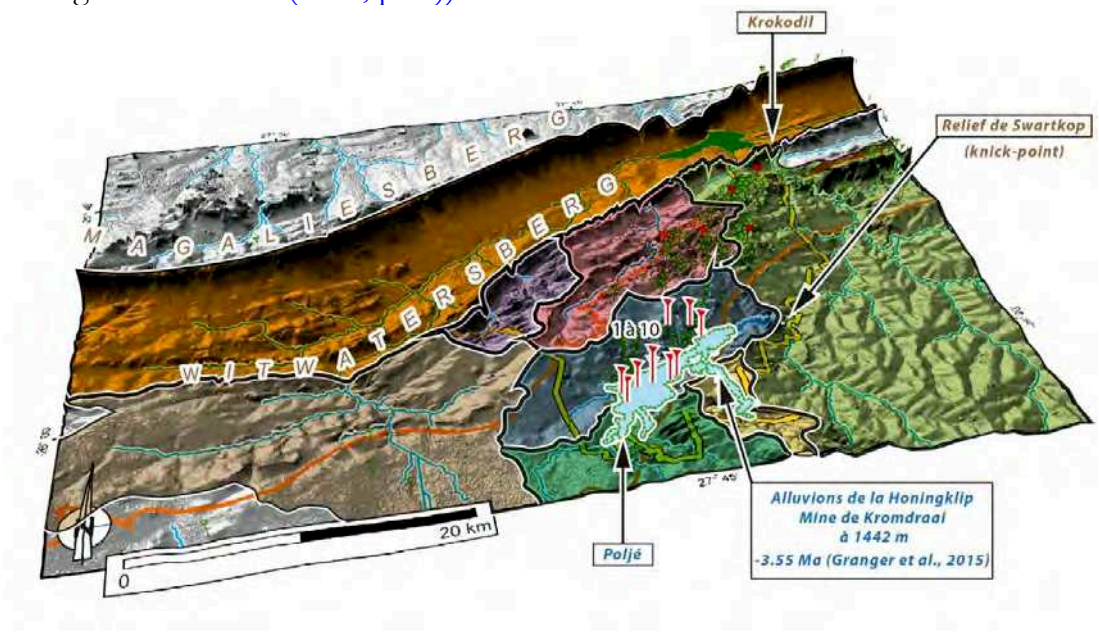


Figure 308 Mise en place d'un grand replat dont la partie située sur les dolomies, dans la vallée de la Bloubank et un poljé.

3.2.3.6.2. Les alluvions datées à 3.55 Ma à l'ancienne mine d'Or de Kromdraai (rivière Honingklip)

La Honingklip est un affluent de la Bloubank comme indiqué par les cartes (Figure 1173 p.1199 et Figure 1174), leur confluence (27.775 ; -25.991) est située à 1412 m d'altitude.

Son bassin versant hydrographique, en jaune sur la Figure 1159 (p.1182), commence, de l'amont vers l'aval, par une haute cascade sur les quartzites de Witwatersrand, dans le jardin botanique de Krugersdorp, ensuite elle coule sur les roches mafiques de l'Archéen puis traverse le *Black Reef* au niveau de l'ancienne mine de Kromdraai (musée) et enfin rejoint la Bloubank.

Des alluvions, conservées à 1442 mètres d'altitude, au niveau de l'ancienne mine d'or de Kromdraai (musée), indiquées sur l'image aérienne ci-dessous (Figure 309), sont datées de **3.55 Ma** (méthode de datation par des cosmogéniques $^{26}Al/^{10}Be$) par Darryl Granger *in* Bruxelles (2019, p.30).

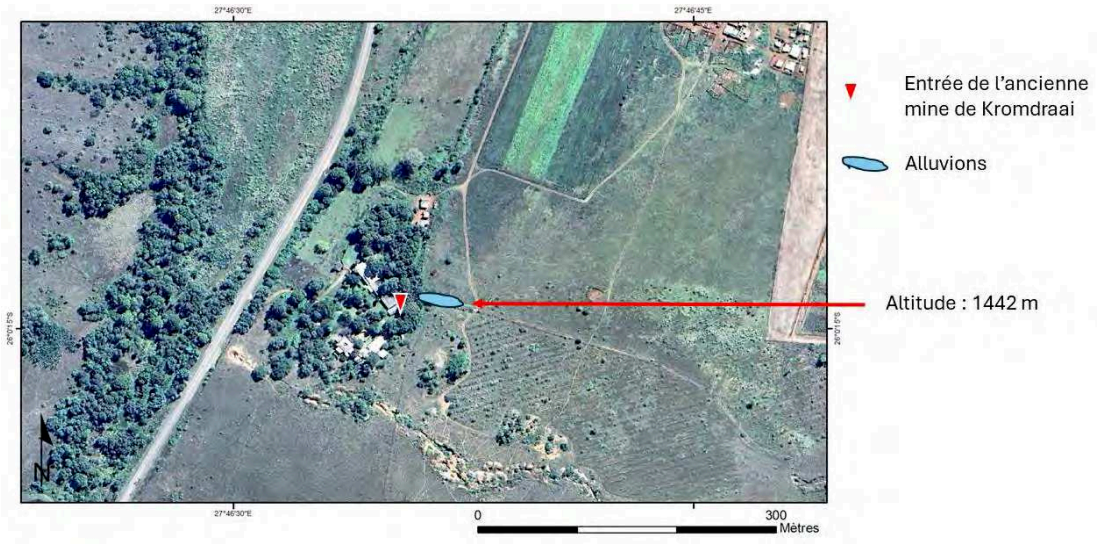


Figure 309 Alluvions, datées à 3.55 Ma, à l'ancienne mine de Kromdraai.

Un calcul rapide permet de mesurer une incision verticale de seize mètres en 3.5 millions d'années, soit un taux d'incision moyen de 4.5 m/Ma (Bruxelles, 2019, p.30), ce qui est très faible. C'est cette immunité des paysages du *CoH* face à l'érosion qui a permis de conserver des vestiges de nos ancêtres dans cette vallée.

3.2.3.6.3. Une surface d'aplanissement à 1440 m

Dans le secteur de l'ancienne mine d'or Kromdraai, le *Black Reef* affleure (Figure 310). La route, de l'ancienne mine qui rejoint *Oaktree* vers le sud, recoupe cette formation et permet d'identifier différentes lithologies constituées de bancs de quartzites, de conglomérats et de pisolites, photographiés ci-dessous Figure 311 et Figure 312.

Un grand aplanissement, à 1440 m d'altitude, se développe sur le *Black Reef* à l'ancienne mine de Kromdraai (Figure 310). D'après ce que nous avons vu précédemment, cette surface est donc datée de 3.5 Ma.

Localisation googlemaps : https://maps.app.goo.gl/ADL5ZXS9rVnntSqTA
Localisation googlemaps : https://maps.app.goo.gl/eHzpdSyTeBCwkviN7 (26.0104443, 27.7717207).

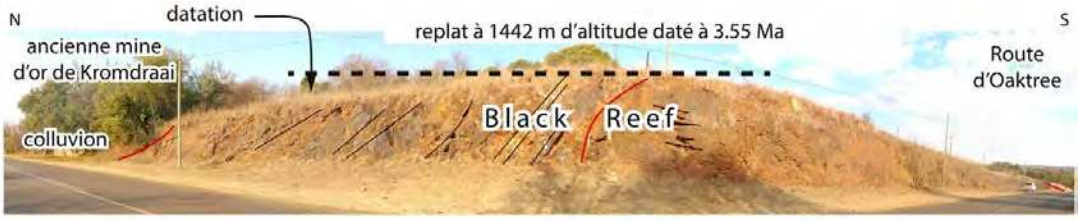


Figure 310 Replat sur le Black Reef à l'ancienne mine de Kromdraai, daté à 3.5 Ma.
https://maps.app.goo.gl/adh5H8axDHrBbQfd6



Figure 311 Conglomérats du Black Reef à l'ancienne mine d'or de Kromdraai.



Figure 312 Pisolites du Black Reef.



Figure 313 Colluvions au bord de la route.

3.2.3.6.4. Surface structurale du Black Reef : Pisolites et vallée sur la surface S4 à 1450 m calée sur le Black Reef en rive gauche

Nous avons décrit que le *Cradle of Humankind* a été plusieurs fois érodé par des surfaces d'érosion (Surface Gondwana, Surface Africaine, Surface Post-africaine), mais il existe aussi d'autres types de surfaces dans ce paysage, ce sont les surfaces structurales.

Définition d'une surface structurale :

On appelle surface structurale une surface topographique correspondant au plan stratigraphique supérieur d'une couche dure (sédiments ou lave) (Archambault *et al.*, 1980, p.78).

Une surface structurale est donc le mur d'une **formation géologique**. Nous avons décrit les formations géologiques du *CoH* et du Bassin du Transvaal dans la partie précédente. Elles sont résumées sur le log stratigraphique de la Figure 145 (p.205) ou celui plus complet (Figure 1204, p.1233) et sur l'analyse des surfaces (Figure 426 et Figure 427, p.467).

Par exemple, nous identifierons une surface structurale à 1450 m d'altitude, en rive gauche de la rivière Bloubank, qui correspond au toit de la formation du *Black Reef* (ci-dessous, Figure 314), indiquée par des pointillés rouges sur la coupe schématique synthétique du *CoH* (p.466) et qui indique une érosion différentielle lors de la mise en place de la surface sous-jacente, probablement la surface S4. On la repère aussi sur les figures (p.412).

> *« Un petit escarpement entourant le socle granitique semi-circulaire est formé par les collines proéminentes inclinées vers le nord de la formation de la Black Reef. » (Ingram et van Tonder, 2011, p.9).*

Il est important que le contraste soit marqué entre deux lithologies pour former une surface structurale. C'est le cas entre les schistes et les quartzites du *Black Reef* qui ne seront impactés par la karstification de la même manière que les dolomies de Malmani qui les surmontent. Le *Black-Reef* formera donc une surface substructurale (telle que définie par Archambault *et al.*, 1980, p.79) qui coïncide aussi avec une surface d'altération dans ce secteur. Nous en reparlerons lorsque nous évoquerons la formation de Rooihoogte et les formations à brèches et les conglomérats (p.299) et lorsque nous parlerons des pinacles de « *Devil's Kantoor* » que l'on retrouve justement sur le *Black Reef* mais à l'est du Bassin du Transvaal.

Nous avons identifié une surface structurale correspondant au *Black Reef* en rive gauche de la Bloubank. Elle est caractérisée par un replat topographique (Figure 315) remarquable par une épaisse accumulation de pisolithes ferreux (Figure 316 et Figure 317).

Le relief structural, en pente, du Black Reef, vers 1450 m à 1460 m d'altitude, a joué dans une moindre mesure le rôle de *knickpoint* pour l'érosion régressive des dolomies par la Bloubank, en amont.

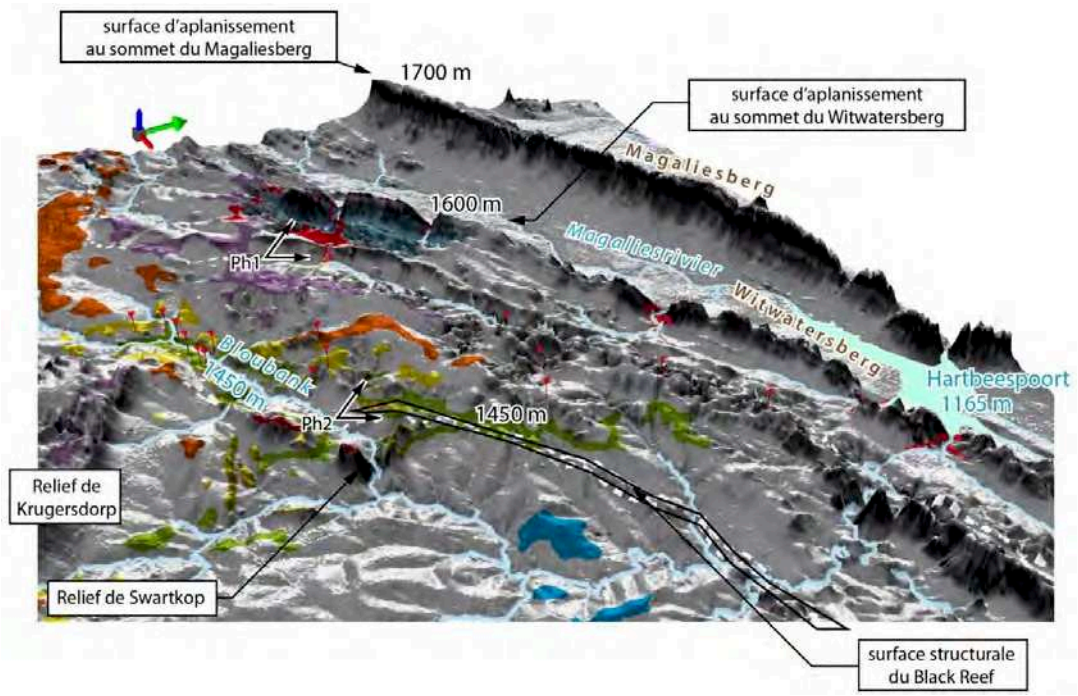


Figure 314 Vue 2.5D montrant les surfaces et la position des prises de vue panoramiques.

Ph 1 : position du panorama de la Figure 271.
Ph 2 ; position du panorama de la Figure 315 (en vert la surface à 1450 m).

Nous avons aussi identifié cette surface sur le *Black Reef* à l'ancienne mine d'or de Kromdraai (p.354).

Cette plaine à 1450 m d'altitude correspond donc à la surface structurale formée par la formation du *Black Reef*, située ici en rive gauche de la Bloubank. Cette surface est caractérisée par une accumulation importante de pisolites de fer.

Localisation googlemaps : https://maps.app.goo.gl/Cq9sAvHBtiiDQVVU6



Figure 315 Plaine située à 1450 m.



Figure 316 Accumulations indurées de pisolites de fer.



Figure 317 Pisolite de fer.

3.2.3.6.5. Surface à 1430 m sur les alluvions de la Bloubank

Lors de travaux routiers, des alluvions nous permettent de caractériser la surface S4 à 1425 m d'altitude.

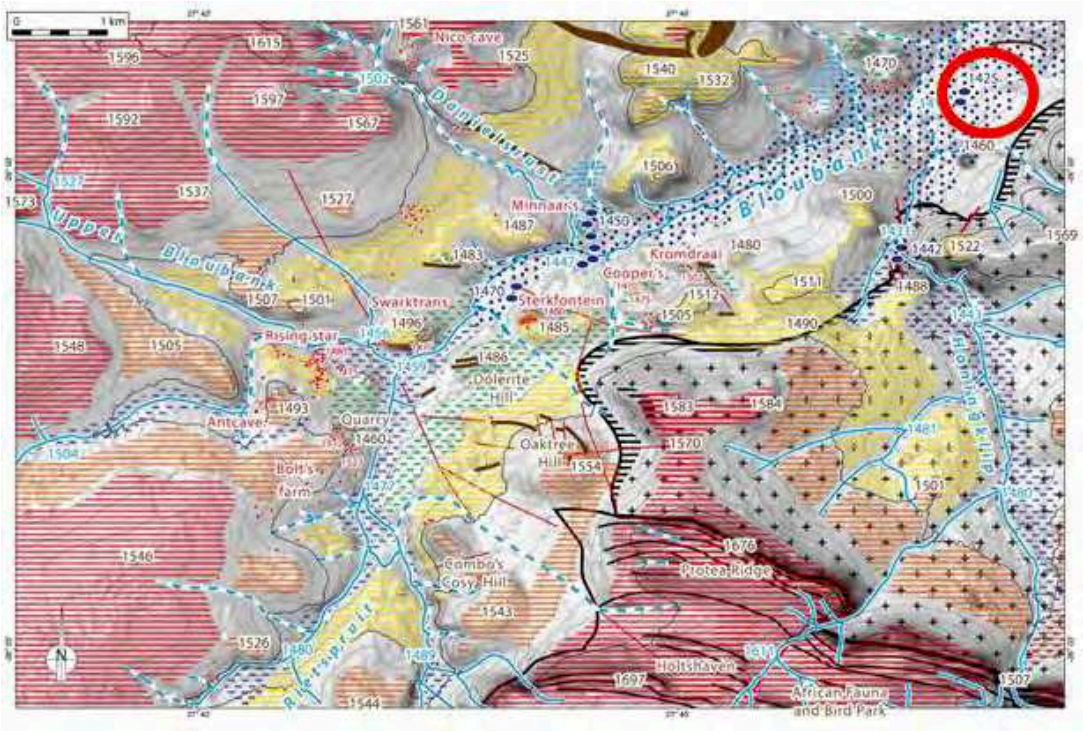


Figure 318 Localisation des alluvions sur la surface S4, indiquée par le cercle rouge.



Figure 319 Travaux routiers faisant apparaître de gros galets fluviatiles (alluvions) à 1425 m d'altitude (surface S4).

(Lien : https://maps.app.goo.gl/1yq1ZxfKCcrNWEDK8).



Figure 320 Détails des alluvions à 1425 m d'altitude.

3.2.3.6.6. Surface à 1410 à 1430 m sur les roches de Ventersdorp

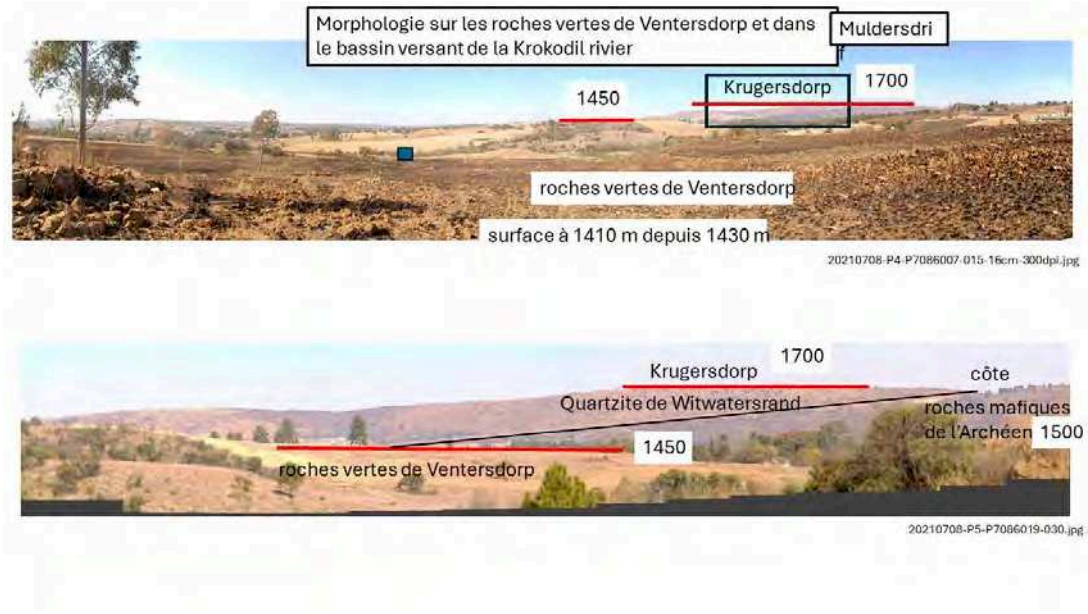


Figure 321 Surface sur les roches de Ventersdorp à Muldersdri.

3.2.3.6.7. Surface à 1430 m sur les granito-gneiss à Len's Den

Dans le bassin versant de la Krokodil River, on trouve une vaste surface d'aplanissement à 1430 m d'altitude dans les granito-gneiss.

Localisation googlemaps : https://maps.app.goo.gl/tperCb6TGgZ7ALQN6
Localisation googlemaps : https://maps.app.goo.gl/3aA3QRZL9ATegTHu8

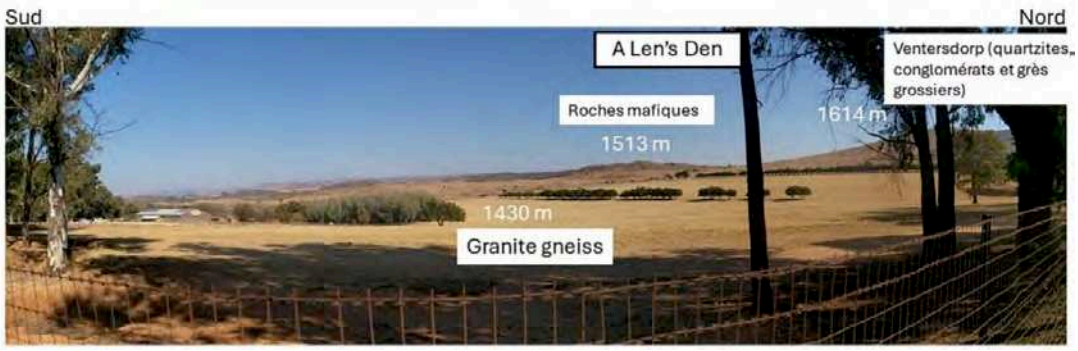


Figure 322 Panorama de Len's Den montrant l'aplanissement à 1430 m sur les granito-gneiss.



Figure 323 Tranchée permettant de voir les stones-lines sur les gneiss.



Figure 324 Stone-line.

3.2.4. Remarques sur les brèches silicifiées au-dessus du gisement karstique fossilifère de Cooper's

Cette surface se situe à 1514 m d'altitude, elle se situe bien en-dessous de la Surface Africaine. C'est la surface orange (S2) qui commence à 1500 / 1510 m (Figure 326 p.364 ; Figure 355, p.404 ; Figure 425, p.466).



Figure 325 Brèches silicifiées sur la colline au-dessus du gisement de Cooper's.

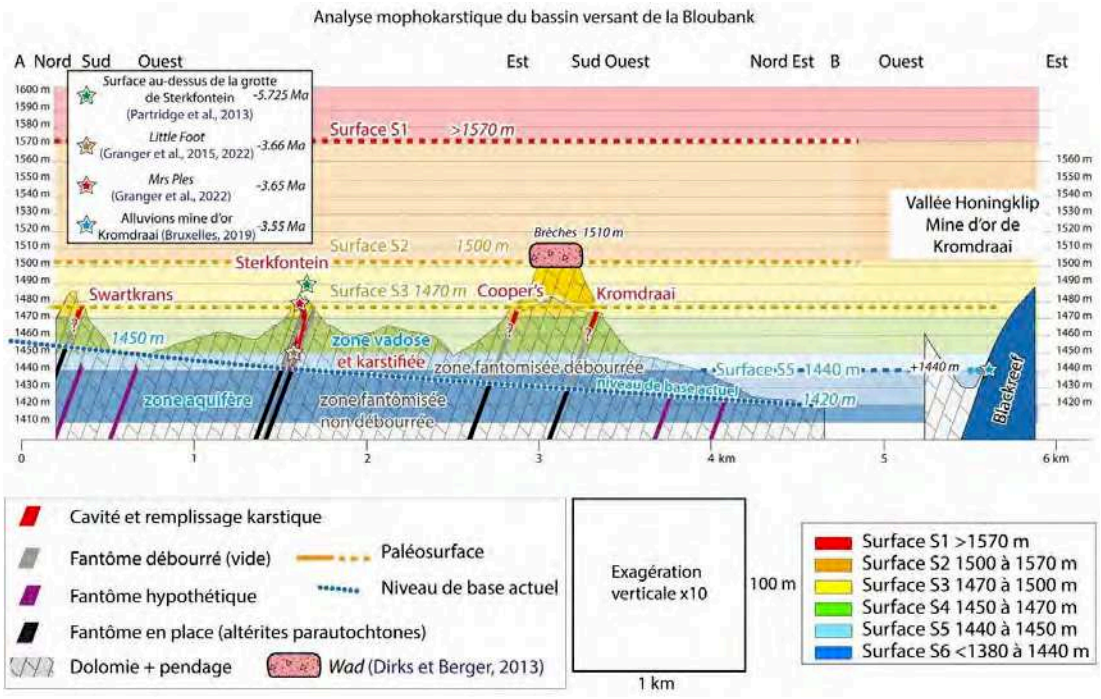


Figure 326 Coupe géologique et morphokarstique des réseaux de Swartkrans, Sterkfontein, Cooper's et Kromdraai.

3.2.5. Remarque sur le vallon à l'est de la grotte de Sterkfontein dont la limite ouest est une faille bréchifiée et silicifiée

À l'est de la grotte de Sterkfontein, dont le réseau karstique est indiqué en rouge sur la Figure 327, il existe un large vallon de faible profondeur caractérisé par une formation superficielle sombre et marqué principalement par une absence de dolomie. Il est délimité à l'ouest par une longue faille bréchifiée et silicifiée.

À l'est de cette brèche, le long d'un chemin orienté nord-sud, on trouve parfois l'encaissant qui affleure, il est caractérisé par des dolomies très altérées et constituées principalement de cristaux automorphes centimétrique de silice. À l'air libre, ces amas de cristaux ont une couleur orangée liée à l'altération de surface (Figure 334) tandis que les cristaux sont translucides et la matrice est de couleur blanche lorsqu'on les casse (Figure 335). Ces cristaux indiqueraient des phénomènes d'hydrothermalisme. Existe-t 'il un lien entre la présence de la cavité de Sterkfontein et cette grande faille matérialisée par des brèches ? A-t 'elle joué un rôle au niveau de la circulation d'eau dans le massif et lors du débourrage du fantôme ?

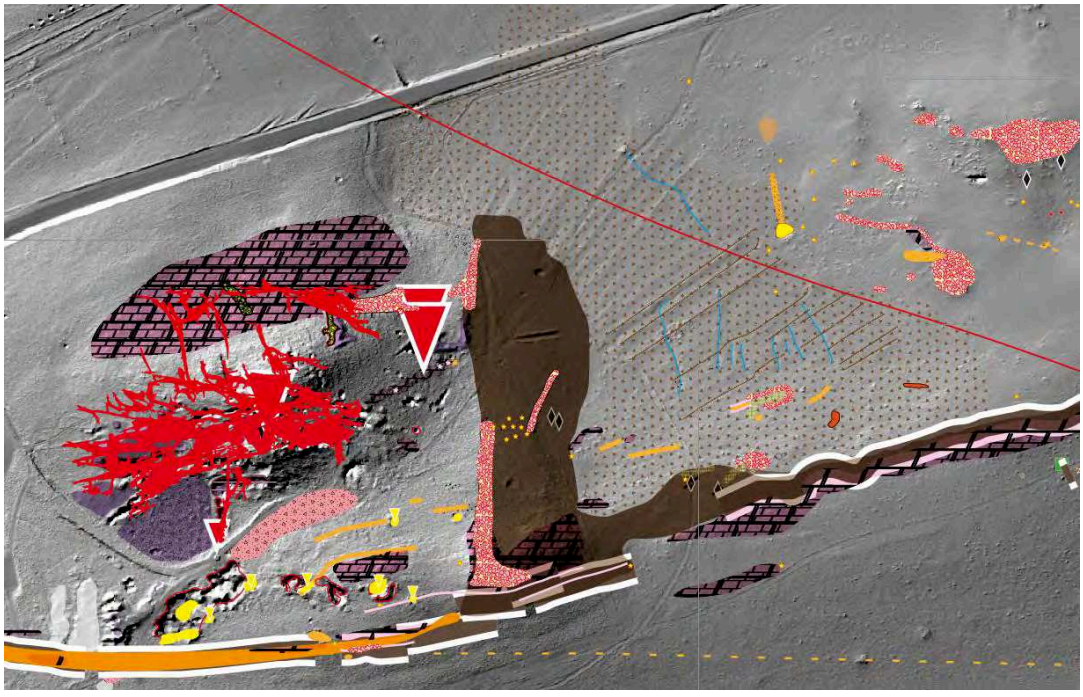


Figure 327 Localisation des dolomies silicifiées (en rose), d'une zone caractérisée par une absence de dolomies (en marron) et des formations de brèches silicifiées (en rose) et le réseau karstique de la grotte de Sterkfontein (en rouge).



Figure 328 Niveau de « brèche de chert schisteux » SCB (Slaney Chert Breccia) (Hobbs et al., 2011) dans les dolomies, au sud de la colline de Sterkfontein, qui forme un petit escarpement que l'on suit jusqu'à la colline de Cooper's et jusqu'au gisement de Kromdraai. Wilkinson (1973, Fig.7.1) a cartographié cet affleurement (carte suivante) et indique que c'est un sille de dolérite.



Figure 329 Niveau de « brèche de chert schisteux » SCB (Slatey Chert Breccia) (Hobbs et al., 2011) dans les dolomies, au sud de la colline de Sterkfontein.

Wilkinson (1973, Fig.7.1) a identifié le sill de dolérites, en marron, et photographié ci-dessus, et la faille silicifiée, indiquée en pointillé noir et par la flèche rouge, qui affleure près de la grotte de Sterkfontein, *Lincoln et Fault Caves*. Il explique que la grotte s'est formée contre cette faille silicifiée qui forme une barrière imperméable (Wilkinson, 1973, Fig.4.2).

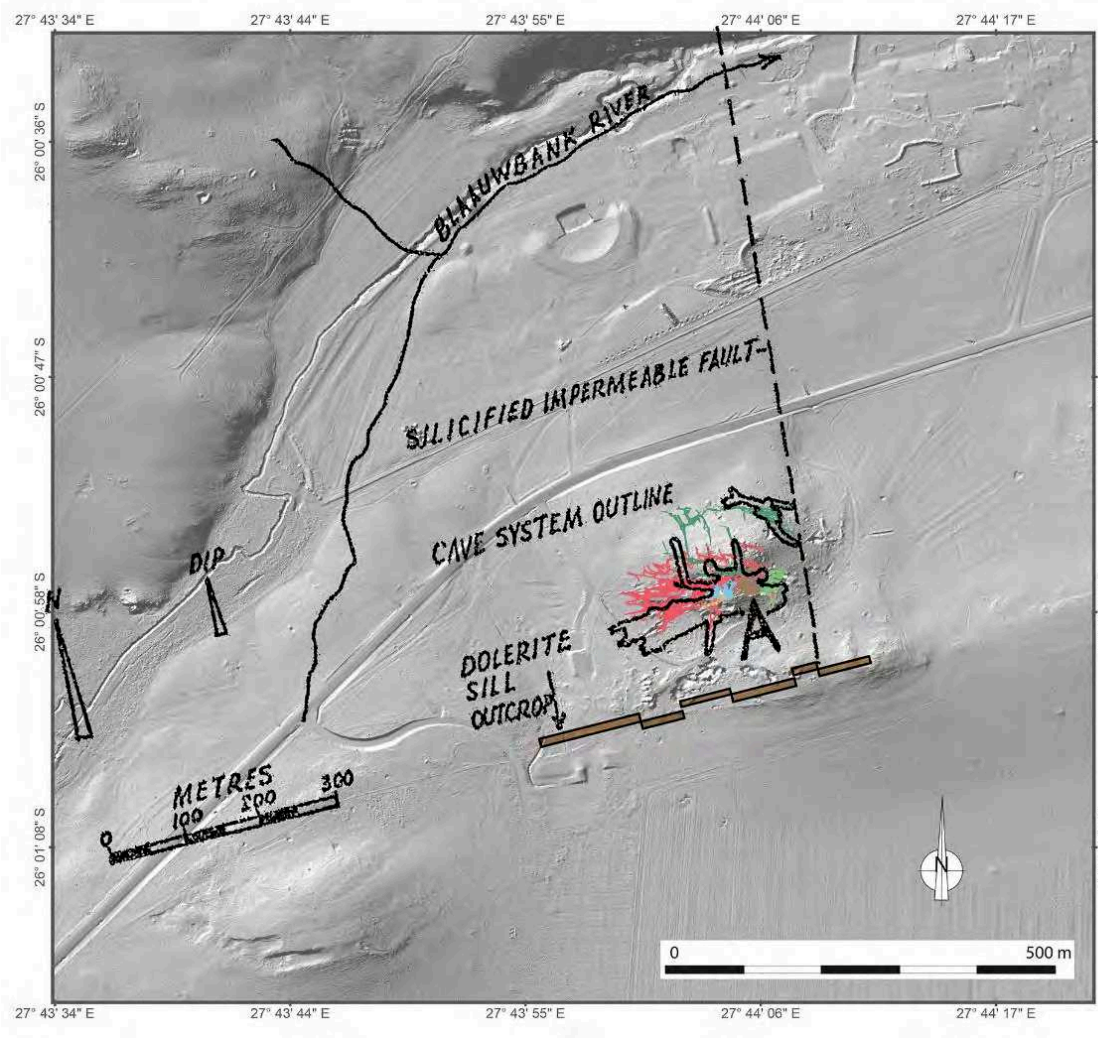


Figure 330 Report de la carte de Sterkfontein, Lincoln et Fault selon Wilkinson (1973, Fig.7.1, modifié).

Le vallon, photographié sur la Figure 331 et cartographié en marron sur la Figure 191, est constitué de poches de cristaux de silices automorphes centimétriques (Figure 332 et Figure 333) suggérant de l'hydrothermalisme. Existe-t-il un lien entre l'hydrothermalisme et la fantômisation du réseau de Sterkfontein qui se situe contre cette faille silicifiée ?



Figure 331 Affleurement de dolomies très altérées, de poches de silices cristallisées et présence d'une couverture sédimentaire sombre (fantôme de dolomies ?).



Figure 332 Cristaux automorphes de silice.



Figure 333 Amas de cristaux automorphes de silice exhumé d'une couverture sédimentaire sombre pouvant être du fantôme de dolomies.



Figure 334 Détails sur les cristaux centimétriques automorphes de silice tels que trouvés à l'affleurement, altérés et colorés.



Figure 335 Détails des cristaux centimétriques automorphes de silice observés sur une cassure fraîche.

On observe aussi des minérali-sations grises.

3.2.5.1. Brèche de type n°5 identifiée sur le terrain entre la grotte de Sterkfontein et le gisement de Kromdraai

Un affleurement de *SCB* (*Slatey Chert Breccia*, Hobbs, 2011, Plate 10, p.91) (Figure 328, Figure 329 et Figure 336) est trouvé au-dessus de la colline de la grotte de Sterkfontein où ils arment un petit escarpement que nous suivons jusqu'aux paléokarsts de Cooper et au gisement de Kromdraai. Nous observons que les filons rejoignent les brèches de la colline de Cooper. Dirks a observé un phénomène similaire à Malapa sur la surface à 1520 m d'altitude (Dirks et Berger, 2013, p.18).

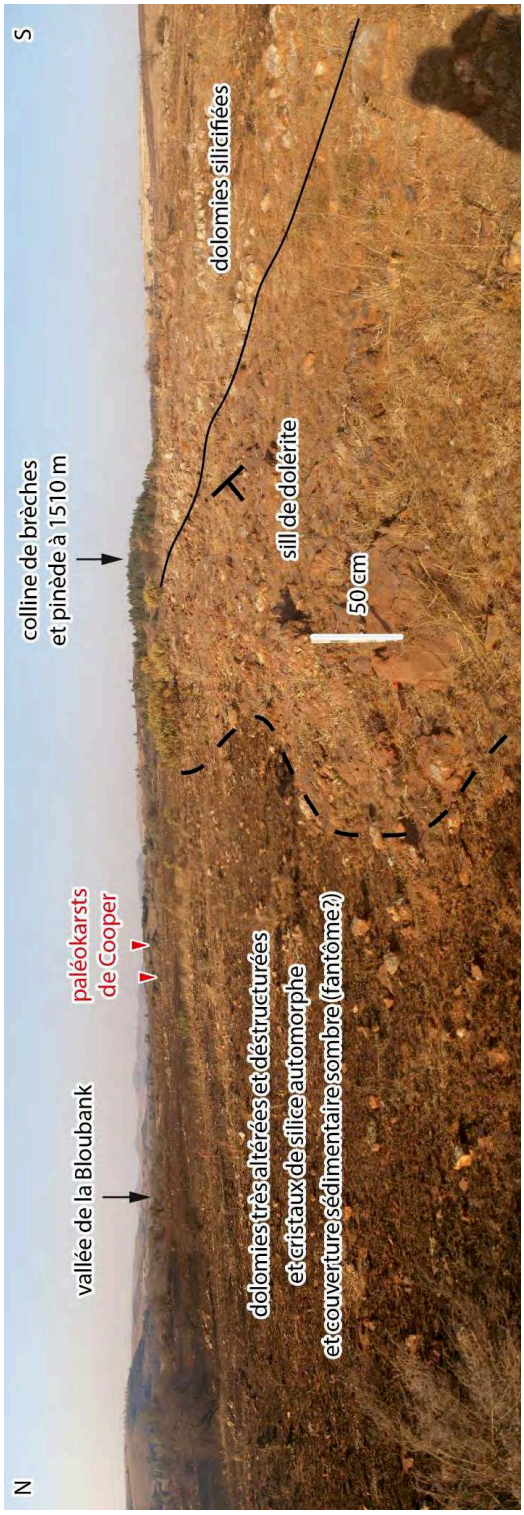


Figure 336 Affleurement de Slatey Chert Breccia que nous suivons jusqu'aux paléokarsts de Cooper et au gisement de Kromdraai.

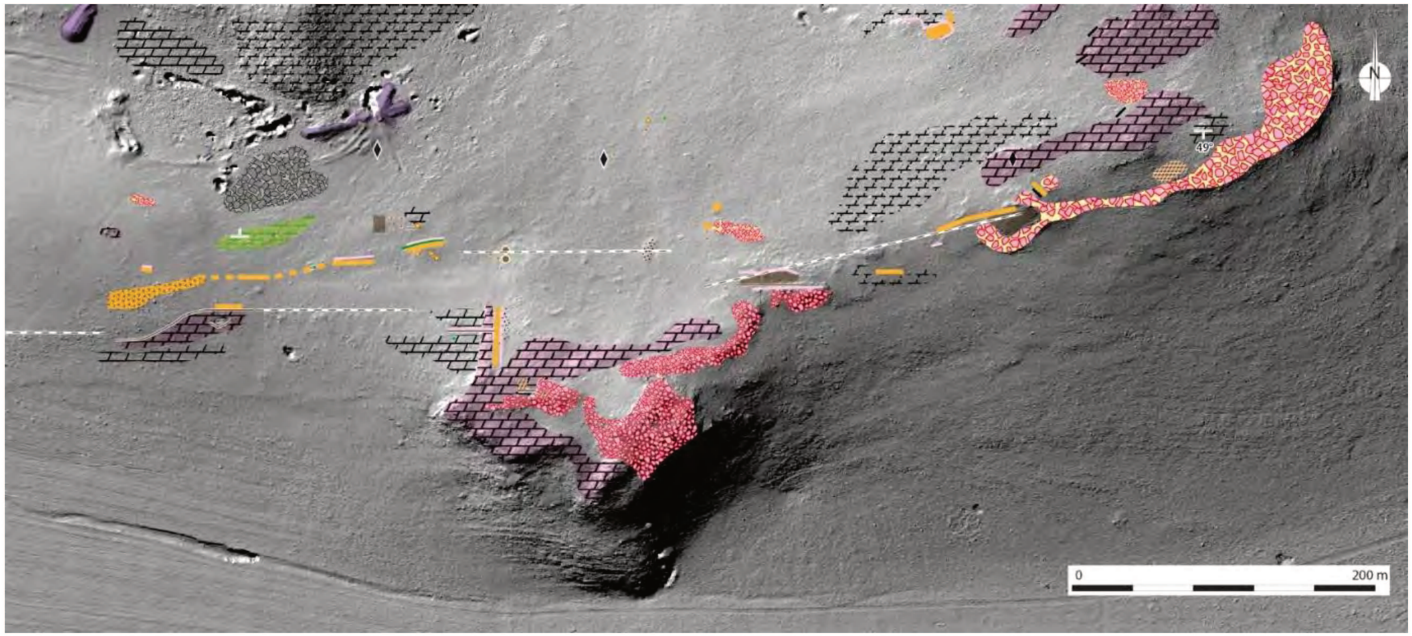


Figure 337 Carte du relief formant la pinède montrant la complexité des filons SCB, cartographiés en orange lorsqu' ils sont trouvés in-situ et en pointillé blanc quand ils sont très résiduels ou supposés. Ce pourrait être les brèches de type n°1 (Dirks et Berger, 2013).

3.3. STRUCTURATION GEOLOGIQUE DU TRANSVAAL ET MISE EN EVIDENCE DE L'EROSION REGIONALE ET DES PALEOSURFACES D'EROSION

Après avoir décrit et caractérisé la Surface Africaine, nous allons maintenant nous intéresser à ce qu'il y a en-dessous, c'est-à-dire les dolomies karstifiées et les autres types de roches du *Cradle of Humankind*.
Nous réfléchirons à la chronologie de l'établissement des paléosurfaces. Nous en tirerons des enseignements sur la karstification et les mécanismes à l'origine des cavités fossilifères, et nous tenterons de comprendre les particularités de la vallée de la Bloubank, qui a conservé dans ses cavités des fossiles d'Hominines.

3.3.1. Géologie du Cradle of Humankind et réalisation d'une nouvelle cartographie

Avant de parler et de présenter les cartes géologiques du *Cradle of Humankind*, rappelons brièvement pourquoi ce karst est célèbre et comment il a été étudié.

3.3.1.1. Carte géologique inédite du Cradle of Humankind

3.3.1.1.1. Historiographie succincte du Cradle of Humankind

Ce karst a d'abord été prospecté pour la recherche de calcite au XIXe siècle, puis au XXe siècle pour la recherche de fossiles à la suite des premières découvertes paléontologiques. La découverte d'un crâne d'Australopithèque conservé dans les travertins du plateau dolomitique karstifié de Ghaap (Dart, 1925b), suivie par celle de plusieurs crânes dans la grotte de Sterkfontein (Broom, 1936) et d'un crâne de paranthrope à Kromdraai en 1938, a eu un grand retentissement à l'époque. Jusqu'alors, les grottes étaient exploitées seulement pour fournir de la calcite à une industrie de l'or en plein essor, et les remplissages fossilifères étaient souvent dynamités. Mais, à partir de 1947, les découvertes de fossiles d'Australopithèques dans la grotte de Sterkfontein, et à Swartkrans au début des années 1950, puis, à la fin des années 1990, à Drimolen et Gondolin et dans la vallée de Makapan, située en dehors du *CoH*, relancent l'intérêt pour le karst et aboutit au classement du *CoH* comme *World Heritage Site* par l'UNESCO en 1999 (*DACEL*, 1998). Ensuite, le karst ne cessera d'être étudié et prospecté.

Le géologue et géomorphologue Partridge a longtemps étudié l'Afrique du Sud (Brink et Partridge, 1965 ; Partridge et Maud, 1987, 2000 ; Partridge *et al.*, 2010) et ce karst en particulier, depuis sa thèse en 1969 jusqu'à aujourd'hui (Partridge, 1969, 1973, 1978, Partridge *et al.*, 1999, 2003, Partridge, 2005).
Le géologue Dirks travaille également pour dater les sites du « Berceau de l'Humanité » (Dirks *et al.*, 2016) et coopère avec Berger pour étudier les karsts fossilifères (Dirks et Berger, 2013), notamment ceux de Rising Star et Malapa, qu'ils ont découverts (Dirks *et al.*, 2010, 2015, 2017 ; Dirks et Berger, 2013).
Le géologue minier et spéléologue français, Jacques Martini, travaillant en Afrique du Sud pour le *Council for Geoscience*, a longuement prospecté la région et les karsts sud-africains et a beaucoup publié sur ce secteur (Martini, 1976, 1979, 1981, 1985, 1987, 1990, 1994, 1998, 2022, 2003 et 2007).

Cependant, de nombreux aspects de ce karst restent encore à comprendre, comme le soulignent les études récentes de Laurent Bruxelles sur la fantômisation dans la grotte de Sterkfontein et à Swartkrans (Bruxelles, 2014, 2017, 2019, 2022).

Cette région karstique est aussi très étudiée d'un point de vue :

- **géotechnique** du fait des phénomènes désastreux des dolines d'effondrement et des soutirages (*sinkholes)* (Trollip, 2006 ; ZITHOLELE Consulting, 2009 ; Richardson, 2013, Table 4 p.39, Figure 14 p.44 ; Oosthuizen *et al.*, 2013, 2015 ; Kleinhans, 2002, 2017 ; Dippenaar *et al.*, 2019 ; Pharoe *et al.*, 2018, 2020) ;

- **hydrogéologique** pour tenter de préserver les ressources en eau malgré les activités minières très polluantes (Holland, 2009 ; Holland et Wiegmans, 2009 ; WRC, 2010 ; Hobbs, 2011) ;

- **minéralogique** pour les ressources en manganèse (Beukes *et al.*, 1999, 2016, Van Niekerk et al., 1999 ; Pack *et al.*, 2000).

3.3.1.2. Absence de carte géologique au 1/50 000 dans le secteur de Sterkfontein et la nécessité de réaliser de nouvelles cartes

Le célèbre karst du *Cradle of Humankind*, bien que riche en gisements paléontologiques et de renommée internationale, n'a pas été aussi bien cartographié qu'on le souhaiterait, alors que cette région est étudiée depuis longtemps par les géologues (Molengraaff, 1901 p.38 à 40 ; Brink et Partridge, 1965 ; Partridge, 1969, 1973, 1978 ; Gutzmer et Beukes, 1994, 2002 ; Martini, 1976a, 1990, 1994, 1998 ; Kinnaird *et al.*, 2005, Parker *et al.*, 2013 ; Taylor *et al.,* 2009 ; Rasmeni, 2012 ; Pharoe *et al.*, 2018, 2020, etc.).

Ainsi, il n'existe pas de carte géologique au 1/50 000 de la partie sud du *Cradle of Humankind*. Les cartes géologiques Randfontein, n°2627BA et Roodepoort, n°2627BB n'existent pas, alors que les cartes à cette échelle existent pour la partie nord : Hekpoort, n°2527DC et Broederstroom, n°2527DD (Figure 338 et Figure 339).

De ce fait, les contours géologiques utilisés dans les rapports et les publications scientifiques récentes (Holland et Wiegmans, 2009 ; Hobbs *et al.*, 2011, Fig.2, p.3 ; Dirks *et al.,* 2015 ; Holland, 2009 ; Holland et Wiegmans, 2009 ; Holland et Witthüser, 2018, Fig.2 ; Hobbs *et al.*, 2022, Fig.2, p.171 ; Etc.) sont malheureusement ceux de la carte géologique de Johannesburg au 1/148 000 (Sheet 52) de 1921. C'est une échelle insuffisante pour réaliser des études karstologiques approfondies.

Nous avons donc dû réaliser, au préalable, une carte géologique inédite du *Cradle of Humankind* (Figure 340).

Pour cela, nous avons compilé dans un SIG (Système d'Information Géographique) :

- des données LIDAR inédites, fournies par Matthew V. CARUANA ;
- des images satellites haute résolution ainsi que différentes données géomatiques fournies par le *Chief Directorate: National Geo-Spatial Information (CDNGI)* sud-africain ;
- différentes cartes géologiques et publications scientifiques antérieures listées en annexe (p.1173), qu'il a fallu géoréférencer (cf. Fiche méthodologique p.1137) et harmoniser.

Un autre problème vient des formations d'altération que l'on trouve en abondance dans le Bassin du Transvaal et dans le *CoH* notamment entre les dolomies de Malmani et le groupe de Pretoria, c'est-à-dire plus particulièrement au toit des dolomies à l'affleurement.

Elles ont été cartographiées à l'ouest du *CoH* sur la carte au 1/250 000 de Wesrand (West Rand) (n°2626) (*Geological Survey South Africa*, 1986) mais elles n'ont pas été cartographiées dans le CoH sur la carte de East Rand (n°2628) (*Geological Survey South Africa*, 1986) (Figure 338), ni sur les cartes hydrogéologiques de Marshall (2009, 2011). Peut-être parce qu'elles sont recouvertes d'une couverture d'altération qui les masque et que nous venons de décrire précédemment. Ces altérites ont été décrites par plusieurs auteurs et portent plusieurs dénominations : Rooihoogte, Chert Breccia, Giant Chert, Diepkloof, etc. Elles peuvent présenter des différences que nous n'aborderons pas ici. Nous devons donc rester critiques quant à la cartographie de ces formations sur nos cartes de synthèse car nous n'avons pas pu entièrement les valider par des observations sur le terrain. Cependant, elles nous intéressent pour notre étude sur la karstification des dolomies.

Remarque sur la cartographie des dykes de roches intrusives, ils sont cartographiés sur les 4 cartes au 1/50 000 (2527 DA, DB, DC, DD) et sur la carte au 1/250 000 de Rustenberg (n°2526) mais pas sur les autres cartes au 1/250 000, comme la carte de Westrand (n°2626). La cartographie des roches intrusives n'est donc pas continue dans la partie sud du *CoH* du fait que les cartes au 1/50000 n'existent pas.

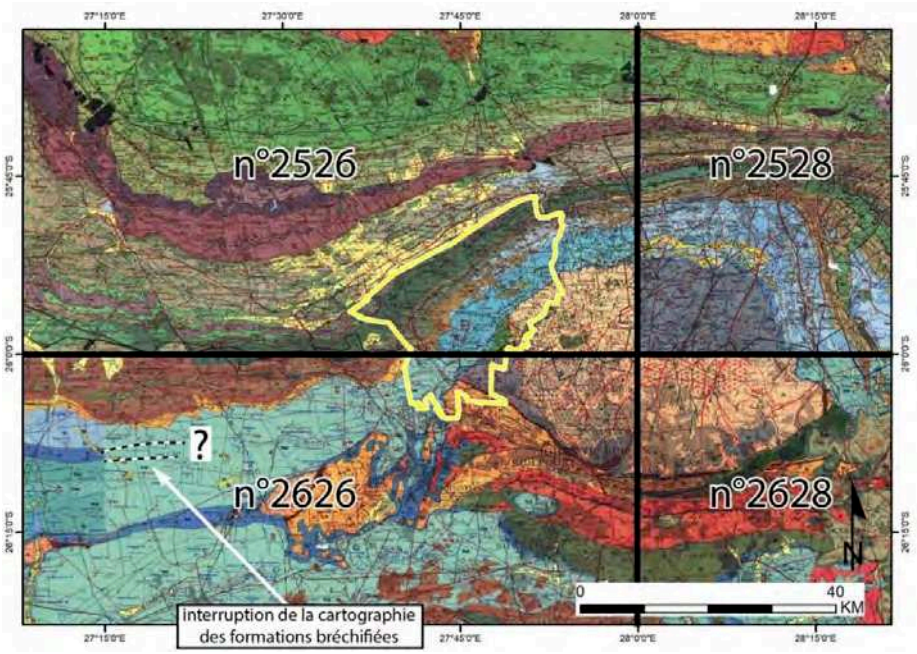


Figure 338 Localisation du CoH sur les fonds de cartes géologiques au 1/250 000 : Wes Rand (n°2626), Est Rand (2628), Pretoria (2528) et Rustenberg (2526). Remarquons l'interruption de la cartographie des altérites à l'est de la feuille n°2626.

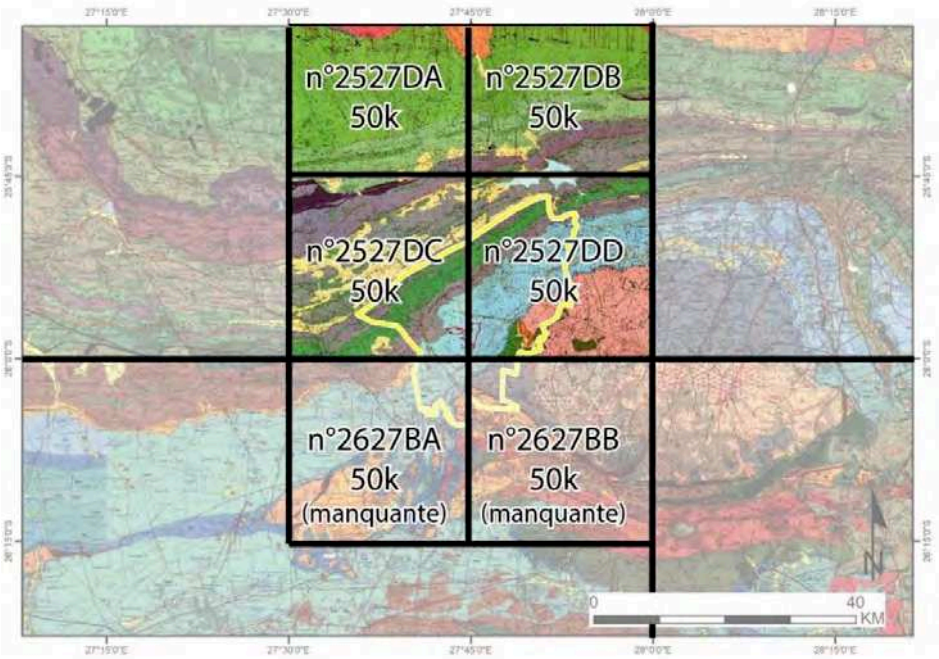


Figure 339 Localisation du CoH sur les fonds de cartes géologiques au 1/50 000. Nous remarquons que les feuilles n°2627BA et 2627BB sont manquantes.

3.3.1.3. Carte géologique inédite du Cradle of Humankind

En synthétisant les données cartographiques disponibles, nous avons pu réaliser les cartes géologiques suivantes (Figure 340 à Figure 343).

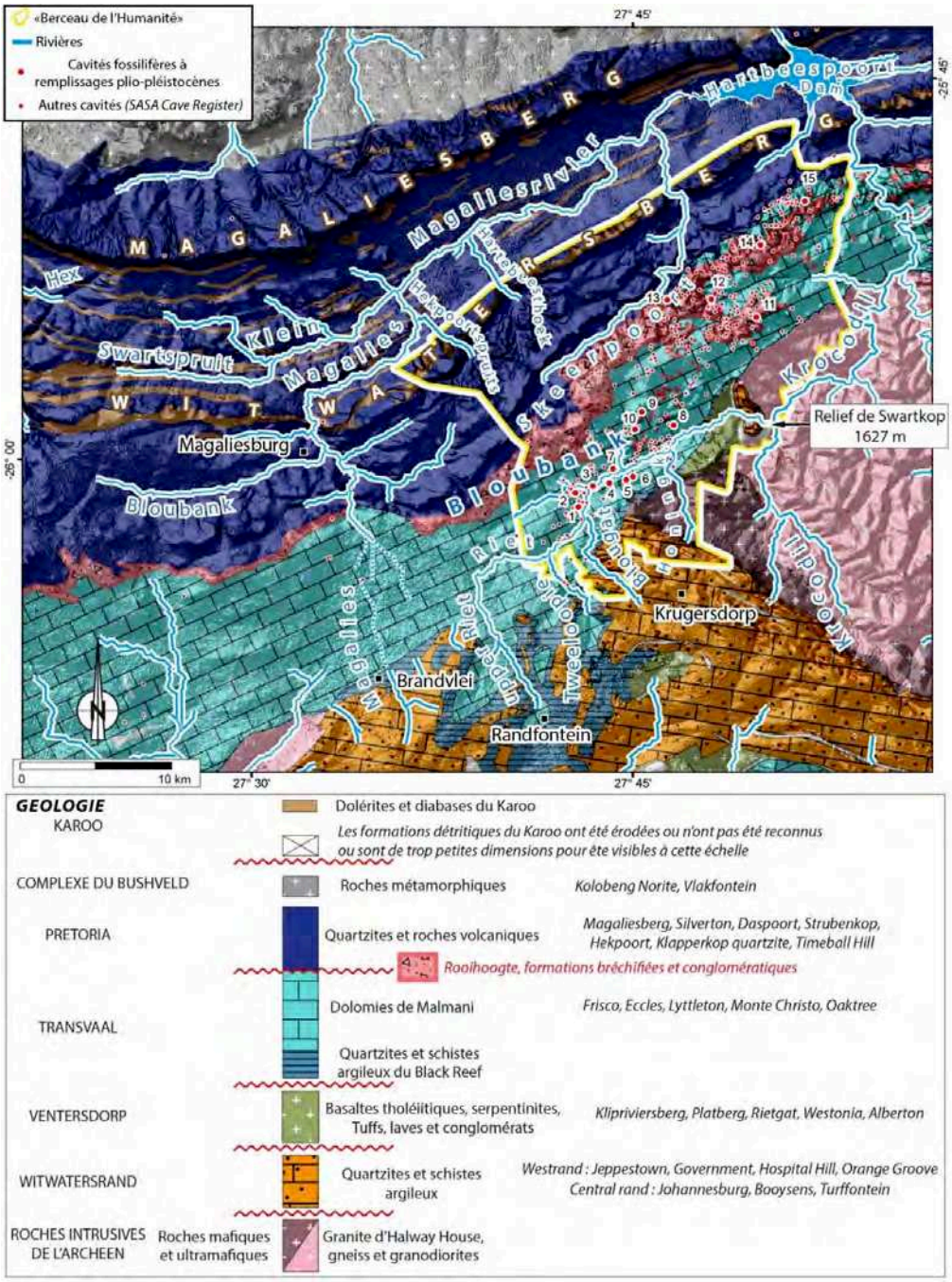


Figure 340 Carte géologique inédite du Cradle of Humankind.

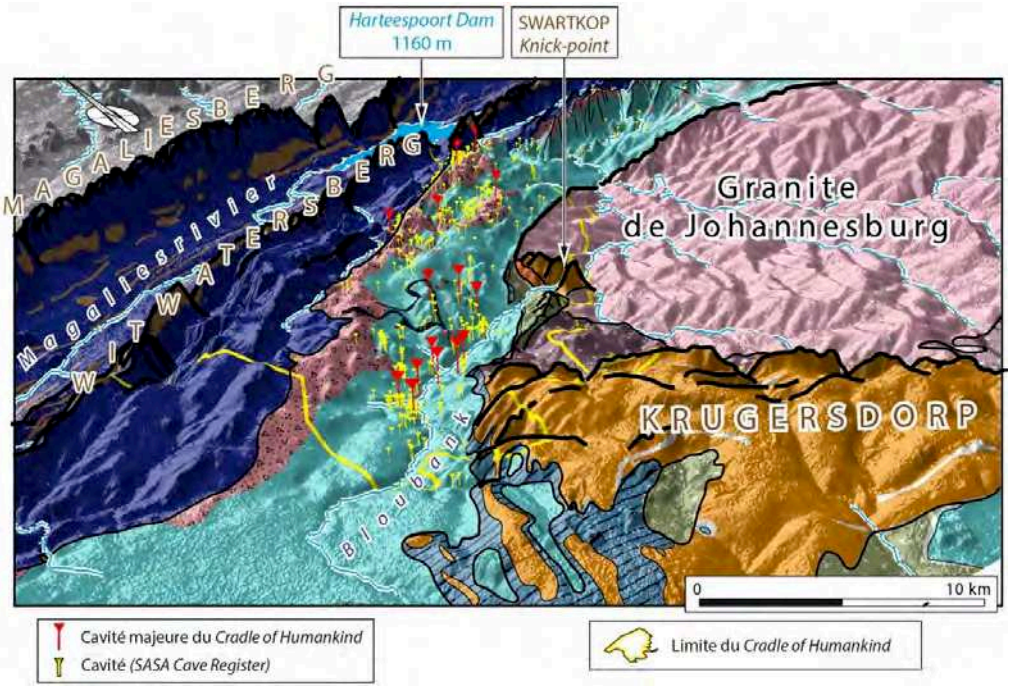


Figure 341 Contexte géologique du Cradle of Humankind (Vue 2.5D exagérée vingt fois).

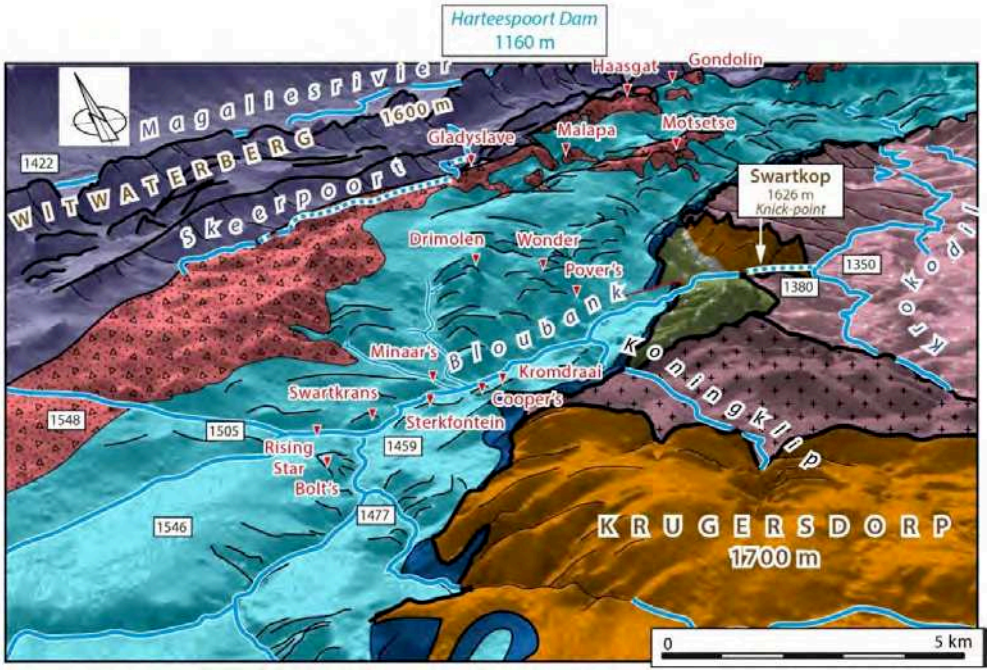


Figure 342 Contexte géologique de la vallée de la Bloubank et des grottes fossilifères majeures (Wonder et Motsetse ne sont pas fossilifères et Haasgat et Minnaar n'ont pas livré de fossiles d'Hominines uniquement de la faune) (Vue 2.5D exagérée vingt fois).

3.3.1.4. Carte géologique de la vallée de la Bloubank au sud du Cradle of Humankind

Cette carte, ci-dessous, Figure 343, est centrée sur la vallée de la Bloubank. En réalité, la rivière qui circule au pied de la grotte de Sterkfontein et des gisements de Swartkrans et Kromdraai s'appelle la *Bloubankspruit* mais nous l'appellerons simplement Bloubank[10].

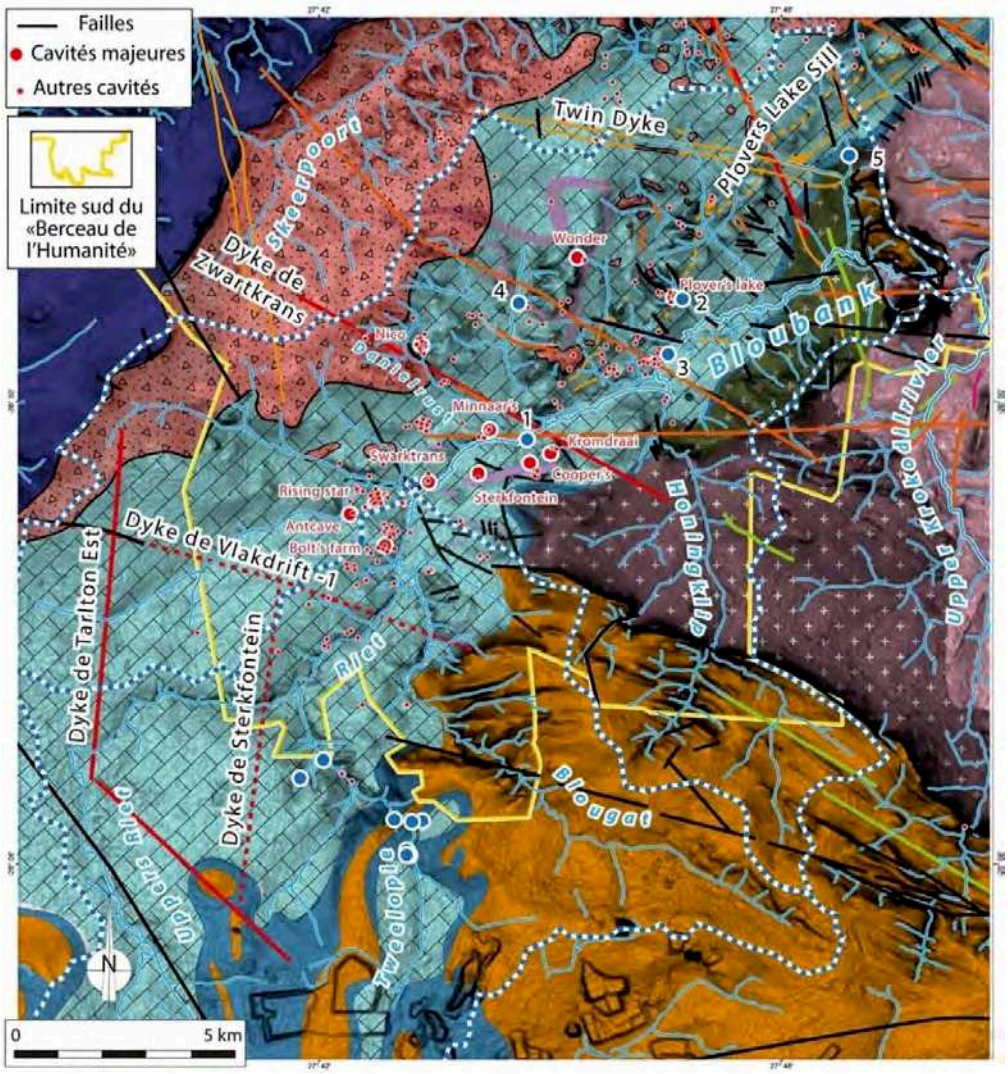


Figure 343 Carte géologique du sud du Cradle of Humankind.

[10] Attention car il y aussi un affluent de la *Magaliesrivier* qui s'appelle Bloublank, visible sur la carte précédente (Figure 340)



Noms des sources (Hobbs, *et al.*, 2011)
1 : Zwartkrans,
2 : Plover's lake,
3 : Kromdraai,
4 : Danielrust,
5 : Aquamine,
6 : Tweefontein,
7 : Nouklip,
8 : Nash,
9 : Uitkomst,
10 : Cradle,
11 : Broederstroom.

3.3.1.5. Carte géologique du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai

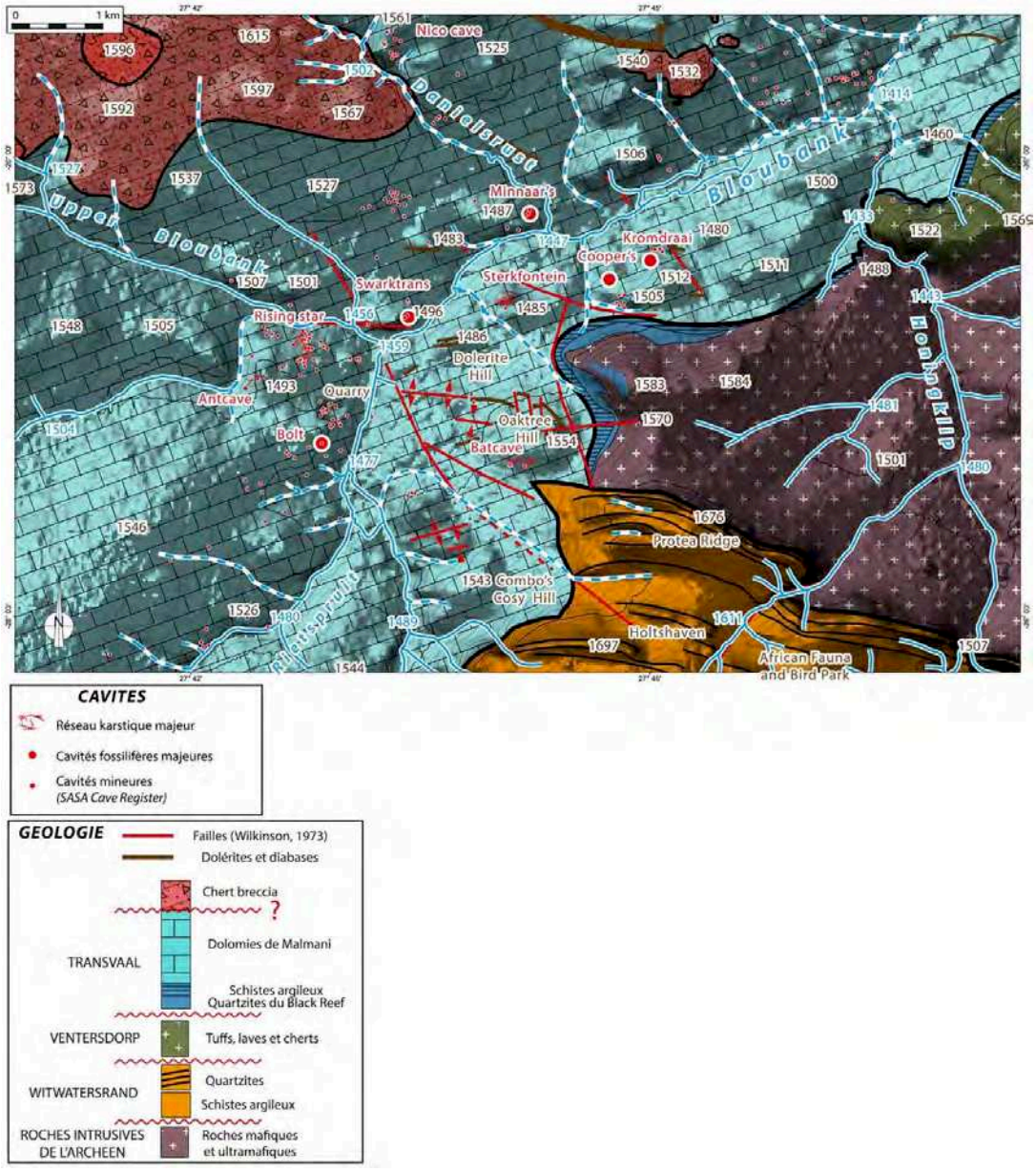


Figure 344 Géologie de la vallée de la Bloubank et du secteur de Sterkfontein.

3.3.2. Description des dolomies du Cradle of Humankind

La séquence sédimentaire du Bassin du Transvaal débute par les schistes argileux et les quartzites du *Black Reef* (Coetzee, 1996). Ils recouvrent en discordance les conglomérats à ciments aurifères du Witwatersrand). Les équivalents stratigraphiques du Black Reef sur le Plateau de Ghaap sont les quartzites de Vryburg, qui eux ont été datés à 2642,2 ± 2,3 Ma (Walraven *et al.*, in Walraven et Martini, 1995 ; Altermann, 1996 ; Altermann et Nelson, 1998, p.232).

Le terme « *reef* » ne fait pas référence à un récif marin mais à l'intérêt minier d'une couche. Dans les gisements d'or de Kromdraai, on distingue la *Main-Reef*, la « couche principale », la couche la plus importante en volume d'or et on trouve de la pyrite en faible proportion.

> "Au mur même de cette pyrite [...] il existe, le long de la pyrite, une veine mince d'hématite brune, mêlée d'argile parfois schisteuse, veine de 3 à 4 centimètres [...] où la richesse en or atteint son maximum, jusqu'à 3 kilogrammes d'or à la tonne dans quelques essais. C'est cette veine sombre qui a fait donner à la couche son nom de reef noir (Black reef) » *(De Launay, 1896, p.297)*.

Au-dessus, viennent des carbonates marins (datés de -2588 Ma) (Martin *et al.*, 1998). Ce sont les dolomies de Malmani du Bassin du Transvaal (p.384) (en photo Figure 347 p.392), dont il n'est conservé au niveau du *« Berceau de l'Humanité »* que 1450 m d'épaisseur (Button, 1973 ; Truswell et Eriksson, 1975) seulement. Nous verrons qu'une partie de ces dolomies, notamment la formation de Frisco, a été érodée et/ou altérée, comme le montre la coupe de la Figure 349 p.395. Leurs équivalents stratigraphiques sur le Plateau karstique de Ghaap sont les dolomies de Campbellrand. Au niveau du karst fossilifère de Makapansgat, ce sont les dolomies de Ramotswa, de Maholobota et de Magopane (Eriksson *et al.,* 1993).

Les dolomies sont recouvertes par plus de 5000 m de dépôts appartenant au groupe de Pretoria dans le Transvaal. Ce sont principalement des roches siliceuses, et des schistes avec des intercalations de quartzites et de lave (Martini, 1981, p.6) et leurs équivalents stratigraphiques sur le Plateau de Ghaap sont le groupe de Postmasburg (daté de -2316 à -2080 Ma). Ces roches sont moins sensibles à la fantômisation que les carbonates et les dolomies, les roches siliceuses forment par exemple des arènes granitiques, une variante du fantôme, mais cela ne forme pas de cavités longues.

Nous détaillerons plus loin :

- les dolomies de Malmani et le groupe de Pretoria du CoH dans le Bassin du Transvaal (p.384) ;
- les carbonates de Campbellrand surmontés par le groupe de Postsmaburg sur le Plateau de Ghaap (p.968).

La sédimentation chimique du Paléoprotérozoïque va être à l'origine de la précipitation des carbonates du Bassin du Transvaal (Dolomies de Malmani) sur une Terre qui ne dispose que d'une atmosphère primitive, pauvre en oxygène. La vie animale et végétale n'est pas encore développée. En mer, on trouve essentiellement les stromatolithes qui sont des colonies marines de bactéries qui précipitent des carbonates, en captant du CO_2 et en relâchant de l'O_2. « La couleur plus foncée de certains stromatolithes vers le haut pourrait venir de la nature mobile des filaments d'algues qui se déplaçaient vers le haut sous forme de fines couches successives de sédiments carbonatés accumulés » (Button, 1973, p.240).

On trouve aussi des niveaux de silex *(chert)* (en photo p.414), qui peuvent constituer jusqu'à plus de 50% de la roche (Martini, 1985). Eriksson (1972, p.93) indique que, dans les carottes de forage, l'épaisseur des cherts varie entre de minces filons ou lentilles et des épaisseurs dépassant 200 m. Ces interbancs de chert auront une importance primordiale lors de l'altération des dolomies pendant la fantômisation (Figure 376).

Des apports en eaux de pluie, enrichies en fer et en manganèse après leur ruissellement sur le continent, auraient fait baisser le ph des mers en provoquant une dolomitisation des carbonates et la précipitation des niveaux de cherts. (Button, 1973, p.239 ; Truswell et Eriksson, 1975 ; Foster, 1988, Fig.10)). La dolomitisation pourrait aussi être provoquée par l'environnement intertidal peu profond, favorable au développement de saumures d'évaporation (Clay, 1986 in Martini, 1990, p.1172).

3.3.2.1. Datations des dolomies paléoprotérozoïques

Des analyses isotopiques U-Pb sur zircons extraits de minces niveaux de tuf présents dans les dolomies permettent de déterminer l'âge des dolomies paléoprotérozoïques, elles ont entre 2600 et 2400 Ma (Martini, 2007).

> 2549.9 Ma ± 3 (méthode Pb-Pb) sur des zircons dans les tufs de la formation d'Oaktree (Walraven et Martini, 1995, Table2, p.61, Figure 4, p.63).
>
> 2588 Ma ± 7 (Méthode U-Pb SHRIMP (*Sensitive High Resolution Ion Microprobe*)) sur des zircons provenant des tufs de la formation supérieure d'Oaktree (Martin *et al.*, 1998).
>
> Pour ces deux datations, les tufs ont été prélevés au niveau de la ferme Kromdraai 520 JQ, aux coordonnées suivantes : 27°46'11" E 26°00'00"S (lien googlemaps). C'est une butte, à 2 km, au nord est du gisement de Kromdraai, indiquée « 1500 » sur la Figure 1173 (p.1199) et correspondant à la formation d'Oaktree (Eriksson et Truswell, 1974 in Walraven et Martini, 1995, Fig. 2, p.62).
>
> Des tufs similaires forment le plafond d'*Elephants Chamber* et *Milner Hall* dans la grotte de Sterkfontein, (Martini *et al.*, 2003).

En utilisant la même méthode de datation des âges similaires ont été calculés à *Berlyn State Forest* dans l'est du Bassin du Transvaal (-2583 Ma ± 5 d'après Martin *et al.*, 1998) et dans les autres régions où le bassin paléoprotérozoïque est conservé, comme sur le Plateau de Ghaap (Altermann, 1996 ; Altermann et Nelson, 1998).

Il est considéré que la sédimentation carbonatée se termine à -2432 Ma (âge de la formation de Kuruman à Ghaap, Compston in Trendall *et al.*, 1990 ; Nelson *et al.*, 1999 *in* Ingram et van Tonder, 2011, p.18). Nous décrirons ce secteur karstifié dans le Chapitre n°5 (p.968). Nous verrons, dans ce chapitre qu'il est difficile de dater les formations altérées. Cette date de la fin de la sédimentation carbonatée est donc à prendre avec précaution.

3.3.2.2. Cinq formations composent les dolomies de Malmani dans le Bassin du Transvaal et la formation supérieure est absente dans le « Cradle of Humankind »

Dans le bassin du Transvaal, il est admis que cinq formations lithologiques constituent les dolomies de Malmani (Button, 1973 ; Ingram et Van Tonder, 2011). Eriksson (1972) dénombre dix unités et Eriksson et Truswall (1974) huit.

Les distinctions de formations dans les dolomies de Malmani se font au niveau de :

- La couleur de la dolomie, notamment plus elle est foncée plus elle est riche en Fe et Mn (Eriksson, 1972) ;
- La présence ou l'absence de chert ;
- Le degré de recristallisation ;
- Les morphologies et les associations de stromatolithes ;
- La présence ou l'absence d'autres structures primaires telles que les *ripplemarks*, les oolites, les interbancs de chert, les schistes et les brèches.

Ces formations qui affleurent sur plusieurs centaines de kilomètres à travers tout le Bassin du Transvaal (Button, 1972 ; Martini, 1978 *in* Walraven et Martini, 1995, p.60) n'ont pas été clairement distinguées et cartographiées en amont de Kromdraai et dans le secteur de Sterkfontein, comme le montrent les différentes cartes géologiques (Figure 1168 p.1192) et pour les raisons évoquées précédemment (p.376) (absence de cartes géologiques au 1/50 000). Peut-être est-ce dû aux couvertures d'altération (Sol Hutton, Waterval, Rooihoogte) qui masquent les dolomies à l'affleurement, notamment vers le sud-ouest du Berceau de l'Humanité ?

La description des formations qui constituent les dolomies de Malmani est issue de la notice de la carte géologique 1/50 000 n°2527DD de *Broederstroom* (Ingram et Van Tonder, 2011) et du *SACS (South African Committee for Stratigraphy)* (*in* WRC, 2010 p131). Les dolomies dans la carrière de *Bolt's farm* sont photographiées (Figure 372 p.414).

On trouve de bas en haut (Figure 346 de la page suivante) :

3.3.2.2.1. Formation d'Oaktree (200 m. d'épaisseur)

Dolomie foncée, pauvre en chert, avec de nombreux interbancs de schistes carbonatés à la base et dont le nombre diminue en allant vers le sommet. On trouve de minces horizons schisteux (<2m d'épaisseur), localement charbonneux (*carbonaceous shale*). C'est dans cette formation que s'est creusée la vallée de la Bloubank jusqu'à Kromdraai, après Kromdraai elle formerait une partie de sa rive droite (**Figure 1168** p.1192). La grotte de Sterkfontein appartient à cette formation (Figure 129).
On trouve dans la formation d'Oaktree deux minces couches de tuf (cendres volcaniques) (<30 cm) près de son sommet stratigraphique. Ce sont ces tufs qui ont été datés de -2585 Ma (Walraven et Martini, 1995) sur la butte à 2 km au nord est du gisement de Kromdraai. Dans la grotte de Sterkfontein, ces tufs forment le plafond d'*Elephants Chamber* et *Milner Hall* (Martini *et al.*, 2003).

3.3.2.2.2. Formation de Monte Christo (700 m. d'épaisseur)

Dolomie claire à stromatolithes et oolithes, avec une alternance entre des zones sans niveaux de cherts et des zones riches en chert. Elle est interstratifiée avec des horizons schisteux.
D'après la carte géologique 1/50 000 n°2527DD de *Broederstroom* (Ingram, Obbes et Van Tonder, 2010 - cf. Tableau 58, p.1089) qui ne s'étend malheureusement pas vers Sterkfontein, la formation de Monte Christo est découpée en plusieurs membres (Membre de Rietfontein, de *Mooisplaats*, de *Rietspruits* et de *Crocodile River*) indiqués Figure 346. Malheureusement, cette distinction en membres de la formation de Monte-Christo n'est pas faite dans le secteur de Sterkfontein du fait de l'absence de cartes géologiques au 1/50 000 reportée sur les cartes géologiques en amont de Kromdraai (**Figure 1168**, p.1192) et dans le secteur de Sterkfontein, certainement pour des raisons évoquées plus haut (p.376).
Ce manque d'information est préjudiciable car de nombreuses cavités se situent dans cette formation de Monte-Christo : *Motsese, Drimolen, Wonder, Rising Star*, etc. (Figure 346).

1. **Présence d'un horizon remarquable au toit de la formation de Monte-Christo et à la base de la formation de Lyttelton (Button, 1973 ; Ingram, Obbes et Van Tonder, 2010 ; Dirks et Berger, 2013)**

« Le sommet stratigraphique de la formation de Monte-Christo serait une couche de 5 m d'épaisseur de brèches de cherts cisaillée (sheared chert-breccia) dans une matrice de dolomie » (Dirks et Berger, 2013, p.113).

D'après la carte géologique citée ci-dessus, un horizon important de *chert-in-shale breccia* (Figure 346) est situé à la base du membre de Rietspruit. Button (1973) indique aussi la présence d'une *chert-in-shale breccia* entre la *Lower Dolomite and Chert Zone* et la *Middle Chert Poor Zone*, c'est-à-dire au toit de la formation de Monte-Christo et à la base de la formation de Lyttelton, que nous avons indiqué en jaune sur la coupe stratigraphique de Button (1973).

3.3.2.2.3. Formation de Lyttelton (150 m. d'épaisseur)

Dolomie sombre sans chert avec des stromatolithes et des niveaux à oolithes. Les silex apparaissent vers le sommet. Le sommet stratigraphique est une couche de 10 à 15 m d'épaisseur de brèches de cherts, où les couches de cherts sont fortement déformées, plissées et brisées en blocs anguleux dans une matrice dolomitique.

3.3.2.2.4. Formation d'Eccles (380 m. d'épaisseur)

Dolomie sombre riche en chert avec des stromatolithes, des niveaux d'oolithes, les silex augmentant vers le sommet. Le sommet est caractérisé par une brèche de chert, interprétée comme une surface d'érosion avant la formation de Frisco (Eriksson *et al.*, 2006).

3.3.2.2.5. Formation de Frisco (absente dans le CoH)

Dolomie sans chert avec des calcaires et des schistes carbonatés à la base.

Dans le CoH, la formation supérieure des dolomies de Malmani, la formation Frisco, est absente, comme indiqué dans le log de la notice de la carte géologique 1/50 000 n°2527DD de *Broederstroom* (Ingram et Van Tonder, 2011, fig.36, p.61) et comme le montre notre coupe géologique (Figure 349 p.395).

Une partie des formations bréchifiées au toit des dolomies à l'affleurement, correspondent aux altérites décrites précédemment (p.299) et sont corrélées à l'altération de cette formation sur place.

En revanche elle est bien présente dans l'est du Bassin Transvaal, avec une épaisseur supérieure à 200 m. Sa position stratigraphique est clairement définie par Button (1973) comme appartenant à la Zone Mixte et elle est située stratigraphiquement sous la formation Penge. Elle est aussi présente 90 m à Makapansgat (Greer, 1982) (p.954)

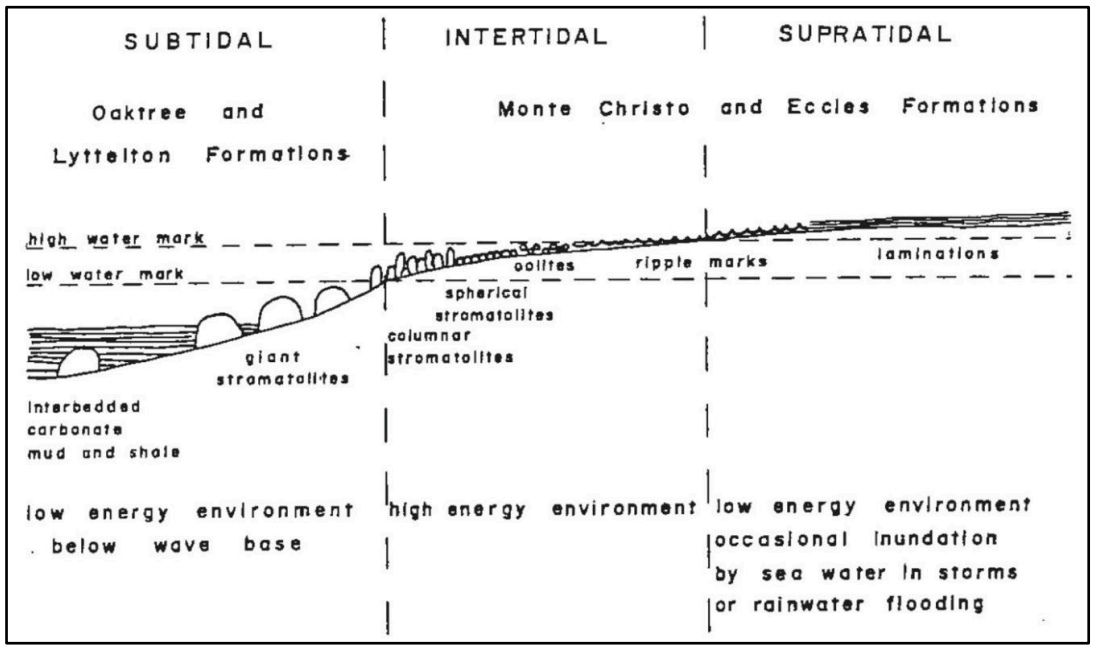


Figure 345 Reconstitution de la ligne de rivage de la mer paléoprotérozoïque et de la distribution spatiale des différentes formations des Dolomies de Malmani et des différents faciès (stromatolites, laminations alguaires, oolithes, etc.) selon Foster (1988, Fig.8, p.40).

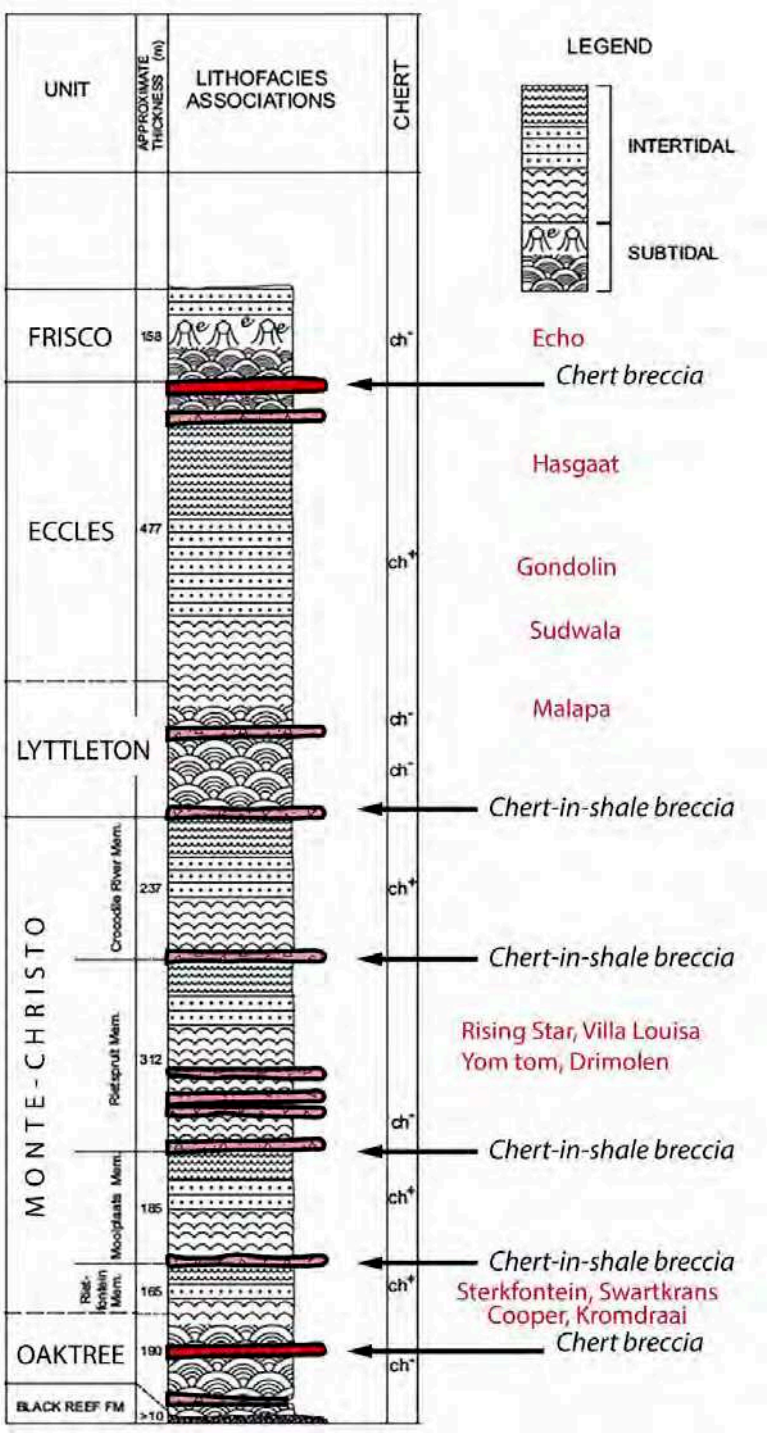


Figure 346 Log synthétique des formations composant les dolomies de Malmani (Source : Obbes, 2000 in Ingram, Obbes et Van Tonder, 2011, fig.35, p.59, modifié, légende en table 8, p.47).

Remarquons les différentes formations à brèches *« chert-in-shale breccia »* et *« chert breccia »* qui séparent les différents membres et formations des dolomies de Malmani, nous les avons indiquées par des flèches.

Sont aussi annotées la présence ou l'absence de cherts et la localisation stratigraphique des cavités du CoH.

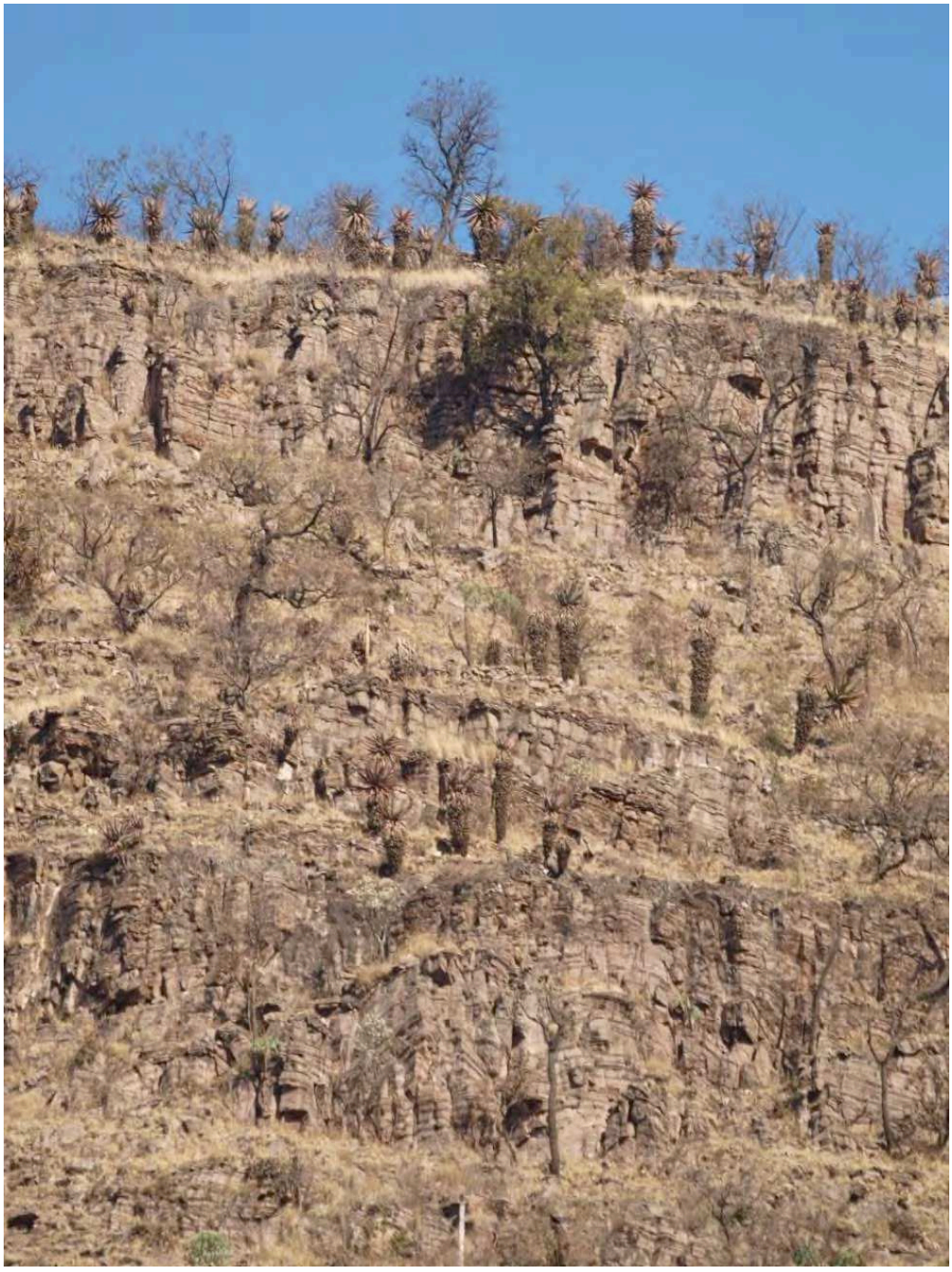


Figure 347 Dolomies de Malmani, riches en niveaux de chert, de la région karstique d'Hoogland, à une quarantaine de kilomètres à l'ouest du CoH.

3.3.3. Mise en évidence de l'érosion du Cradle of Humankind par une coupe géologique

Les dolomies de Malmani ont une épaisseur estimée à 1450 m de puissance dans le Bassin du Transvaal (Button, 1973 ; Truswell et Eriksson, 1975, Catuneanu et Eriksson, 2002, Fig.7, p.80) (Figure 346).
La coupe géologique de la Figure 349 permet d'estimer l'épaisseur des dolomies érodées, altérées voire karstifiées à 2000 m, comme indiqué par la zone en rouge sur la coupe. Nous pouvons supposer que cette épaisseur de dolomies forme une partie des altérites à clastes de chert (Formation Rooihoogte) trouvées au toit des dolomies aujourd'hui et constituant le plateau actuel.
De plus, il a fallu décaper au préalable les centaines de mètres d'épaisseur du Karoo, puis de la formation de Frisco (Dirks et Berger, 2013 ; Dirks *et al.*, 2016), avant de découvrir en surface les dolomies altérées et fantômisées, dont le fantôme était rapidement évacué en créant ainsi des vides (les grottes) qui ont pu piéger des sédiments et des fossiles comme l'a bien démontré Bruxelles (2019, 2022).
Nous chercherons à identifier les grandes phases d'érosion qui ont impacté le CoH et les dolomies, à partir des formes remarquables laissées dans les paysages. Ce sont les surfaces d'aplanissement que nous avons définies précédemment (p.298) mais aussi les formations à brèches et les reliefs ruiniformes comme les pinacles. Nous essayerons de corréler chronologiquement ces surfaces d'érosion avec l'ouverture des cavités karstiques et l'âge de leurs remplissages (cf. partie suivante).
La coupe géologique suivante (Figure 349) est localisée sur la Figure 348 (page suivante) et la **Figure 256** p.318.
L'altitude des formations géologiques du Karoo, conservées à 40 kilomètres au sud-est, est constante dans tout le bassin et située à 1600 m. C'est la Surface pré-Karoo ou surface pré-Ecca.

Deux hypothèses sont envisageables :

- soit le Karoo a érodé le sol en se déposant, et c'est une discordance stratigraphique ;
- soit le Karoo est venu recouvrir une surface d'érosion qui existait déjà et antérieure à -350 Ma. Cette paléosurface pourrait correspondre à la surface d'abrasion des glaciers carbonifères, dont les tillites de la formation Dwyka (situées à la base du Karoo) constituent aujourd'hui un indice.

Ce pourrait aussi être une surface encore plus ancienne, datée du bassin de Waterberg (voir les coupes de Wellington (1929, Fig.1 et 3 p.39) ou d'Abiye (2011, fig.3, p.203).

On repère quelques éléments géologiques : la couverture du Karoo en violet, le volcanisme alcalin du Pilanesberg, le dôme granitique de Johannesburg, le karst de Lobatse au Botswana, le synclinal de Potchefstroom, etc. Se reporter au log stratigraphique synthétique (Figure 145 p.205).

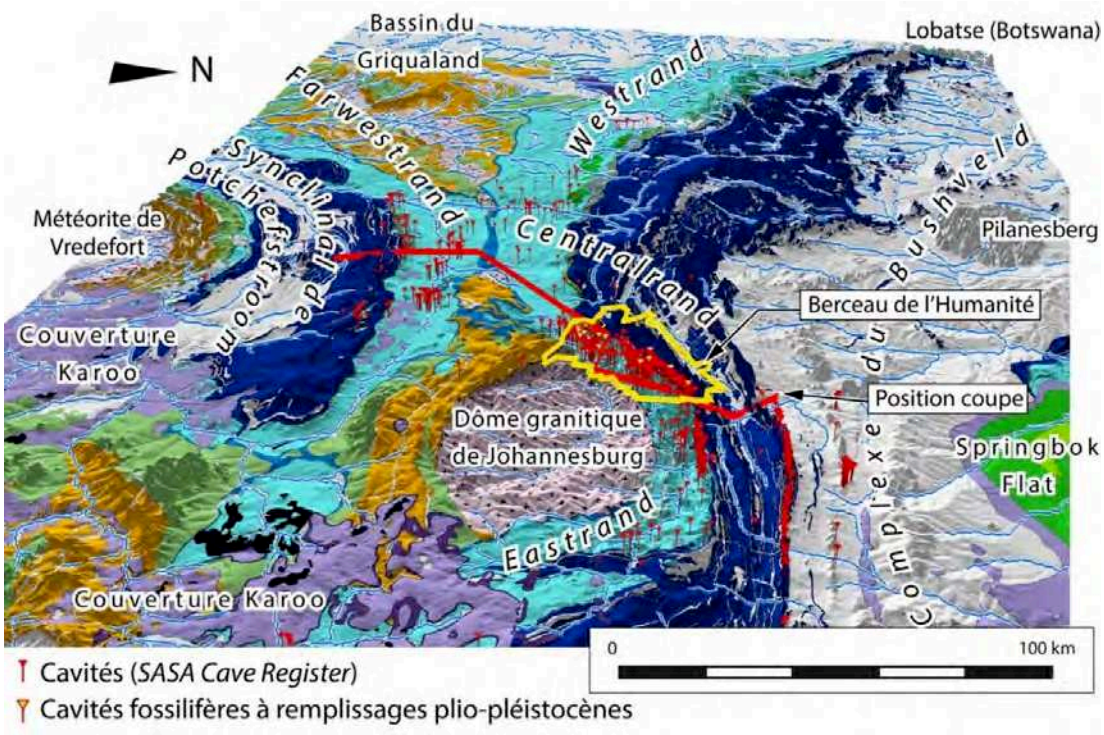


Figure 348 Vue 2.5 D du sud du Bassin du Transvaal où se situe le Cradle of Humankind délimité en jaune.

La coupe géologique ci-dessous (Figure 349), localisée sur la carte (p.441), montre l'épaisseur supposée des dolomies érodées et altérées (au moins 2000 m, en rouge) entre le *Potchestroom Synclinorium,* le *Central Rand*, le *Cradle of Humankind* et le lac de *Hartbeespoortdam*.

Elle indique la position des mines de manganèse (carrés noirs) et des cavités (triangles rouges) situées préférentiellement sous la Surface Africaine, à 1600 m d'altitude (trait orange).

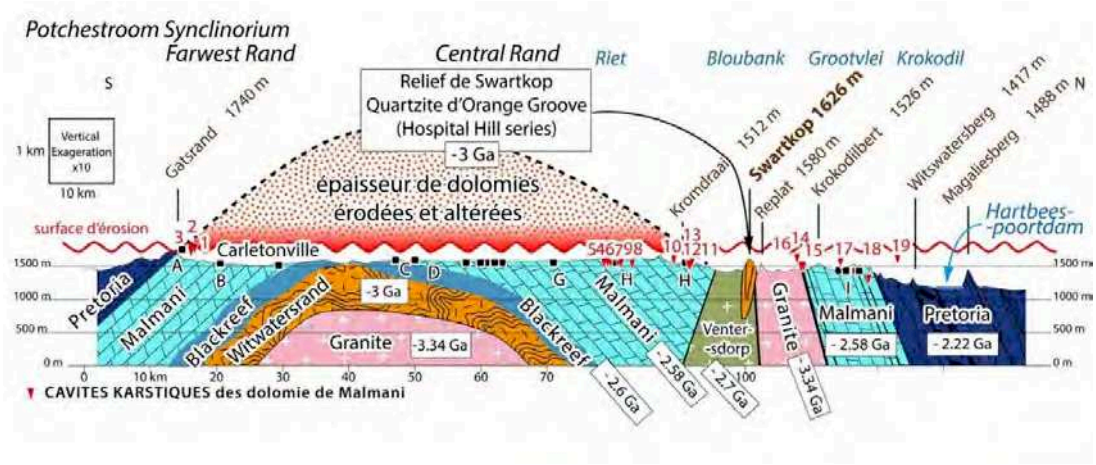


Figure 349 Coupe géologique des dolomies du Potchestroom Synclinorium et du Central Rand entre Carletonville, le « Berceau de l'Humanité » et le lac de Hartbeespoortdam.

Les altitudes ont été mesurées sur les MNT (comme décrit dans le Chapitre n°11 p. 36) ou proviennent de la littérature (Hobbs, 2011, Table 2). Les coupes sont en accord, avec celles de Wellington, (Wellington 1929, Fig.2 et 3 p.39). Les numérotations des cavités et le nom des mines, indiqués par des lettres (A, B, C, …) sont précisés sur la page suivante.

Noms des mines :

A : *West Wits Gold Mine* (Van Niekerk *et al.*, 1999a) - altitude 1720 m ;
B : *General Nice Manganese* (Carletonville) (Pharoe *et al.*, 2018) - altitude 1523 m ;
C : Ryedale (Pack *et al.*, 2000) altitude 1540 m ;
D : Houtkoppies- altitude 1590 m (Van Niekerk, 1999) ; Klipkuil - altitude 1500 m (Van Niekerk, 1999); Waterval - altitude 1605 m (Van Niekerk, 1999) ;
G : Krugersdal (diamants, agates) (Marshaal et Norton, 2009) ;
H : Goedgedacht (diamants, agates) (Marshaal et Norton, 2009) ;
I : Hartbeestlaagte / Zwartrand (diamants, agates) (Marshaal et Norton, 2009).

Noms et altitudes des cavités organisées par bassin versant hydrographique :

En gras sont indiquées les cavités fossilifères.

Bassin hydrographique de la *Mooirivier*
z : Porcupine - Bone cave (altitude de l'entrée 1520 m (mnt) et profondeur à 1479 m)
w : Skilpad (altitude de l'entrée 1633 m (mnt) et profondeur à -1570 m)

Bassin hydrographique de la *Mooirivierloop - Loopspruit*
1 : Apocalypse Pothole (altitude de l'entrée 1694 m (mnt) et profondeur à 1609 m)

Bassin hydrographique d'un petit affluent sans nom de la *Vaal river*
2 : Armageddon (altitude de l'entrée 1698 m (1714 mnt) et profondeur à 1439 m)
3 : Sinkhole cave (altitude de l'entrée 1650 m et profondeur à 1565 m)

Bassin hydrographique de la Rietspruit un affluent de la Bloubank (en rive gauche)
4 : **Bolt's cave** (altitude de l'entrée 1503 m et profondeur à 1447 m)

Bassin hydrographique de la Bloubank après la confluence de la *Rietspruit* (en rive droite)
21 : Antcave (altitude de l'entrée 1496 m et profondeur à 1459 m)

Bassin hydrographique de la Bloubank après la confluence de la *Rietspruit* (en rive gauche)
5 : **Rising Star** (altitude de l'entrée 1474 m (Makhubela *et al.*, 2019, p.3) et profondeur à 1450 m)
6 : **Swartkrans** (altitude de l'entrée 1479 m et profondeur à 1465 m)

Bassin hydrographique de la Bloubank de la confluence du *Danielrust* à la confluence de la *Rietspruit*
9 : **Kromdraai** (altitude de l'entrée 1481 m et profondeur à 1465 m)
7 : **Sterkfontein** (altitude de l'entrée 1480 m et profondeur à 1437 m)
7 : **Fault cave** (altitude de l'entrée 1475 m et profondeur à 1443 m)
8 : **Cooper's** (altitude de l'entrée 1474 m et profondeur à 1460 m)

Bassin hydrographique du *Danielrust* - rive droite
20 : Nico's 2 (altitude de l'entrée 1554 m et profondeur à 1459 m)

Bassin hydrographique de la Bloubank, de la confluence de la *Crocodilrivier* à la confluence du *Danielrust*
11 : Wonder cave (altitude de l'entrée 1511 m, 1440 m (Hobbs, 2011) et profondeur à 1440 m)
13 : **Plover's lake** (altitude de l'entrée 1438 m et profondeur à 1420 m)
10 : **Drimolen** (altitude de l'entrée 1529 m (mnt) et profondeur à 1525 m)
X : Horwal Hole (altitude de l'entrée 1525 m et profondeur à 1467 m)
12 : **Minaar's** (altitude de l'entrée 1451 m (mnt) et profondeur à 1442 m)

Bassin hydrographique de *Skeerpoort*
14 : **Gladysvale** (altitude de l'entrée 1429 m (mnt), 1350 m (Hobbs, 2011) et profondeur à 1350 m)
15 : **Malapa** (altitude de l'entrée 1440 m et profondeur à 1430 m)
17 : **Haasgat** (altitude de l'entrée 1489 m (mnt), 1465 m (Hobbs, 2011) et profondeur à 1480 m)

Bassin hydrographique de la *Krokodilrivier*
16 : **Motsetse** (altitude de l'entrée 1490 m et profondeur à 1490 m)

Bassin hydrographique de la Broedestroom (Leeu) rive gauche
18 : **Gondolin** (altitude de l'entrée 1390 m (mnt) et profondeur à 1380 m)

Bassin hydrographique de la Hennops
19 : Hoogland (altitude de l'entrée 1536 m et profondeur inférieur à 10 m).

3.3.4. Mise en évidence de l'érosion du *Cradle of Humankind* par l'analyse des paysages sur le terrain

Depuis le sommet de Krugersdorp, en regardant vers le nord, on observe des surfaces d'aplanissement comme le montre le panorama suivant (Figure 350).
On distingue des paysages différents selon la lithologie. À l'est, c'est la platitude des granites, alors qu'à l'ouest on voit se développer sur les carbonates des vallées plus encaissées et des collines karstiques qui émergent. On distingue aussi des reliefs élevés en quartzite, qui forment les chaînes de Magaliesberg (dont le sommet aplani culmine à 1600 m) et celle de Witwatersberg (à 1700 m) et le relief de Swartkop. Ce dernier a bloqué pendant une longue période l'érosion régressive de la Bloubank en amont de ce relief.

Ce panorama permet aussi de comprendre que les formes du relief sont largement contrôlées par la nature lithologique des sols (Figure 405). On observe le relief de Swartkop (1626 m) qui est traversé par la rivière Bloubank (1380 m). Il est constitué des mêmes quartzites que le relief de Krugersdorp. On observe aussi des surfaces d'altitudes inférieures sur les gneiss de Lanseria, les granites de *Halfway House et* les roches mafiques de l'Archéen qui sont caractérisées par des formes de paysage différentes :

- des réseaux de vallées et de rivières **dendritiques** sur les granites (granite d'*Halfway House*) et les gneiss (gneiss de Lanseria) du Dôme de Johannesburg, ainsi que sur les roches de la formation de Ventersdorp et les roches mafiques de l'Archéen.
- par contre, sur les dolomies de Malmani, nous avons des cours d'eau parallèles (orthoclinaux) et faiblement encaissés dans des surfaces emboîtées, de type paléo-poljés (p.348).



Figure 350 Panorama depuis le Walter Sisulu National Botanical Garden.

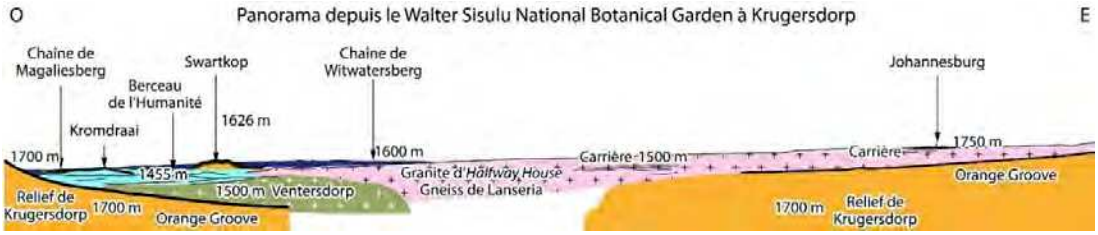


Figure 351 Analyse géologique du panorama précédent.

3.4. INCISION DES VALLEES QUI EXHUMENT LES FANTOMES DE ROCHE ET OUVRE LES PREMIERES GROTTES ET PERMET LA FOSSILISATION DES REMPLISSAGES KARSTIQUES

Après avoir décrit la Surface Africaine, à 1560 m dans le *CoH*, et les formations sédimentaires qui la caractérisent, et après avoir déterminé son âge crétacé (p.313) (Baby, 2017), nous allons poursuivre l'analyse des paléosurfaces, notamment celles situées en-dessous de la Surface Africaine, afin de mieux comprendre le rythme d'incision des vallées du *CoH* et l'âge des différentes phases de karstification.

La rivière Bloubank coule sur les dolomies qu'elle incise faiblement. C'est également un affluent de la rivière Crocodile, elle-même un affluent du Limpopo, qui se jette dans l'Océan Indien. La rivière Crocodile est située beaucoup plus bas en altitude (1380 m) et coule sur les granites de Johannesburg.

Ces différences lithologiques ont-elles eu un impact sur la géométrie des terrasses de la Bloubank, leur démantèlement et la préservation des remplissages fossilifères ? En effet, plus la vallée est creusée, plus les karsts sont démantelés et vidangés.

Trouvera-t 'on d'autres mécanismes pour expliquer la faible incision des dolomies par la Bloubank, qui expliqueraient pourquoi une vallée aussi ancienne a pu se conserver, avec des remplissages karstiques anciens plio-pléistocènes ? Les travaux de Bruxelles (2019) ont montré le rôle de *knickpoint* du relief de Swartkop que la rivière Bloubank a péniblement creusé en canyon en amont de sa confluence avec la rivière Crocodile. Présentons ce mécanisme.

3.4.1. Cartographie régionale du CoH, la Surface Africaine et des surfaces emboîtées

Le traitement géomatique des MNT décrit dans le Chapitre n°1 (p.19) nous permet de produire des cartes hypsométriques et hydrologiques régionales du *CoH* (Figure 354 à Figure 356) et d'analyser les paléosurfaces du panorama suivant (Figure 354).

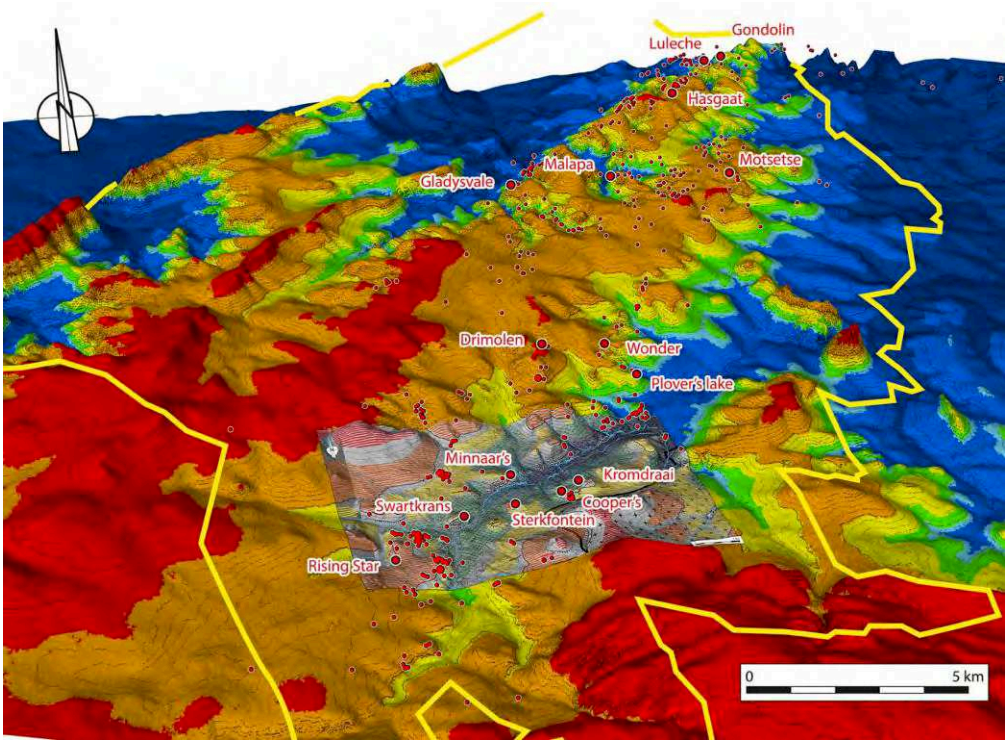


Figure 352 Cartographie 2.5D des paléosurfaces régionales du Cradle of Humankind (exagération verticale x5).

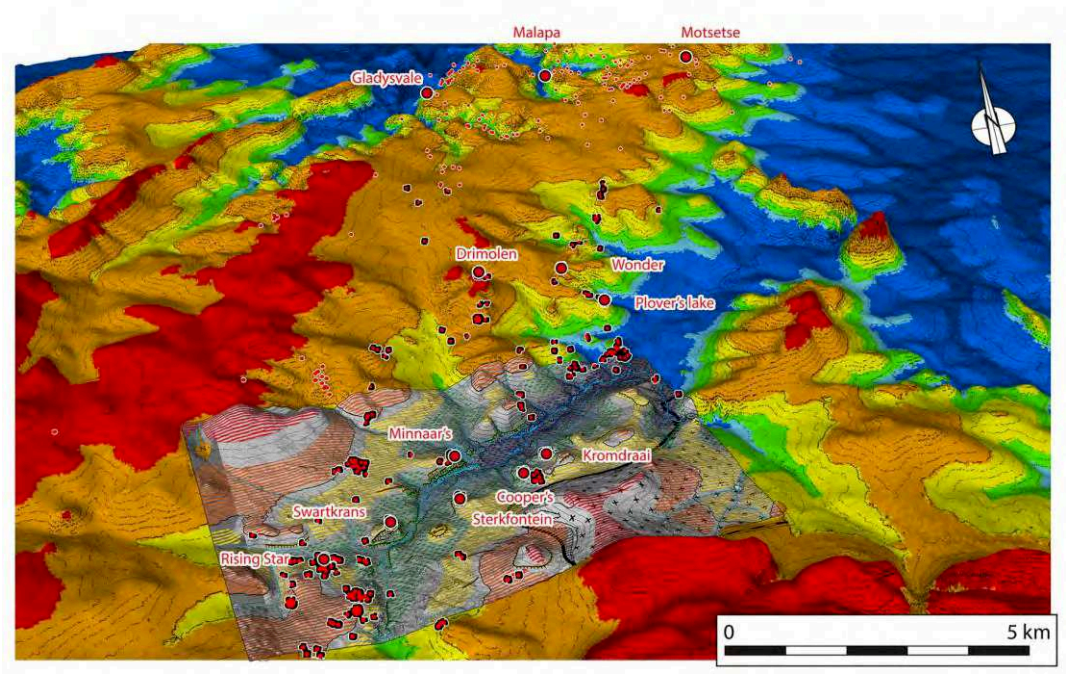


Figure 353 Cartographie 2.5D des paléosurfaces du Cradle of Humankind (exagération verticale x5).

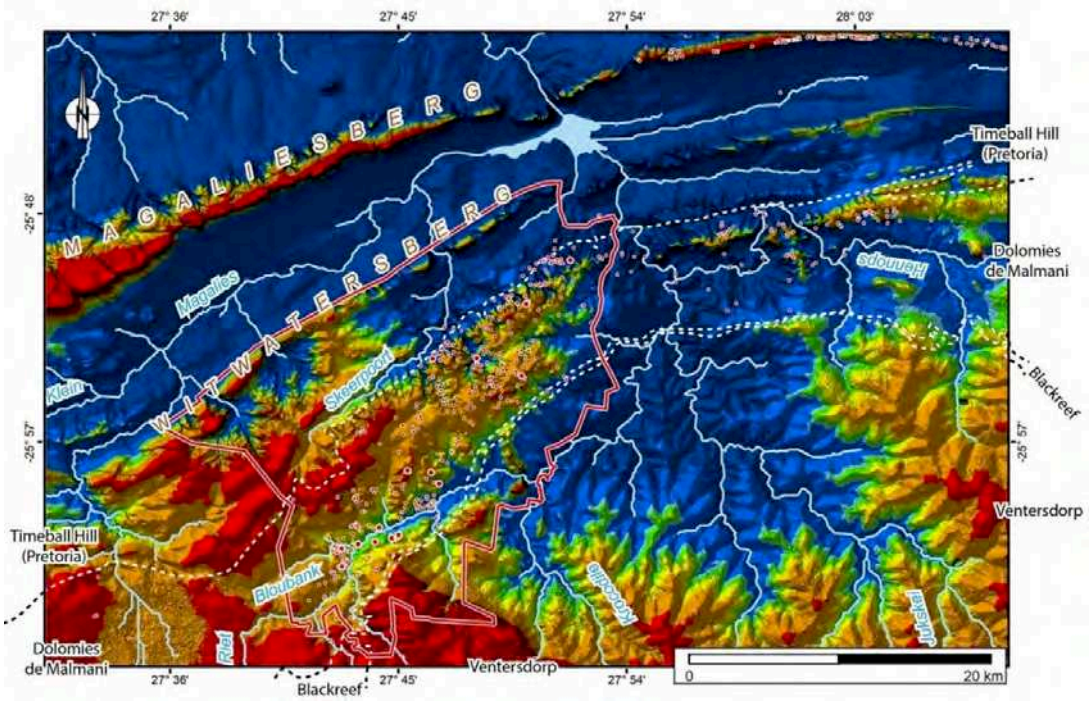


Figure 354 Carte hypsométrique et hydrologique régionale du Coh (en rouge). Les pointillées blanc délimitent les dolomies.

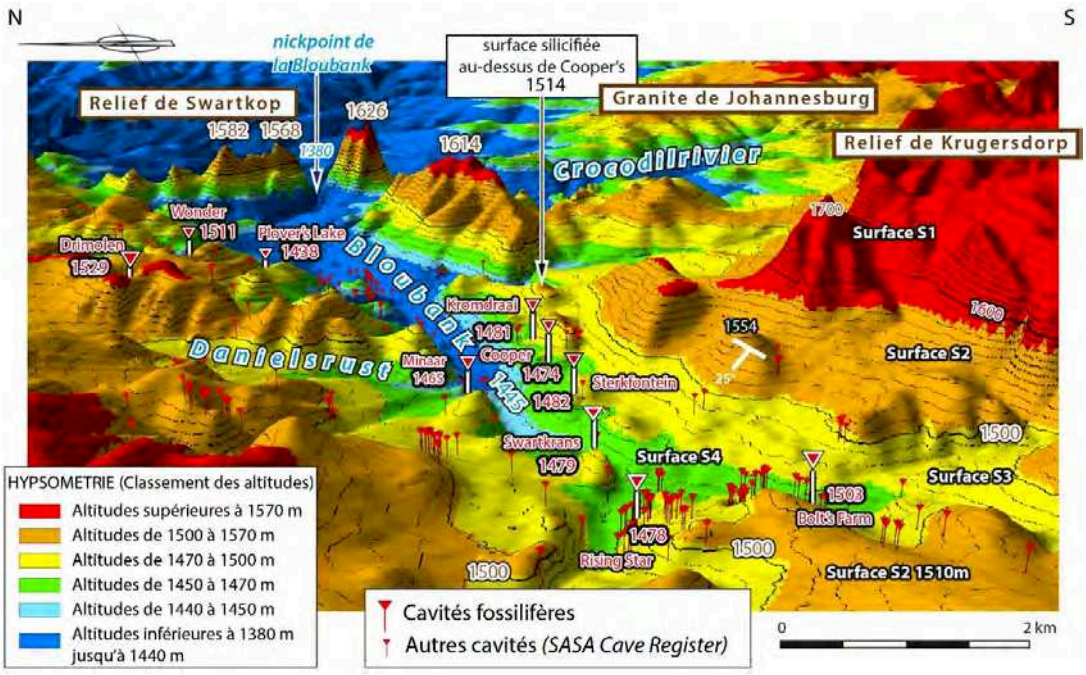


Figure 355 Analyse morphokarstique (2.5 D) de la Bloubank à Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai et ses surfaces d'aplanissement remarquables (paléoniveaux de base).

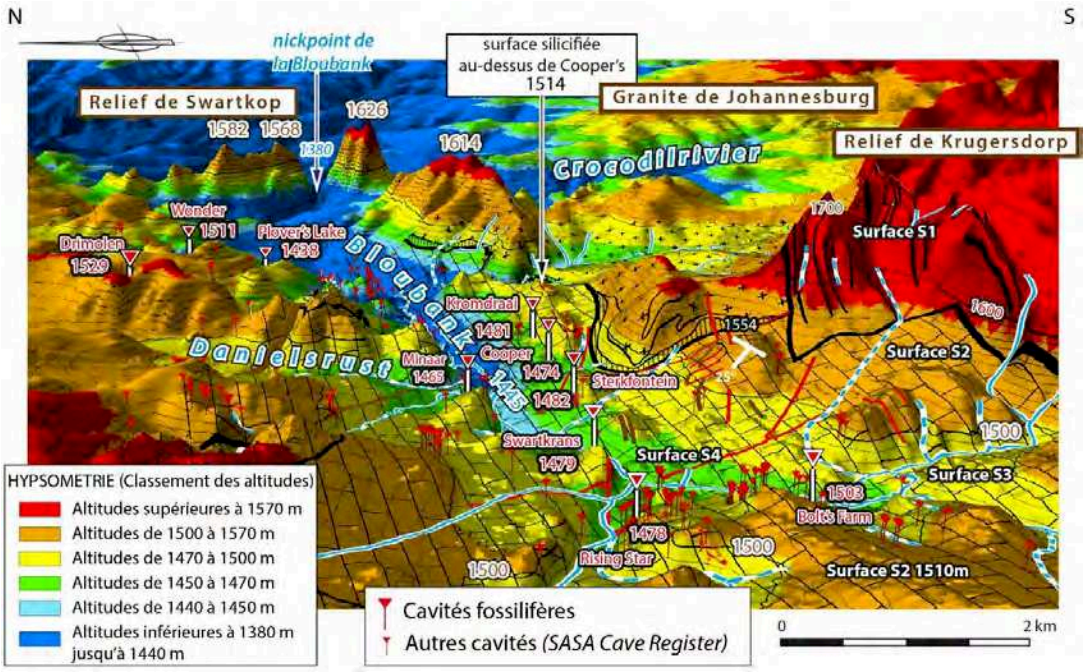


Figure 356 Même carte que précédemment avec ajout des lithologies.

Les triangles rouges et les altitudes, sur ces documents, font référence aux sites suivants :

- 1482 m : Type Site de Sterkfontein (où a été trouvé le crâne de Mrs Ples, Granger *et al.*, 2022, fig.1, *cf.* Figure 165 p.224) ;
- 1480 m : entrée touristique de la grotte de Sterkfontein ;
- 1473 m : gisements de Cooper's ;
- 1475 m : gisement de Kromdraai ;
- 1451 m : gisements de Minnaar's.

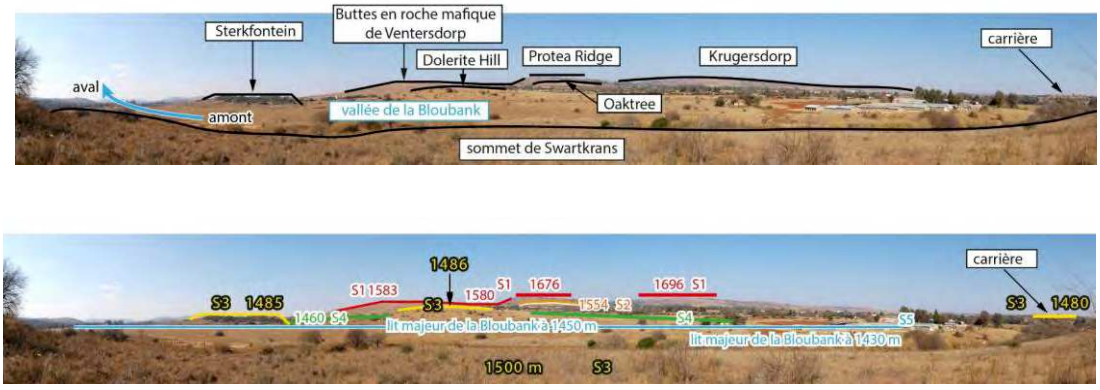


Figure 357 Analyse des surfaces de la Bloubank dans le secteur de Sterkfontein depuis le sommet de Swartkrans.

Depuis le sommet de la colline karstique fossilifère de Swartkrans, à 1500 m d'altitude (S3), on observe (Figure 354) une vallée peu encaissée, inscrites dans les carbonates jusqu'à 1445 m d'altitude (S4). Au-dessus, on trouve des petites collines karstiques fossilifères, en rive droite c'est Sterkfontein (entrée touristique à 1480 m et le *Type-site* à 1482 m), Cooper's D (1474 m) et Kromdraai (1481 m).
En rive gauche, nous avons Swartkrans (1479 m) et Minaar's (1451 m). Ces collines, qui définissent la surface S2, surplombent d'une trentaine de mètres une plaine à 1465 m d'altitude (S4). L'ensemble du paysage vu depuis cette vue 2.5D (Figure 355 et Figure 356) est carbonaté, hormis plusieurs reliefs, très durs, en quartzite se détachant de la planitude des carbonates. Ce sont les reliefs de Swartkop et de Krugersdorp. Le relief de Krugersdorp correspond aux quartzites de Witwatersrand, indiqués en orange sur les coupes des figures suivantes : Figure 364, Figure 362, Figure 365 et Figure 367. Le relief de Swartkop correspond à la formation Orange Groove.

Nous verrons comment l'incision lente du Swartkop par la Bloubank a induit une immunité face à l'érosion régressive en amont du knickpoint. La base de la Surface Africaine est vers 1570 m comme à Protea Ridge.

Surfaces (Bruxelles, 2019)	Surfaces (cette thèse)
Surface S1 >1600 m	Surface S1 >1570 m
Surface S2 1540 à 1560 m	Surface S2 1500 à 1570 m
Surface S3 1480 à 1510 m	Surface S3 1470 à 1500 m
Surface S4 1430 à 1450 m	Surface S4 1450 à 1470 m
	Surface S5 1440 à 1450 m
	Surface S6 <1380 à 1440 m

Figure 358 Comparaison de la typologie des surfaces montrant l'apport de cette thèse à la connaissance des surfaces morphokarstiques du Cradle of Humankind.

3.4.1.1. Profil n°1

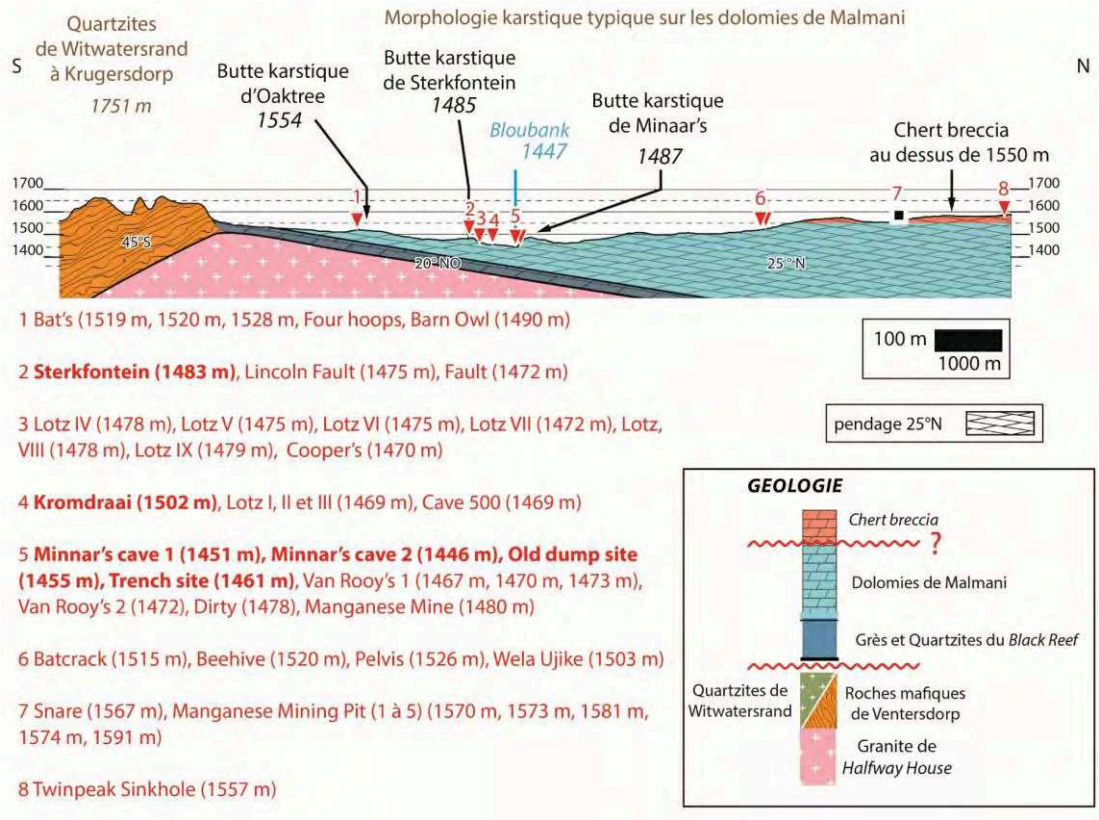


Figure 359 Coupe géologique et répartitions des cavités dans le Cradle of Humankind à Sterkfontein et Minaar's cave.

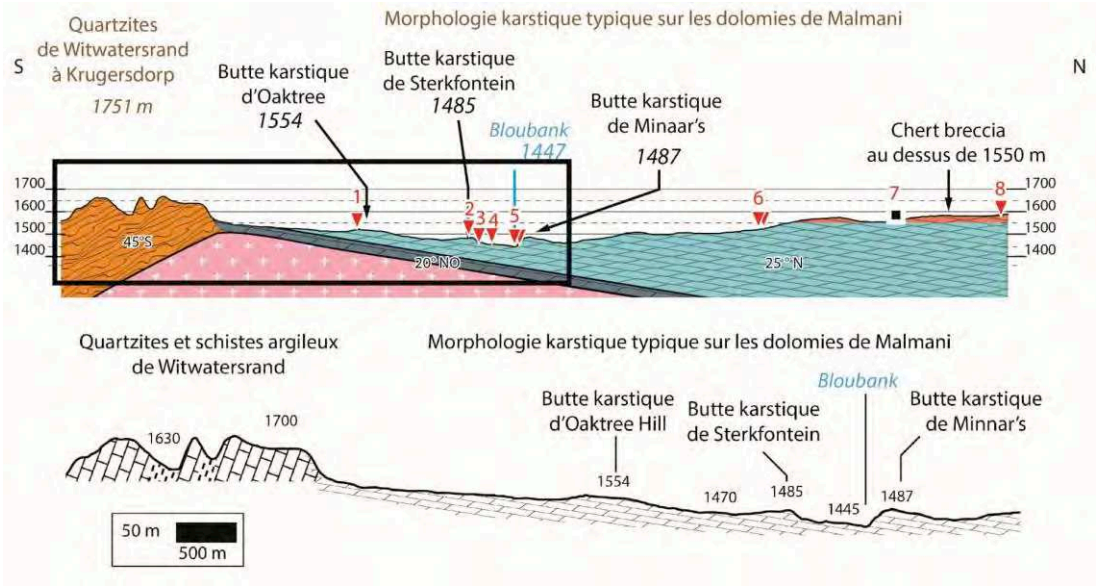


Figure 360 Détail de la coupe géologique.

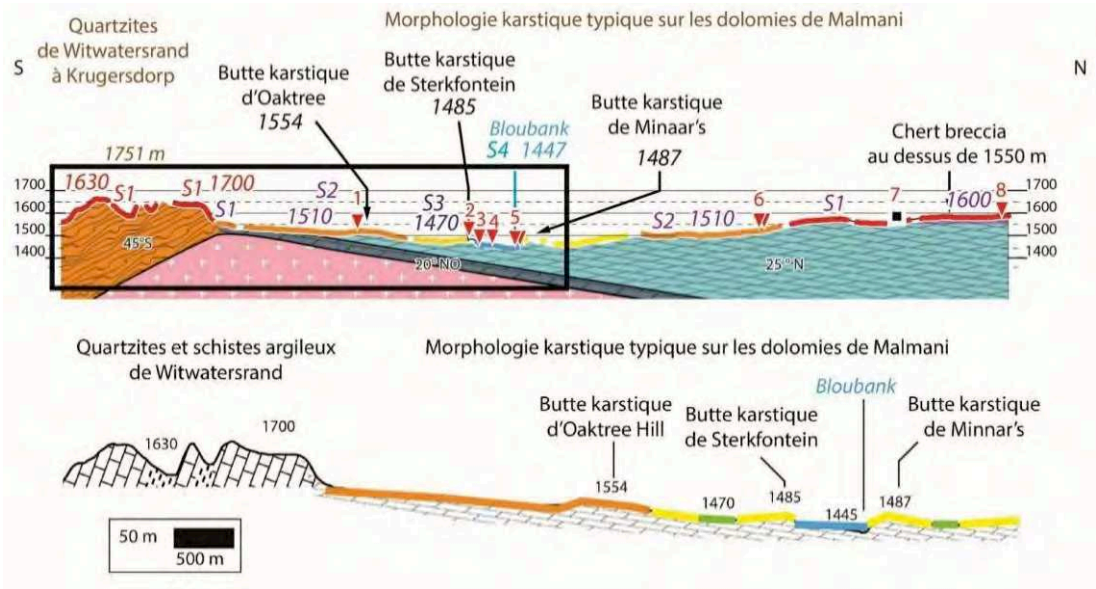


Figure 361 Analyse morphokarstique dans le Cradle of Humankind à Sterkfontein et Minaar's cave.

La synthèse morphokarstique ci-dessous (Figure 351) montre la répartition des cavités selon les surfaces hypsométriques identifiées dans le *Cradle of Humankind* à Sterkfontein et *Minaar's cave*.

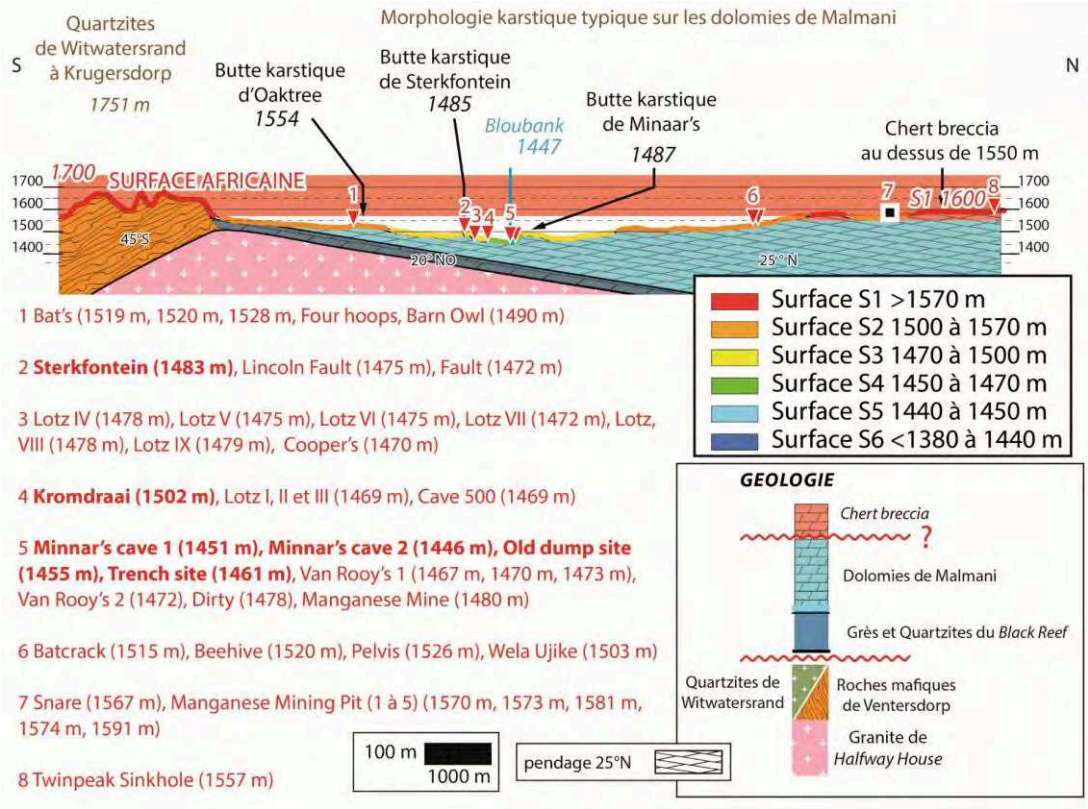


Figure 362 Synthèse morphokarstique du Cradle of Humankind à Sterkfontein et Minaar's cave.

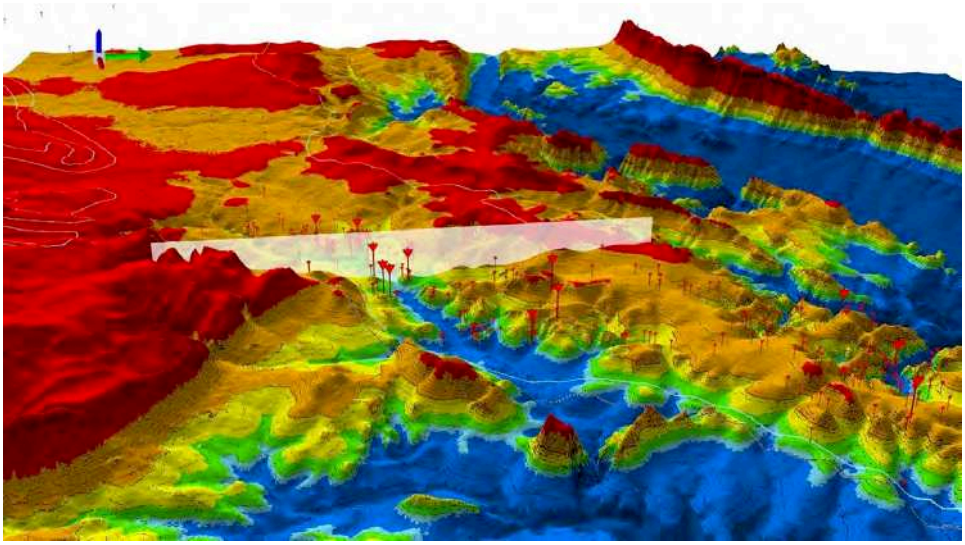


Figure 363 Vue 2.5D du profil morphokarstique n°1.

3.4.1.2. Profil n°2

Le profil morphokarstique ci-dessous (Figure 364) montre la répartition des cavités selon les surfaces hypsométriques identifiées dans le *Cradle of Humankind* à Swartkrans.
Au sud, la rivière Blougat circule sur la surface S3 vers 1480 m d'altitude. La partie sud est détaillée sur les coupes réalisées par Hobbs et Cobbing (2017, fig.5, p.7, fig.10 p.15) on comprend la présence du relief - où est située la ville de Krugersdorp - par la présence des quartzites qui contrastent avec la plaine carbonatée.

Le log stratigraphique montre que la formation des quartzites de Pretoria a été érodée dans le *Cradle of Humankind* lorsque les dolomies de Malmani affleurent. Les quartzites de Pretoria affleurent au nord du *CoH*, au niveau des chaînes de relief de Witwatersberg et Magaliesberg (**Figure 1164** p.1187).

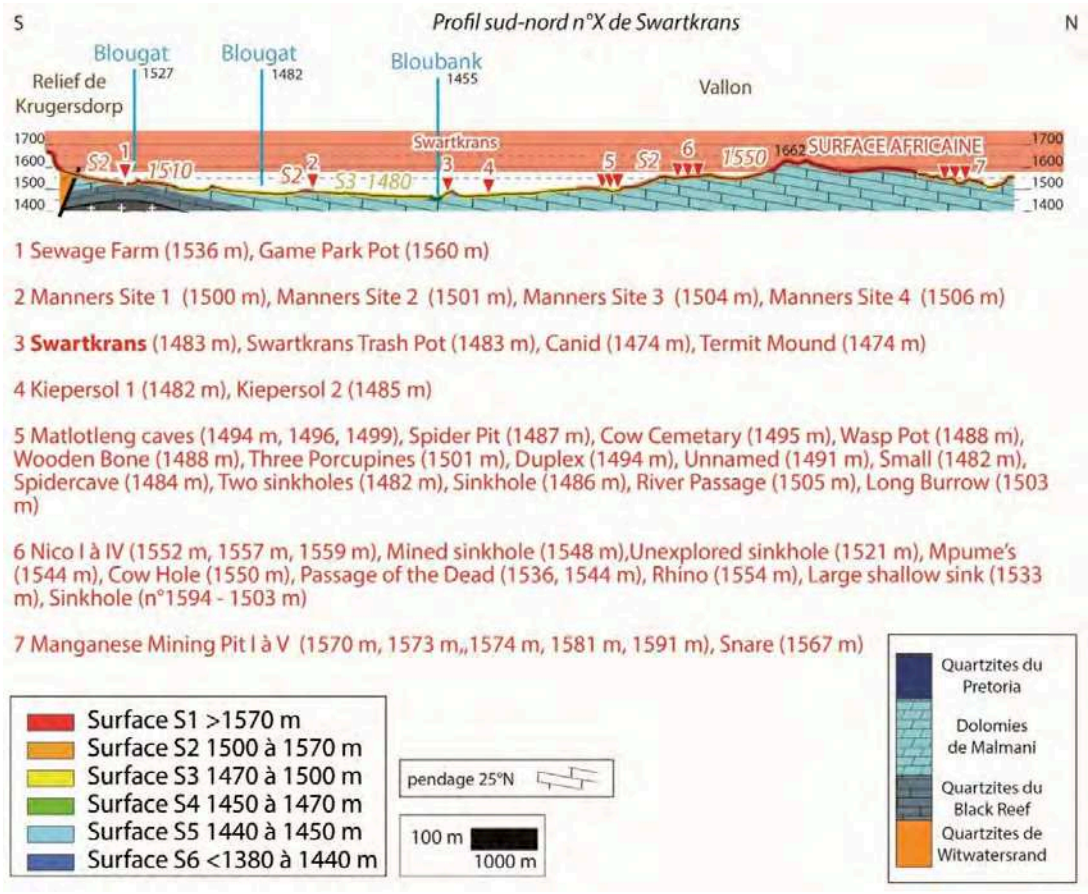


Figure 364 Profil morphokarstique des cavités dans le Cradle of Humankind à Swartkrans. En gras, le nom des cavités fossilifères.

3.4.1.3. Profil n°3

Le profil suivant (Figure 365) montre l'érosion différentielle des quartzites de Witwatersrand, à Krugersdorp au sud, par rapport aux dolomies.
Pour simplifier ce profil, nous avons regroupé au niveau du socle les roches mafiques et les granites.

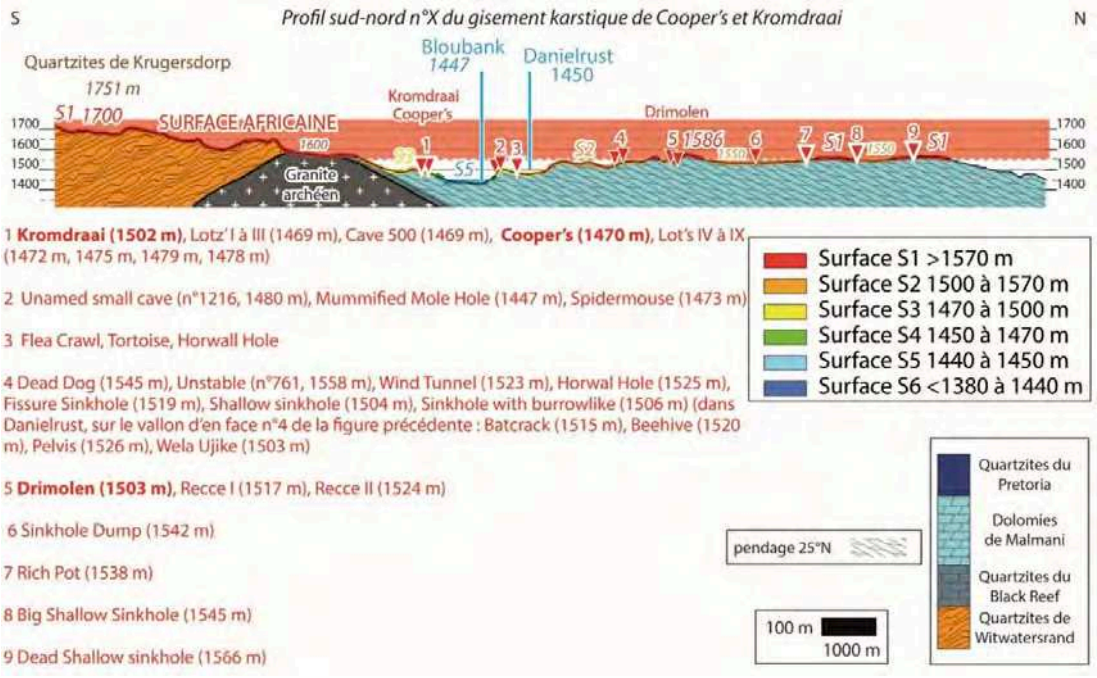


Figure 365 Profil morphokarstique des cavités dans le Cradle of Humankind à Kromdraai, Cooper's et Drimolen.

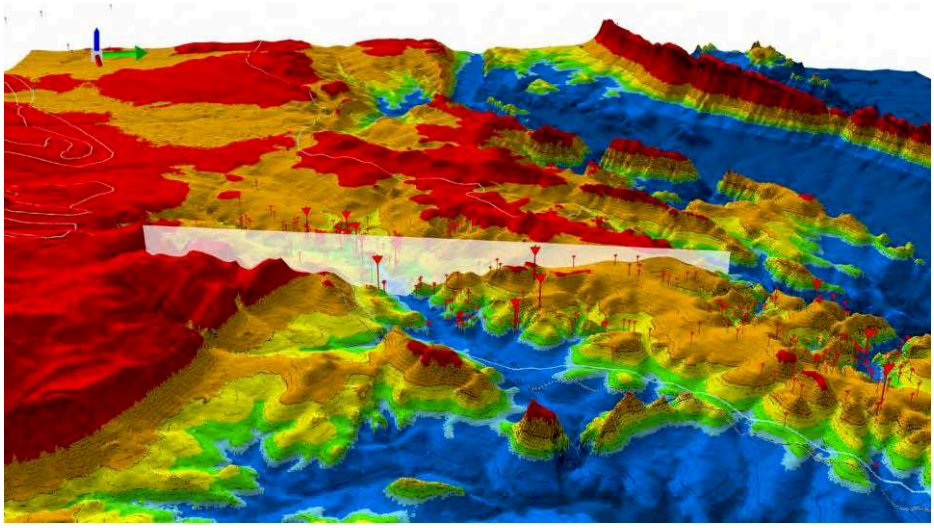


Figure 366 Vue 2.5D du profil morphokarstique n°3.

3.4.1.4. Profil n°4

Ce profil morphokarstique des cavités dans le *Cradle of Humankind* à Polver's Lake et Wonderwerk. Nous avons indiqué la position des alluvions de l'Ancienne Mine d'Or de Kromdraai, qui ont été datées à 3.55 Ma (Granger *et al.*, 2015).

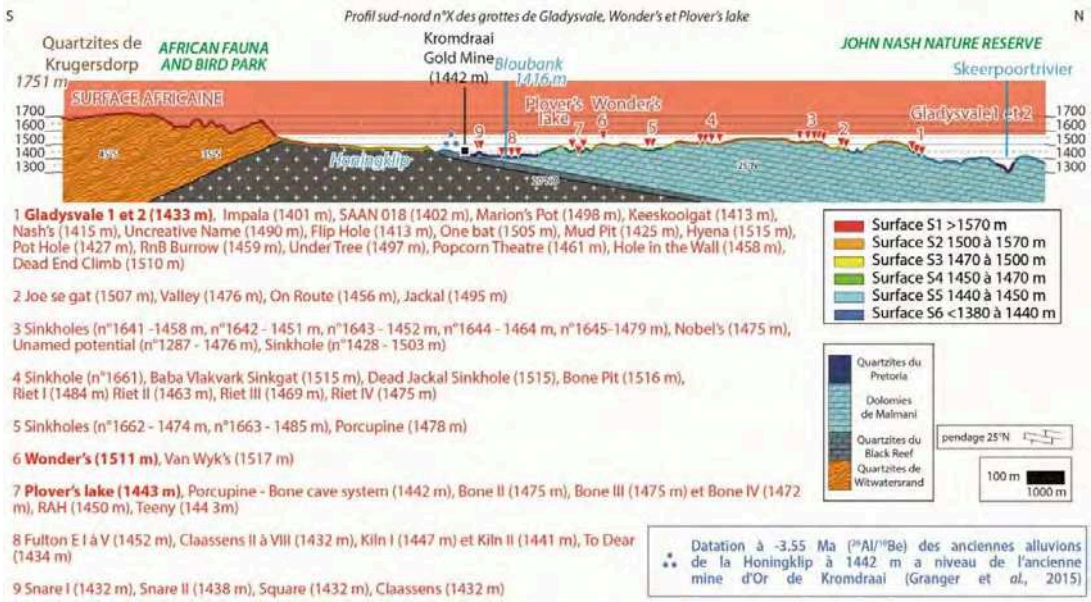


Figure 367 Profil morphokarstique des cavités dans le Cradle of Humankind à Polver's Lake et Wonderwerk.

3.4.1.5. Cartographies synthétiques du CoH

Ces différentes cartes montrent le contexte géologique (Figure 368), hypsométrique (Figure 369) et morphokarstique (Figure 370) de la vallée de la Bloubank et des grottes fossilifères majeures. Pour rappel, Wonder et Motsetse ne sont pas fossilifères et Haasgat et Minnaar n'ont pas livré de fossiles d'Hominines mais uniquement de la faune. Elles sont cependant indiquées ici. Nous pouvons consulter les autres cartes disponibles en annexe (p.1173).

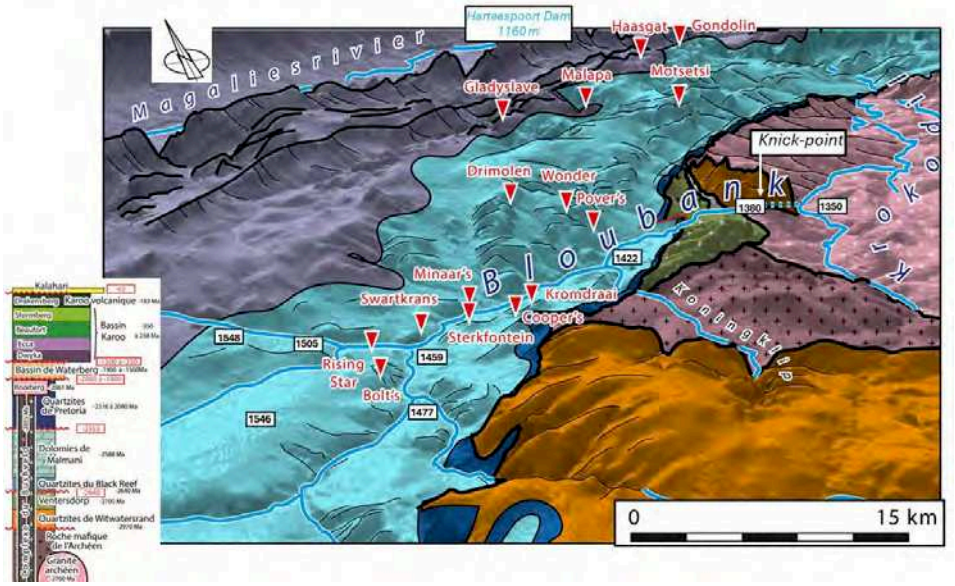


Figure 368 Carte géologique de la Bloubank (Vue 2.5D exagérée 20 fois).

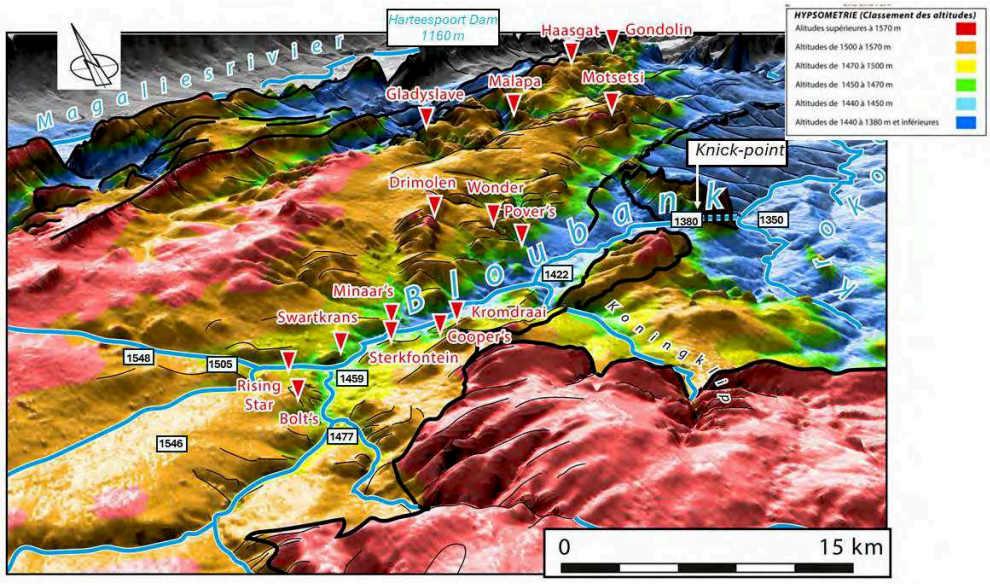


Figure 369 Carte hypsométrique de la Bloubank (Vue 2.5D exagérée 20 fois).

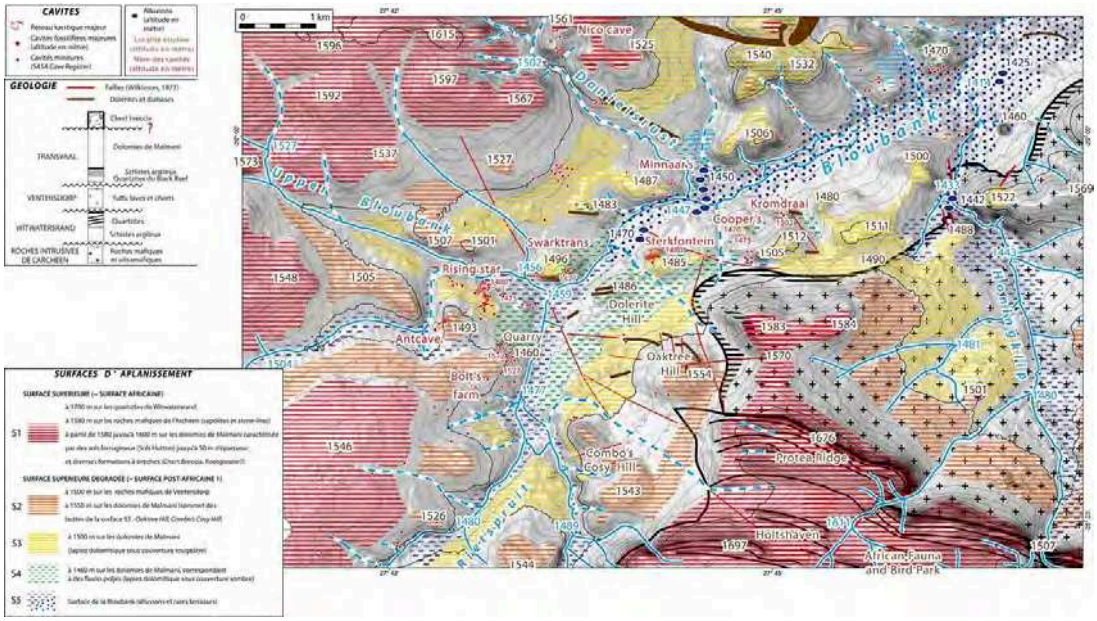


Figure 370 Carte morphokarstique du bassin versant de la Bloubank.

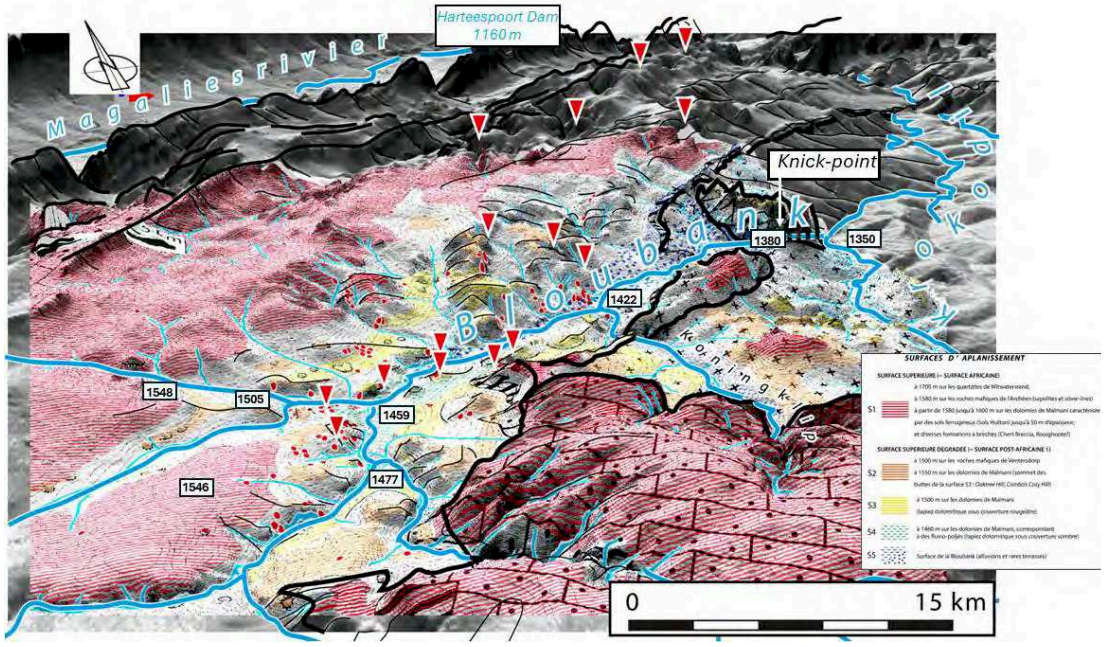


Figure 371 Vue 2.5D (exagérée 20 fois) de la carte morphokarstique précédente.

3.4.2. Définition de la fantômisation (formation des cavités et intérêt pour la formation des sites fossilifères en général) et manière dont elle a été mise en évidence dans le Cradle of Humankind

Précédemment dans le Chapitre n°2, nous avons décrit la karstification par fantômisation (p.206). Ici, nous verrons comment la fantômisation est à l'origine de la présence de grottes dans le *Cradle of Humankind*. Nous expliquerons comment fonctionne le processus de spéléogenèse par fantômisation. Pourquoi est-il intéressant pour la recherche de grottes et de fossiles ? Pourquoi est-ce un critère à rechercher dans les autres karsts ? Nous verrons qu'en plus, comme ce ne sont pas des cavités où de l'eau a vraiment circulé, les sédiments peuvent s'y accumuler et ne sont pas remaniés.

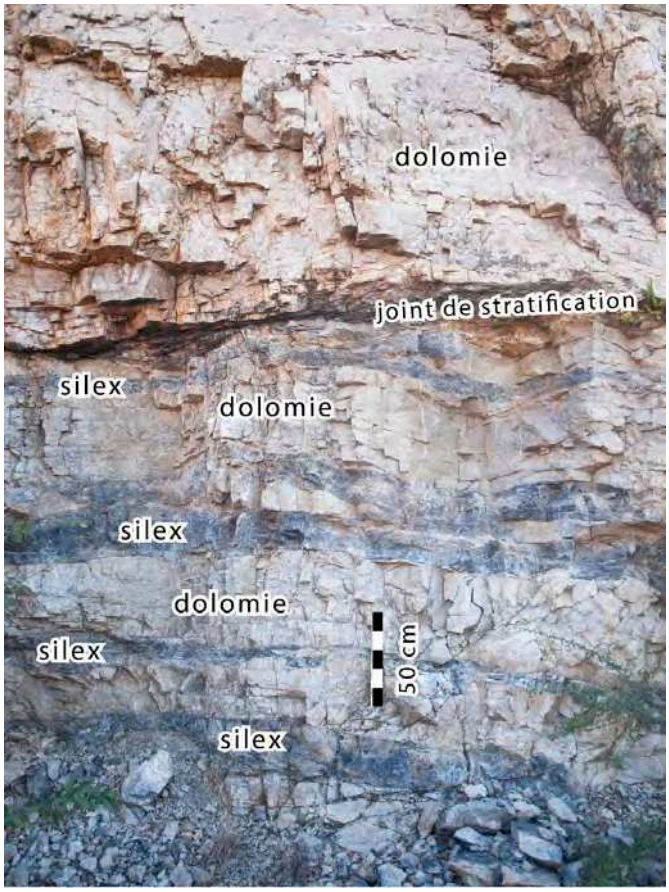


Figure 372 Les dolomies de Malmani, non altérées affleurent dans la carrière abandonnée de Bolt's Farm. On distingue des bancs de dolomies grises métriques et des niveaux de silex décimétriques, de couleur bleue.

3.4.2.1. La spéléogenèse par fantômisation explique la présence des gisements karstiques fossilifères dans le Cradle of Humankind

Afin de mieux comprendre les modalités de remplissage de ces cavités mais aussi leur ancienneté, il est nécessaire de comprendre comment les cavités se sont formées et se forment encore. Nous décrirons le phénomène de fantômisation dans la grotte de Sterkfontein (Figure 376 à Figure 377) et au niveau de l'ancienne carrière de Sterkfontein (*Bolt's Farm*) (Figure 386 et Figure 387) (Bruxelles, 2019, 2022).

Comprendre et bien caractériser le rôle de la fantômisation dans la spéléogenèse des grottes du *Cradle of Humankind* est capital pour comprendre le piégeage et la conservation des fossiles (Bruxelles, 2019, 2022) et ainsi nous être utile pour rechercher d'autres karsts. Cette meilleure compréhension du karst et de l'organisation stratigraphique dans les grottes est indispensable pour réévaluer les karsts connus. Nous verrons que le pendage des carbonates (et donc le pendage du remplissage), de 25°N dans le *CoH*, sera un élément à prendre en compte lorsque nous décrirons le mécanisme qui permet d'accumuler des sédiments venant de la surface dans la grotte.

C'est en intégrant le pendage au processus de fantômisation que nous comprenons pourquoi les fossiles anciens (Kuman *et al.*, 2021 ; Pickering *et al.*, 2025) à Swartkrans sont situés à l'extérieur, en aval-pendage, que plutôt dans le fond de la grotte en amont-pendage (Figure 373).



Figure 373 Localisation des nouvelles fouilles dans le gisement de Swartkrans dans la vallée de la Bloubank où ont été exhumés les outils taillés les plus vieux d'Afrique du Sud (Kuman et al., 2021). Les études stratigraphiques et la compréhension du phénomène de fantômisation des carbonates montrent qu'il est logique de découvrir des remplissages plus anciens en direction de l'aval-pendage et en sortant du fond de la cavité.

3.4.2.1.1. Présence de fantôme de roche dans la grotte de Sterkfontein et dans les autres grottes du CoH

Dans la grotte de Sterkfontein a été mise en évidence la présence de fantôme de dolomie (Bruxelles, 2019) en place (altérite autochtone de la Figure 376) maintenu en place par les niveaux de silex qui sont présents dans les dolomies de Malmani (Figure 372). Ces niveaux de silex ne sont altérés par la fantômisation que dans une moindre mesure (voir les analyses minéralogiques de Maire *in* Bruxelles, 2019, p.43). Le fond de la cavité est rempli de fantôme effondré (altérite parautochtone de la Figure 376).

La fantômisation est la première étape de spéléogenèse (creusement des vides) des karsts du CoH, c'est une altération supergène qui s'effectue en milieu vadose mais stable avec un très faible gradient hydraulique, en contexte orogénique stable sur de longues périodes de temps (rôle de knickpoint du Swartkop). Plus précisément, c'est la micrite des carbonates qui se transforme au fur et à mesure que l'altération supergène pénètre les carbonates *per descensum*. Cette altération commencerait sous la Surface Africaine (S1) vers 1600 m d'altitude (Bruxelles, 2017, 2019, 2022), voire sous des couvertures sédimentaires (peut-être Ecca ?) aujourd'hui érodées. La datation du phénomène de la fantômisation dans le *Cradle of Humankind* n'est pas clairement établie. Les datations du manganèse pourraient éclairer sur l'âge de la fantômisation. La pédogenèse pourrait jouer un rôle dans la fantômisation (Quinif, 2010).

Dans les points bas de la cavité de Sterkfontein, comme en général dans le fond des cavités que nous avons étudiées en Afrique australe, le fantôme de roche est encore conservé en place, à proximité du niveau de base (lac souterrain). Parfois, les formes laissées par la fantômisation des dolomies sont visibles en surface, comme c'est le cas sur les fronts de taille de l'ancienne carrière de *Bolt's Farm* à Sterkfontein (Figure 383, Figure 384, Figure 386, p.425), où certains fantômes ont été cimentés par la calcite (en jaune sur le plan de la Figure 389 p429, et photographies des figures suivantes) et remplies de brèches (Bruxelles, 2019, 2022). La carrière est localisée sur nos cartes en annexe, désignée par « *Quarry* » sur la Figure 1173, p.1199.

Nous avons vu que les niveaux de silex sont altérés différemment par la fantômisation que les roches carbonatées. C'est aussi le cas des quartzites du *Black Reef*, situés stratigraphiquement sous les dolomies de Malmani. C'est aussi le cas des quartzites de Pretoria qui sont situés au-dessus des dolomies. En conséquence, les dolomies de Malmani sont encadrées stratigraphiquement par des formations qui sont plus faiblement altérées par la fantômisation (ou seulement dans une moindre mesure, car les silex, de couleur bleue à la base sont pâles et jaunâtres aujourd'hui (oxydation ?).

C'est pour ces raisons que l'on trouve d'épaisses accumulations de brèches sur le *Black Reef* et des reliefs en pinacles à *Devil's Kantoor (Duivels-Kantoor*).

« Cette évolution isovolumique ne peut constituer qu'une toute première phase d'une évolution géologique beaucoup plus longue. On imagine aisément que la poursuite de l'altération dans le cas d'un calcaire totalement carbonaté fera disparaître ce carbonate. Dans ce cas, il s'agit d'un abaissement généralisé de la surface continentale, avec formation de dépôts superficiels comprenant les insolubles, comme les nodules siliceux. D'autre part, le squelette résiduel, quel qu'il soit, est mécaniquement fragile et une rupture d'équilibre se produit facilement, avec érosion mécanique de ce squelette. » (Quinif, 2010 p.62).



Figure 374 Boxworks dans la grotte n°764 du SASA Cave Register, visité le 15/08/2021. (Position GPS : -26.39354167 ; 27.74251389, 1657 m, puits d'accès de 89 m).



Figure 375 Boxworks d'une grotte du CoH (Source : SEC Caving, groupe WhatsApp).

Après l'évacuation du fantôme de dolomie et le creusement d'un vide, il ne reste plus que les éléments insolubles. Sur la photographie ci-dessus (Figure 375), on distingue : (1) des niveaux de silex concordant avec la stratigraphie de l'encaissant auquel ils appartiennent (dolomies de Malmani), ici subhorizontaux, et (2) des diaclases verticales plus fines correspondant à d'anciennes fissures au sein des dolomies, imprégnées par des minéralisations secondaires de silice.
On obtient alors un ***boxworks***, caractéristique de la **spéléogenèse par fantômisation.**
Dans le fond de la cavité de Sterkfontein il y a (1) une grande accumulation de fantôme de roche en place au plafond, contenu par les niveaux de cherts insolubles et (2) du fantôme effondré (Figure 376) (Bruxelles, 2019, p.42).
C'est pourquoi on retrouvera le fantôme encore en place ou en cours d'évacuation au fond des cavités, dans les points les plus bas, près de la nappe aquifère et à proximité du niveau de base, qui évacue le fantôme lors des mises en charge, comme nous allons le voir.

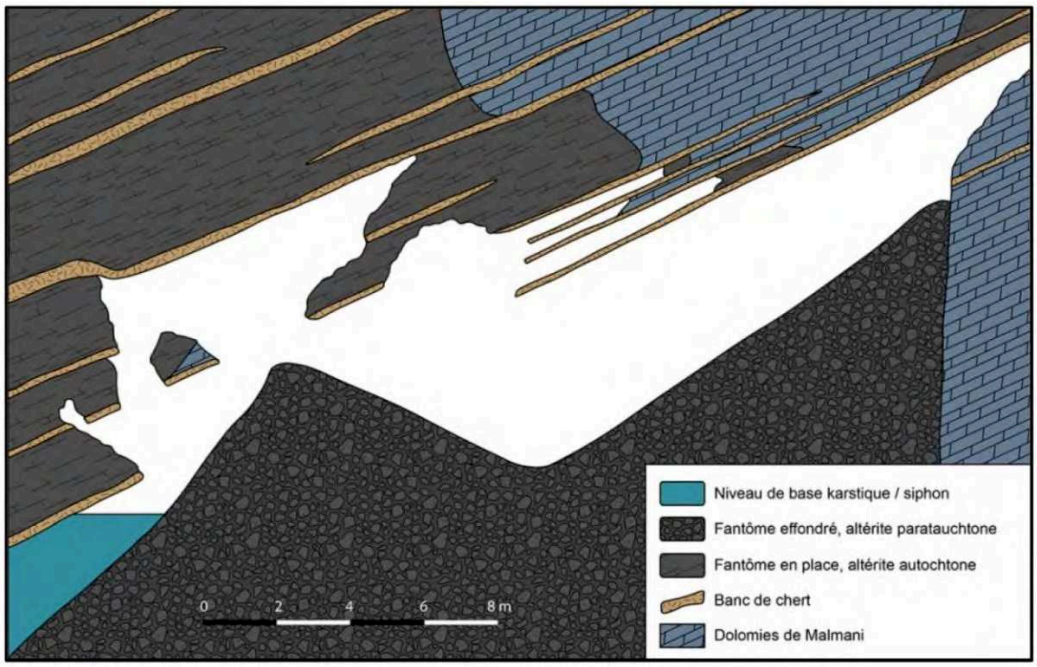


Figure 376 Coupe stratigraphique du fond de la cavité de Sterkfontein (Source : Bruxelles, 2019, p.42).

Dans *Chaos cave* (N°65 du SASA Cave Register ; 27,18697222 ; -26,47649167 ; 1526 m), à 75 km au SO du *CoH*, les niveaux de silex, moins altérés par la fantômisation que les carbonates, font que le fantôme de dolomie reste en place. La couleur du fantôme est sombre. Dans cette galerie le fantôme est en cours d'évacuation, faisant basculer et chuter les niveaux de silex sous leur propre poids. Ils s'accumulent alors en chaos vers le bas. La photographie suivante illustre bien le schéma d'effondrement de Wilkinson (1973, Fig.6.2).

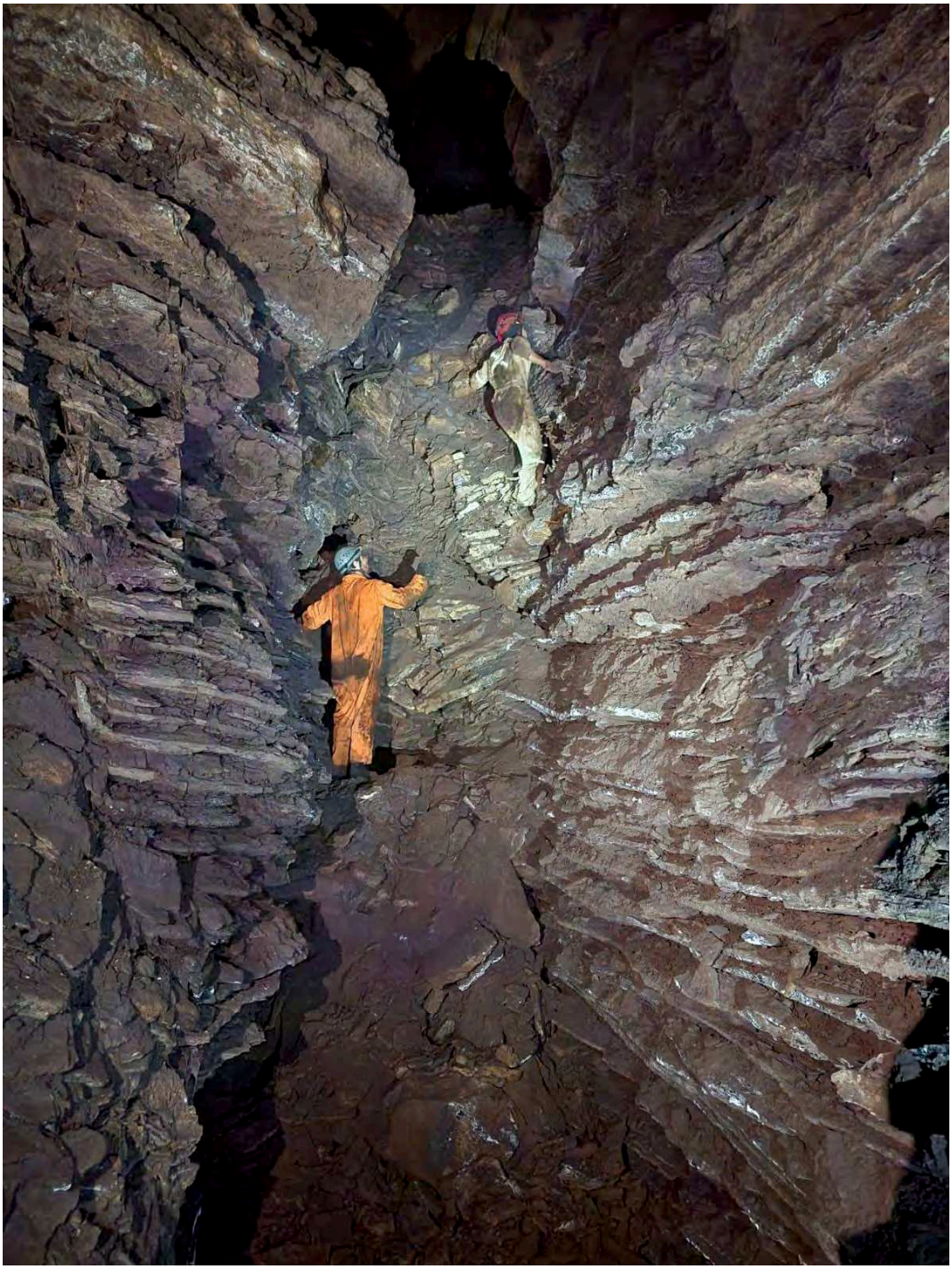


Figure 377 Couloir dans Chaos Cave (Source : SEC Caving 21/03/2023 lien).

Dans *Boon's cave* (N°55 du SASA Cave Register ; 27,13121944 ; -26,09818056 ; 1525 m), à 60 km à l'ouest du *CoH* les niveaux de silex, moins altérés par la fantômisation que les carbonates, apparaissent en relief. Remarquons la couleur sombre des dolomies.

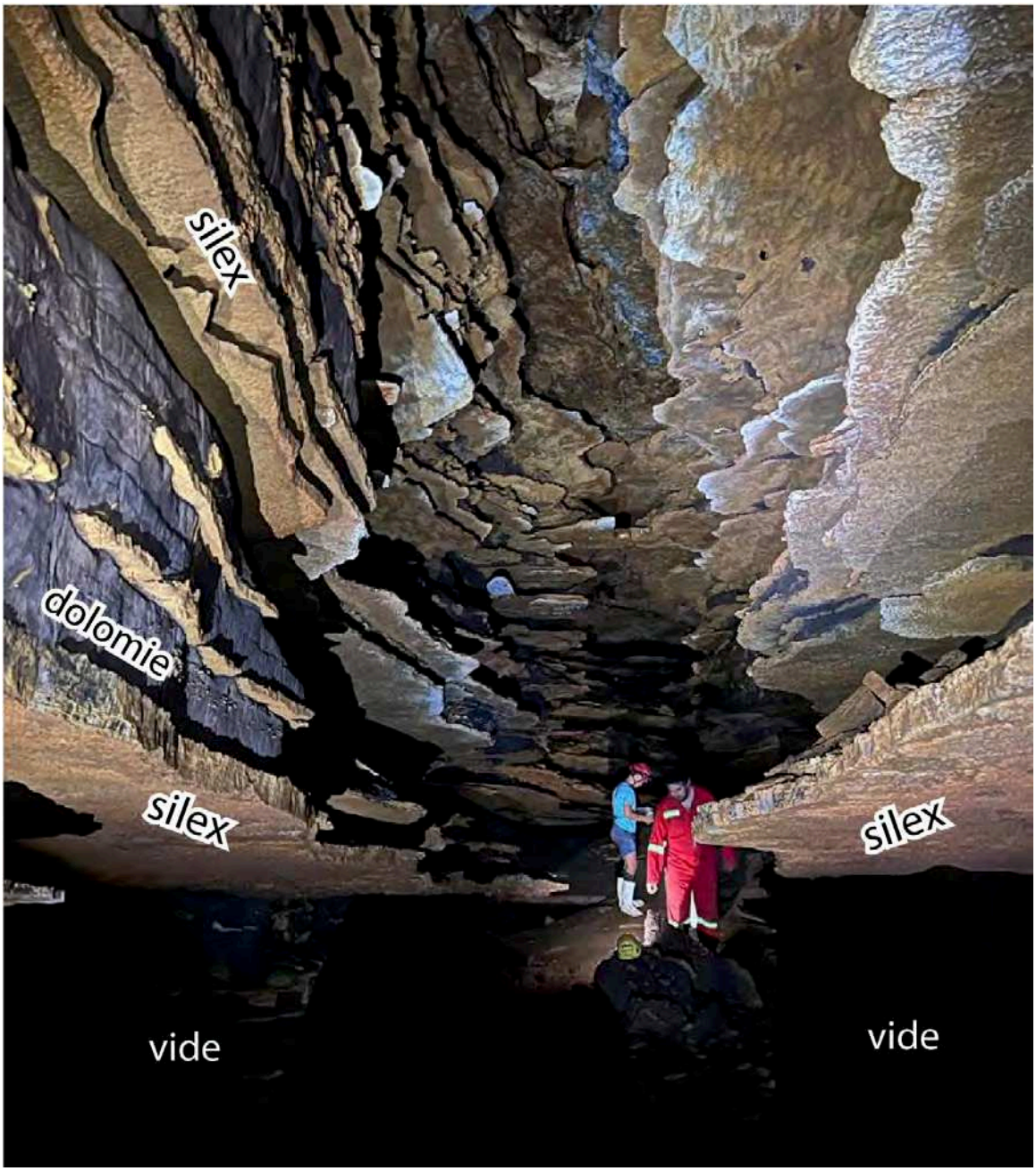


Figure 378 Couloir dans Boon's cave (Source : SEC Caving, modifié).

3.4.2.1.2. Evacuation du fantôme per ascensum dans la grotte de Sterkfontein

Nous décrirons l'évacuation du fantôme, du bas vers le haut, lors des mises en charge de la nappe phréatique jusqu'à percer la surface topographique et mettre en connexion la cavité et la surface topographique, permettant alors l'entrée des sédiments et des éléments qui se fossiliseront dans le karst. Dans les cavités, nous observons la présence du fantôme de dolomie dans les parties les plus profondes et les plus proches du niveau de base, c'est-à-dire les parties les plus basses en altitude. La présence de lacs souterrains à proximité des fantômes permet de comprendre comment s'effectue l'évacuation du fantôme par les mises en charge de la nappe phréatique, comme l'a montré Laurent Bruxelles dans la grotte de Sterkfontein (Bruxelles, 2019, 2022a) ou Martini dans les grottes de Berlin, dans l'est du bassin du Transvaal (Martini, 1987) (Figure 1143 p 1166).

C'est donc une érosion mécanique qui est à l'origine de ce phénomène, comme cela a été prouvé pour le décolmatage, en plusieurs mois, de la grotte Quentin, dans la carrière de Nocarcentre, à Ecaussines (Belgique) par suite de l'abaissement anthropique du niveau de base de la carrière (Quinif, 2010, p.104 à 113 et 135). Le front de taille de l'ancienne carrière de *Bolt's Farm* à Sterkfontein met à l'affleurement des dolomies à niveaux de chert (Figure 386) altérées et karstifiées par la fantômisation comme nous l'avons montré. On distingue des couloirs verticaux et des pseudo-endokarsts (Bruxelles, 2019, 2022a).

Les formes laissées par les fantômes de dolomie correspondent ici aux parties dessinées en rouge, en blanc et en noir sur la Figure 387. S*tricto sensu*, le fantôme n'est pas conservé ici, on ne retrouve qu'une altérite parautochtone, dessinée en noir sur la Figure 387 et qui correspond aux insolubles des carbonates fantômisés (fer, manganèse, chert bréchifié, etc.) et certainement indurés par de la calcite, puis de la silice issue de la pédogenèse classique.

« La fantômisation, en tant qu'altération isovolumique, est un cas de l'altération pédogénétique sur toute roche, comme l'altération ferralitique » (Quinif, 2010, p.61).

C'est un paléokarst qui s'est formé par évacuation du fantôme de dolomie, sapé depuis le bas par les mises en charge de la nappe phréatique. L'espace ainsi créé, en bas, va déstabiliser le fantôme situé plus haut, qui va alors chuter par gravité et s'accumuler vers le bas. Cela va créer les premiers vides au plafond de la cavité, c'est le premier cavernement, en rouge sur la **Figure 387**. Associé à ce fantôme de dolomie qui s'accumule sur le plancher, on trouve des matériaux insolubles et inaltérables (la silice des fossiles et des cherts, des argiles et des minéraux, etc.). Ils seront indurés et minéralisés pour donner la formation, dessinée en noir **(Figure 387)**, et visible sur le font de taille. On qualifie cette altérite d'allochtone, bien qu'elle n'ait pas subi beaucoup de transport.

C'est un autre processus, ou une autre partie du processus de fantômisation, qui donnera les minéralisations des gisements de manganèse et de fer («wad» et saprolites de Waterval (De Villiers, 1960, Van Niekerk et al, 2000, 2006, Trollip 2020), voire les platinoïdes des récifs de Merensky de la West Wits Gold Mine. Par la suite, une calcite météoritique viendra secondairement remplir le vide (représentée en blanc sur la Figure 387 p.427). La pédogenèse pourrait avoir une action sur la cimentation secondaire par de la calcite, puis de la silice et enfin du fer. Cet affleurement montre clairement comment le battement de la nappe phréatique est venu débourrer le fantôme de dolomie depuis le point bas topographique, lors des mises en charge. Pour que la formation dessinée en noir (Figure 387) puisse se déposer, il faut que l'espace soit disponible, ce qui est rendu possible par la mise en charge du niveau d'eau (niveau de base).

3.4.2.1.3. Profils topographiques des galeries et niveau de base

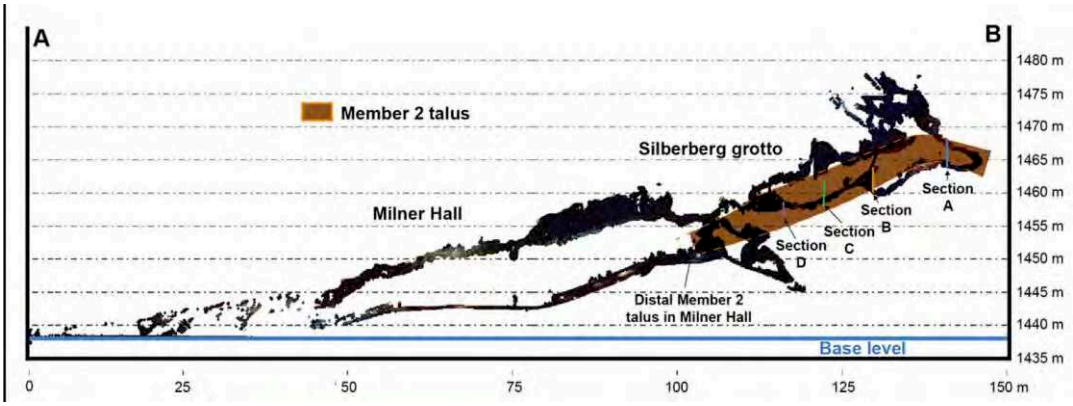
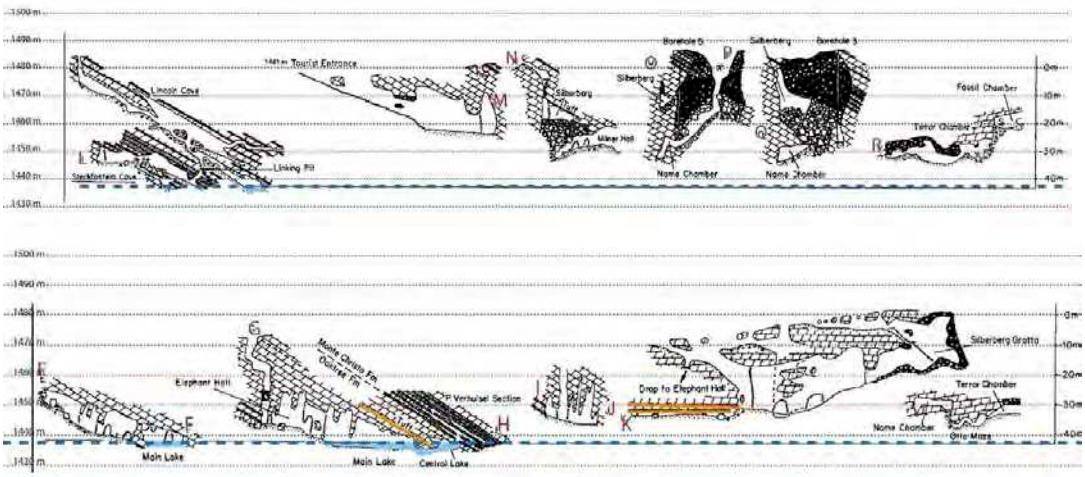


Figure 379 Profil topographique de la grotte de Sterkfontein (Source : Bruxelles, 2019).



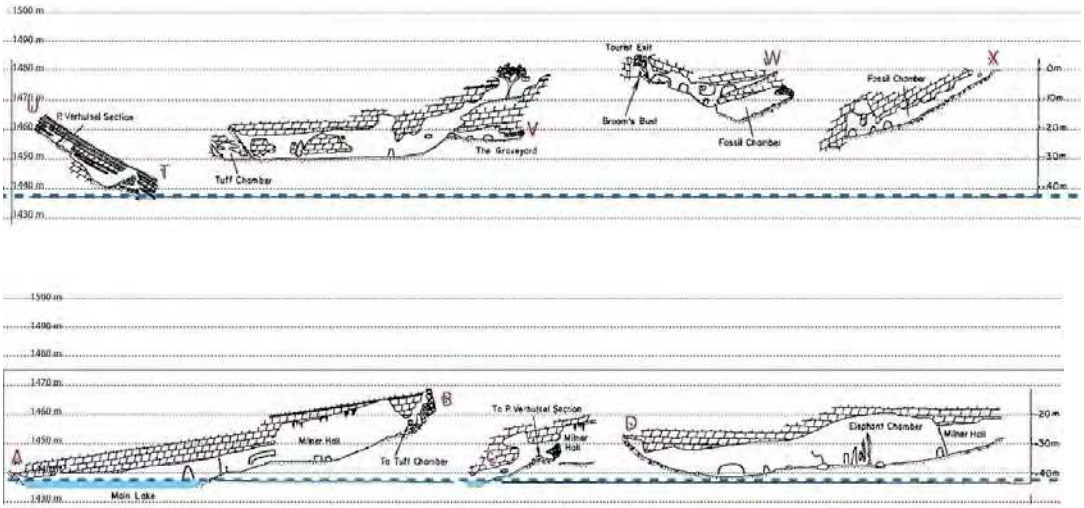


Figure 380 Différents profils topographiques de la grotte de Sterkfontein (Martini et al., 2003, colorisé).

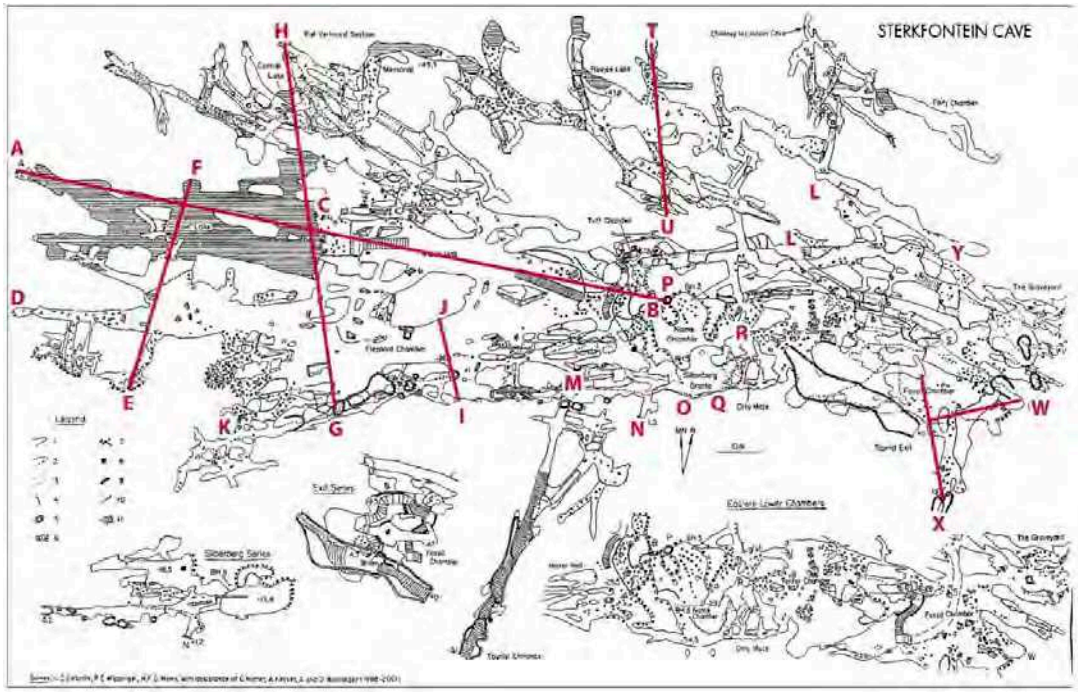


Figure 381 Plan topographique de la grotte de Sterkfontein avec indication de la position des profils ci-dessus (Martini et al., 2003, colorisé).

3.4.2.2. Exemple de Bolt's farm : les couloirs de fantôme de la carrière

Laurent Bruxelles a étudié les fronts de taille de l'ancienne carrière de *Bolt's* Farm à Sterkfontein (Bruxelles, 2019, 2022), localisée sur la Figure 382 ci-dessous et sur les cartes (p.1199).

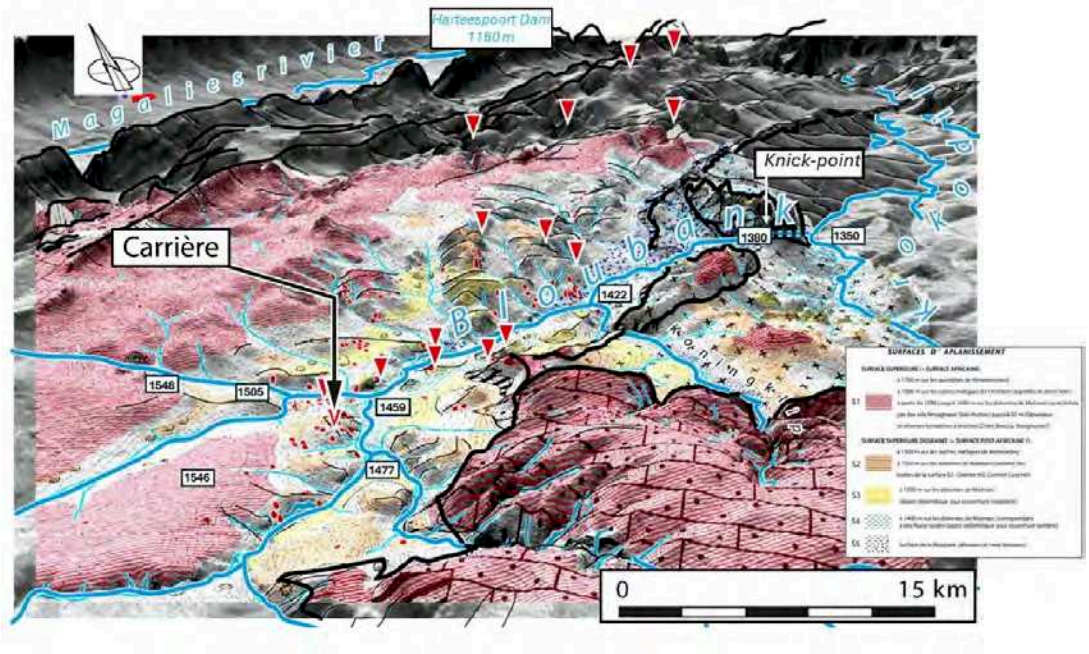


Figure 382 Localisation de la carrière de Bolt's Farm.

Il décrit des couloirs d'altération verticaux (Figure 383, Figure 384, Figure 386, p.425) en lien avec la **spéléogenèse par fantômisation** (Bruxelles, 2019, 2022) que nous avons décrit dans le Chapitre n°2 (p.214).

La présence de ces couloirs dans le *CoH*, en plus de la présence des grottes, montrent que toute la tranche de dolomies de la région a été soumise à cette spéléogenèse par fantômisation, jusqu'à cette altitude de la carrière, à 1460 m, et au-moins jusqu'à **1447 m** l'altitude de *Bolt's cave* sur le plateau (voir la synthèse Figure 425 p.466).

3.4.2.2.1. Analyse des fantômes visibles sur les fronts de taille de la carrière

Les photographies suivantes (Figure 383, Figure 384, Figure 386) montrent ces couloirs d'altération que l'on trouve tous les 40 m.



Figure 383 Couloirs de fantômes (notés f), subverticaux, recoupés par les fronts de taille de l'ancienne carrière de Bolt' Farm (Sterkfontein Quarry).

Ces structures n'ont pas été décrites par Hobbs *et al.* 2022 (Plate 2, p.41) lorsqu'ils y décrivent les fronts de taille de cette carrière. Ce type de couloirs d'altération commencent à être étudiés en France (Barral, 2024 ; Barral *et al.*, 2024, Fig.7, p.10 ; Fig.11, p.15 et Fig.13, p.17).



Figure 384 Détails d'un couloir fantômisé.

3.4.2.2.2. Analyse d'un couloir fantômisé

Sur la photographie, ci-contre, Figure 385, nous avons délimité le fantôme de roche (noté F) par un contour rouge. Ce couloir correspond à un ancien **fantôme de roches** comblé d'altérites parautochtones composées de brèches de blocs de dolomies et de fragments de silex. Après le tassement du fantôme qui produit cette altérite parautochtone, celle-ci a été cimentée par la calcite.

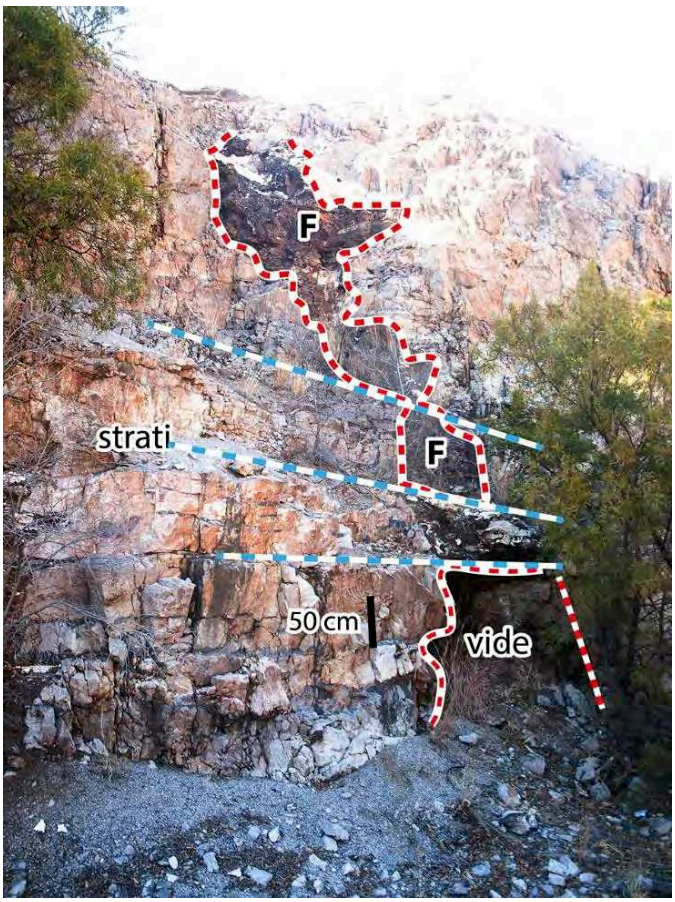


Figure 385 Ancien fantôme (couloir d'altération) recoupé par le front de taille. En bleu, nous avons indiqué la stratigraphie de l'encaissant (dolomies à niveaux de silex)

3.4.2.2.3. Analyse des pseudo-endokarsts

D'autres conduits, cette fois-ci, subhorizontaux ont été analysés dans cette carrière (Figure 386), ce sont des **pseudo-endokarsts** (Bruxelles, 2019). Leurs analyses permettent de caractériser la spéléogenèse par fantômisation. Le vide au sommet du conduit, indiqué sur la Figure 387 ci-dessous, est une conséquence de la spéléogenèse par fantômisation, il s'est formé par suite du tassement du fantôme sur lui-même. À ce stade, il n'y a pas encore eu de **spéléogenèse par enlèvement total**. La vidange de l'altérite s'est produite après, lors des mises en charge successives de l'aquifère. L'espace ainsi crée a ensuite été comblé par la calcite provenant de la surface (eau de pluie). Les datations de calcite similaire dans les grottes proches indiquent un âge de 2 millions d'années.



Figure 386 Pseudo-endokarsts recoupés par le front de taille.

Ci-dessous, les vides formés au sommet des pseudo-endokarsts par tassement du fantôme sont indiqués en rouge. La calcite, en blanc, en a comblé une partie. Les accumulations d'altérite autochtone, principalement des matériaux insolubles et inaltérables issus de la fantômisation des dolomies, sont entourées par un trait noir (cf. le « fantôme de l'excursion » de la carrière de Gauthier-Wincqz Quinif, 2010, fig.5-1 p.81).

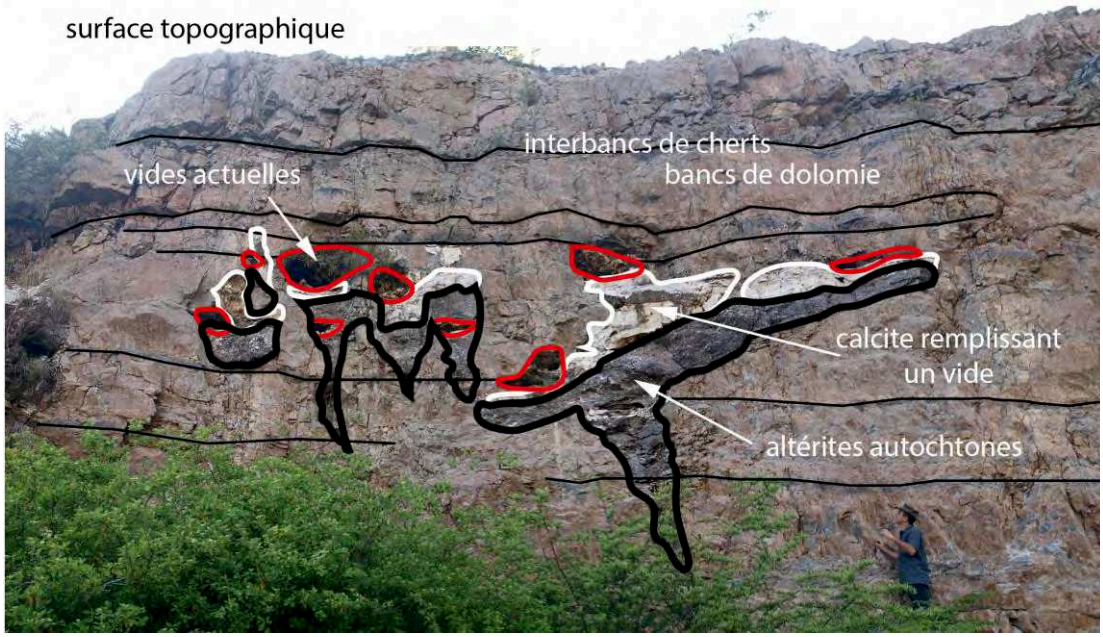


Figure 387 Analyse des pseudo-endokarsts.

3.4.2.2.4. Accumulations de blocs de silex (clastes de chert)

Le front de taille de la carrière a recoupé ce couloir fantômisé qui se poursuit en profondeur avec la grotte de *Heartbreaker* (Figure 388). Les silex s'altèrent moins que les carbonates et s'accumulent par gravité, après tassement et évacuation du fantôme sur le fond des couloirs. Ce mécanisme explique la présence de nombreux clastes de silex contenus dans les brèches karstiques du secteur que nous avons décrites précédemment (p.225).

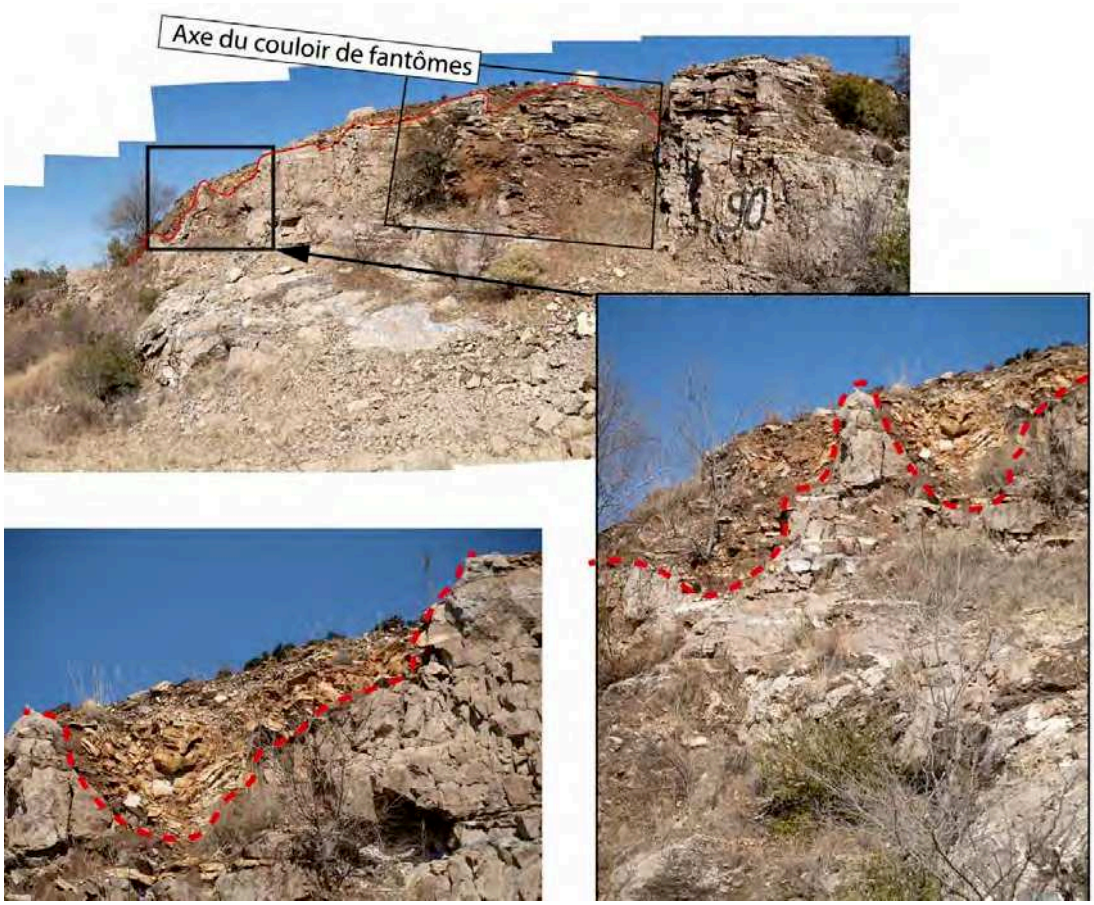


Figure 388 Front de taille de la carrière de Sterkfontein qui a recoupé un couloir de fantôme et qui montre une accumulation des silex à la base des couloirs.

3.4.2.2.5. Cartographie du secteur de la carrière de Bolt's cave

Ces observations de terrain ont été résumées sur des cartes (Figure 389 et Figure 390) qui permettent de faire le lien entre la spéléogenèse par fantômisation et plusieurs éléments présents à la carrière :

- les couloirs de fantôme de la carrière, situés à 1460 m d'altitude, représentées par des cercles blancs sur Figure 389 ;

- les réseaux karstiques, en rouge, qui s'ouvrent à la surface du plateau, à 1505 m d'altitude, comme *Bolt cave* qui descend jusqu'à 1447 m d'altitude et les réseaux de la carrière ;

- les filons décamétriques de calcites, en jaune, de la carrière.

Voir aussi les cartes de Cooke (1991), Gommery *et al.* (2016) et Edwards et al., (2019).



Figure 389 Report des cavités, en rouge, des couloirs.

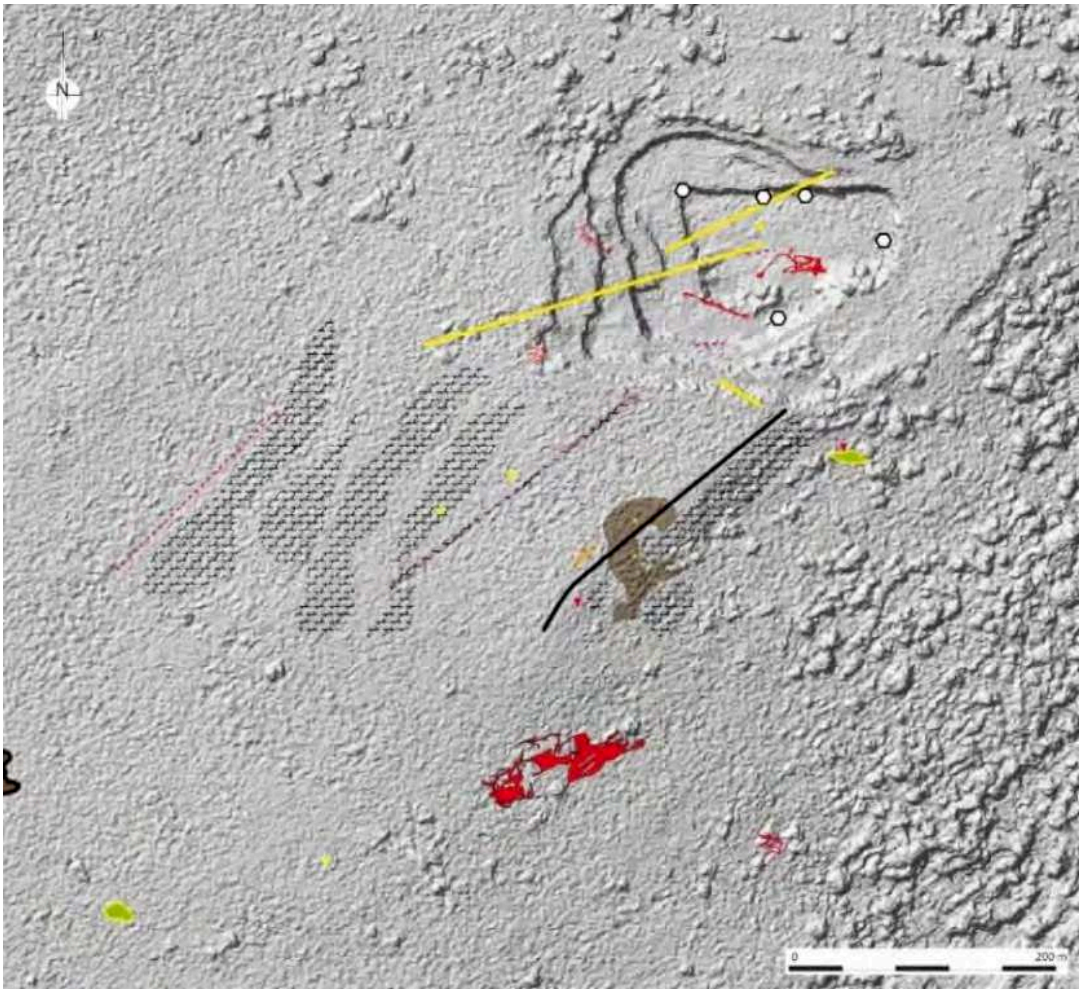


Figure 390 Cartographies succinctes des cavités, en rouge, des couloirs (cercle blancs) et des filons de calcite sur le modèle ombré de la carrière.



3.4.2.3. Du fantôme en surface comme à Minaar's

À 40 m, à l'est de *Trench site MVR2* et d'*Old dump-site MVR1* et à 100 m au sud des grottes de *Minnaar's* n°1 et n°2, on observe des zones fantômisées dans les dolomies, remplies par de la calcite secondaire (Figure 391). Le quadrillage correspond aux fissures conjuguées de la dolomie à faciès de peau d'éléphant.



Figure 391 Fantômes de roche à Minnaar (Position : -26.007070, 27.737283 ; https://maps.app.goo.gl/65oNHP1hXoSPiMYN9).

3.4.2.4. Identifier sur les images satellites des réseaux de couloirs fantômisés en surface des formations carbonatées, indicatrices de réseaux spéléologiques souterrains : exemples des paléokarsts de Malapa

Plusieurs cartographies à différentes échelles ont été réalisées en surface des paléokarsts de Malapa (Dirks *et al.* 2010, Fig.1, p.205 ; Dirks et Berger, 2013, Fig.3, p.114). Ces cartes montrent l'organisation spatiale des roches intrusives, des formations à brèches et des paléokarsts.

> *« Une karstification influencée par des contrôles lithologiques parallèles interagissant des systèmes de fractures transverses d'origines paléoprotérozoïques et par une contrainte d'extension orientées NO-SE à une époque où la surface africaine était encore intacte et la région pas encore soulevée » (Dirks et Berger, 2013).*

On observe des fractures orientées NNE – ESE.

Dirks *et al.* (2010) distinguent des :

- chert fracture vein & stockwork ;
- chert breccia in sandstone matrix.

Par rapport à leur typologie des brèches établie en 2013 (Dirks et Berger, 2013), on peut faire les corrélations suivantes :

- chert fracture vein & stockwork = Brèches de type n°3 ;
- chert breccia in sandstone matrix = Brèches de type n°1.

3.4.2.4.1. ***Carte géologique régionale de Malapa (Dirks et Berger, 2013)***

Sur cette carte géologique (Dirks et Berger, 2013, Fig.3, p.114) la formation de la Rooihoogte est présente au niveau du contact entre les dolomies de Malmani et le groupe de Pretoria puis est aussi trouvé le long de failles (dykes). On repère aussi des lambeaux de la formation Ecca (en rose).

La carte originale de Dirks et Berger (2013, Fig.3, p.114) comporte plusieurs incohérences géomatiques concernant la grille de coordonnées utilisées. Dans l'article, il indique que : « *all grid references are in UTM WGS84* » mais nous ne trouvons aucune correspondance avec les grilles en UTM 34, 35 ou 36 WGS84. Nous avons indiqué l'UTM 35 sur cette carte, ci-dessous (Figure 392).

De plus, les coordonnées fournies dans l'article (p.117) pour les formations Karoo sont fausses (en violet sur la Figure 392) et ne correspondent pas avec ce qui est cartographié sur leur carte (en rouge). Le même décalage est visible. Les cavités (en jaune) ne correspondent pas à l'inventaire des cavités fourni par le *SASA Cave Register* (en rouge). Aucun autre élément de la carte ne semble décalé. Dans leur article, ils utilisent l'inventaire des cavités pour faire des statistiques mais nous avons repéré des erreurs de projection cartographique sur leurs cartes, nous nous posons donc des questions sur la validité de leurs statistiques.

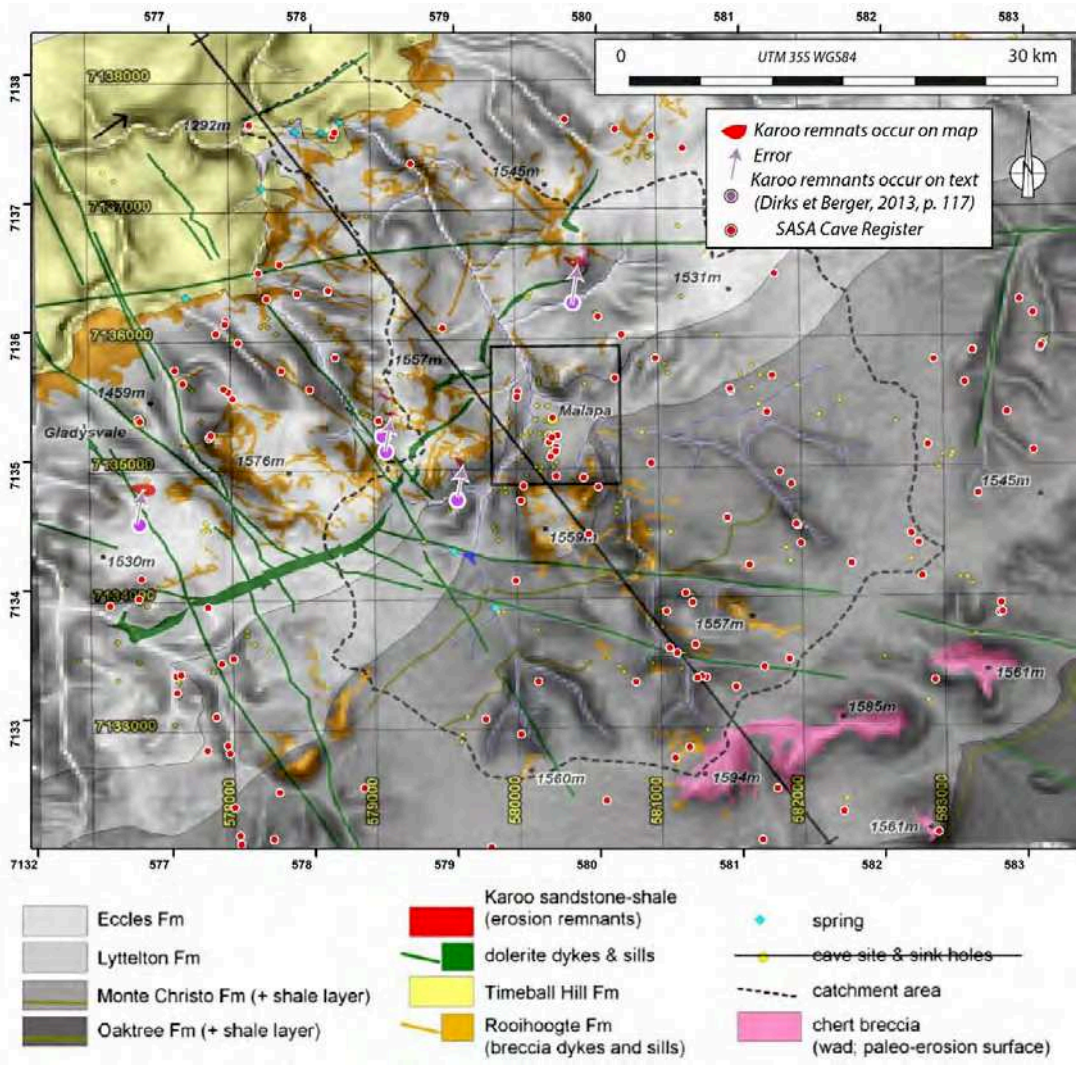


Figure 392 Sur cette carte géologique (Source : Dirks et Berger, 2013, Fig.3, p.114, modifiée) la formation de la Rooihoogte est présente au niveau du contact entre les dolomies de Malmani et le groupe de Pretoria puis est aussi trouvé le long de failles (dykes). On repère aussi des lambeaux de la formation Ecca (en rose).

3.4.2.4.2. Carte géologique de Malapa (Dirks et Berger, 2013)

Comme précédemment, nous ne comprenons pas non plus les coordonnées de cette carte. Elles semblent décalées par rapport à l'UTM 35 S WGS84. De plus, la grille correspond à 550 m en X et 480 m en Y, ce qui n'est pas logique. Toutefois la carte est correcte car nous l'avons géoréférencée en utilisant les talwegs. Nous avons rajouté l'inventaire des cavités du *SASA Cave Register*, en rouge.

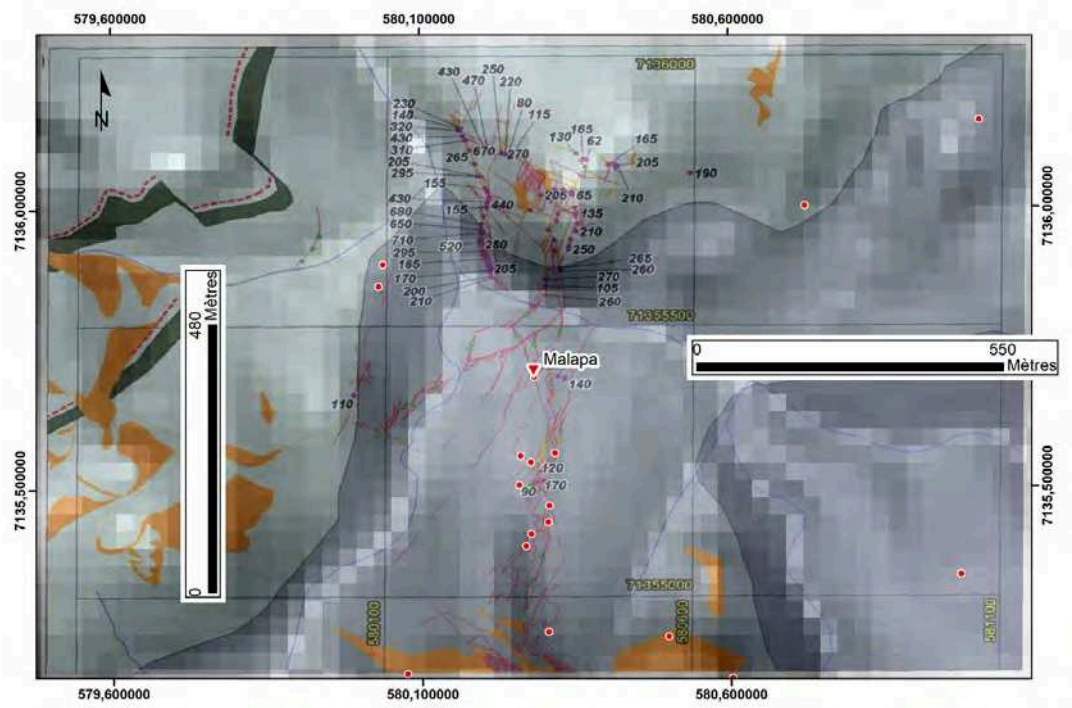


Figure 393 Localisé dans le même secteur que celle de (Source : Dirks et Berger, 2013, Fig.5, p.116). La position de cette carte est indiquée par le rectangle noir sur la carte précédente. La légende est identique à celle de la figure précédente.

3.4.2.4.3. Carte des réseaux de paléokarsts de Malapa (Dirks et al. 2010)

Nous avons reporté sur l'image satellite les éléments cartographiés par Dirks et al. (2010). Ces éléments qui ont certainement un lien avec la karstification et la présence d'un karst fossilifère est encore à déterminer.

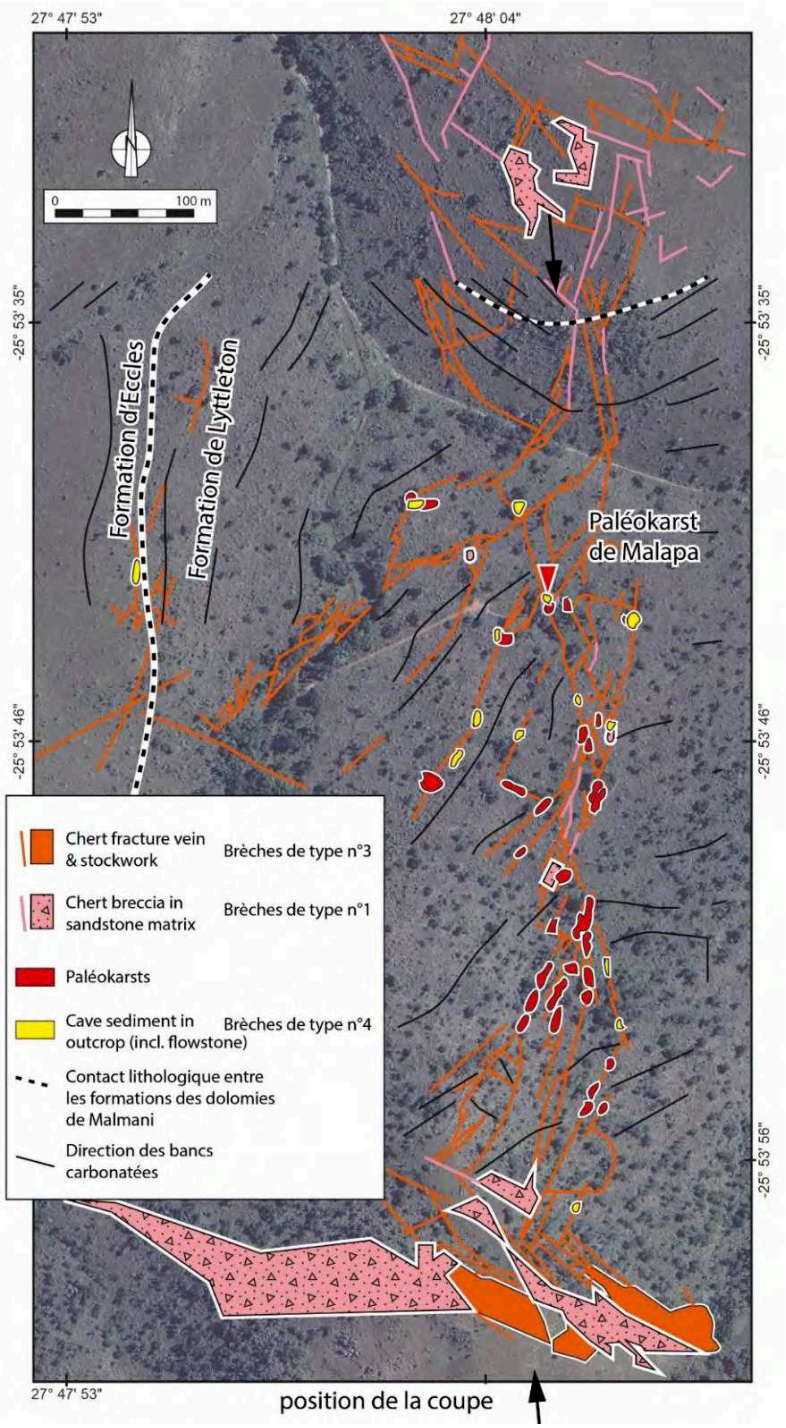


Figure 394 Cartographie en surface du paléokarst de Malapa par Dirks et al. (2010, Fig.1, p.205, modifié). La position de la coupe N-S de la Figure 189 (p.258) est indiquée par les flèches.

3.4.2.4.4. Cartographie du réseau de fractures à l'ouest de Malapa en lien avec la karstification.

Le retrait de la couverture sédimentaire (principalement des altérites, délimitée par le contour en orange) par érosion régressive et la mise en place des vallées (en blanc) met en surface un réseau de fractures, organisées en couloir, en rouge sur la figure suivante, provenant de la fantômisation des carbonates. Nous montrerons qu'il y a une analogie entre la géométrie des couloirs fantômisés, visibles ici en surface et les réseaux karstiques des cavités du *Cradle of Humankind* (cf. Figure 1192 p.1219 ; Figure 1200 p.1227 ; Figure 1201 p.1227 ; Figure 1203 p.1229).

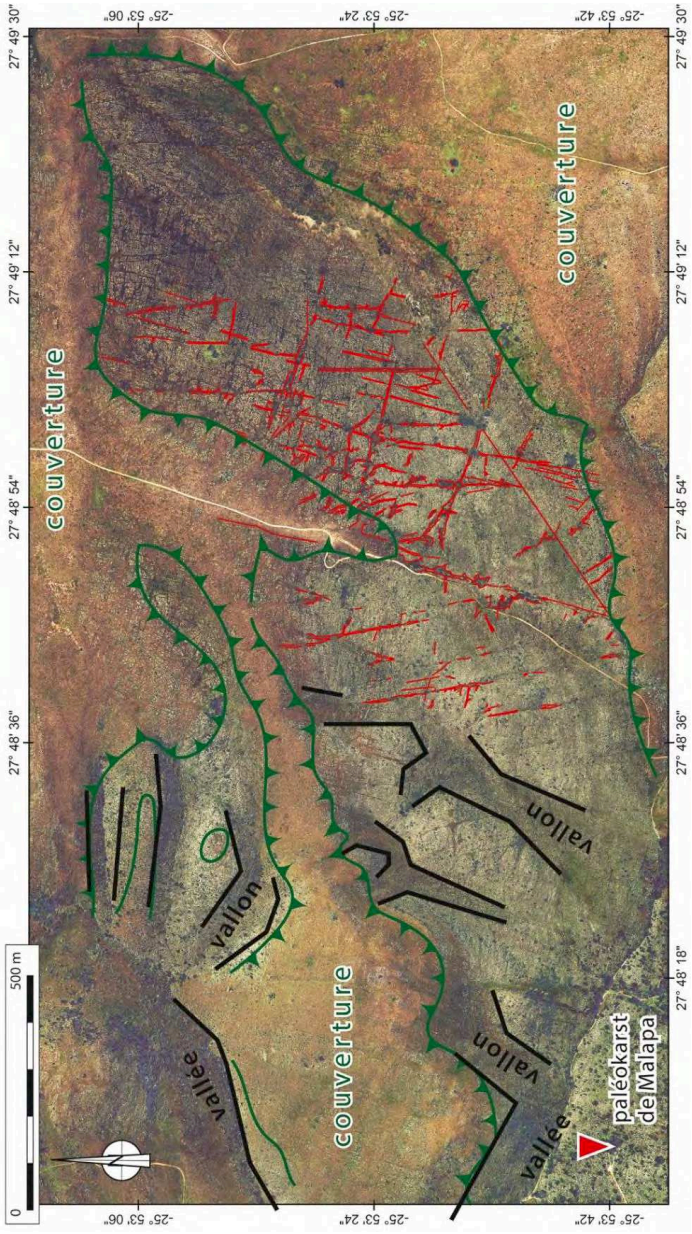
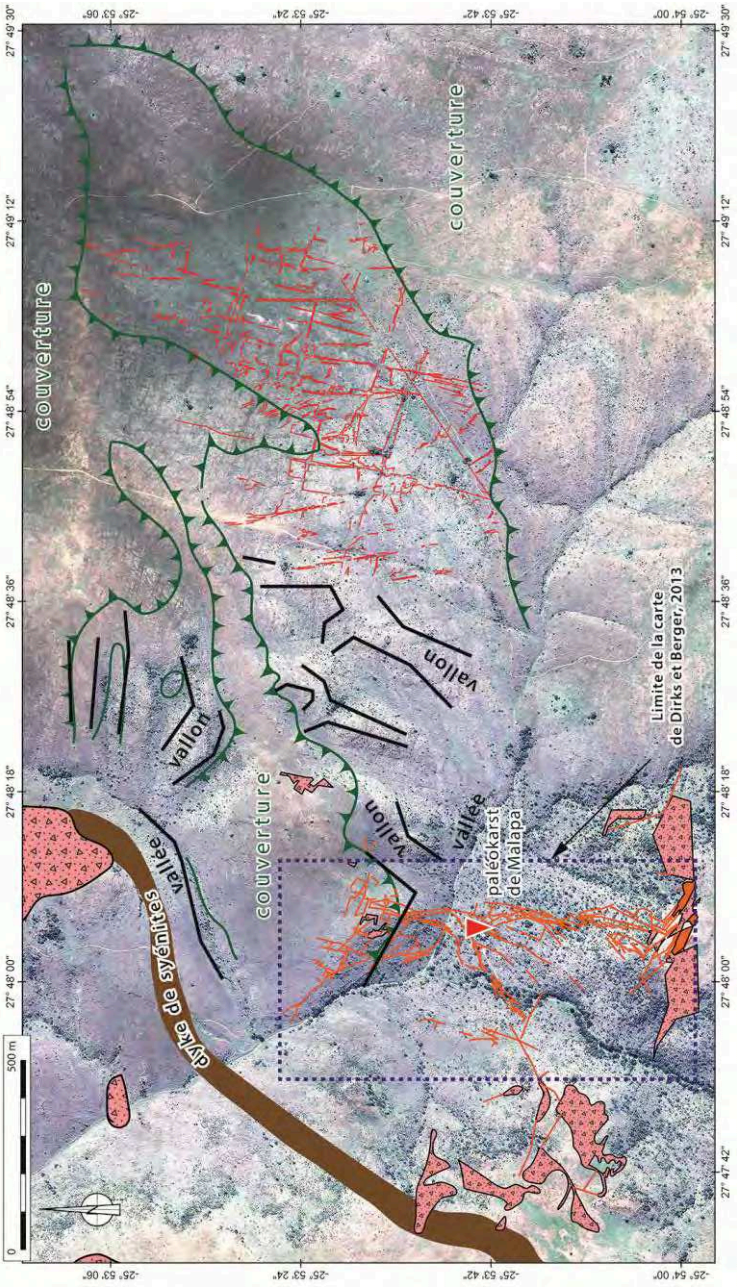


Figure 395 Le retrait de la couverture sédimentaire met à l'affleurement un réseau de fractures, organisées en couloir et cartographié sommairement en rouge.

3.4.2.4.5. Cartographie des analogies de formes entre les couloirs fantômisés et les paléokarsts fossilifères de Malapa et les vallons

Analogie entre les paléokarsts de Malapa, plus précisément les « *chert fracture vein & stockwork* », en orange (Dirks *et al.* 2010, Fig.1, p.205, Figure 394, Dirks et Berger, 2013, Fig.5, p.116) et les couloirs de fantômisation, en rouge, mis à l'affleurement par suite du retrait des couvertures sédimentaires, dont les limites sont en vert.



Le cadre en pointillé correspond à la carte précédente (Figure 394 p.436).

Figure 396 Analogie entre les paléokarsts de Malapa, plus précisément les « chert fracture vein & stockwork », en orange et les couloirs de fantômisation, en rouge

3.4.3. Schémas de la fantômisation, du creusement des vallées et de la fossilisation

Nous venons de voir comment les altérites dans les dolomies étaient évacuées par la nappe phréatique en créant les premiers cavernements. Nous allons examiner maintenant comment (1) s'incise la surface topographique et comment (2) le réseau hydrographique érode les couvertures superficielles et les altérites pour atteindre le toit des dolomies. Ainsi, nous verrons comment le fantôme est débourré par le haut et par le bas et les conséquences que cela va avoir pour piéger les fossiles. La mise en place d'un réseau hydrographique va éroder la couverture, atteindre le toit des dolomies altérées (Figure 398) tout en creusant une vallée.

Dans la vallée de la Bloubank, les fluctuations du niveau d'eau sont faibles et le lit de la rivière n'est pas profond. Les variations du niveau d'eau liées à la mise en charge soutirent et évacuent les altérites vers le bas (Figure 399) entraînant l'écroulement gravitaire du fantôme et créant ainsi les premiers cavernements.

Ce phénomène d'évacuation du fantôme, lié à l'abaissement de la surface topographique par érosion peut amener la cavité à s'ouvrir en surface (Figure 400). Dans la grotte, en contre-bas de cette ouverture, le fantôme de dolomie et les produits inaltérables et insolubles s'accumulent par gravité pour former un talus. C'est le membre 1 observé au droit de l'aven de la grotte de Sterkfontein (Figure 404) (Bruxelles, 2019). Cette ouverture vers l'extérieur permet alors aux sédiments, et aux organismes vivants, circulant en surface, de pénétrer dans la cavité (Figure 401), c'est le membre 2 de Sterkfontein (Figure 404) (Bruxelles, 2019). Si l'érosion continue, la cavité précédente est tronquée par la surface d'érosion. La cavité devient un paléokarst. Le remplissage peut subir une induration (pédogenèse ?) et il n'est pas érodé. La nappe phréatique continue d'éroder les altérites et crée un nouvel aven (Figure 402) par lequel entre de nouveau dans la grotte du sédiment venant de la surface (en théorie, une surface plus récente que la précédente) **(Figure 403)**, c'est le membre 3 de la grotte de Sterkfontein (Figure 404) (Bruxelles, 2019).

En résumé, nous ne sommes pas face à un phénomène karstique où l'eau de pluie vient creuser une cavité du haut vers le bas. Les premiers cavernements se font par fantômisation, par crypto-karstification sous couverture sédimentaire et non à l'air libre. On considère d'ailleurs que la fantômisation se fait dans un sédiment imbibé d'eau.

Plus exactement, dans certaines conditions, dans un temps T1, les carbonates sont altérés à l'intérieur de la masse de la formation, peut-être à la faveur de désordres créés par la tectonique. C'est la fantômisation proprement dite. À ce moment-là, il n'y a pas de cavernement, pas de vides créés. Le cavernement commence, dans un temps T2, lorsque la remontée de la nappe, liée à la mise en place des réseaux hydrographiques, provoque l'évacuation par le bas d'une partie des carbonates rendus meubles par la fantômisation (= en raccourci "le fantôme"). Ensuite, sous l'effet de la gravité, l'édifice sus-jacent au premier vide créé, s'effondre sur lui-même entraînant la "solifluxion" de la partie meuble (le fantôme donc) et la rupture mécanique de la structure formée par les bancs de silice. Le renouvellement de ce phénomène en chaîne permet au cavernement d'atteindre, dans un temps T3, la surface topographique d'autant plus rapidement que celle-ci est abaissée par la mise en place du réseau hydrographique.

Ici, l'évolution de la vallée de la Bloubank et les fluctuations du niveau de circulation de l'eau (niveau de base) ont été très faibles. Plusieurs niveaux archéologiques successifs ont ainsi pu s'accumuler dans les grottes qui s'étendent de -3.6 Ma, à aujourd'hui. Le pendage est important à prendre en compte, si l'on veut faire des corrélations altitudinales entre les couches archéologiques d'une même grotte ou de grottes différentes.

De plus, conjointement aux phénomènes de creusement et de remplissage de la cavité, de la calcite météoritique vient combler les vides, entre les couches ou dans les couches. Une mauvaise lecture stratigraphique de la position de cette calcite peut entraîner une erreur dans la datation de la couche archéologique. La calcite ne vient pas nécessairement napper le toit d'une couche archéologique elle peut venir s'infiltrer à l'intérieur de cette même couche. C'est ainsi que l'on a donné un âge trop jeune à *Little Foot* (**Pickering et Kramers (2010)** *in* Bruxelles, 2019, p.58) avant que de nouvelles études stratigraphiques viennent corriger l'erreur (Granger *et al.,* 2015).

Maintenant, notre prochaine étape sera de rechercher des mécanismes similaires (fantômisation et crypto-karstification) dans des vallées carbonatées qui existaient il y a 3 Ma. Pour cela nous allons (1) rechercher où sont les carbonates, puis (2) voir s'ils sont karstifiés et, (3) identifier à quelles gammes d'altitudes correspondent ces 3 Ma. Les schémas suivants (Figure 397 à Figure 403) montrent l'évolution du creusement de la vallée de la Bloubank et la karstogenèse des réseaux karstiques qui piègent les sédiments.

3.4.3.1. Étape 1

La coupe synthétique suivante (Figure 397) montre la vallée de la Bloubank, où les dolomies sont fantômisées (gris foncé) et recouvertes par une couverture sédimentaire (orange).

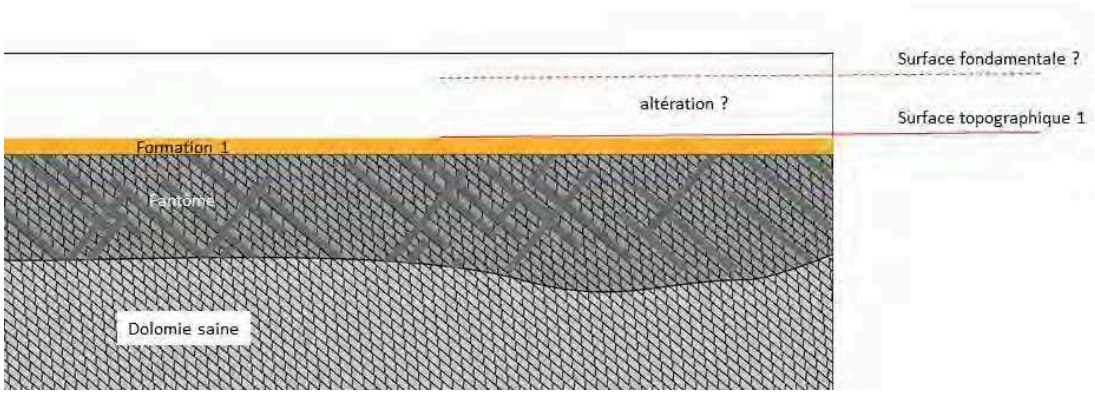


Figure 397 Étape 1.

1.1.1. *Étape 2*

Une rivière érode la couverture et les dolomies.

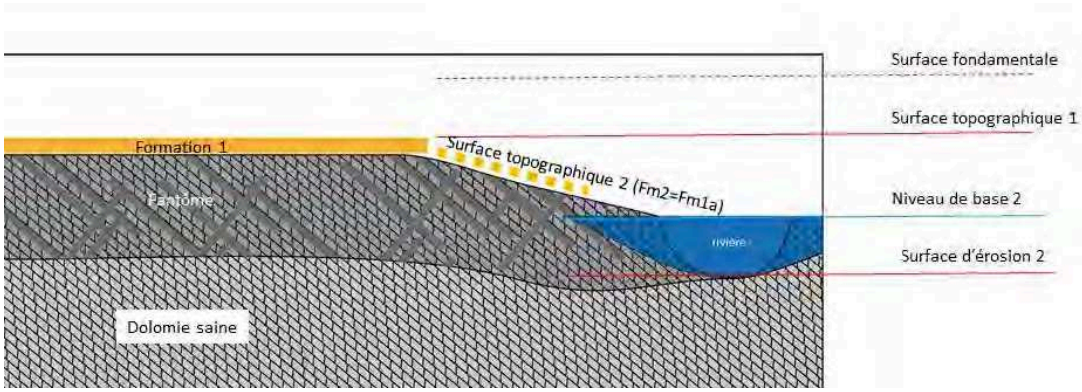


Figure 398 Étape 2.

3.4.3.2. Étape 3

La rivière connaît des fluctuations du niveau d'eau qui agrandissent le cavernement en évacuant les altérites.

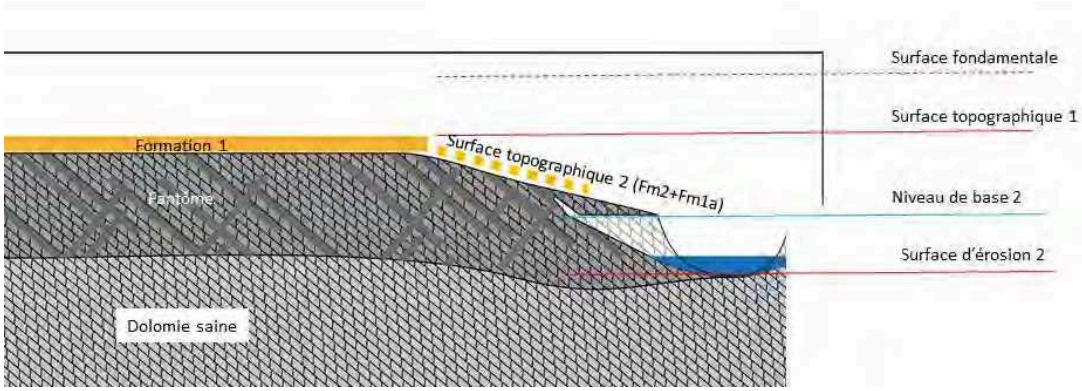


Figure 399 Étape 3.

3.4.3.3. Étape 4

Le fantôme est sapé depuis le bas, puis finit par s'effondrer par gravité en provoquant l'ouverture du cavernement en surface. Un talus se forme en bas de l'aven (indiqué en noir).

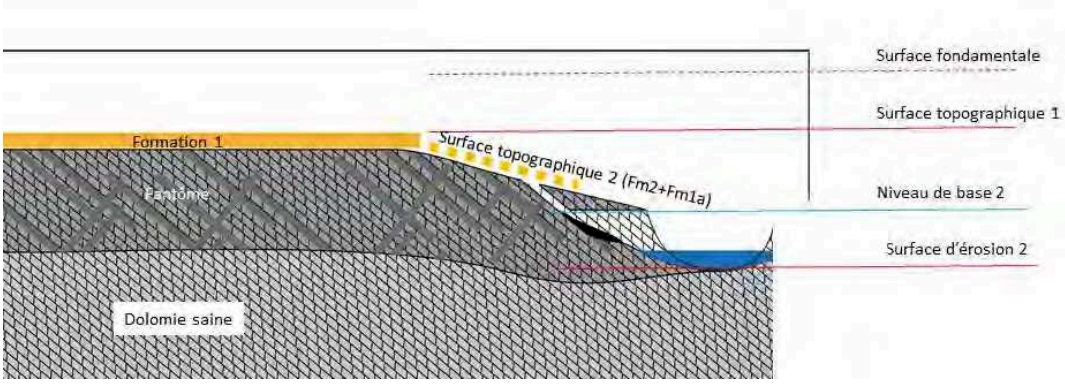


Figure 400 Étape 4.

3.4.3.4. Étape 5

Des sédiments et des fossiles de la surface viennent combler la cavité par gravité (indiqués en orange).

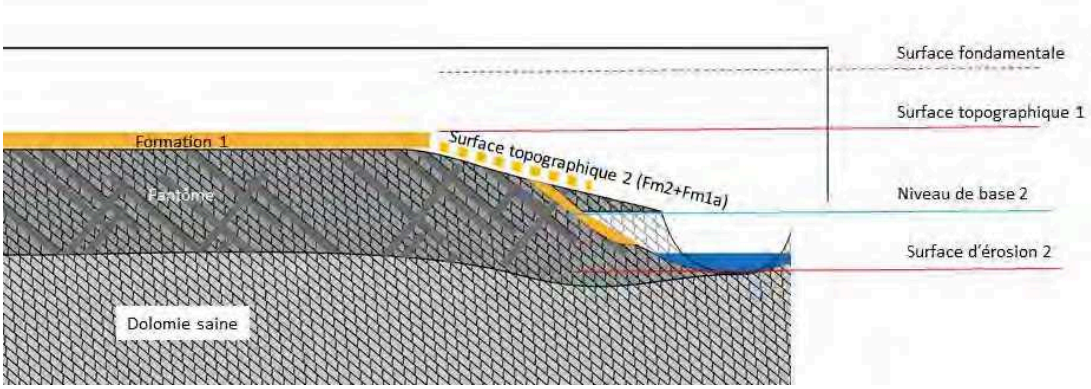


Figure 401 Étape 5.

3.4.3.5. Étape 6

La surface topographique vient tronquer la cavité précédente qui, ne fonctionnant plus, devient un paléokarst et un nouveau cavernement se produit par suite des fluctuations du niveau d'eau (niveau de base) par le même mécanisme que précédemment.

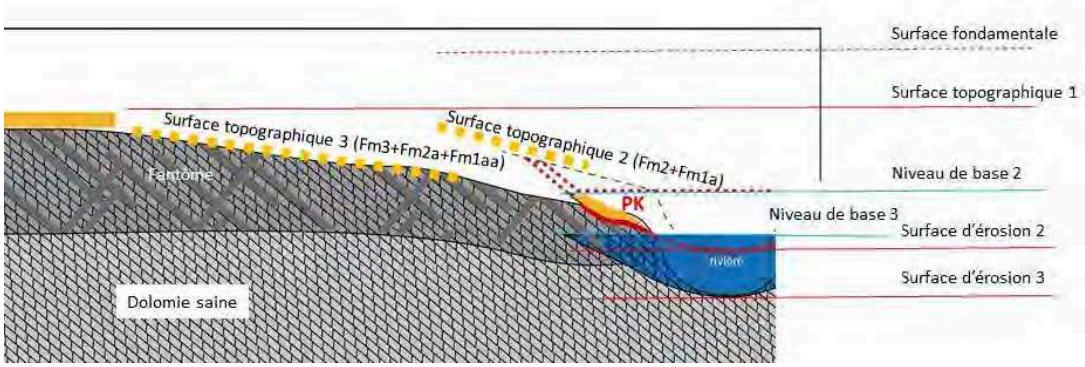


Figure 402 Étape 6.

3.4.3.6. Étape 7

Ainsi, plusieurs niveaux sédimentaires et paléontologiques se rencontrent dans les paléokarsts et cavités actuelles de la Bloubank. Le pendage est important à prendre en compte, si l'on veut faire des corrélations altitudinales entre les couches archéologiques.

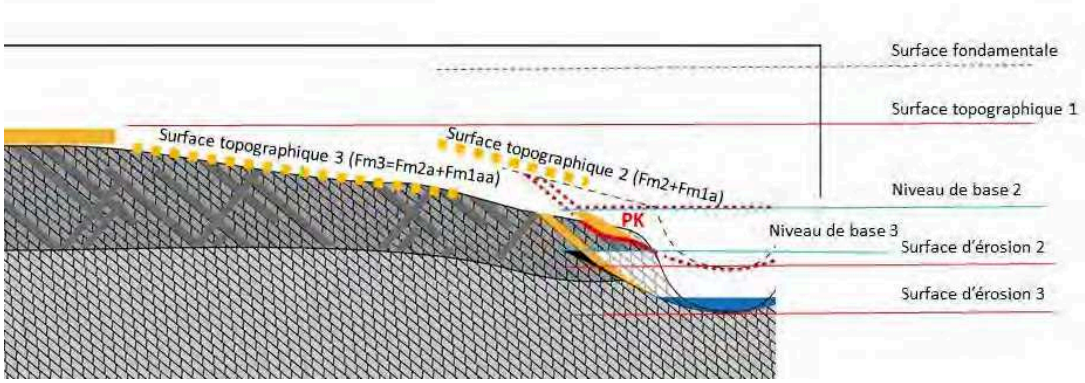


Figure 403 Étape 7.

3.4.3.7. Application dans la grotte de Sterkfontein.

La coupe stratigraphique de la grotte de Sterkfontein ci-dessous (Figure 404), réalisée par Bruxelles (2019), établit clairement le lien entre le dépôt des membres 1, 2 à 3 et l'ouverture de la cavité sur l'extérieur, comme nous venons de l'expliquer avec les schémas précédents.

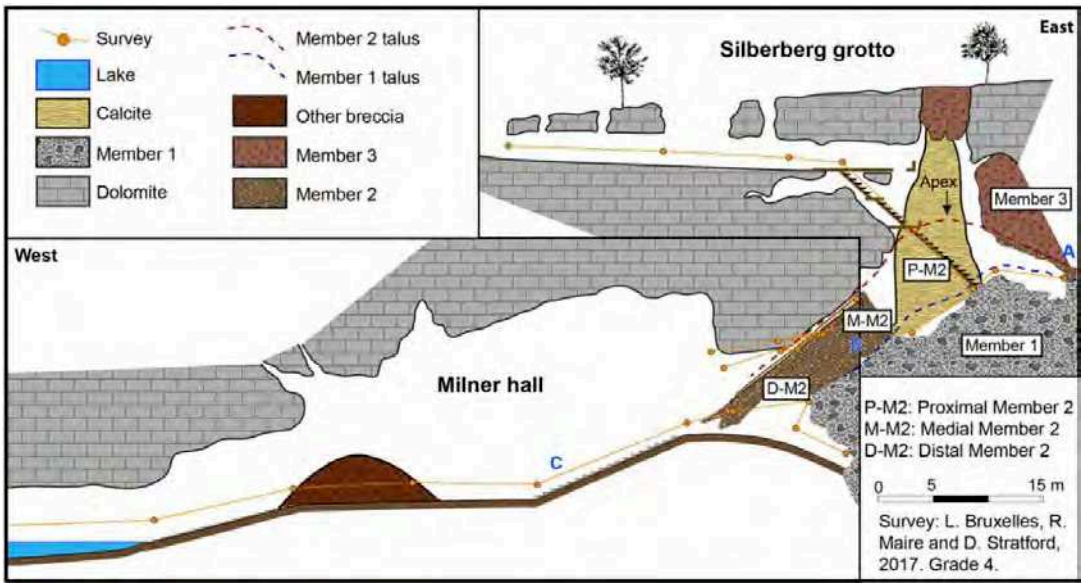


Figure 404 Coupe stratigraphique de la grotte de Sterkfontein (Source : Bruxelles, 2019, Fig. 41, p.72).

3.4.4. Rôle de *knickpoint* du relief de Swartkop qui a ralenti l'érosion régressive de la vallée de la Bloubank en amont du relief et permis de préserver des paysages anciens

Nous verrons que le relief de Swartkop, qui est traversé par la Bloubank en formant un profond canyon de 250 m d'incision (de 1626 à 1380 m), a entraîné des conséquences importantes sur l'évolution des paysages en amont du Swartkop et sur l'érosion régressive de la rivière Bloubank sur les dolomies de Malmani et sur leurs karstifications.



Figure 405 Détail du panorama de la Figure 350 (p.399) précédent montrant les différentes formes du paysage selon qu'affleurent les roches de Ventersdorp, les dolomies de Malmani ou les quartzites de Witwatersrand (Swartkop). Dans les dolomies, le paysage karstique est caractérisé par des vallées d'où émergent des buttes karstiques (Kromdraai). On distingue aussi les reliefs en roche dure qui émergent des carbonates. Ce sont les quartzites du Mont Swartkop et des chaînes de Magaliesberg et du Witwatersberg en arrière-plan.

3.4.4.1. Mise en évidence du knickpoint sur un profil topographique le long de la rivière Bloubank

L'eau météoritique qui tombe sur le plateau dolomitique du *Central Rand* et sur le relief de Krugersdorp (cf. WRC, 2010 ; Hobbs, 2011) circule à travers le karst. Le lac souterrain, au fond de la grotte de Sterkfontein est situé à 1437 m d'altitude (Hobbs *et al.*, 2022, p.188). Son niveau peut varier de quelques décimètres (Hobbs, 2011, p.117). La Bloubank coule aussi à 1450 m dans la vallée sous la grotte de Sterkfontein, puis à 1380 m dans les gorges du relief de Swartkop, enfin le lac de barrage d'Hartbeespoortdam à 1165 m indiquent la position du niveau de base actuel. Le cycle de l'eau que nous venons de décrire est illustré sur le profil topographique suivant (Figure 406) où une exagération verticale est nécessaire pour distinguer les formes karstiques de ce paysage relativement plat (Figure 407). Nous pouvons nous demander comment les filons de roche volcanique impactent le cycle de l'eau en compartimentant le réservoir carbonaté, ce qui a dû avoir une incidence dans le passé sur l'évacuation du fantôme et sur les remplissages fossilifères.

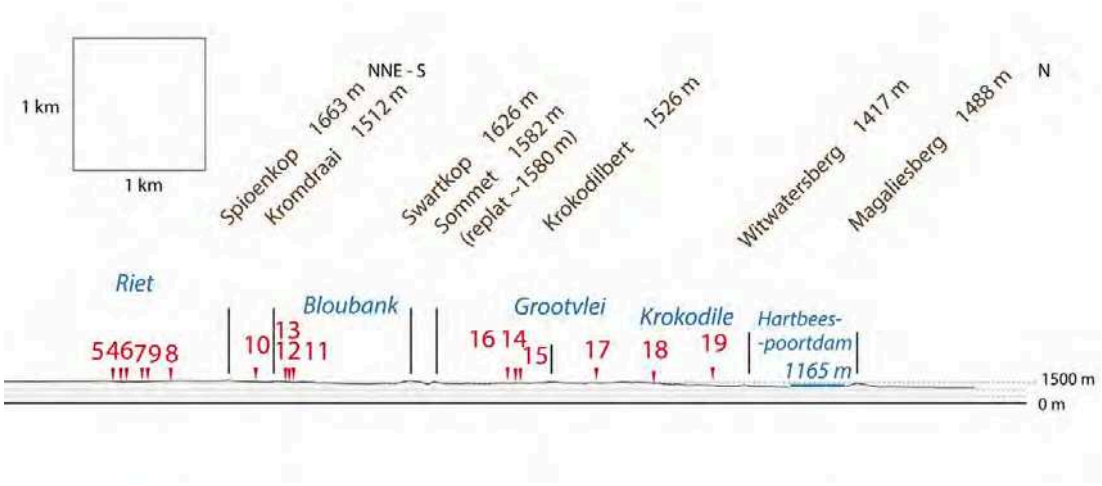


Figure 406 Profil topographique, non exagéré, de la Bloubank dans le Cradle of Humankind qui montre le faible contraste d'altitude, caractéristique des plateaux carbonatés.

Ce profil topographique ci-dessous (Figure 407), exagéré verticalement (x10), du *Cradle of Humankind* met en évidence l'importance du relief de Swartkop à 1626 m d'altitude. Le lac souterrain dans Sterkfontein, situé à 1437 m (Hobbs *et al.*, 2022, p.188) et l'altitude du lac d'*Hartbeespoortdam* à 1165 m indique la position du niveau de base actuel. Ce profil est localisé sur la Figure 348 p.394, il correspond à l'extrémité nord de la coupe géologique de la Figure 349 (p.395).

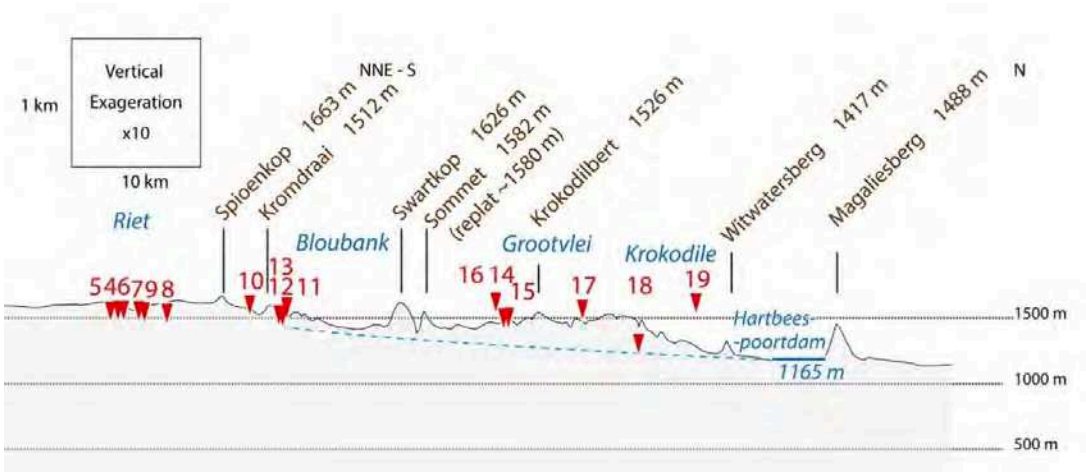


Figure 407 Profil topographique à travers le CoH (exagéré verticalement dix fois).

3.4.4.2. Incision des quartzites du relief de Swartkop et érosion régressive de la rivière Bloubank en amont

Le profil topographique précédent, complété avec les données géologiques, montre que la Bloubank circule sur les quartzites de Ventersdorp et le granite archéen de Johannesburg et qu'elle a incisé le relief de Swartkop. On repère les crêts formés par les quartzites de Pretoria (quartzites de Daaspoort pour le Witwatersrand et quartzites de Magaliesberg pour le Magaliesberg) qui ont influencé la circulation des rivières orthoclinales.

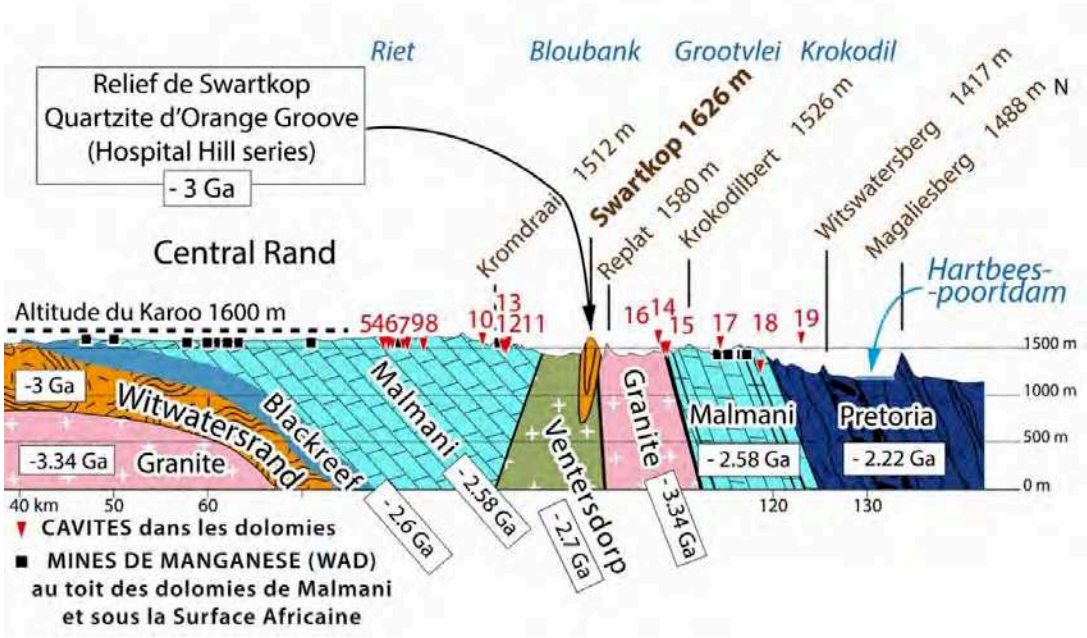


Figure 408 Cette coupe géologique est un détail de la coupe géologique plus grande de la Figure 349 (p.395), où est indiquée la légende et le numéro des cavités.

3.4.4.3. Panorama du knickpoint

Avant de creuser, par érosion régressive, la vallée de la Bloubank en amont du relief de Swartkop, la rivière a dû inciser un canyon à travers les quartzites du Swartkop. Cette barrière naturelle forme aujourd'hui un relief à 1626 m (Swartkop en rive droite) et à 1568 et 1582 m en rive gauche. La Bloubank coule aujourd'hui au fond de ce canyon à 1380 m d'altitude (Figure 410). Soit un canyon de plus de 250 m d'incision.



Figure 409 Panorama depuis Wondercave en direction du relief de Swartkop et de la chaîne en quartzites de Witwatersrand. La position de ce panorama est indiquée en rouge sur la Figure 411.



Figure 410 Analyse des surfaces et de formations géologiques du panorama depuis Wonder cave. Au premier plan, les dolomies forment une surface plane à 1500 m d'altitude.

Nous remarquons que la rivière de la Bloubank incise les quartzites du Swartkop avant la confluence avec la Krokodil. Ce relief en quartzites a joué le rôle de verrou à l'érosion régressive sur les dolomies en amont du Swartkop de la Bloubank (Bruxelles, 2019, p.26).

Le Swartkop, en quartzites de la formation d'Orange Groove (*Hospital Hill Series*, -3000 à -2710 Ma), nous le verrons, a joué un rôle important dans l'immunité de la vallée de la Bloubank face à l'érosion (Bruxelles, 2019) et dans sa préservation (Figure 350, Figure 406, Figure 407).

La lithologie, plus exactement la dureté des couches géologiques que les fleuves et les rivières incisent sur leur parcours, contrôle l'incision, le niveau de base et par conséquent la karstification. Il faut donc prendre en compte les étapes d'incision du fleuve Limpopo, puis de la rivière Krokodil et enfin de la Bloubank, avant d'étudier la karstification des faibles reliefs résiduels carbonatés de Sterkfontein, Swartkrans, Kromdraai, etc.).

Avant que les nappes phréatiques contrôlées par le niveau de base de la Bloubank évacuent le fantôme de dolomies par mise en charge de l'aquifère, il faut considérer que la Bloubank a dû suffisamment éroder le massif de Swartkop (quartzite dur) au moins jusqu'à l'altitude de **1530 m** (altitude du niveau de base actuel de la Bloubank donné par le niveau de lac actuel dans la grotte de Sterkfontein) ou jusqu'à la plus grande profondeur d'une grotte connue du CoH, comme par exemple Bolt's cave à **1447 m** d'altitude, et il faut aussi prendre en compte qu'ultérieurement il a fallu éroder les massifs rencontrés par la rivière Krokodil et par le fleuve Limpopo (chutes de Tolo Azime, barrière granitique des derniers contreforts du Zoutpansberg, etc.).

Nous verrons que ces particularités sont à l'origine de la préservation des paysages anciens que nous recherchons. C'est le cas de la région karstique de Vlaakplaats et d'Hoogland au nord-est, en dehors du *Cradle of Humankind* (p.912) mais dans le même cadre géologique que celui-ci. Là, c'est le parcours de la rivière Hennops qui traverse les quartzites de la Witwatersberg par des percées cataclinales (surimposition *vs* antécédence).

L'étude géomorphologique montre que les quartzites, plus résistants à l'érosion, forment des reliefs imposants dans le *CoH*, tels que la Chaîne de Witwatersberg qui culmine à 1600 m d'altitude, la Chaîne de Magaliesberg (replats à 1700 m), le relief de Swartkop (1626 m) et le relief de Krugersdorp (1750 m) alors que les dolomies ont été plus érodées et karstifiées, formant un compartiment à l'altitude plus basse, traversé de vallées situées entre 1400 m à 1600 m d'altitude et dans lesquelles subsistent des buttes karstiques fossilifères (Figure 350 et Figure 405).

3.4.4.4. Cartes topographiques et géologiques du Knickpoint de Swartkop sur la Bloubank

Les cartes suivantes, Figure 411 et Figure 412, montrent le canyon de la rivière Bloubank à travers le massif de Swartkop formant un knickpoint en amont de la confluence de la Bloubank avec la rivière Krokodil. En rouge est indiqué d'où est observé le panorama de la Figure 411. On précise ici que c'est la *Bloubankspruit*, que nous appelons en général Bloubank[11].

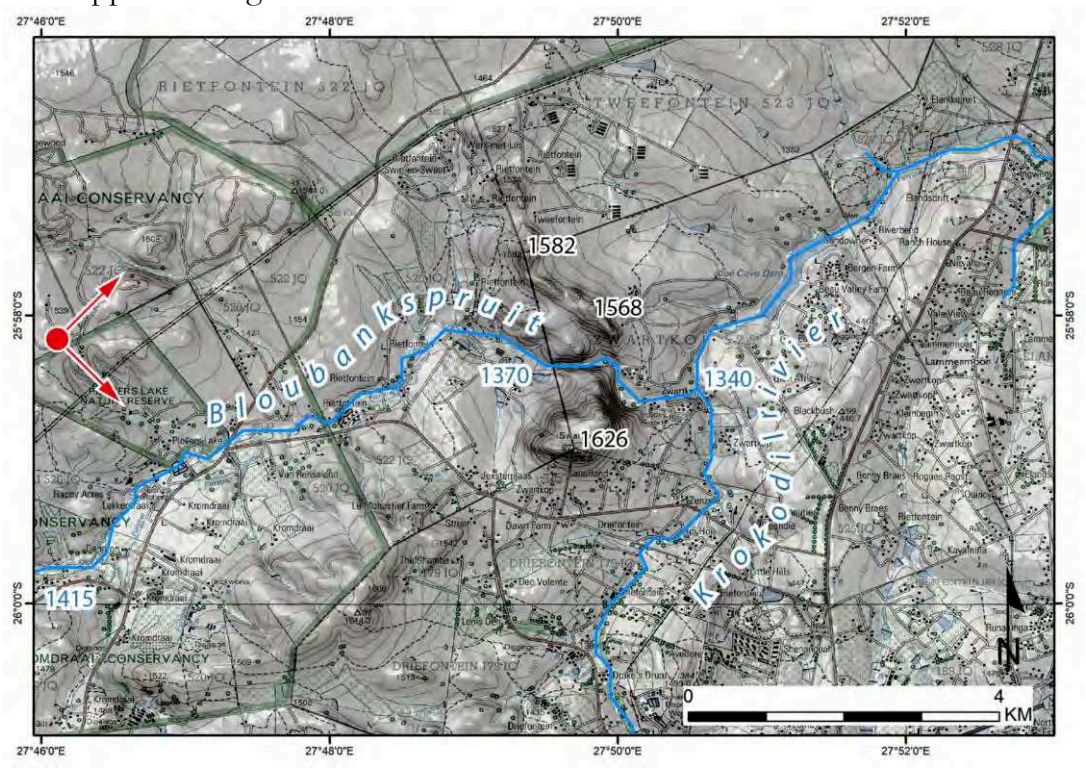


Figure 411 La position du panorama (Figure 409) est indiquée par le point rouge sur la carte topographique (Source : NGI) en relief de Swartkop et de la confluence de la Bloubank et de la Krokodil.

[11] Attention, il existe une autre rivière nommée Bloubank mais qui est un affluent de la *Magaliesrivier* (Figure 340 p.304).

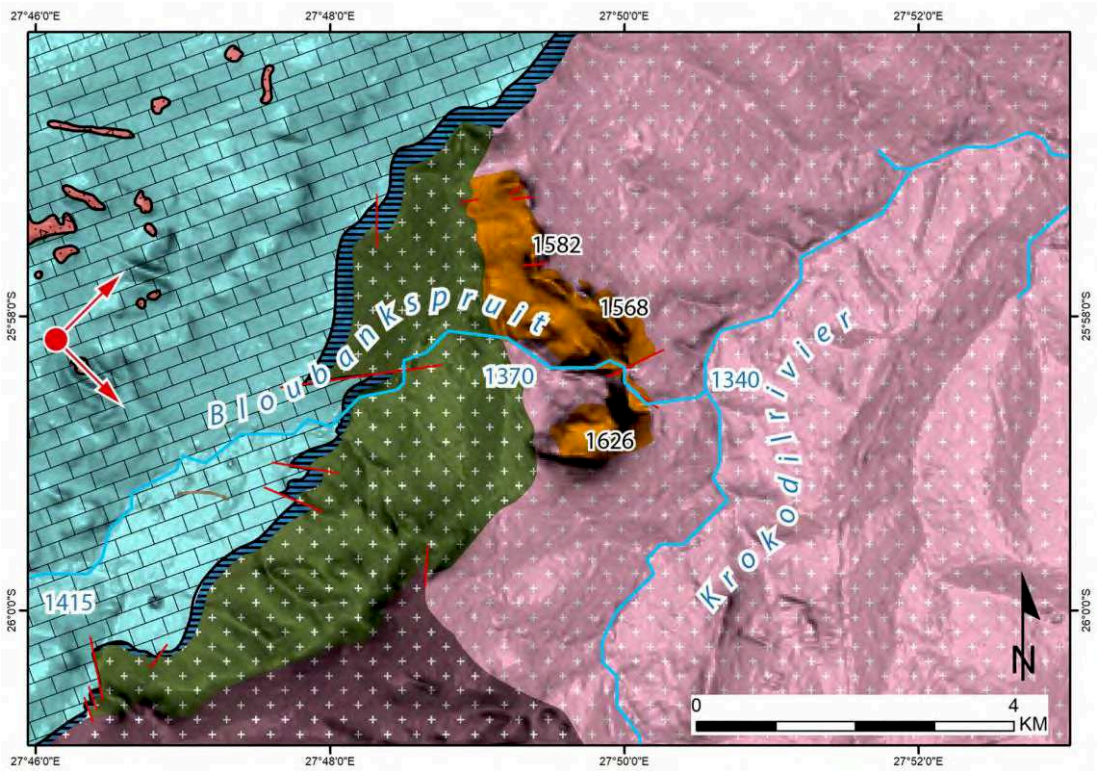


Figure 412 La position du panorama (Figure 409) est indiquée par le point rouge sur la carte géologique de Swartkop et de la confluence de la Bloubank et de la Krokodil. Au-dessous, nous avons indiqué la légende complète de la Figure 340 (p.379).



3.5. SYNTHESE DE L'ANALYSE MORPHOKARSTIQUE DU *CRADLE OF HUMANKIND*

Nous avons indiqué sur la Figure 413 ci-dessous l'extension du *Cradle of Humankind* (en jaune) et les cavités fossilifères à remplissages plio-pléistocènes (en rouge) ainsi que les autres cavités recensées dans l'inventaire du *SASA* (en vert).

La rivière Bloubank coule d'ouest en est. Son amont est situé sur la **Surface Africaine** (définie juste après) à 1560 m d'altitude. Elle traverse les dolomies (délimitée en orange) dans le secteur des cavités de Sterkfontein, Kromdraai, Swartkrans (en rouge) vers 1450 m d'altitude, c'est la **vallée de la Bloubank** que nous avons étudiée. La rivière de la Bloubank rejoint ensuite la rivière *Krokodil*. Celle-ci coule sur les granites de Johannesburg et rejoint le lac de barrage *Haartbespoort* qui correspond au point bas de la région, à 1160 m d'altitude. Nous remarquons qu'il est situé dans les marnes entre les deux reliefs de quartzites du Witwatersberg et du Magaliesberg.

Au Permo-Trias (vers 200 Ma) l'ensemble de la région était recouverte par les formations sédimentaires du Karoo, qui sont conservées aujourd'hui à 1600 m d'altitude. Celles-ci ont été altérées et totalement érodées dans le *CoH*. Par la suite, **la Surface Africaine**, une grande surface d'érosion a ensuite érodé la région à partir du Crétacé, jusqu'à l'altitude de 1560 m, où elle est encore conservée aujourd'hui. Certains reliefs en quartzite, très durs et très anciens émergeaient déjà au-dessus de la Surface Africaine au Crétacé, notamment les reliefs du Witwatersberg, du Magaliesberg et de Krugersdorp.

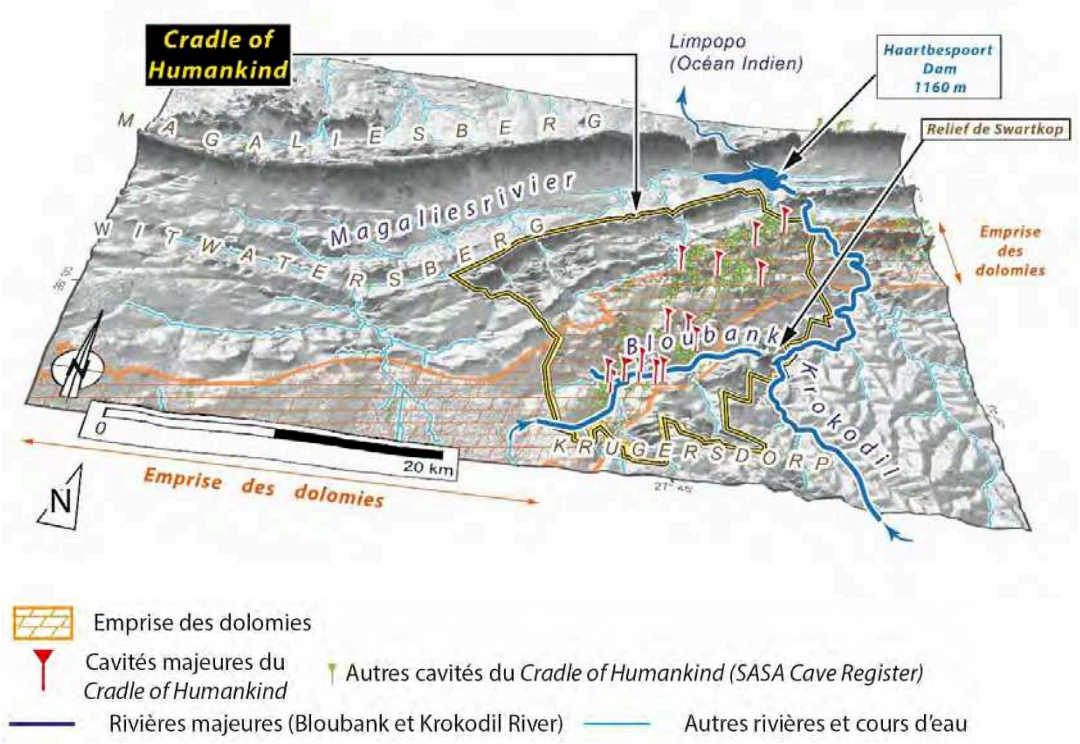


Figure 413 Éléments morphologiques majeurs du paysage du Cradle of Humankind.

Nous avons expliqué que c'est sous la Surface Africaine que les dolomies ont été fantômisées. Lorsque les rivières ont circulé sur la Surface Africaine et l'ont entaillé et érodé les dolomies fantômisées ont été exhumées. Les fantômes de roche, meubles et poreux, ont alors été rapidement évacués par l'eau. Ce phénomène de surface s'accompagne d'un processus interne au réservoir karstique : les mises en charge de l'aquifère provoquent une vidange le fantôme *per ascensum* (comme décrit p.432). L'association de ces deux phénomènes entraîne l'ouverture des premières grottes en surface, qui peuvent alors se combler de sédiments et de fossiles, formant ainsi des brèches qui s'indureront au fur et à mesure que la surface topographique va s'inciser et que des fluides riches en silice vont circuler (pédogenèse, etc.).

Nous allons tenter de reconstituer le déroulement de cette évolution du paysage à travers l'analyse des bassins versants des rivières, et en nous appuyant sur des jalons chronologiques comme les âges des surfaces d'aplanissement, des alluvions, des remplissages karstiques et des concrétions.

3.5.1. La Surface Africaine au Crétacé

À partir du Crétacé, d'après Baby (2017), il s'établit sur la région, ce qu'on appelle la **Surface Africaine** (en orange). C'est une vaste plaine de corrosion, qui pendant plusieurs millions d'années va altérer les substrats et les sols. Lorsque les substrats sont carbonatés comme les dolomies de Malmani, ceux-ci subissent une **fantômisation** (en rouge, sur la Figure 415). Remarquons que des reliefs (en violet) émergent de cette plaine, les longues chaînes de Magaliesberg et du Witwatersberg et la courte chaîne de Swartkop qui va avoir une grande importance lors du creusement de la vallée de la Bloubank.

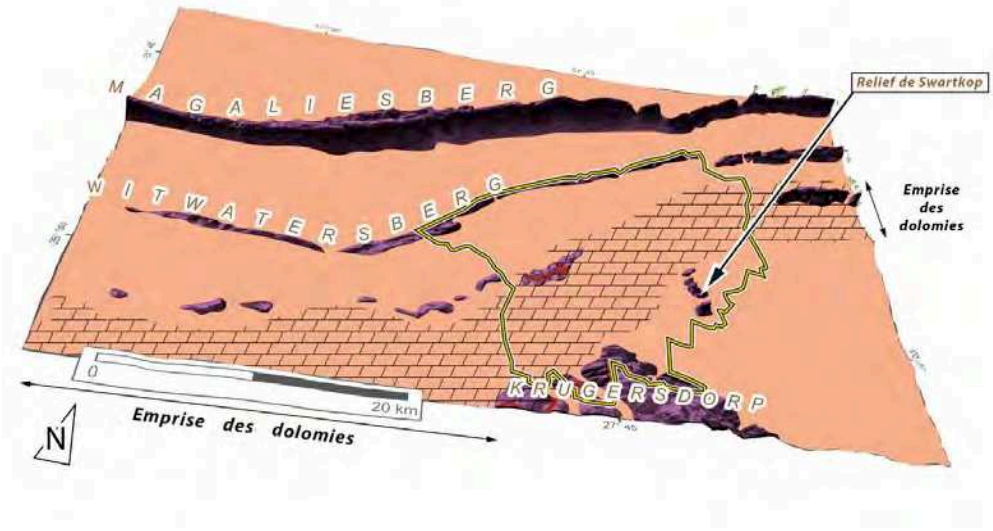


Figure 414 Au Crétacé et établi la Surface Africaine et des reliefs émergent.

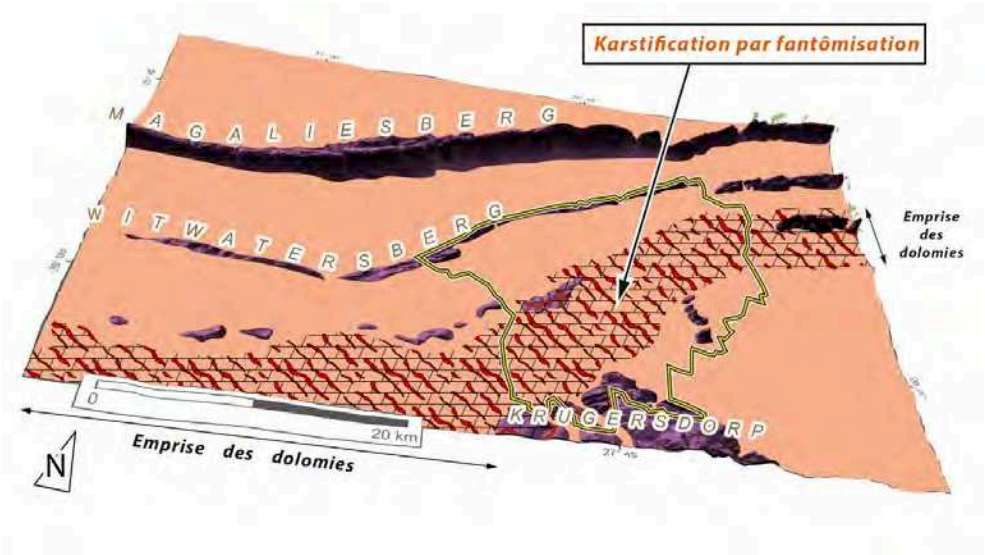


Figure 415 La karstification par fantômisation des dolomies, indiquée par des traits rouges, débute sous la Surface Africaine.

3.5.2. Un axe de drainage commence à s'organiser : la rivière Magalies

Un axe de drainage orthoclinal s'organise sur les marnes et les argiles situées stratigraphiquement entre les crêts en quartzites du Witwatersberg et du Magaliesberg. Elle rejoint le lac de barrage d'*Haartbeespoort à 1160 m d'altitude*, qui est le point bas topographique. Les eaux se dirigent alors vers le Limpopo et l'Océan Indien. Au nord de la chaîne de Magaliesberg, les terrains ont été précédemment érodés.

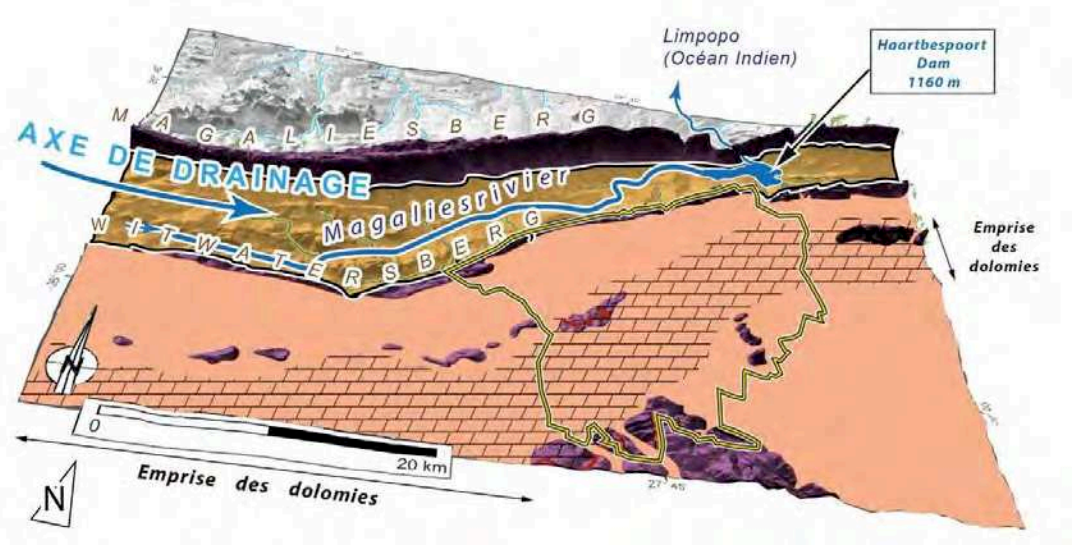


Figure 416 Organisation du drainage de la rivière cataclinale de Magaliesrivier.

3.5.3. La Magalies supérieure érode la Surface Africaine du West Rand et du Central Rand

Au sud, un affluent de la Magaliesberg *(Upper Magaliesberg)*, érode les quartzites du relief du Witwatersberg, au niveau de la percée anaclinale de Seekoelhoek, à 1415 m d'altitude, qui permet une vague d'érosion régressive du bassin en amont (en marron sur la Figure 417) où est située la Surface Africaine, à 1560 m d'altitude, et qui commence à être érodée, exhumant les premiers fantômes de roche en surface.

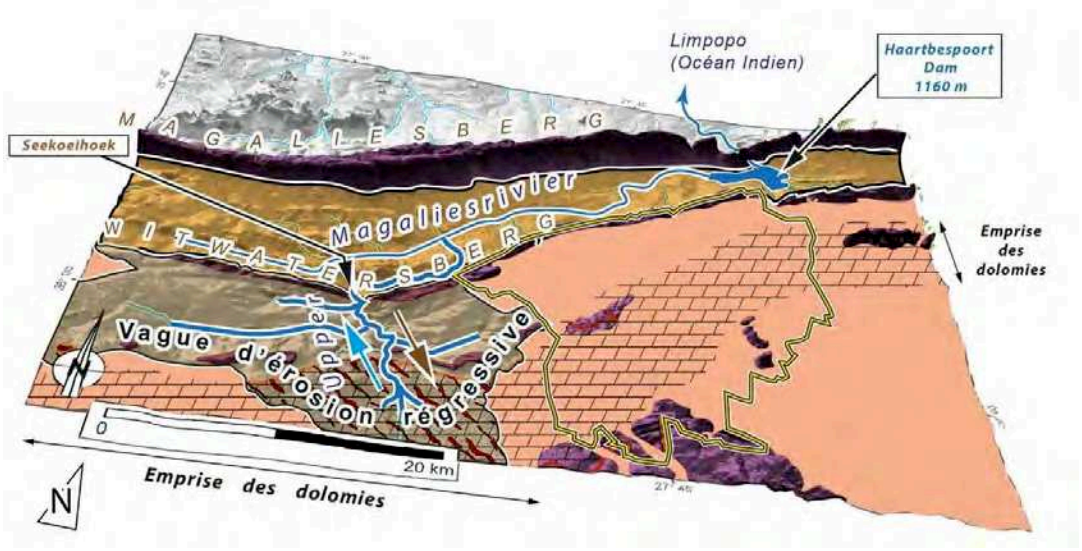


Figure 417 Percées anaclinales et érosion régressive en amont de Seekoeihoek.

3.5.4. La Krokodil érode les granites de Johannesburg

Le creusement du relief du Witwatersberg à 1165 m d'altitude au sud du barrage d'Hartbeespoort va permettre l'érosion des granites par la rivière Krokodil. La grotte de Gondolin a livré des spécimens de *Paranthropus Robustus*, datés de -1.8 Ma (Herries, 2006 ; Herries *et al.*, 2019 ; Adam, 2008) (Adams *et al.*, 2005, 2006, 2007 ; Herries et Adams, 2013). D'après sa localisation géomorphologique la grotte de Motsetse semble s'ouvrir à cette période.

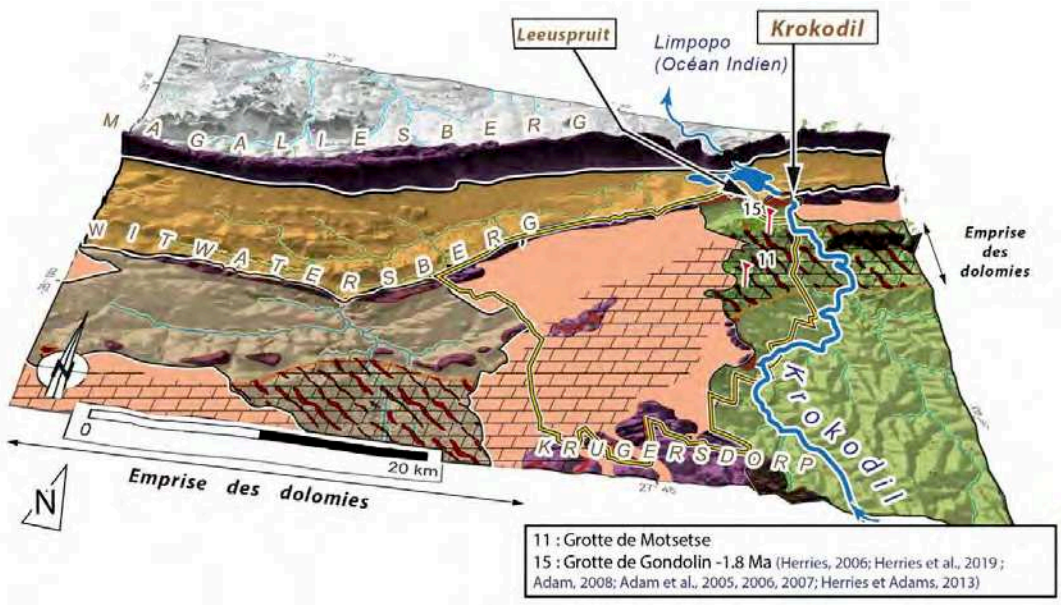


Figure 418 Erosion de la vallée Krokodil sur les granites.

3.5.5. Creusement du poljé de la Bloubank par une vague d'érosion régressive 3.65 Ma

Le creusement des granites par la Krokodil (en vert sur la Figure 420) va permettre à la vallée de la Bloubank, un affluent de la Krokodil (en bleu sur la Figure 420) de s'inciser à son tour. Cependant, un grand relief en quartzite (le Swartkop) forme comme une barrière à travers la vallée que doit lentement creuser la Bloubank pendant qu'en amont, l'érosion régressive érode tout aussi lentement la vallée. Les grottes de Sterkfontein, Kromdraai, Cooper's (en rouge et numéro de 1 à 10) se creusent et accumulent à leur tour des sédiments et des fossiles. Ce seront les premiers jalons chronologiques provenant du karst qui nous permettent de commencer à dater des éléments du paysage du *CoH*. Parmi eux, nous aurons les plus anciens remplissages karstiques fossilifères datés dont Sterkfontein et *Little Foot* à **3.65 Ma** (Granger *et al.*, 2015).

Préalablement, un poljé* (voir définition p.348) s'est développé sur les dolomies au niveau de ce qui deviendra la vallée de la Bloubank (en vert ci-dessous Figure 419). Ce replat s'étendait dans la vallée de la Honingklip (en jaune Figure 421 ci-dessous). Les alluvions de la Honingklip décrites dans l'ancienne carrière de Kromdraai (que nous avons présenté p.354) et datées de **3.55 Ma** (Bruxelles, 2019) donneraient un âge à ce poljé et aux surfaces de la Bloubank.

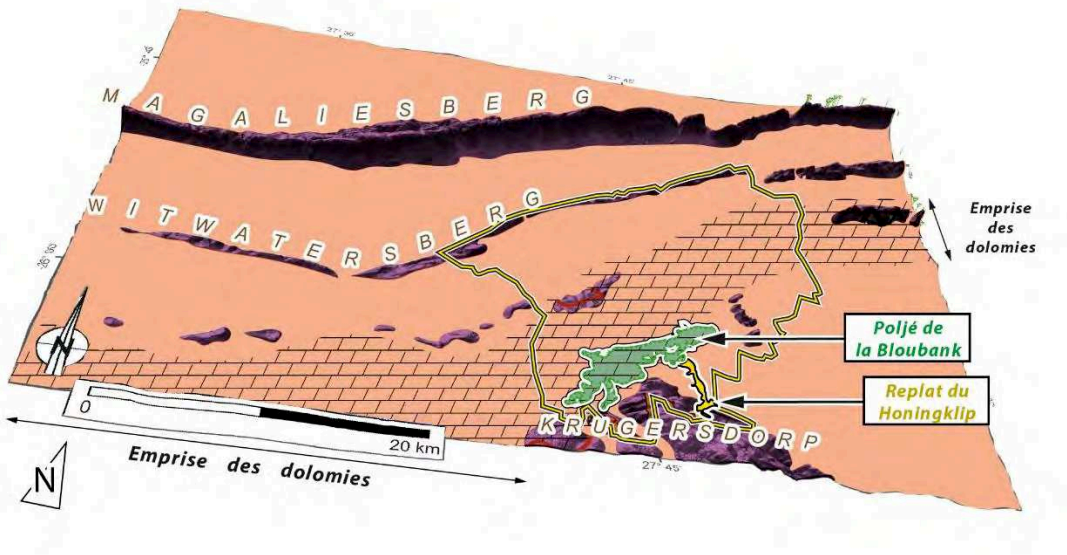


Figure 419 Poljé de la Bloubank.

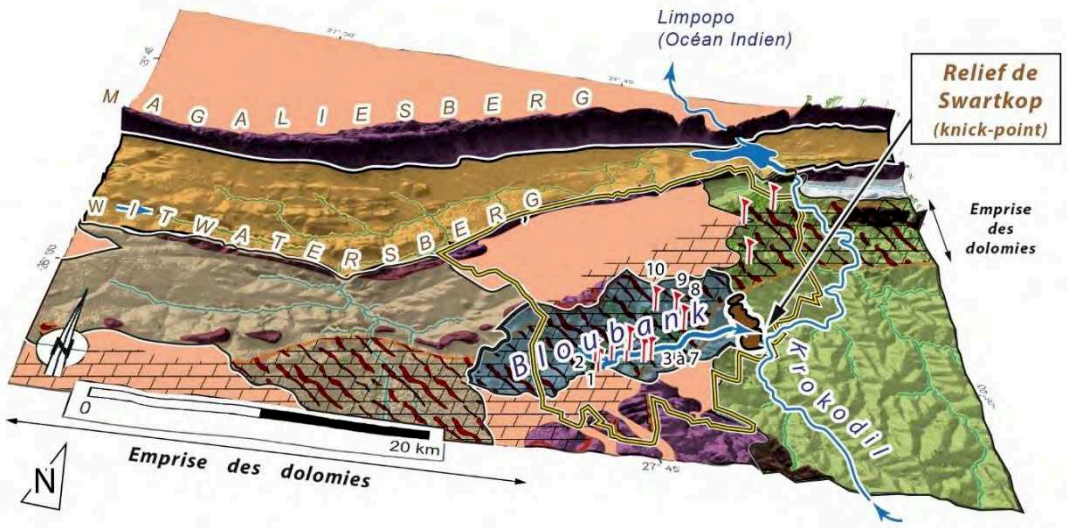


Figure 420 Creusement de la vallée de la Bloubank en amont du knickpoint du Swartkop, au moins à partir de 3.65 Ma (âge des remplissages les plus anciens connus).

3.5.6. Honingklip 3.55 Ma

Le bassin versant du Honingklip, en jaune sur la Figure 421, se développe sur les roches mafiques de l'Archéen et sur le relief de Krugersdorp où il y a une grande cascade de 20 m, visible dans le jardin botanique.

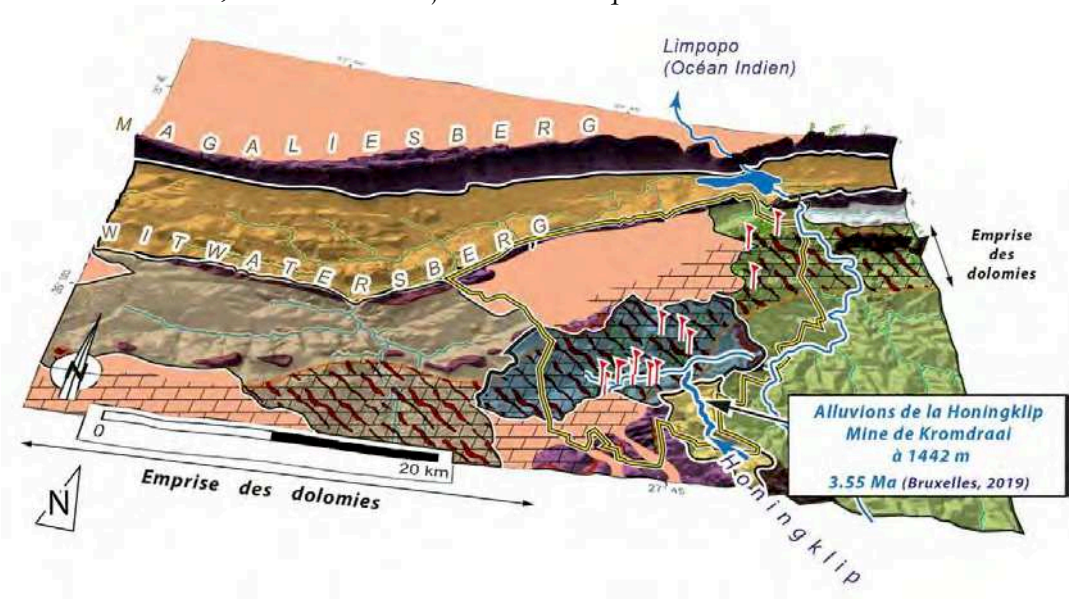


Figure 421 Mise en place de la vallée de la Honingklip.

3.5.7. Riet

Le bassin versant du Riet, en vert sur Figure 422 ci-dessous, se développe sur les dolomies et sur le relief de Krugersdorp.

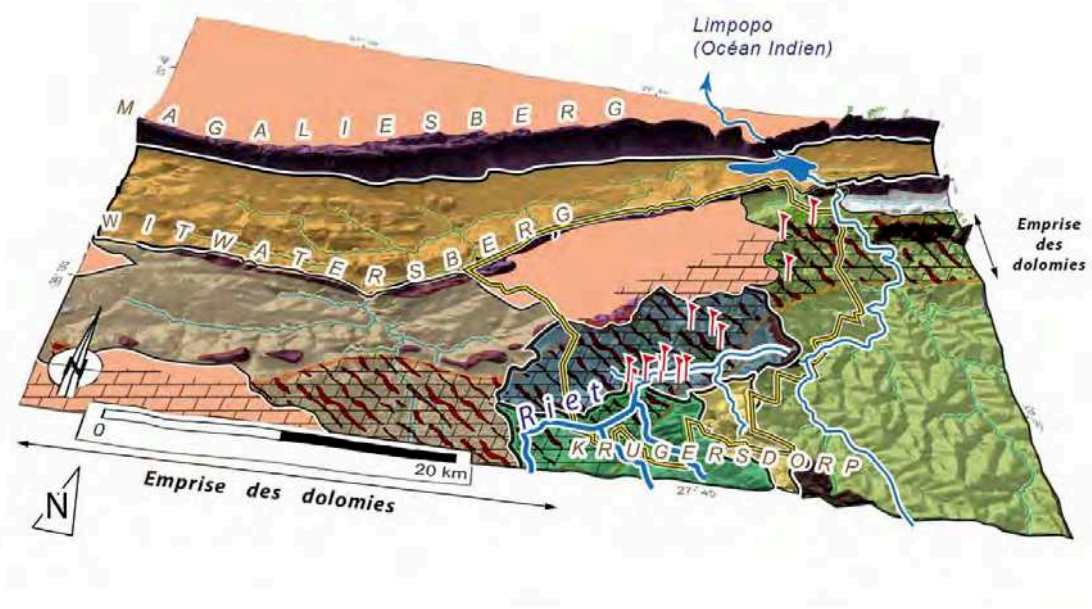


Figure 422 Vague d'érosion régressive en amont de la Bloubank : le Riet.

3.5.8. Creusement des cuvettes de Skeerpoort 2.4 Ma

Ensuite, vers l'est, c'est la cuvette de Skeerpoort qui se creuse (en rouge sur la Figure 423), permettant aux grottes de se former en amont, de piéger des sédiments et de s'indurer.

Les remplissages karstiques fossilifères de Malapa sont datés de 1.98 Ma (Pickering, 2011), ceux de la grotte de Gladysvale sont datés entre 2.4 à 0.6 Ma (Lacruz 2002 ; Herries, 2013) et ceux de la grotte d'Haasgat ont été datés de 2.3 à 1.95 Ma (Herries, 2014).

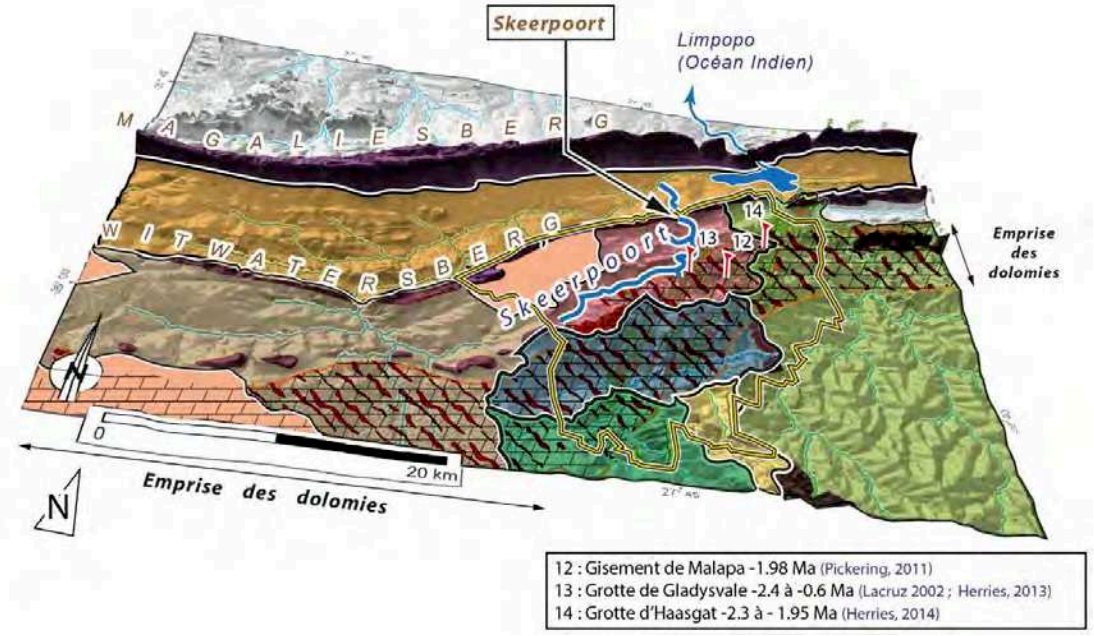


Figure 423 Erosion régressive de la vallée de Skeerpoort au minimum à 2.4 Ma.

3.5.9. Creusement des cuvettes d'Hekpoort et Dorings

D'autres cours d'eau vont à leur tour réussir à creuser des percées anaclinales à travers les quartzites de la chaîne du Witwatersberg et permettent ainsi l'érosion régressive des cuvettes d'*Hekpoortspruit* et de *Doringspruit* (en violet sur la Figure 424).

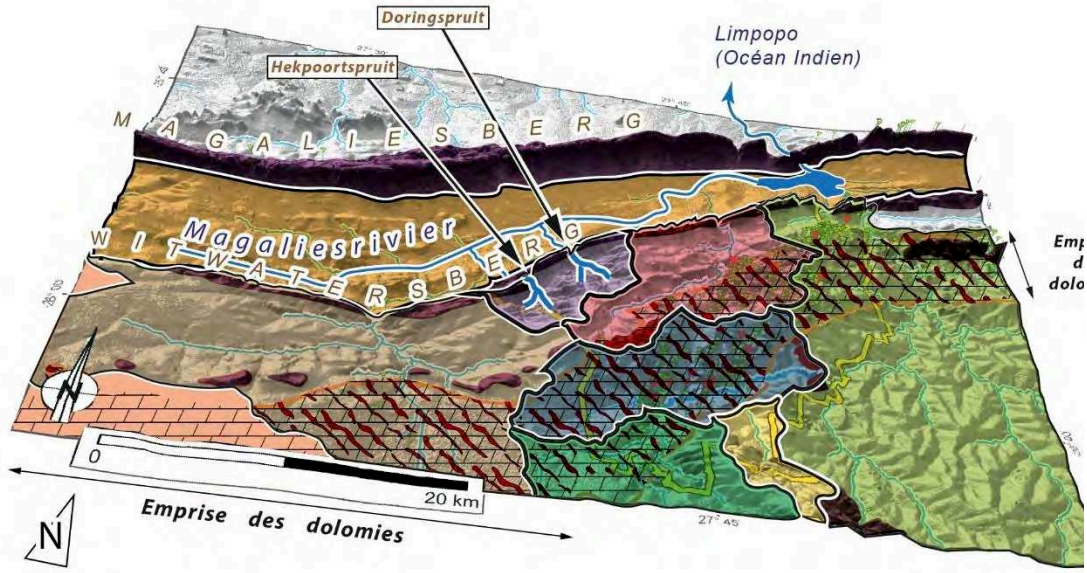


Figure 424 Percées anaclinales et formation des cuvettes d'Hekpoort et de Dorings.

3.6. SYNTHESE SUR LA SURFACE AFRICAINE ET LES PALEOSURFACES DANS LE CRADLE OF HUMANKIND AU NIVEAU DE STERKFONTEIN, SWARTKRANS ET KROMDRAAI

La coupe schématique synthétique du *Cradle of Humankind*, ci-dessous, (Figure 425) compile les informations issues de l'analyse des morphologies des reliefs et des paléosurfaces, de la géométrie des réseaux karstiques et les différents éléments datés. Les structures fantômisées ont été représentées de manière simplifiée.

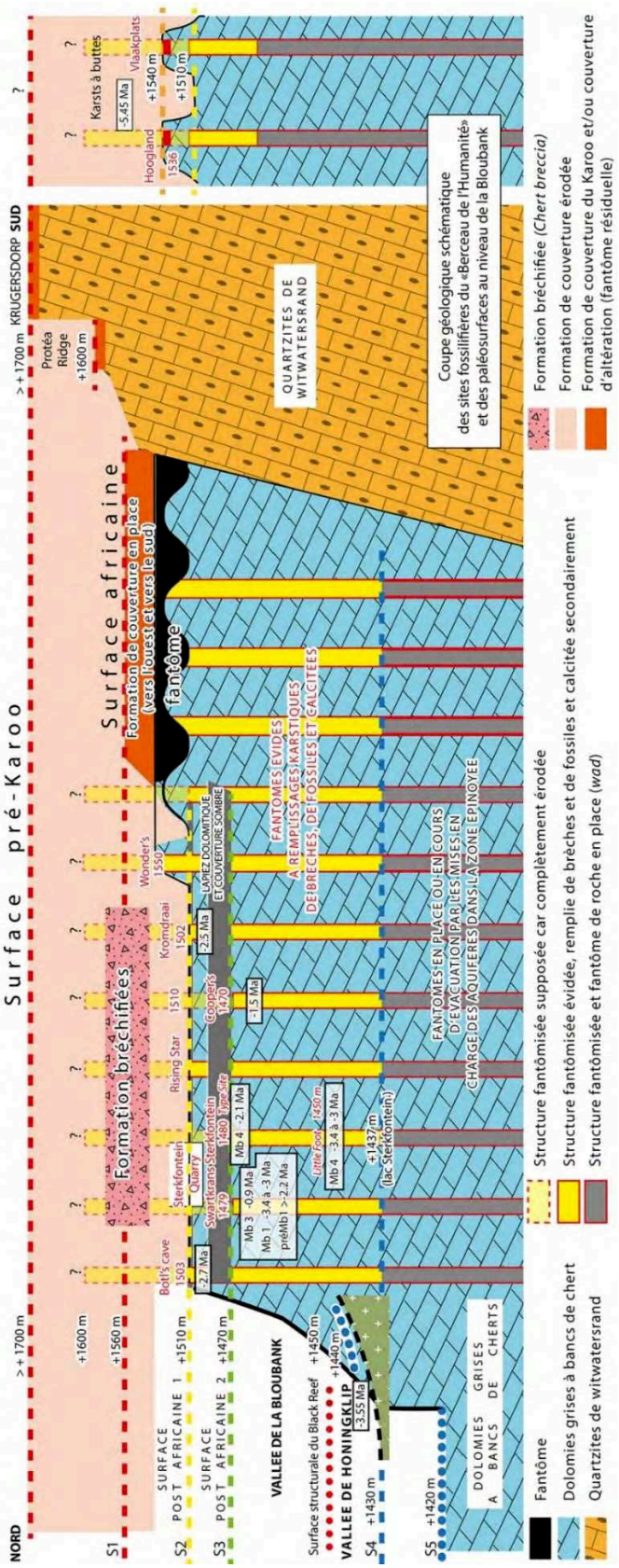
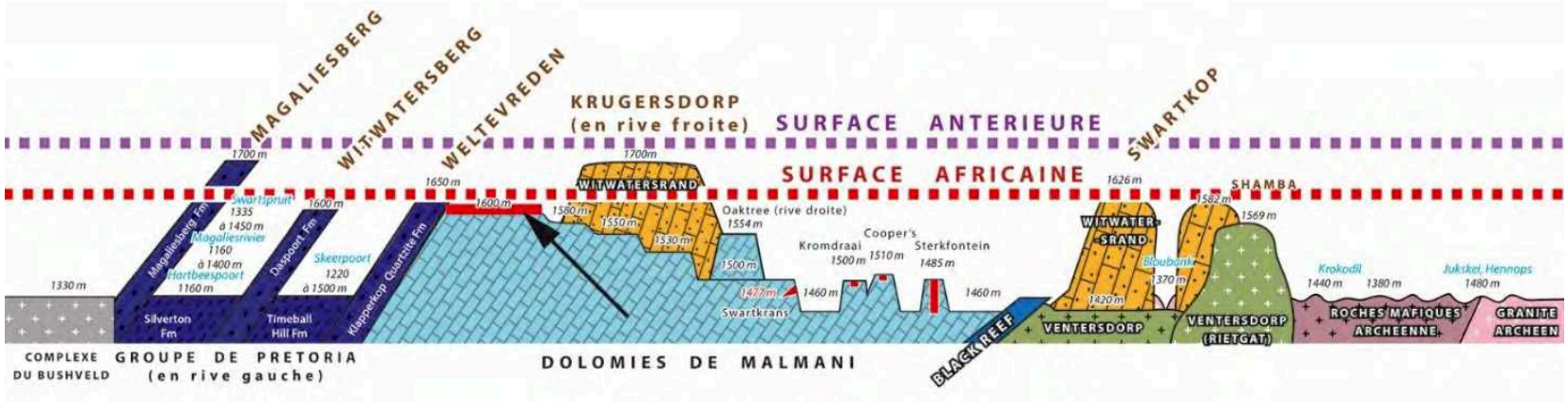


Figure 425 Coupe schématique synthétique du Cradle of Humankind.



La flèche indique la présence des formations altérées encore en place et non érodées par la rivière Bloubank.

Figure 426 Analyse des paléosurfaces et des surfaces structurales (Black Reef) sur le profil géologique schématique de la Bloubank dans le Cradle of Humankind.

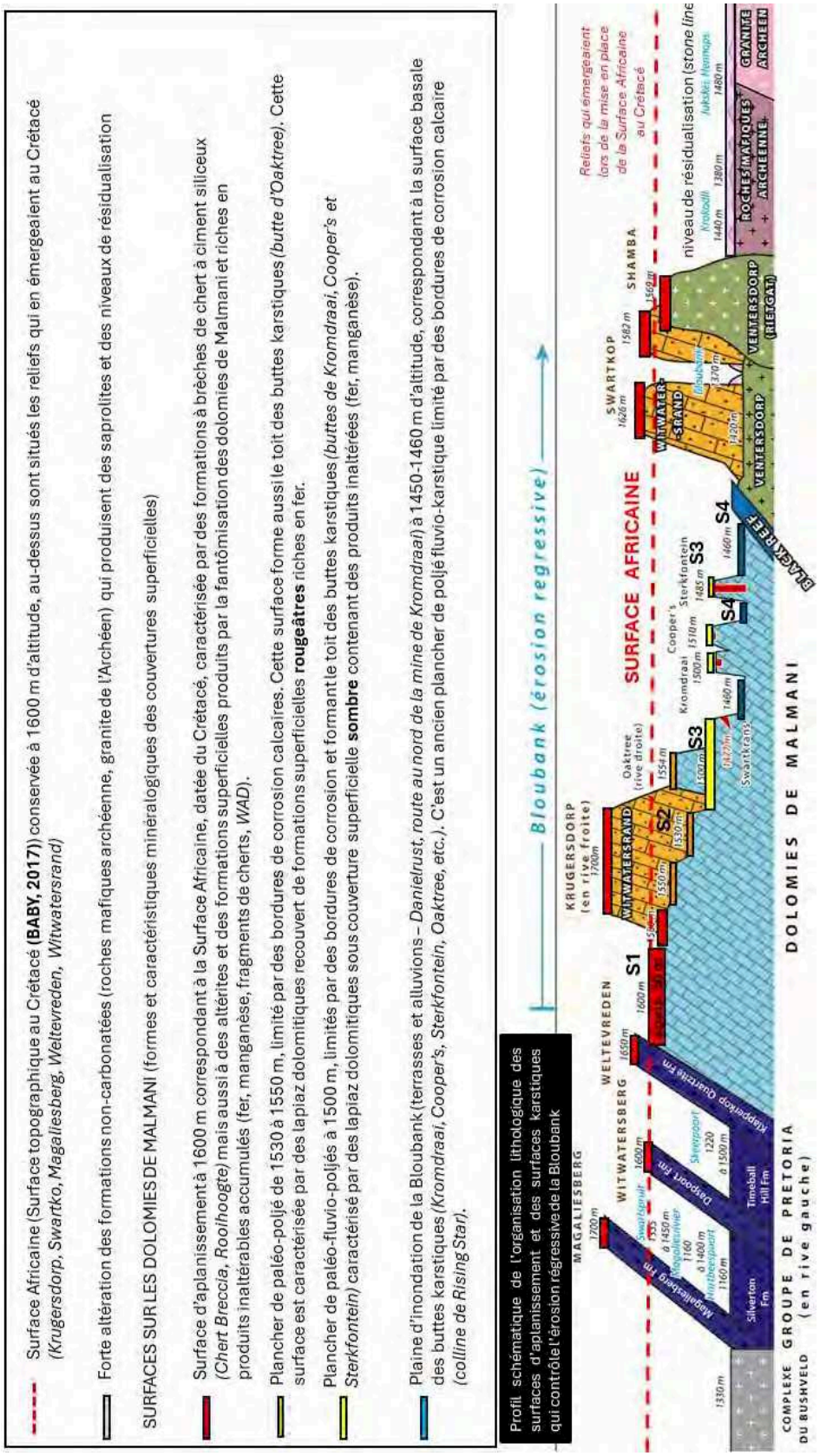


Figure 427 Synthèse.

La coupe géologique et morphokarstique ci-dessous (Figure 428) permet de comparer la localisation des réseaux karstiques (en rouge) et les paléosurfaces observées sur le terrain.

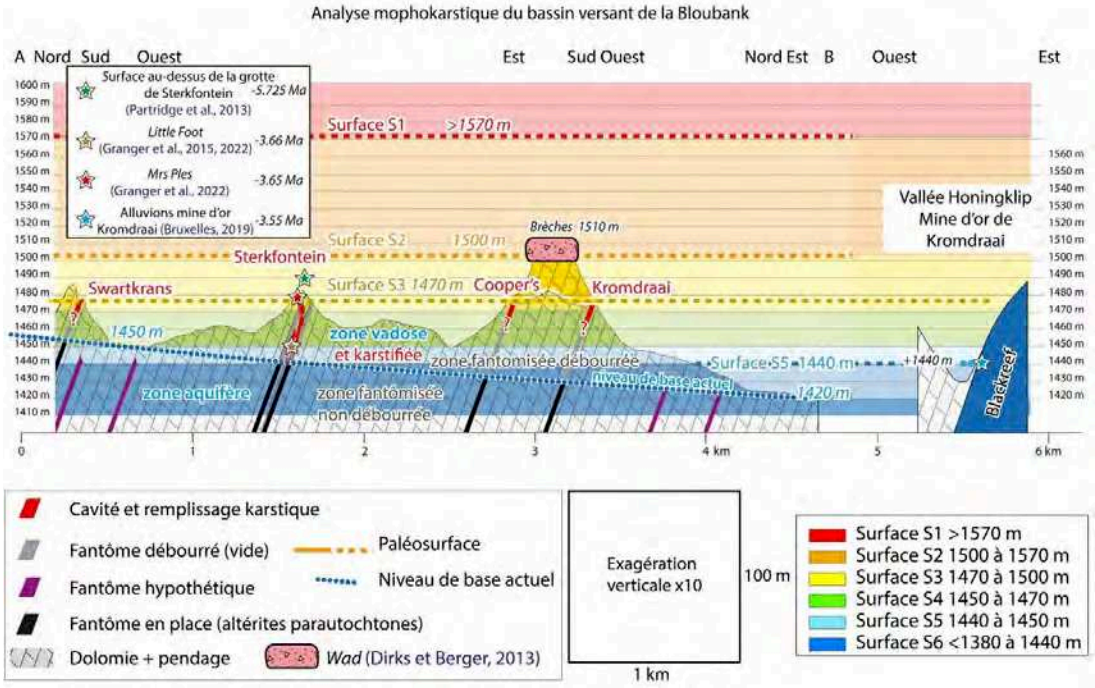


Figure 428 Coupe géologique et morphokarstique des réseaux de Swartkrans, Sterkfontein, Cooper's et Kromdraai.

3.7. CONCLUSION

L'étude des paysages du *Cradle of Humankind* nous a permis d'identifier un certain nombre de critères géomorphologiques caractéristiques de ses karsts fossilifères. Nous utiliserons ces critères pour identifier d'autres karsts potentiels. Ces critères sont caractérisés par la présence de :

- surfaces planes élevées caractérisées par des formations d'altération (surfaces africaines) ;
- de vallées anciennes peu incisées ;
- de *knickpoint* sur les rivières ;
- de collines ou buttes calcaires ou dolomitiques.

1 Identifier des formations carbonatées à l'affleurement

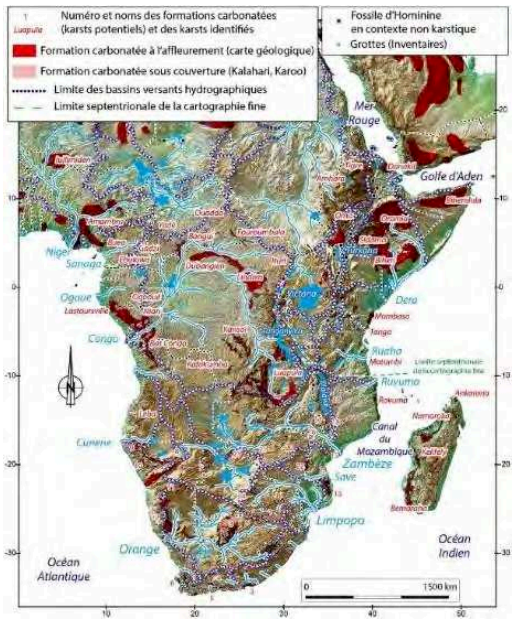


Figure 429 Carte des formations carbonatées à l'affleurement potentiellement karstifiées.

Cette étape a été réalisée à partir de l'analyse des cartes géologiques, qu'il a fallu acquérir puis géoréférencer dans le SIG. Nous avons ensuite pu sélectionner les formations potentiellement karstifiées, telles que les calcaires, les dolomies, les marbres, que nous avons fait apparaître en rouge sur la carte ci-dessous (Figure 429) et en grand format (Figure 107, p.142) Les cartes utilisées sont répertoriées dans le Tableau 58 (p.1089) en annexe.

2 À des altitudes élevées, Identifier la Surface Africaine (fantômisation)



Le traitement géomatique des MNT a permis de réaliser une carte hypsométrique où nous avons classé les réseaux hydrographiques par bassin versant et où nous avons localisé les karsts afin de caractériser leurs positions.

Figure 430 Carte hypsométrique et organisation hydrologique (Carte en grand format Figure 910 p.905).

3 Identifier les zones où les carbonates sont exhumés et érodé par les rivières, identifier des vallées peu incisées (= ancienne) en position en interfluve

Nous avons ensuite ajouté à cette carte la localisation des karsts potentiels et recherché des formes karstiques en surface.

4 Présence de buttes carbonatées

Nous avons aussi recherché des buttes karstiques à partir de l'analyse des MNT en réalisant des cartes de pentes et en observant les images satellites pour identifier des tâches sombres, comme à *Gcwihaba Hills* et Koanaka Hills au Botswana qui indiquent la présence de formations carbonatées subaffleurantes.

5 Identifier des knickpoints

L'étude des paysages du *Cradle of Humankind*, nous a appris le rôle des reliefs, des chaînes de montagne, qui bloquent l'érosion régressive et l'incision des vallées en amont de *knickpoints*. Ce phénomène a notamment été observé avec le relief quartzitique de Swartkop, la barre du *Blackreef* et les nombreux dykes de roches volcaniques qui barrent la vallée de la Bloubank et qui en a bloqué l'érosion (comme décrit dans le 3 (p.268)).

Nous discuterons du lien possible entre les dykes de roche intrusive, la perturbation que provoquent ces dykes sur la circulation de l'eau dans le réservoir carbonaté et la présence des cavités comme à Sterkfontein (Wilkinson, 1973 ; Hobbs *et al.*, 2011), Rising Star (Dirks *et al.*, 2015), Minnaar et d'autres grottes (Martini, 1987). Nous verrons aussi que ces dykes arment de nombreux reliefs, tant en rive gauche qu'en rive droite, en raison de leurs plus grande résistance à l'érosion.

La mise en évidence des *knickpoints* et de l'érosion régressive est facilitée par les traitements numériques des MNT, tels que le calcul des ombrages et des pentes et les hypsométries (cf. Chapitre n°1, p.66).

6 Consulter les inventaires de spéléologie

À cette étape, il sera intéressant de se référer aux données de terrain, aux inventaires de spéléologie et bien sûr de faire des vérifications sur le terrain.

7 Identifier des grottes fantômisées d'après leurs plans topographiques

À partir de l'exemple de Sterkfontein (Atlas Figure 1192, p.1219) et de Malapa (Figure 394, et Figure 396 p.436) dans le *Cradle of Humankind*, ainsi que des grottes du Mozambique (Figure 1374 p.1413) telles que *Codzo River Cave* (Laumanns, 2017c) (Figure 1375 p.1414), Dimba n°2 (Laumanns, 2017b, p.232) ou Ninga Miriango (Laumanns, 2017c) (Figure 1376 p.1415), prospectées par Laurent Bruxelles en 2019, nous pouvons désormais identifier les cavités fantômisées à partir des plans topographiques. Ces derniers révèlent des réseaux labyrinthiques constitués de couloirs conjugués et orthogonaux, plus hauts que larges, et très souvent vidangés par un cours d'eau.

4. CHAPITRE 4 : LE KARST DU NORD-OUEST DU BOTSWANA : UN NOUVEAU BERCEAU DE L'HUMANITE ?

L'évolution du nord-ouest du Botswana au moment de l'ouverture du Rift de l'Okavango soulève plusieurs interrogations : quelles transformations tectoniques et géomorphologiques ont affecté cette région ?

À quel moment et selon quels processus le horst dolomitique occidental a-t-il été karstifié ? Quel âge ont les remplissages karstiques fossilifères et ossifères ? Quelles étaient les conditions climatiques au cours du Plio-Pléistocène, et dans quelles mesures les phases humides ont-elles favorisé la présence des hominines ?

Les analyses morphokarstiques que nous avons menées, complétées par les prospections de terrain et les fouilles archéologiques permettent d'apporter des réponses à ces questions.

Dans ce chapitre, nous expliquerons que les karsts appartenant à un bassin endoréique fonctionnent différemment des karsts dont le bassin versant est en connexion directe avec l'océan, comme le *Cradle of Humankind* en Afrique du Sud décrit dans le Chapitre 3. Dans un tel bassin endoréique, les réservoirs carbonatés et les grottes subissent une élévation du niveau de base pendant les phases pluviales, d'autant plus que le bassin, l'exutoire, se comble de sédiments ou s'inonde rapidement, formant des lacs. Cela entraîne des conséquences sur le karst et sur la spéléogenèse par fantômisation, notamment l'évacuation des fantômes de roche lors des phases de mises en charge, comme nous l'avons décrit pour le *Cradle of Humankind* (Chapitre n°3) (p.268). À l'inverse, dans les bassins versants connectés à l'océan, ce sont l'érosion et le développement de terrasses qui prédominent pendant les phases pluviales.

L'ouverture du Rift de l'Okavango au minimum à **3.35 Ma** (Vainer *et al.*, 2024) a pour conséquence une baisse drastique du niveau de base régional, les forages indiquant une profondeur de plus de 400 m au milieu du rift (Figure 849 p.825) (Gaudare, 2024) et de 62 m en bordure du horst, au niveau de la faille de Gumare (forage JEB1, p.701) et comme le montre la coupe géologique de Bäumle *et al.* (2019) (Figure 902 p.895). Ces éléments indiquent que la karstification aurait eu lieu pendant la mise en place du Rift de l'Okavango. Les karsts étudiés sont situés sur le horst, tandis que le point bas des systèmes hydrologiques est situé dans le graben. Ce dernier a souvent été inondé et occupé par de grands lacs qui ont parfois transgressé le horst. Depuis 200 000 ans, on y trouve le Delta de l'Okavango (Vainer *et al.,* 2023).

Nous chercherons donc, dans ce chapitre, à déterminer l'impact du rifting et de l'installation de ces paléolacs dans le graben sur la karstification des *Aha Hills*, de *Koanaka Hills* et de *Gcwihaba Hills*, situées sur le horst.

Au cœur du désert du Kalahari, à 150 km du Delta de l'Okavango et à 24 km de la faille de Gumare (qui correspond à la bordure d'un ancien lac), les fouilles archéologiques que nous avons menées en 2024 des sédiments karstiques fossilifères et ossifères de la grotte de *Bone Cave* (Koanaka) ont révélé des os de poissons ainsi que des os de plus de 25 espèces d'oiseaux, dont des taxons étroitement liés à l'eau tels que des canards (Anatidés) et une grande diversité de limicoles (*Charadriiformes*). Ces découvertes suggèrent l'existence dans le passé d'un système hydrique complexe et d'une vaste étendue d'eau (sous presse). Effectivement, l'analyse des paysages de Koanaka, notamment les paléosurfaces, et l'étude des sédiments anciens vont clairement en faveur de la présence de vastes étendues d'eau dans le passé.

À 20 km de *Bone Cave* (Koanaka), à Gcwihaba la présence de foraminifères benthiques (micro-organismes marins vivant dans de grandes tranches d'eau et à grande profondeur) dans les roches carbonatées lacustres (des calcrètes) apporte des arguments solides à la présence d'eau (Robbins *et al.* 1996). De plus, une paléovallée, le Gewidum, a creusé ces dépôts lacustres. La grotte de Gcwihaba surplombe aujourd'hui cette vallée et les fouilles de ces remplissages karstiques fossilifères et ossifères indiquent aussi la présence d'eau, soit une rivière dans la vallée (Cooke (1984) *in* Robbins et al. 1996) soit la présence aussi de paléolacs.

Plan du chapitre

La première partie sera consacrée au contexte géologique et hydrologique régional. La deuxième partie décrira les karsts explorés, présentera les données de terrain récoltées lors des missions et exposera les cartes inédites réalisées. La troisième partie fera une synthèse des données géologiques (levés aéromagnétiques, géophysiques et forages). La quatrième partie exposera les arguments de paléoenvironnements aquatiques au pied des collines et des grottes étudiées et fouillées au niveau de (A) Gcwihaba et (B) de *Bone Cave* (Koanaka). La cinquième partie présentera les données issues de la bibliographie pour reconstituer les paléodrainages dans cette région et comprendre la présence des paléolacs. La sixième partie abordera la question des controverses sur l'âge des paysages et l'âge des paléolacs. Enfin, la septième partie fera une synthèse sur l'étude des karsts du nord-ouest du Botswana avant la conclusion.

4.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA REGION DU NORD-OUEST DU BOTSWANA ET DU RIFT DE L'OKAVANGO 476

4.2. DESCRIPTION MORPHOKARSTIQUE DES PAYSAGES ET DES GROTTES 529

4.3. SYNTHESE DES DONNEES GEOLOGIQUES : PROSPECTIONS GEOPHYSIQUES, VALIDEES PAR DES FORAGES 661

4.4. MISE EN EVIDENCE DE PALEOENVIRONNEMENTS LACUSTRES 714

4.5. RECONSTITUTION CARTOGRAPHIQUE SYNTHETIQUE DES PAYSAGES ET DES PALEO-DRAINAGES DU KALAHARI DEPUIS LE CRETACE (D'APRES LA BIBLIOGRAPHIE) ET ETABLISSEMENT DE LACS DANS LE RIFT DE L'OKAVANGO AU PLIO-PLEISTOCENE 820

4.6. DES DATATIONS PROBLEMATIQUES CONCERNANT L'EDIFICATION DES PAYSAGES ET L'AGE DES PALEOLACS 846

4.7. QUELLES REPONSES APPORTEES PAR L'INDUSTRIE LITHIQUE ANCIENNE ? 862

4.8. SYNTHESE ET CONCLUSION DE L'ETUDE DES KARSTS DU NORD-OUEST DU BOTSWANA 877

4.9. CONCLUSION 897

4.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA REGION DU NORD-OUEST DU BOTSWANA ET DU RIFT DE L'OKAVANGO

Le **fleuve de l'Okavango** appartient à l'un des rares bassins endoréiques de la planète, c'est-à-dire que son embouchure n'atteint pas l'Océan Indien mais se situe au milieu des terres, où s'est formé un vaste cône alluvial visible depuis l'espace (en bleu sur la Figure 431), appelé **Delta[1] de l'Okavango.**

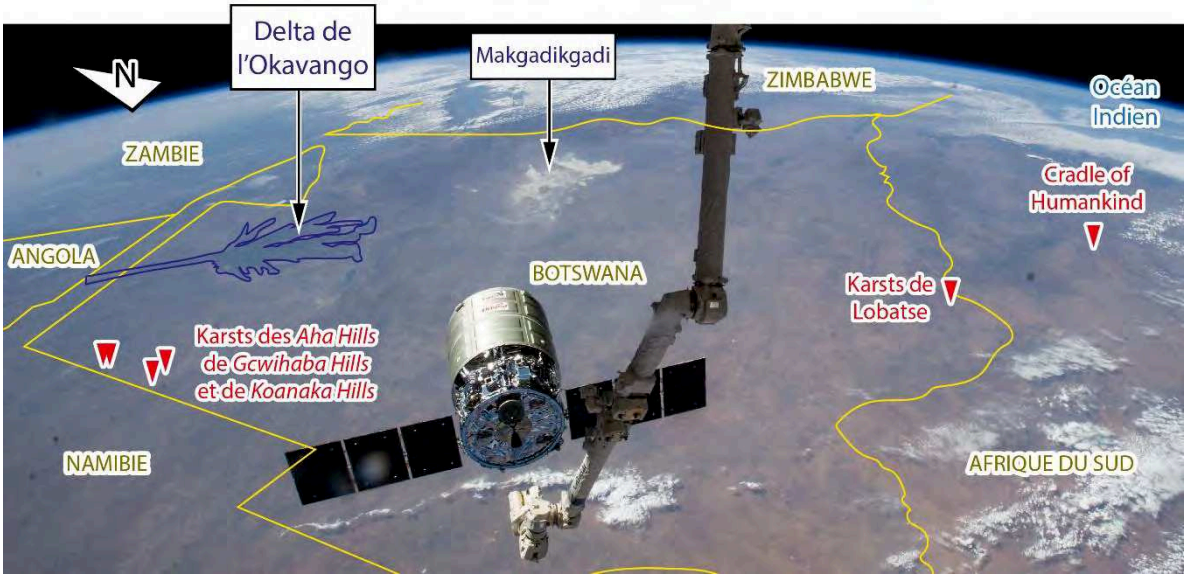


Figure 431 Le Delta de l'Okavango est visible depuis l'ISS. (Source : NASA https://images.nasa.gov/details/iss040e095229 modifié).

Le Delta de l'Okavango est situé dans un bassin beaucoup plus vaste et plus ancien, le **Rift de l'Okavango**, qui se trouve à l'extrémité de la branche occidentale du **Rift est-africain** (p.4) (Figure 432 à Figure 848). Ce **Rift de l'Okavango** s'est ouvert au Pliocène (Ringrose *et al.*, 2005), au minimum à **3.35 Ma** (Vainer *et al.*, 2024), comme le révèlent les datations des nucléides cosmogéniques terrestres $^{26}Al/^{10}Be$, échantillonnés à 60 m de profondeur (Figure 902, p.895) dans le **cône alluvial du Cuando,** dépôt-centre du bassin, localisé sur la carte (p.830). Nous en rediscuterons p.829.

Les mêmes méthodes de datation montrent que les dunes de sable, appartenant à la formation du Kalahari, que nous décrirons plus loin (p.509), étaient déjà présentes il y a 4 Ma (site OGN p.828, Vainer *et al.*, 2021) et qu'elles ont continué à s'édifier tout au long du rifting, certaines étant datées à **1.14 Ma** (la dune KS23 étudiée par Vainer *et al.*, 2024, p.6) et d'autres encore vers 186 000 ans (Goudie et Viles, 2015, p.141) ou 100 000 ans (Thomas et Burrough, 2013). Des épisodes d'aridité plus récents, ont remobilisé le sable et sont enregistrés autour de 48 000, 36 000 et 23 000 ans (Thomas *et al.*, 2000) (p.746).

---

[1] *« Un Delta qui s'écrit avec un D majuscule car son nom correspond à sa forme géométrique, en forme de lettre grec Delta, et non pas à son fonctionnement géologique »* (Dauteuil O., comm. orale).

Ce **Rift de l'Okavango** a également été envahit par d'anciens lacs intérieurs, aujourd'hui asséchés, comme le prouvent les calcrètes du Paléolac Makgadikgadi (évaporites du *Sua Pan* et du *Ntwetwe Pan)*, visibles en blanc depuis l'espace (Figure 431).

L'analyse des reliefs par satellite (décrite dans le 1 p.54) met en évidence une succession de grands lacs qui se sont établis dans le rift (Grove, 1969 ; Heine, 1978 ; C Jones, 1982 *in* Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2001 ; Fig.6, p.193 ; Shaw, 1988 ; Thomas et Shaw, 1990, Fig.4, p.193 ; Cotterill, 2006 ; Mc Farlane et Eckardt, 2008 ; Fierens, 2019, Moore *et al.* 2012, 2022 ; Royer 2020 ; Ringrose, 2022 ; Gaudare, 2024), et dont certains ont - nous le montrerons - transgressé vers l'ouest sur le horst carbonaté où sont situés les karsts que nous étudions, en rouge sur les cartes (Figure 431 et Figure 433) et qui ont érodé, par endroit, les dunes de sables qui étaient déjà établies.

Les karsts se situent seulement à 20 km de la bordure occidentale du rift matérialisée aujourd'hui par la **faille de Gumare** (Figure 848 et Figure 849, p.824) et qui correspond à la limite de certains lacs d'après Moore, Cotterill et Eckardt (2012, p.393) alors que nous montrerons comment le Lac *Deception* a transgressé cette limite (Chadelle et Bruxelles, 2024) (Figure 778 p.781).

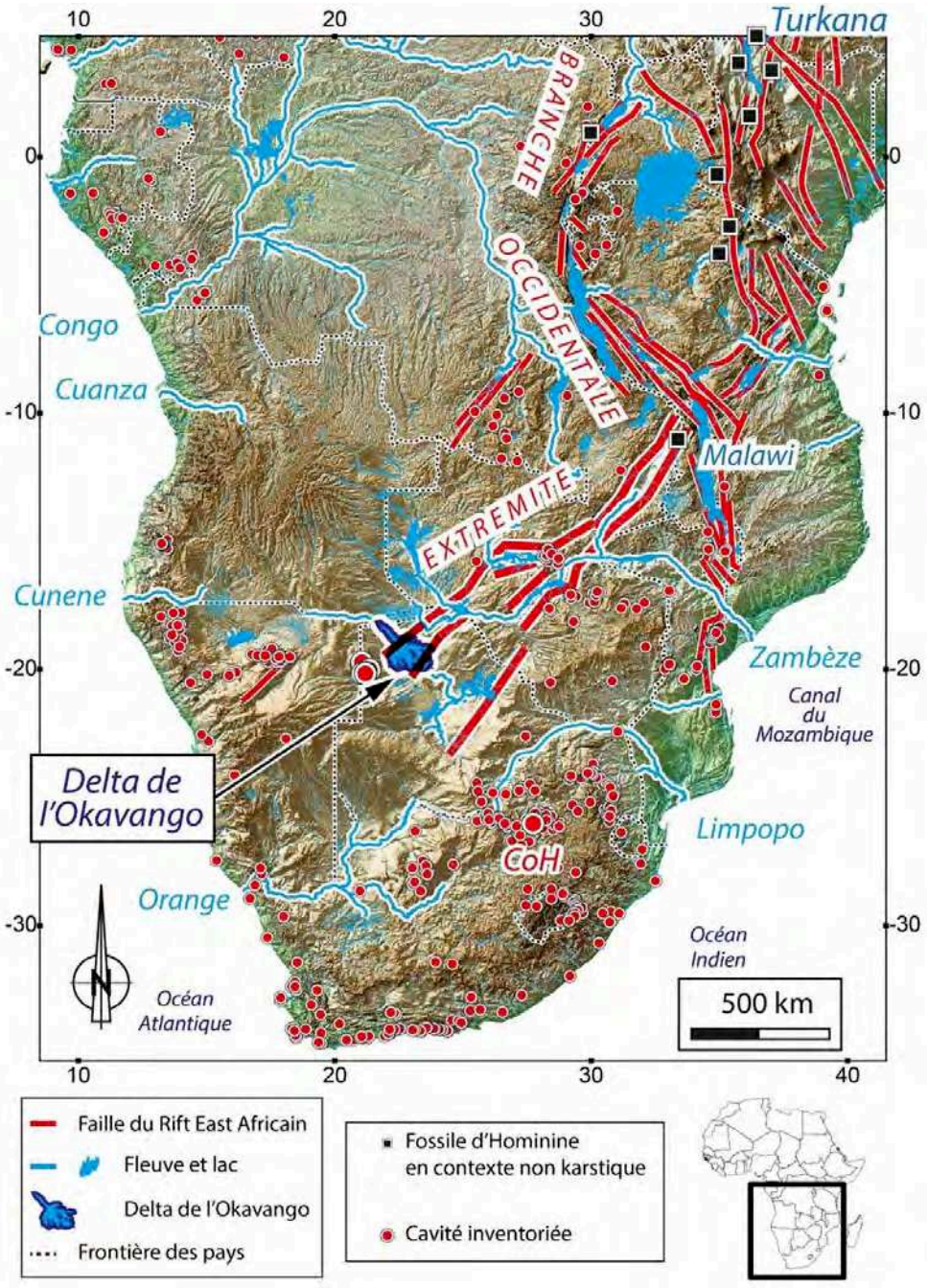


Figure 432 Le Delta de l'Okavango est situé à l'extrémité du Rift est-africain, dont les failles principales sont représentées en rouge.

Les failles du **Rift est-africain** ont été dessinées à partir des cartes suivantes :

- CGIA International Geological Map of Africa 1/5 000 000 (1985/1990) ;
- *CGMW* BRGM 1 / 10 000 000 (issues de l'Esquisse structurale provisoire de l'Afrique de Furon R. et ASGA[1] (1958, 1967).

[1] ASGA : Association des Services Géologiques Africains

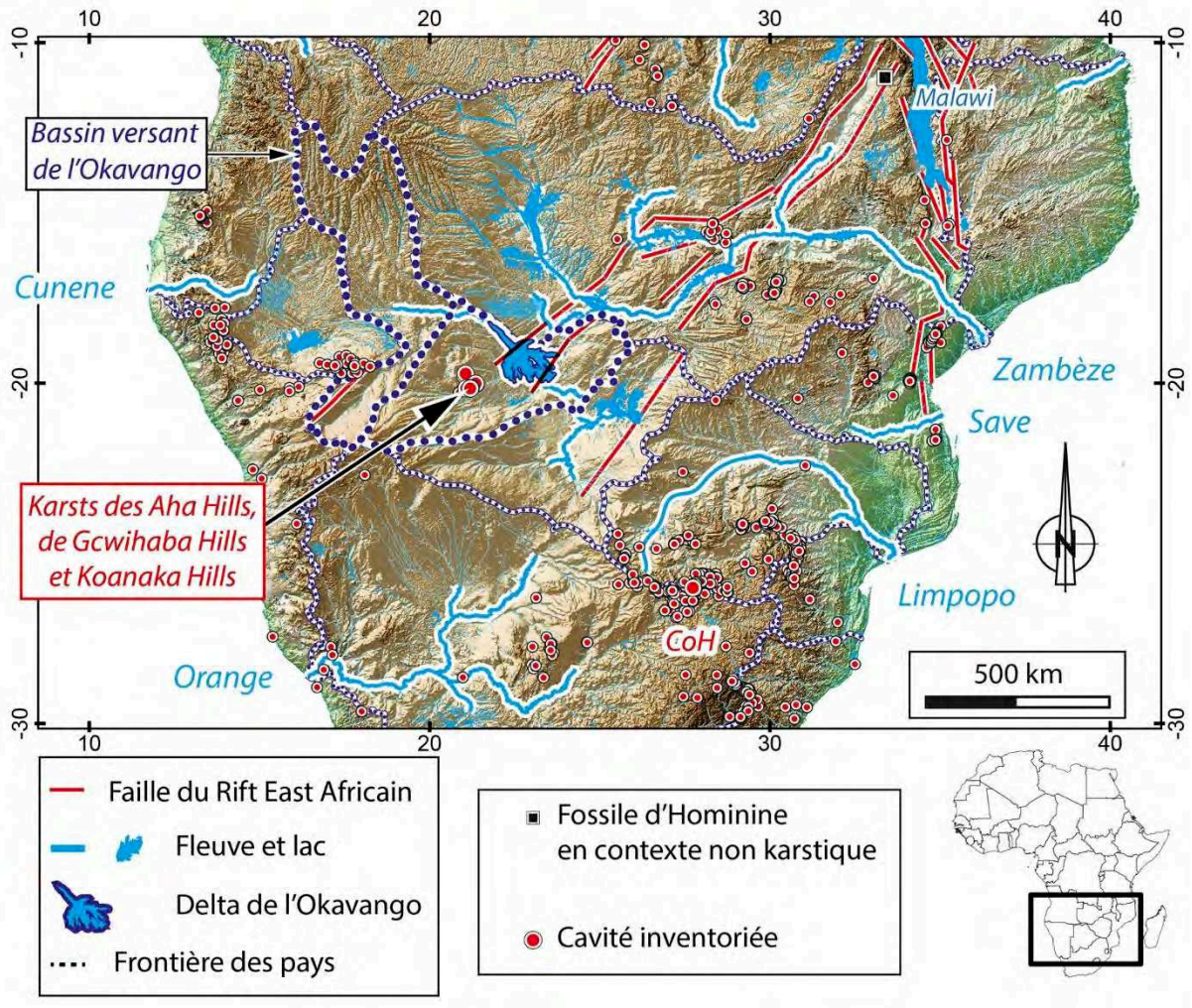
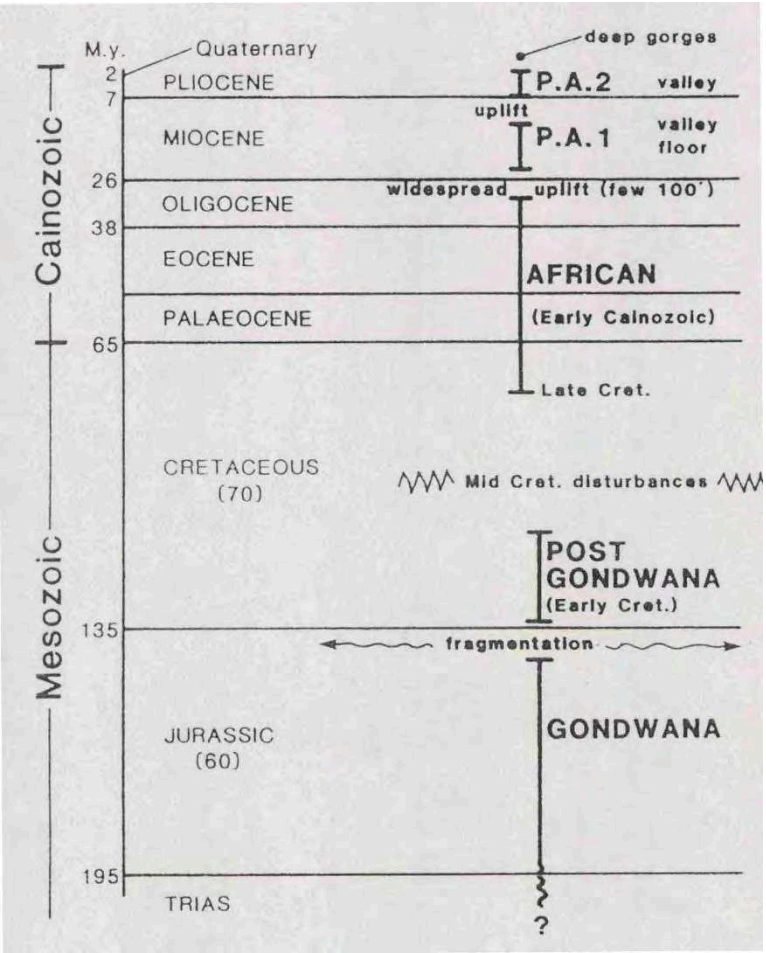


Figure 433 Les karsts étudiés sont situés à 150 km à l'ouest du Delta de l'Okavango, dont le bassin versant actuel en pointillé, est endoréique.

Remarque :

Le bassin versant du fleuve Limpopo entaille, quant à lui, profondément l'est du continent jusqu'à atteindre le karst du *Cradle of Humankind*, décrit dans le Chapitre n°1 et indiqué *CoH* et par un pont rouge sur la carte ci-dessus. Nous pouvons aussi nous reporter à la Figure 1077 (p.1065).

La chronologie des évènements géologiques majeurs de l'Afrique australe est bien établie et résumée dans la Figure 434 ci-dessous. Les acronymes de cette figure font référence aux surfaces d'érosion africaine évoquées Chapitre n°2 (p.171).



P.A. 2 : Surface Post Africaine 2.
P.A. 1 : Surface Post Africaine 1.

AFRICAN : Surface Africaine.

POST-GONDWANA : Surface Post-Gondwana

GONDWANA : Surface Gondwana.et nous en avons parlé.

Figure 434 Chronologie des évènements géologiques (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003, Fig.1).

4.1.1. Résumé de l'histoire géologique du nord-ouest du Botswana

La géologie de l'Afrique australe a été décrite Chapitre n°2 (p.197). Les grandes étapes géologiques ayant façonné la région nord-ouest du Botswana, ainsi que les buttes karstiques dolomitiques des *Aha Hills*, de *Gcwihaba Hills* et de *Koanaka Hills*, peuvent être résumées comme suit (Figure 434) :

1. Dépôt de formations carbonatées marines - à l'origine des dolomies constituant les *Aha Hills*, *Gcwihaba Hills* et *Koanaka Hills* - dans un bassin marin néoprotérozoïque, daté entre -**1020 et -530 Ma** (*Department of Geological Survey report*, 2001 *in* Ellis 2020) ;
2. Plissement et basculement des dolomies lors de l'orogenèse de Damara, vers **750 Ma**, lié à la formation de la Chaîne Panafricaine sur le Gondwana ;
3. Fragmentation du Gondwana, d'abord par l'ouverture du Canal du Mozambique à l'est, vers **183 Ma**, (Eagles et Konig, 2008 ; Partridge et Maud, 2000, p.3 ; Jourdan *et al.*, 2008 *in* Stanley *et al.*, 2021 ; Duncan *et al.*, 1997 *in* Thomson, 2017, Fig.30, p.30), puis par l'ouverture de l'Atlantique à l'ouest (**130 Ma)** (Jungslager, 1999 ; Tardy et Rouquin, 1998, p.340 ; Brown *et al.*, 1995, sur la base des données biostratigraphiques de McMillan, 2003 *in* Guillocheau *et al.*, 2012 ;) (voir p.165);
4. Plusieurs phases de surrection tectonique (flexure crustale du sous continent) à partir du Paléogène, vers **25 Ma**, (*Water Surveys Botswana* et *Aqualogic*, 2003 ; Moore, Cotterill et Eckardt, 2012) entraînent une réorganisation des réseaux hydrographiques, notamment une déconnexion entre les fleuves de la région du Kalahari et le fleuve Limpopo qui se jette dans l'Océan Indien. C'est le début d'un système de drainage endoréique dans la région du Kalahari et la mise en place de lacs et de dépôts fluvio-lacustres et éoliens constituant le **groupe du Kalahari** (voir description p.507). C'est l'établissement de l'immense **Surface Africaine*** (décrite p.268) ;
5. Propagation tectonique vers l'ouest de la branche occidentale du **Rift est-africain** (p.4) (Figure 862), menant à la formation du **Rift de l'Okavango** dans le Bassin du Kalahari au minimum il y a **3.35 Ma** (Vainer *et al.*, 2024). Des lacs s'y développent progressivement, tandis que le fleuve Zambèze capture plusieurs cours d'eau en s'étendant vers l'ouest et le nord. Enfin, un assèchement généralisé s'installe, et la région ne connaît plus qu'une grande inondation annuelle dans le Delta de l'Okavango, depuis **200 000 ans** (Vainer *et al.*, 2023).

Il existe deux courants d'interprétation concernant les âges de mise en place des lacs dans cette partie nord-ouest du Botswana. Certains auteurs avancent des âges anciens, autour du million et demi d'années, tandis que d'autres proposent des âges récents, à partir de 280 000 ans.
Nous essayerons de reconstituer l'évolution de ces paléodrainages et l'établissement de ces paléolacs (p.820), afin de répondre à la problématique suivante : expliquer la présence d'os de poissons fossiles dans la grotte de *Bone Cave* (sous presse), située dans les *Koanaka Hills*, et tenter d'en déterminer l'âge.

4.1.2. Réalisation des atlas cartographiques inédits et des cartes géologiques

La méthodologie développée pour étudier les karsts de la région nord-ouest du Botswana a consisté à réaliser des atlas cartographiques inédites, spécifiques à nos recherches. Nous indiquons les limites des différents atlas réalisés ci-dessous (Figure 435 et Figure 436).

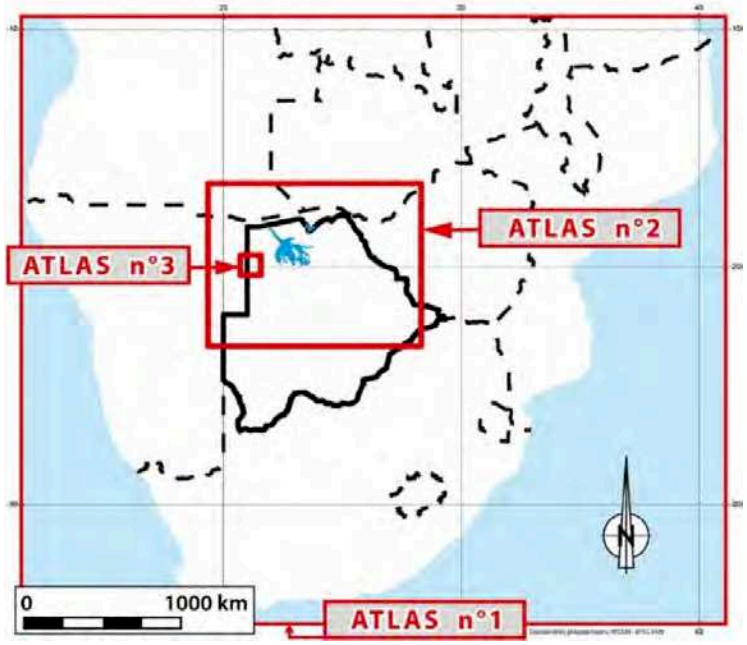


Figure 435 Emplacement de l'ATLAS n°2 sur l'ATLAS n°1.

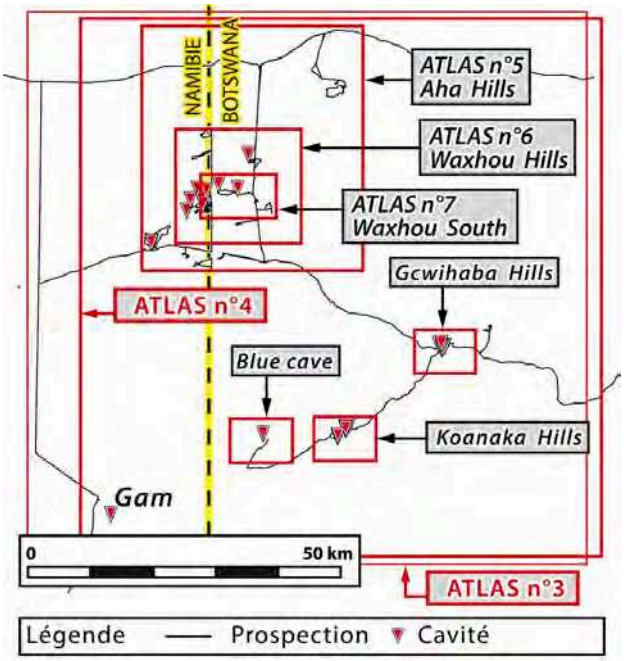


Figure 436 Emplacement des autres atlas sur l'ATLAS n°3.

Les limites de l'ATLAS n°3 et de l'ATLAS n°4 sont très proches.

4.1.2.1. ATLAS n°1 : géologie et hydrologie des karsts de l'Afrique australe

Le **Désert du Kalahari**, en jaune, ci-dessous (Figure 437), recouvre une vaste partie de l'Afrique australe. Constitué de dépôts fluvio-deltaïques, lacustres et de sables éoliens, ils forment le **groupe géologique du Kalahari** (cf. infra p. 507).

Ces sédiments recouvrent les formations géologiques sous-jacentes, telles que les formations du Karoo (en vert) et les dolomies (en rose), potentiellement karstifiées.

Examinons à présent les cartes géologiques que nous avons produites (Figure 439 et Figure 441).

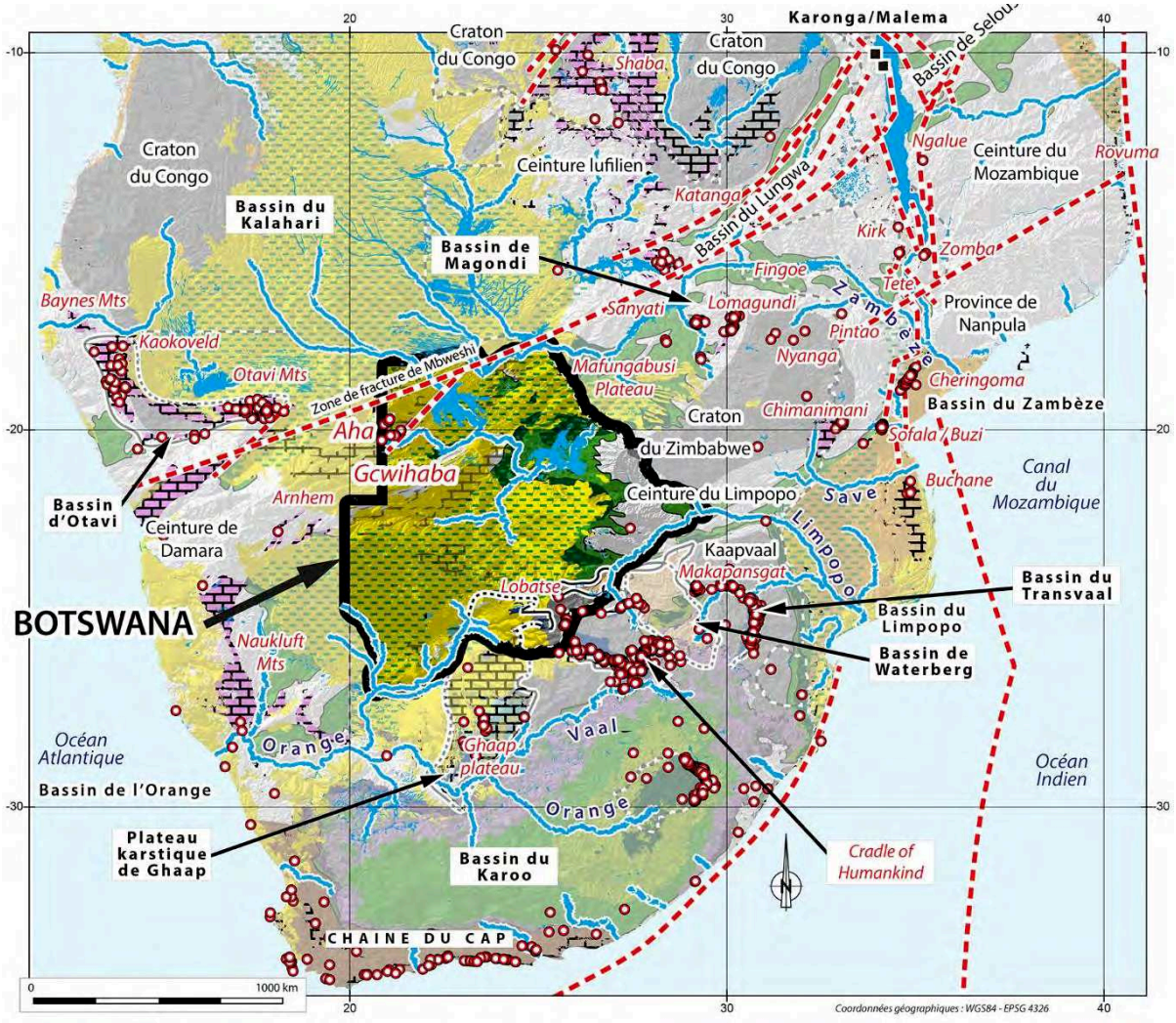


Figure 437 ATLAS n°1 : géologie et hydrologie des karsts de l'Afrique australe.

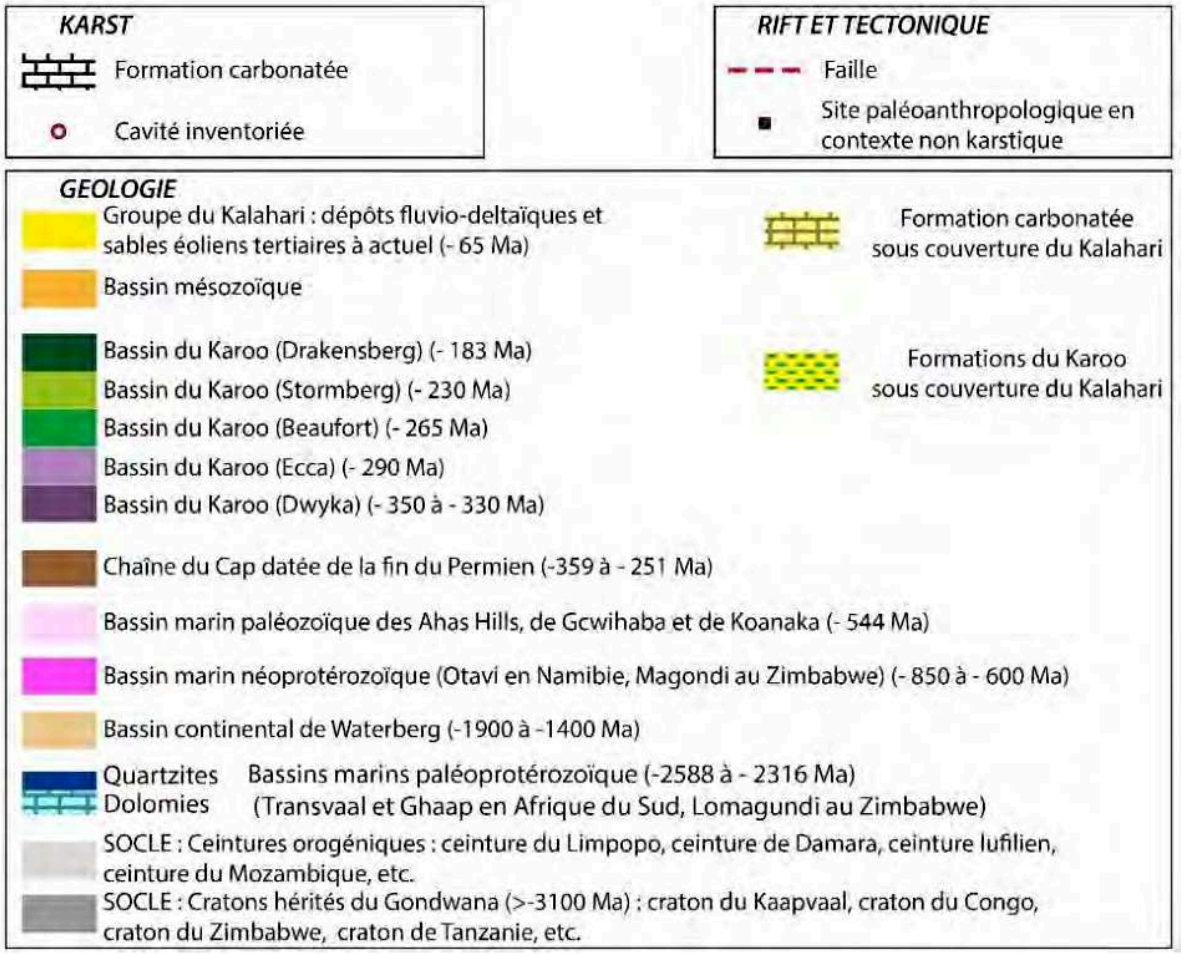


Figure 438 Légende de la carte précédente.

4.1.2.2. ATLAS n°2 : géologie du nord-ouest du Botswana

Dans le nord-ouest du Botswana, presque entièrement recouvert par le désert du Kalahari, les dolomies affleurent très ponctuellement et sont pratiquement invisibles à l'échelle de la carte ci-dessous (Figure 439). Les dolomies sont fortement karstifiées et nous y étudierons les karsts des *Aha Hills*, de *Gcwihaba Hills* et de *Koanaka Hills,* indiqués par des triangles rouges sur la Figure 439.

Numéro des karsts :
1 : *Aha Hills*
2 : *Gcwihaba Hills*
3 : *Koanaka Hills* (K1 et K2 à l'est) et *Blue Cave* (K3 à l'ouest)
4 : Gam (Namibie)
5 : *Cave in Phato Ye Sebilo Gorge*
6 : Bamata (Zimbabwe)
7 : Chirisa et Chitita (Zimbabwe)
.

La région a été affectée par l'ouverture du Rift de l'Okavango, dont les failles apparaissent en rouge ci-dessous (Figure 439) et sur le schéma structurale (Figure 440). Dans ce chapitre, nous essayerons de comprendre les mécanismes de cette ouverture (p.823) et son impact sur la karstification des dolomies situées sur le horst occidental du rift.

Nous analyserons également l'hydrographie, depuis les circulations fluviatiles endoréiques du passé jusqu'à l'établissement et l'assèchement d'anciens lacs, dont subsiste aujourd'hui le **marais salant de Makgadikgadi** (en bleu sur la Figure 439). Ce dernier correspond à un vaste lac disparu, dont les anciennes bordures et rivages sont encore préservées dans le paysage. Nous étudierons aussi le fonctionnement du delta actuel de l'Okavango.

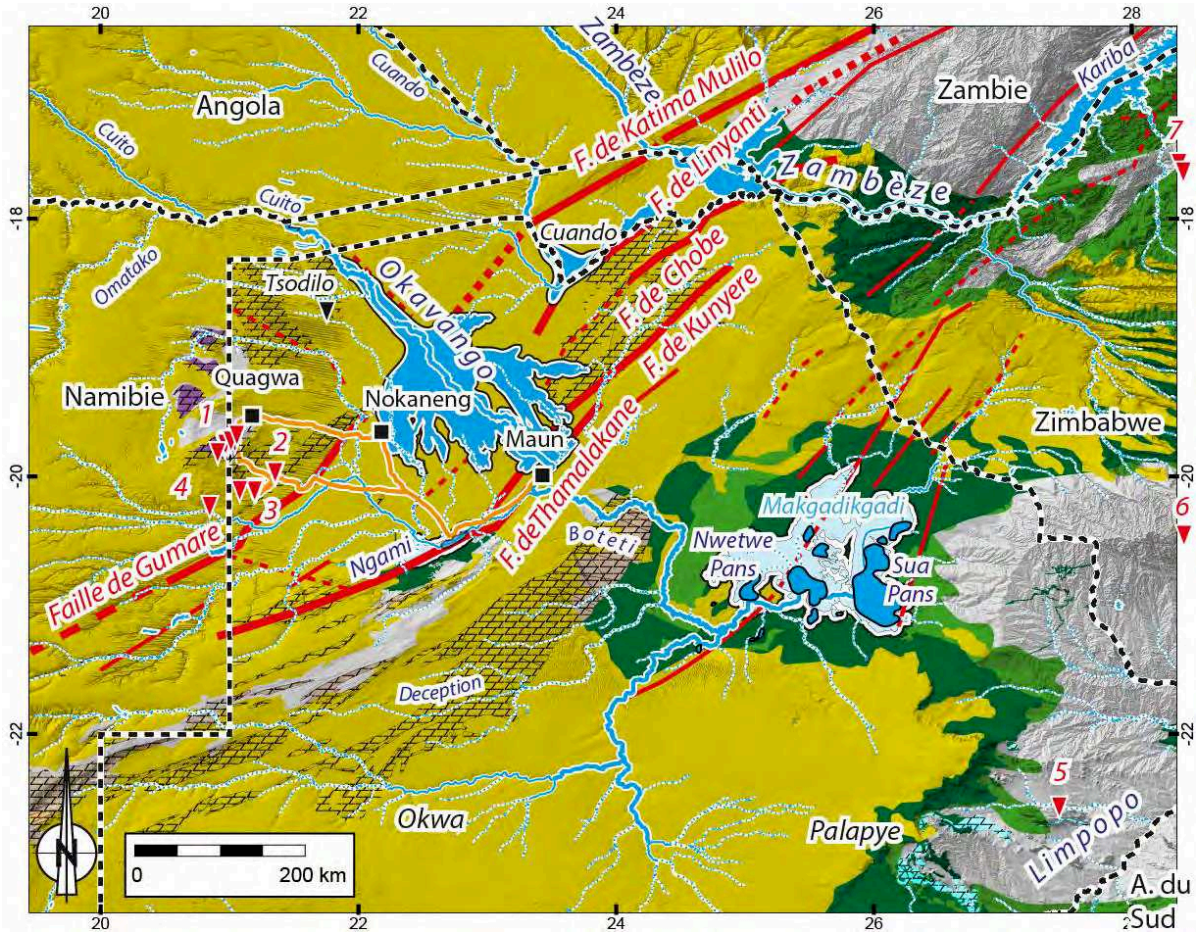


Figure 439 ATLAS n°2 : géologie du nord-ouest du Botswana montrant les grottes étudiées, le Rift de l'Okavango, le Delta de l'Okavango et les marais salants de Makgadikgadi.

Pour mieux nous situer parmi l'ensemble des cartes produites, nous avons indiqué en orange les trajets en voiture depuis la ville de Maun et de Nokaneng pour rejoindre les grottes de Gcwihaba et Koanaka. Deux pistes sont représentées : celle du nord, qui passe par le talweg de Quagwa, et celle du sud, qui passe par le talweg de Gewidum.
Sur cette carte et la précédente, nous avons indiqué les formations carbonatées situées sous le Désert du Kalahari. Nous en reparlerons à la fin du chapitre.

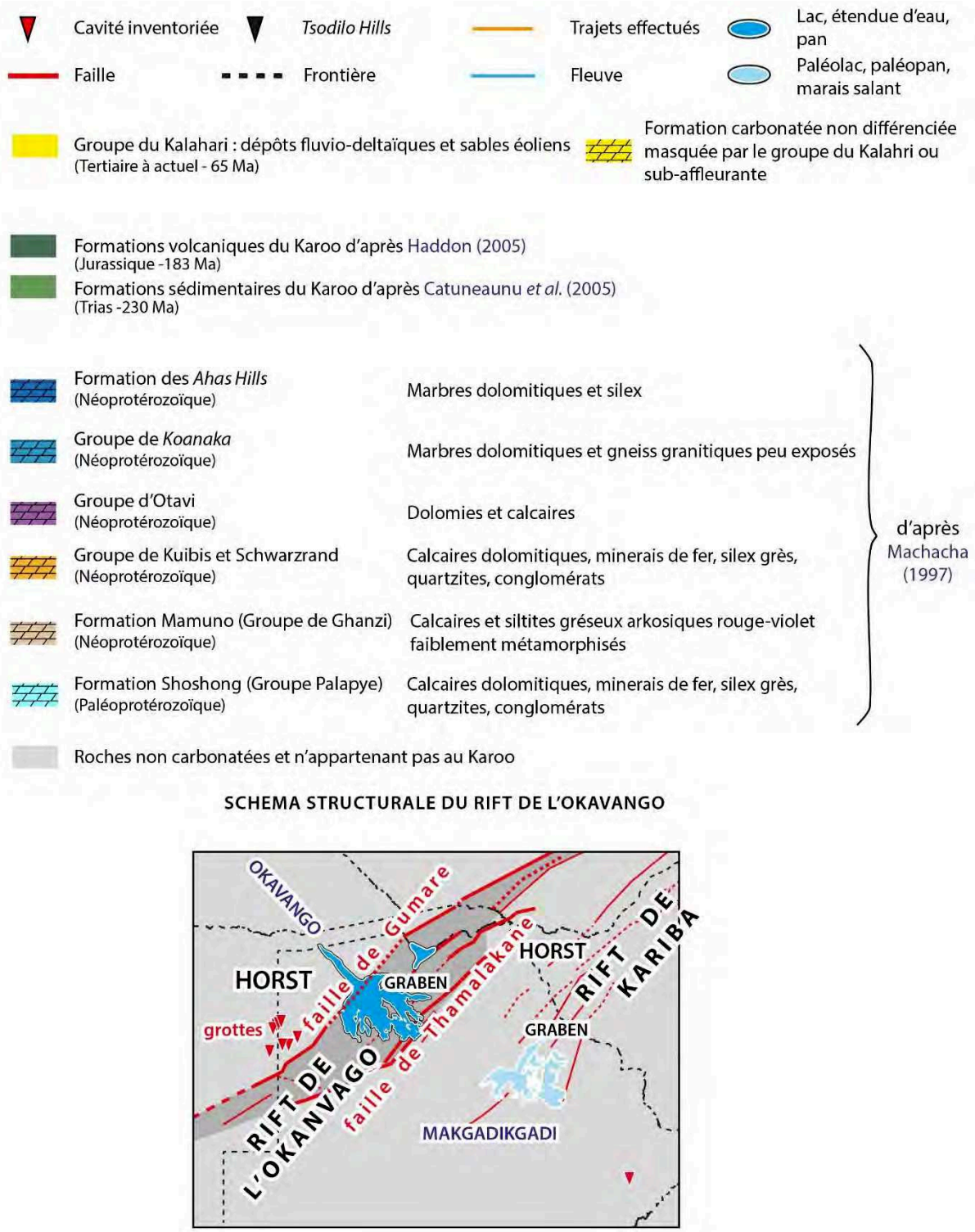


Figure 440 Légende de l'ATLAS n°2 et schéma structurale du Rift de l'Okavango.

Notons que le marais salant du Makgadikgadi n'est pas situé, *sensu stricto*, à l'intérieur du Rift de l'Okavango tel qu'il est défini sur cette carte, mais relève d'une autre zone structuralement plus ancienne, appelée Rift du lac Kariba, non détaillée ici.

4.1.2.3. ATLAS n°2 : géologie pré-Kalahari du nord-ouest du Botswana et explication de la présence du Rift de l'Okavango au niveau d'anciens bassins permiens

La carte géologique (Figure 441) inspirée de la carte intitulée *The Pre-Kalahari Geological Map of the Republic of Botswana* (Machacha, 1997) au 1/1 500 000, exclut les formations du Kalahari. Elle met en évidence la structuration tectonique du **Rift de l'Okavango**, délimitée par des failles en rouge : au nord, la **faille de Gumare–Katima Mulilo** et au sud, la **faille de Thamalakane-Kunyere**. Ces structures tectoniques allongées accueillent aujourd'hui des cours d'eau majeurs, tels que la Cuito et son delta actuel l'Okavango, ainsi que dans le nord du rift la Cuando et le Chobe et le Zambèze. Ce dernier rejoignant successivement les barrages du Kariba en Zambie puis de Cahora Bassa au Mozambique, en-dehors de cette carte. Les basaltes au fond du rift appartiennent au Karoo (Le Gall *et al.*, 2002).
Ces tracés correspondent en grande partie à d'anciens bassins permiens du Karoo, identifiés par *Visser et Praekelt (1996)*, figurés en vert sur la carte. Nous verrons que les formations carbonatées du Karoo ne sont pas karstifiées dans le bassin du Tete au Mozambique (p.1009), à Karonga au Malawi (p.1044) et en Afrique du Sud comme l'indique la répartition des cavités de ce pays (Figure 142 p.201).

La réactivation tectonique de zones de faiblesses héritées de la séparation du Gondwana a joué un rôle fondamental dans la géométrie structurale actuelle. Nous verrons dans ce chapitre comment s'est ouvert le Rift de l'Okavango (p.820) et chercherons à déterminer son impact sur la karstification des *Aha Hills*, des *Gcwihaba Hills* et des *Koanaka Hills*.

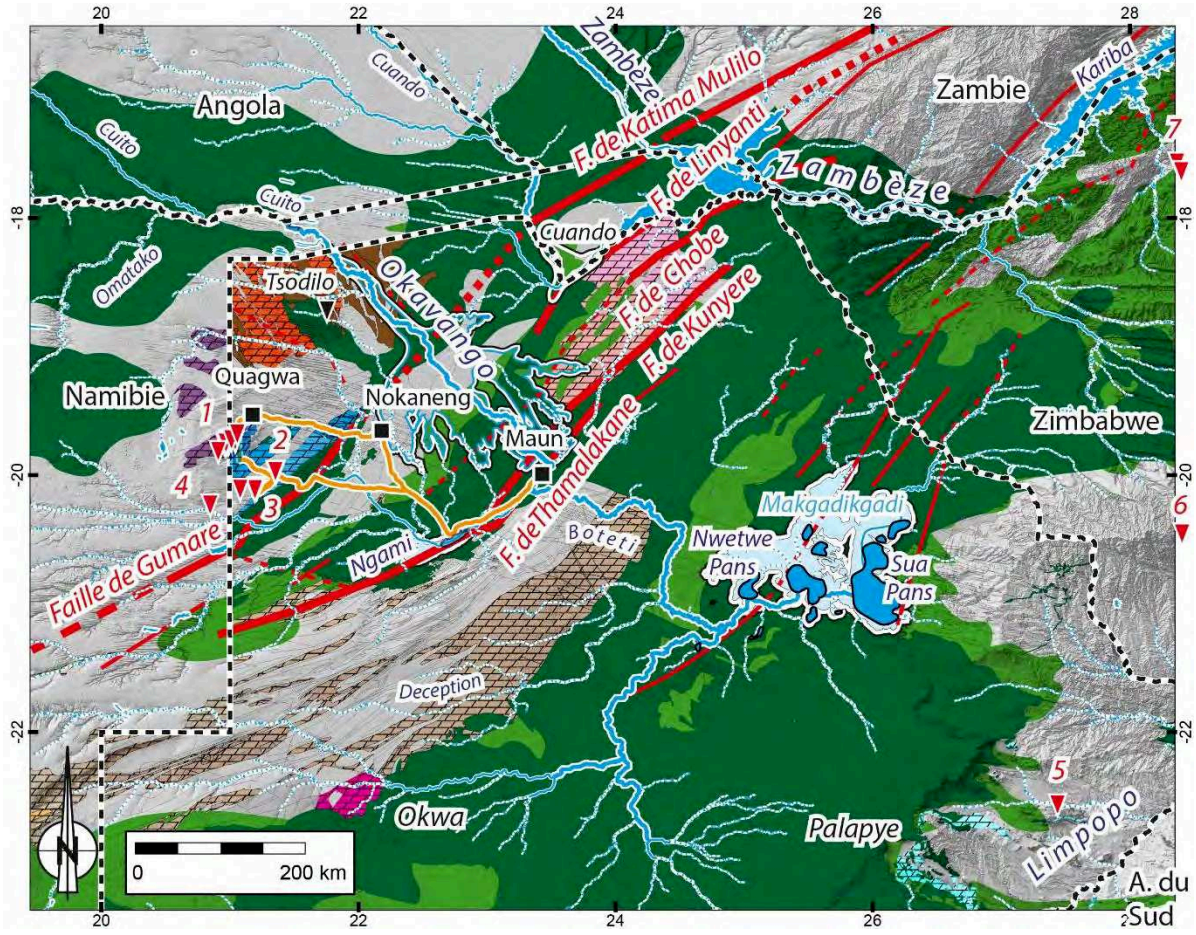


Figure 441 ATLAS n°2 : Carte géologique pré-Kalahari des formations carbonatées et du Karoo au nord-ouest du Botswana.

Numéro des karsts :
1 : *Aha Hills*
2 : *Gcwihaba Hills*
3 : *Koanaka Hills* (K1 et K2 à l'est) et *Blue Cave* (K3 à l'ouest)
4 : Gam (Namibie)
5 : *Cave in Phato Ye Sebilo Gorge*
6 : Bamata (Zimbabwe)
7 : Chirisa et Chitita (Zimbabwe).



Figure 442 Légende de la carte précédente.

4.1.2.4. ATLAS n°3 : géologie du horst occidental du Rift de l'Okavango

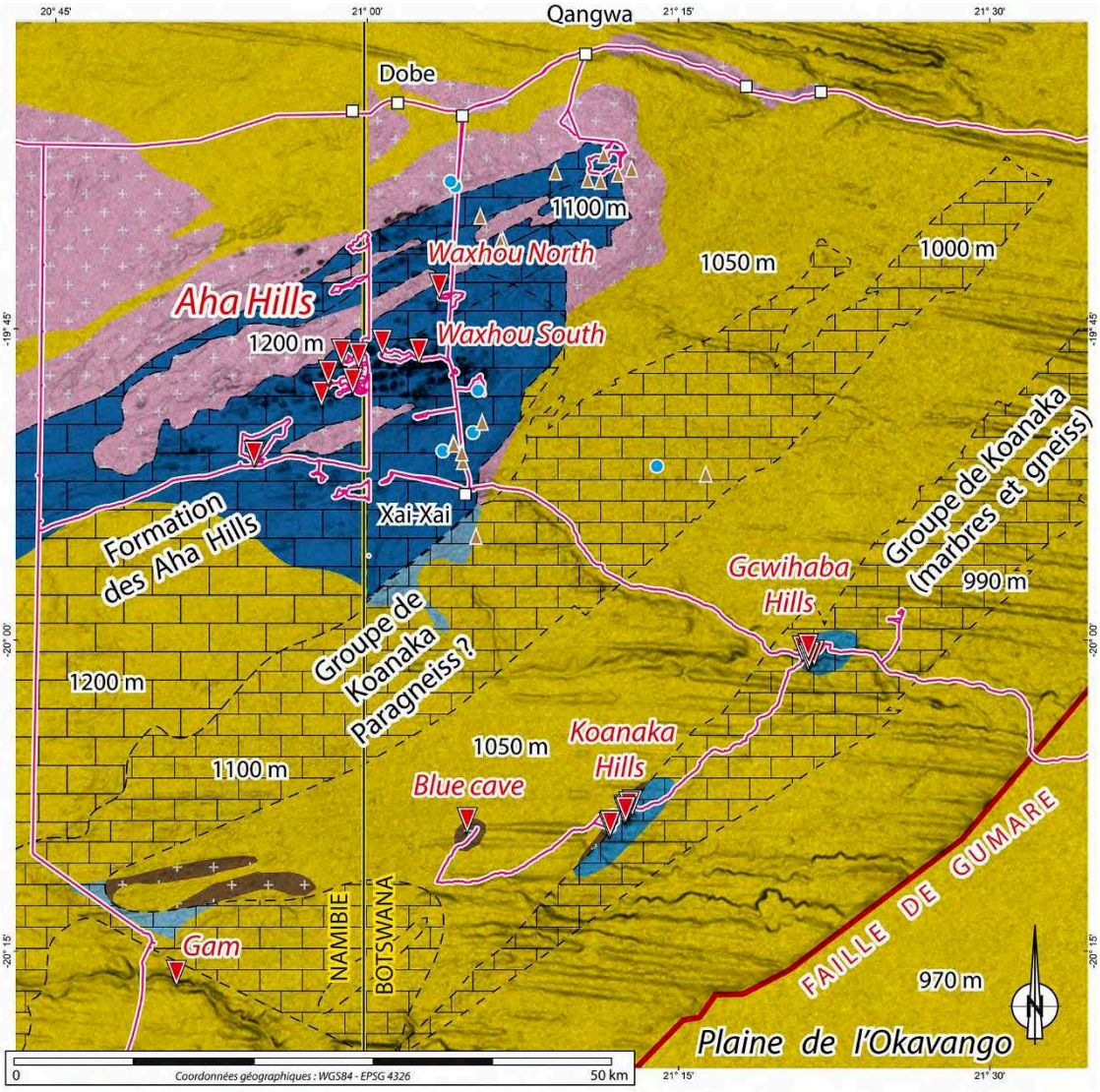
Nous approfondissons la présentation de la géologie de la région étudiée en examinant un agrandissement des cartes. À cette échelle, les collines dolomitiques étudiées sont visibles mais mal cartographiées.

4.1.2.4.1. Carte géologique du horst occidental du Rift de l'Okavango

La carte géologique plus détaillée du horst occidental du Rift de l'Okavango (Figure 443) montre, au sud-est des grottes, la faille de Gumare. Celle-ci joue un rôle important dans la structuration du paysage actuel et passé.
Elle délimite la bordure occidentale du Rift de l'Okavango (Figure 439).

- À gauche de la faille s'étend le horst de l'Okavango, où se situent les *Aha Hills*, à 1200 m d'altitude, ainsi que les *Gcwihaba Hills* et les *Koanaka Hills* à 1000 m ;
- À droite de la faille se trouve le graben, où se situe la plaine de l'Okavango, à 970 m d'altitude et le delta actuel, situé à 945 m (altitude de la ville de Maun).

La carte géologique (Figure 443) montre les formations géologiques qui affleurent en surface. Ce sont principalement les formations du groupe du Kalahari (en jaune) et les formations carbonatées (en bleu) des *Aha Hills* et les affleurements dolomitiques, de faible superficie, des collines de Gcwihaba et Koanaka.
Enfin, la carte géologique que nous avons synthétisée (Figure 444) s'inspire de la carte géologique *The Pre-Kalahari Geological Map of the Republic of Botswana* de Machacha (1997) et des cartes géologiques du *Water Surveys Botswana* et *Aqualogic* (2001, Fig.2 ; 2003, Fig.5) qui ont étudié la région. Tandis que pour la partie namibienne, nous avons utilisé l'interprétation géologique de Rankin (2015) notamment pour délimiter les dolomies de la formation des *Aha Hills* et les gneiss granitiques de Quangwadum, en rose.
Cette carte précise par des trames calcaires les formations géologiques carbonatées présentes sous le désert du Kalahari (groupe du Kalahari), et montrent notamment que les dolomies ont été partiellement recouvertes par des dépôts postérieurs du Chihabadum et du Karoo ou bien que ces dépôts antérieurs se sont installés via un système de fracturation. Ainsi, on observe que les directions des formations géologiques sont parallèles à la direction de la faille qui correspond à la direction des failles du Rift, indiquées en rouge Figure 439.
Cette carte met principalement en évidence la présence de deux formations géologiques au-niveau des collines de *Koanaka Hills* : les dolomies à l'est et le Complexe de Chihabadum à l'ouest. Ce qui est validé par nos observations sur la colline K1 de Koanaka et dans *Gecko Chamber* (Bruxelles *et al.,* 2025, Fig.3, p.38). Toutefois, en raison de la grande étendue du Désert du Kalahari, l'extension du Complexe du Chihabadum sur les cartes géologiques (Machacha, 1997 ; BGI, 2022) a peut-être été fortement surestimée vers l'ouest. Effectivement, il n'est pas mentionné sur ces cartes la colline dolomitique de *Blue Cave*. Peut-être aussi que l'échelle, au 1/1 500 000, de la carte géologique de Machacha (1997) et son caractère interprétatif fondé sur des levés aéromagnétiques, ne permettent pas de distinguer la colline de *Blue Cave*, dont la superficie est trop réduite à cette échelle. La carte aéromagnétique (Figure 447) confirme cette erreur, puisqu'elle met en évidence des variations de magnétisme au sein de ce complexe.



▲ Sommet identifié sur les MNT ● Dépression identifié sur les MNT ▼ Cavités

— Trajet des prospections entre 2015 et 2024 des missions HOMINI'KARST

Groupe du Kalahari *Tertiaire à récent*	Dunes de sables linéaires et dunes de type barkahnes. Pans, sédiments lacustres, sédiments deltaïques et lagunaires (évaporitiques), des sables indifférenciés et des graviers, marnes, calcrètes et silcrètes secondaires.
Formation des Aha Hills *Néoprotérozoïque*	Marbres dolomitiques et silex
Groupe de Koanaka *Néoprotérozoïque*	Paragneiss ? (issues du métamorphisme des marbres dolomitiques)
Groupe de Koanaka *Néoprotérozoïque*	Marbres dolomitiques
Groupe de Koanaka (marbres et gneiss) *Néoprotérozoïque*	Marbres dolomitiques et rares affleurements de gneiss granitiques
Complexe de Chihabadum *Néoprotérozoïque (1000 à 590 Ma)*	Roches ignées et méta-ignées (produites par le métamorphisme de roches volcaniques)
Groupe de Quangwadum *Paléoprotérozoïque*	Gneiss granitiques

Figure 443 ATLAS n°3 : géologie du horst occidental du Rift de l'Okavango (adaptée de la carte géologique de Machacha (1997) et des cartes du Water Surveys Botswana et Aqualogic (2001, Fig.2; 2003, Fig.5).

4.1.2.4.2. Carte géologique pré-Kalahari du horst occidental du Rift de l'Okavango

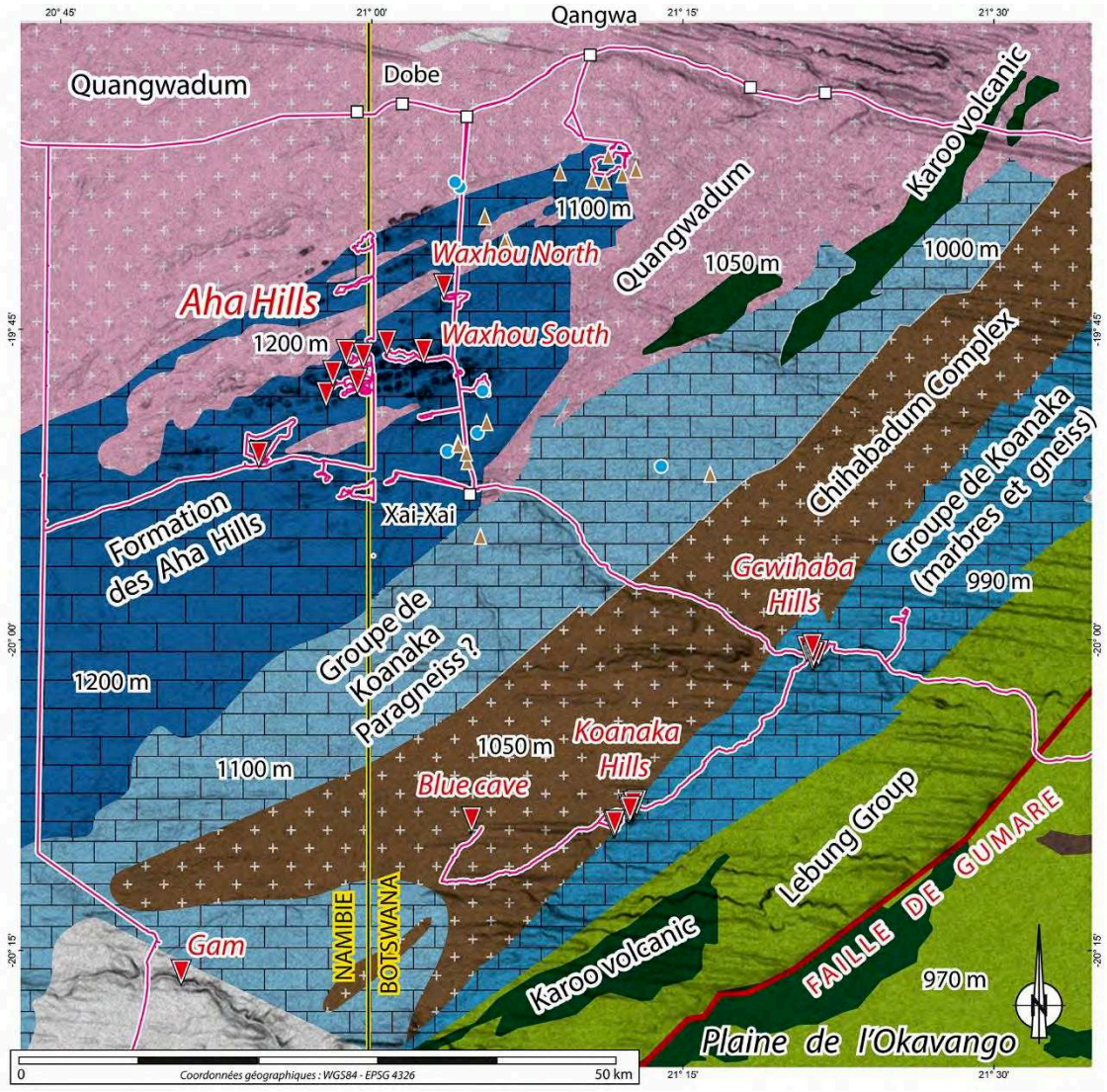


Figure 444 ATLAS n°3 : géologie pré-Kalahari du horst occidental du Rift de l'Okavango (adaptée de la carte géologique de Machacha (1997) et des cartes du Water Surveys Botswana et Aqualogic (2001, Fig.2; 2003, Fig.5). La position des forages est indiquée sur la Figure 686 (p.684).



Figure 445 Légende de la carte précédente.

1. Discussion sur la présence de dolomies au sein du Complexe de Chihabadum : le cas de Blue Cave à Koanaka Hills

La carte plus récente du BGI (2022) (Figure 446) ne permet pas non plus de distinguer la colline de *Blue Cave*. Cependant, elle propose une cartographie plus détaillée (Figure 1235 p.1282) du contact entre le Complexe de Chihabadum et les dolomies entre *Gcwihaba Hills* et *Koanaka Hills*. Cependant, ce complexe n'étant pas encore été confirmé par forage, comme l'indiquent *Water Surveys Botswana* et *Aqualogic* (2001, p.13), nous utiliserons la carte de Machacha (1997), comme *Water Surveys Botswana* et *Aqualogic* dans leurs rapports sur les secteurs de *Gcwihaba Hills* et *Koanaka Hills* de 2001(Fig.2) et de 2003 (Fig.5).

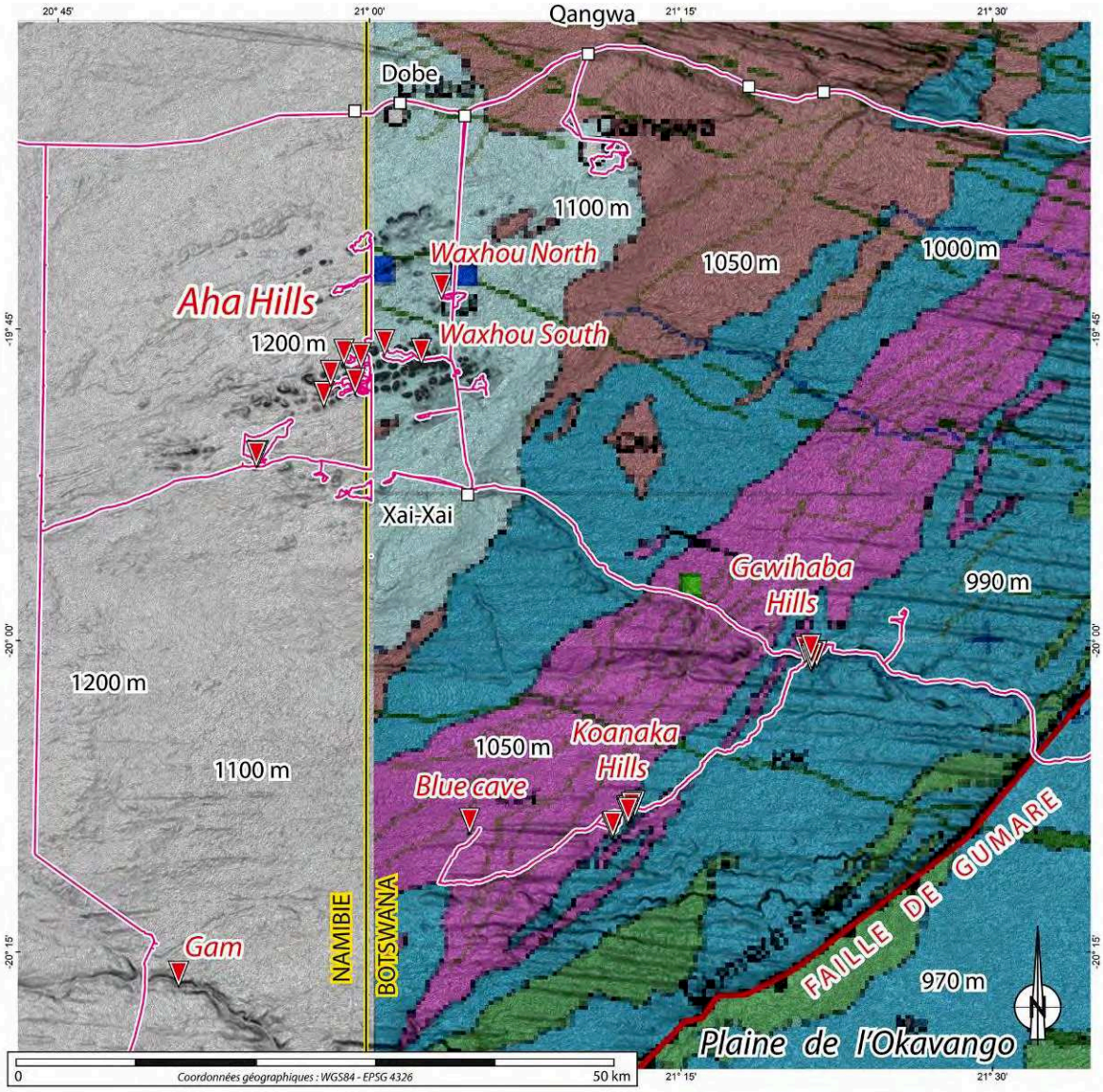


Figure 446 ATLAS n°3 : géologique pré-Kalahari (BGI, 2022, modifié).

Ces éléments révèlent qu'il est possible que d'autres collines dolomitiques, ainsi que d'autres grottes, affleurent en surface dans la zone cartographiée comme appartenant au **Complexe de Chihabadum**. Dans ce secteur, la version des levés aéromagnétiques de Lehmann (2015, Fig.7, p.179) (Figure 447) met en évidence des zones magnétiques en relief grâce à l'utilisation d'un ombrage. L'hypothèse la plus simple consisterait à considérer que les secteurs magnétiquement « plats » correspondent à des dolomies. Nous pourrions alors prolonger vers le nord-ouest les carbonates situés au sud-ouest de la colline de *Blue Cave*, de manière à les intégrer à celle-ci comme l'indique le trait en pointillé orange de la Figure 447, sans certitude. Cette observation nous incite à rechercher systématiquement des collines au sein de cet ensemble et à réexaminer les levés aéromagnétiques. Nous reviendrons sur cette problématique en annexe, où une autre interprétation cartographique de ces levés aéromagnétiques sera présentée (Figure 1253 et Figure 1255 p.1300).

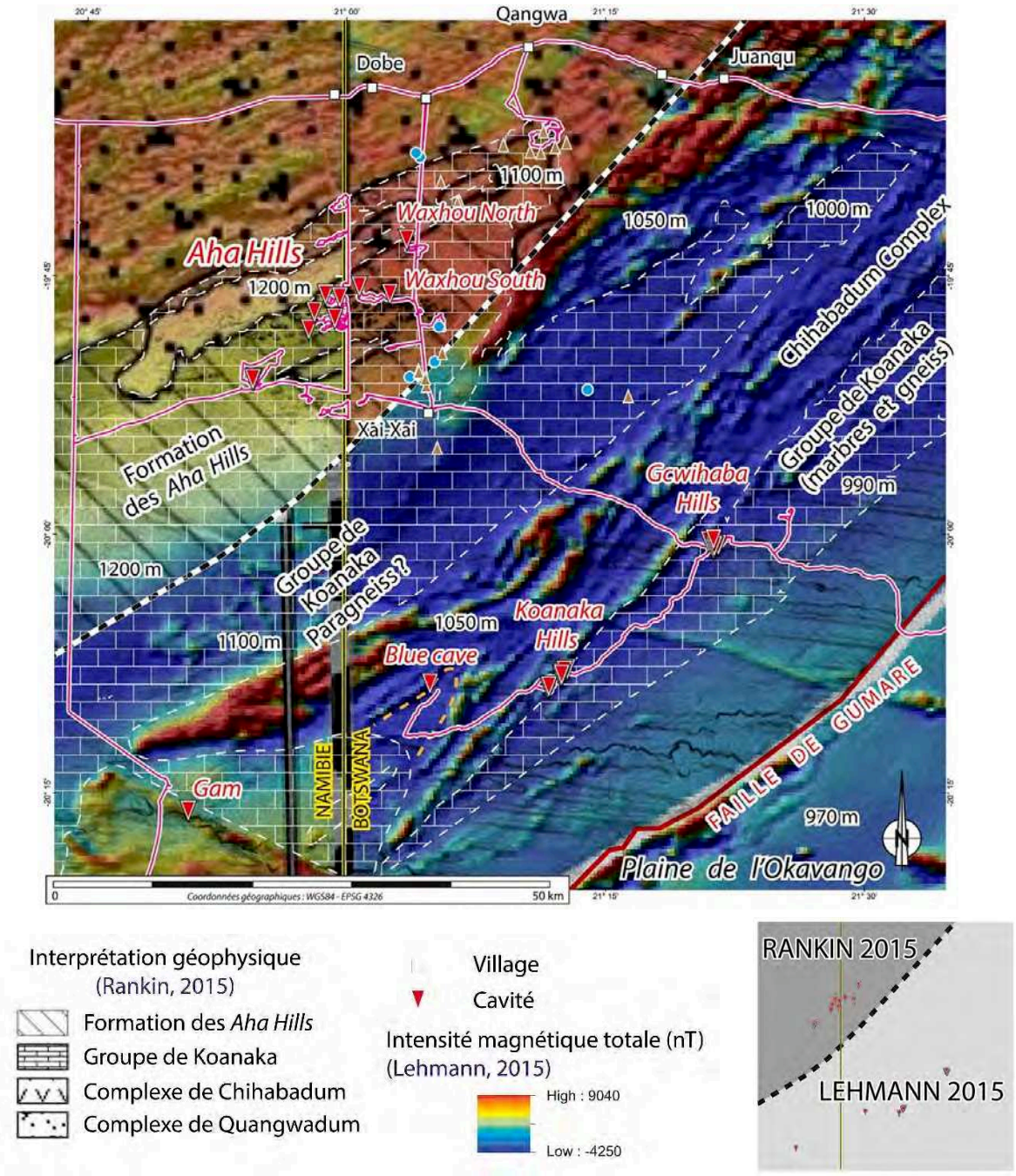


Figure 447 ATLAS n°3 : levés aéromagnétiques d'après Lehmann (2015, Fig.7, p.179) et Rankin (2015, Fig.6.19, p.190) pour la partie namibienne des Aha Hills. Les trames blanches, qui ne sont pas indiquées en légende signalent les formations carbonatées sous couverture ou subaffleurantes.

La ligne en pointillée entre Xai-Xai et Juanqu indique que deux images différentes de levés aéromagnétiques ont été utilisées : Lehmann (2015, Fig.7, p.179) (Figure 1230 p.1277) et Rankin (2015, Fig.6.19, p.190) pour la partie namibienne des *Aha Hills*.

4.1.2.5. ATLAS n°4 : secteurs prospectés

Nous allons maintenant analyser les paysages à partir des images satellites (Figure 448, Figure 449 et Figure 454), superposées à des fonds de cartes calculés à partir des MNT (modèle ombré, carte de pente, hypsométrie), décrits au Chapitre n°1, et complétés des données recueillies sur le terrain et des données issues des cartes géologiques.

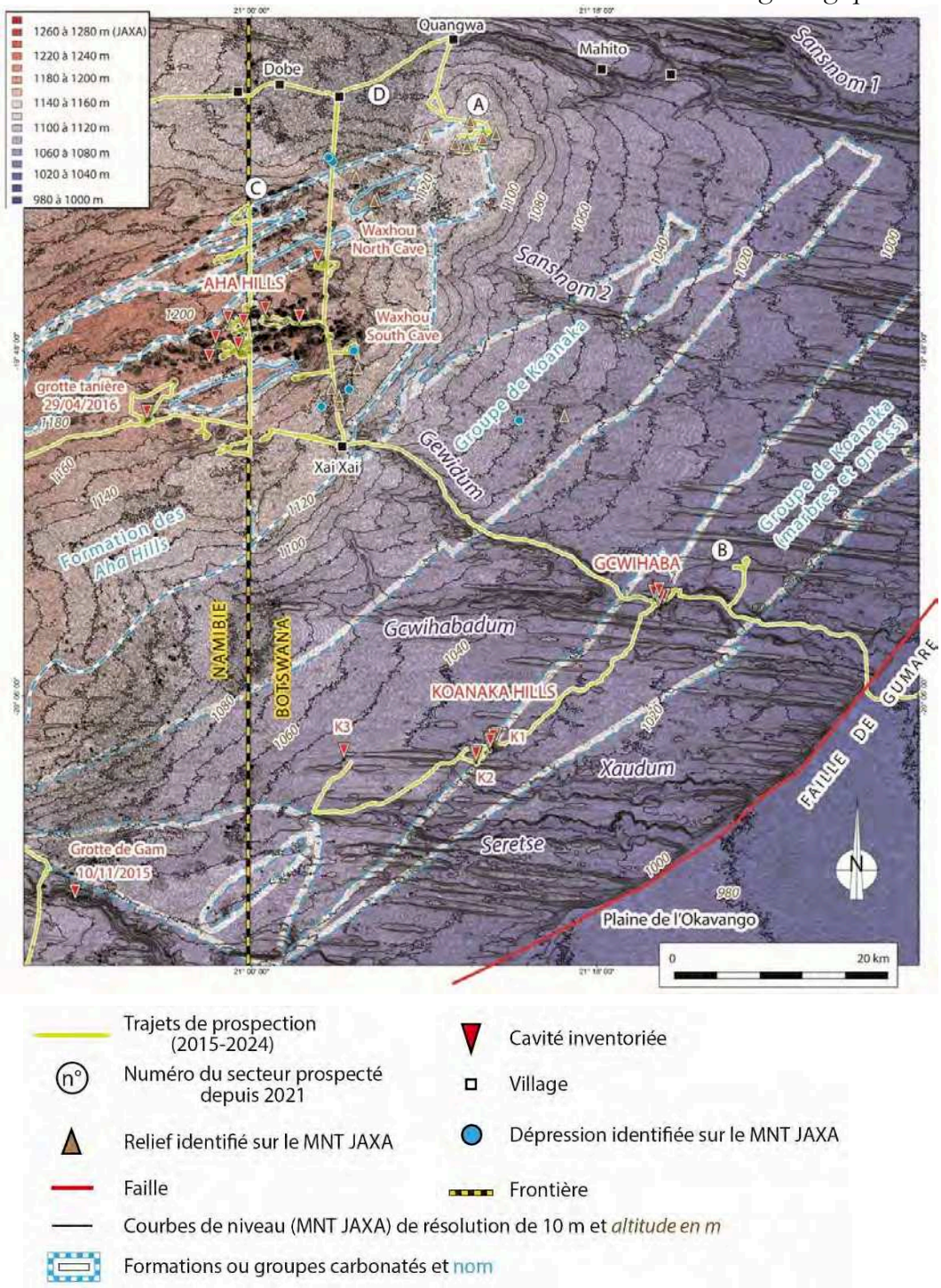


Figure 448 ATLAS n°4 : Hypsométrie et prospections de 2015 à 2024 dans le nord-ouest du Botswana.

Les secteurs prospectés et indiqués sur les cartes suivantes (numéro et lettre) seront décrits plus loin (p.534).

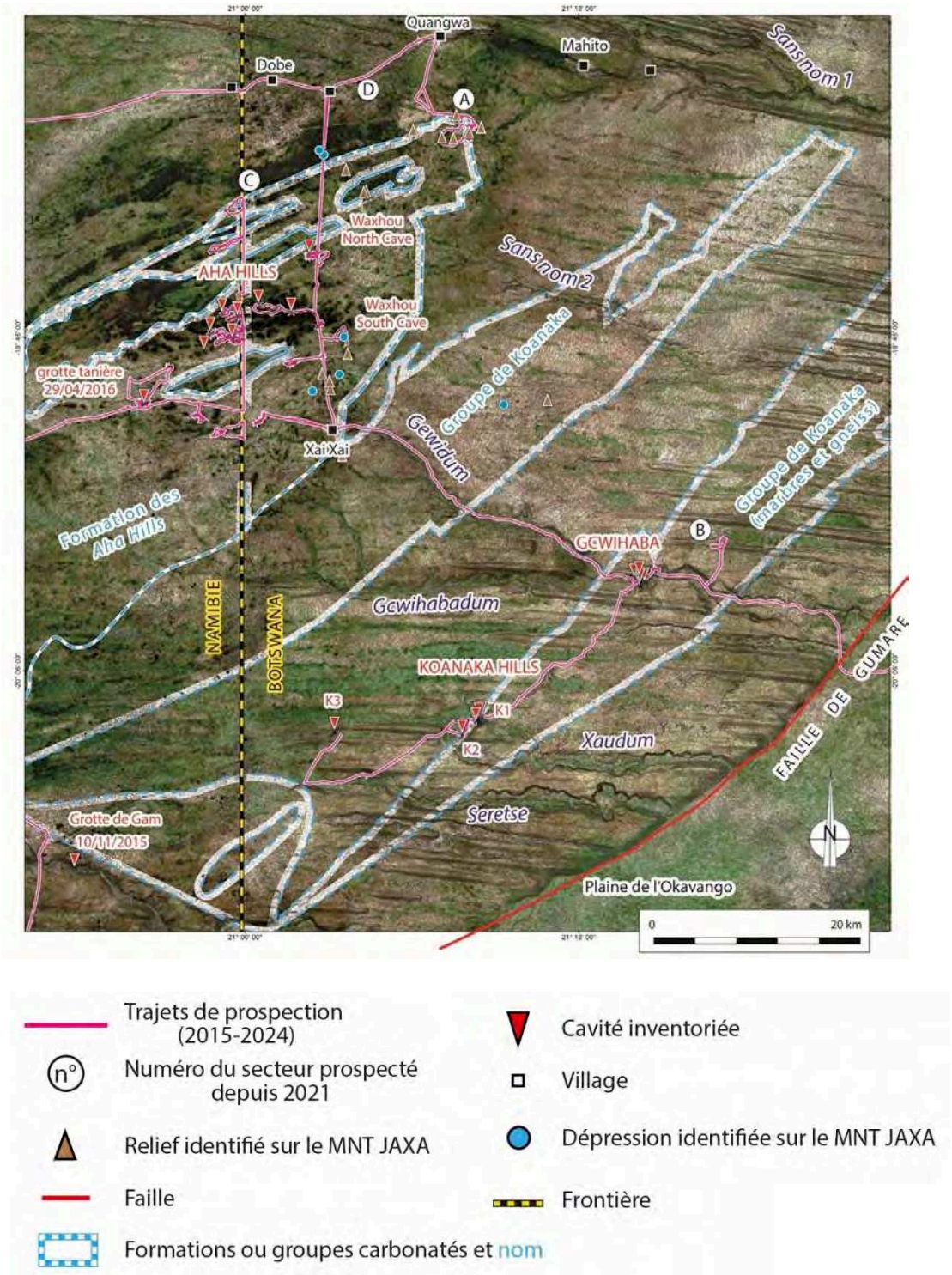


Figure 449 ATLAS n°4 : Image satellite (ARCGIS WB_2016_R15) du nord-ouest du Botswana.

4.1.3. Les formations géologiques et leurs formes

Les cartes précédentes et les missions sur le terrain indiquent que trois principales formations géologiques ont été identifiées :

- les dolomies grises du Néoprotérozoïque qui forment les collines dont certaines sont karstifiées (*Aha Hills, Gcwihaba Hills et Koanaka Hills*) ;
- les sables du désert du Kalahari qui forment de longues dunes rectilignes de plus de 25 km ;
- les vastes dépressions allongées, situées en général dans les espaces interdunaires des dunes de sable et qui sont constituées en surface et en profondeur (voir la synthèse des forages p.675) de niveaux de calcrètes intercalés par des niveaux sableux. Les dunes de sables linéaires et les dépressions allongées constituées par des calcrètes appartiennent au groupe géologique du Kalahari, que nous décrirons (p. 507).

La réalisation d'un modèle ombré et la projection d'une ombre portée, calculée à partir du MNT JAXA et des logiciels SIG, décrits dans le Chapitre n°1, permet de visualiser les longues dunes linéaires de sables, cartographiées en orange ci-dessous (Figure 453à Figure 452), ainsi que les talwegs en bleu. Les pistes pour rejoindre les grottes de Gcwihaba, le village de Xai-Xai et le village de Qangwa empruntent ces talwegs. Remarquons que les talwegs, les dunes et les pistes ont généralement la même orientation est-ouest.



Figure 450 Le karst à buttes des Aha Hills (lire p.541).



Figure 451 Les collines dolomitiques karstifiées de Gcwihaba et la paléovallée de Gewidum creusée dans des dépôts lacustres (lire p.554) (Figure 771 p.775).

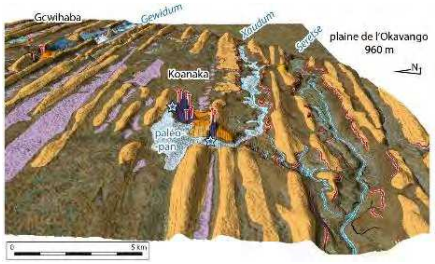


Figure 452 Les paléolacs et les collines karstifiées de Koanaka Hills (lire p.594) (Figure 836 p.813).

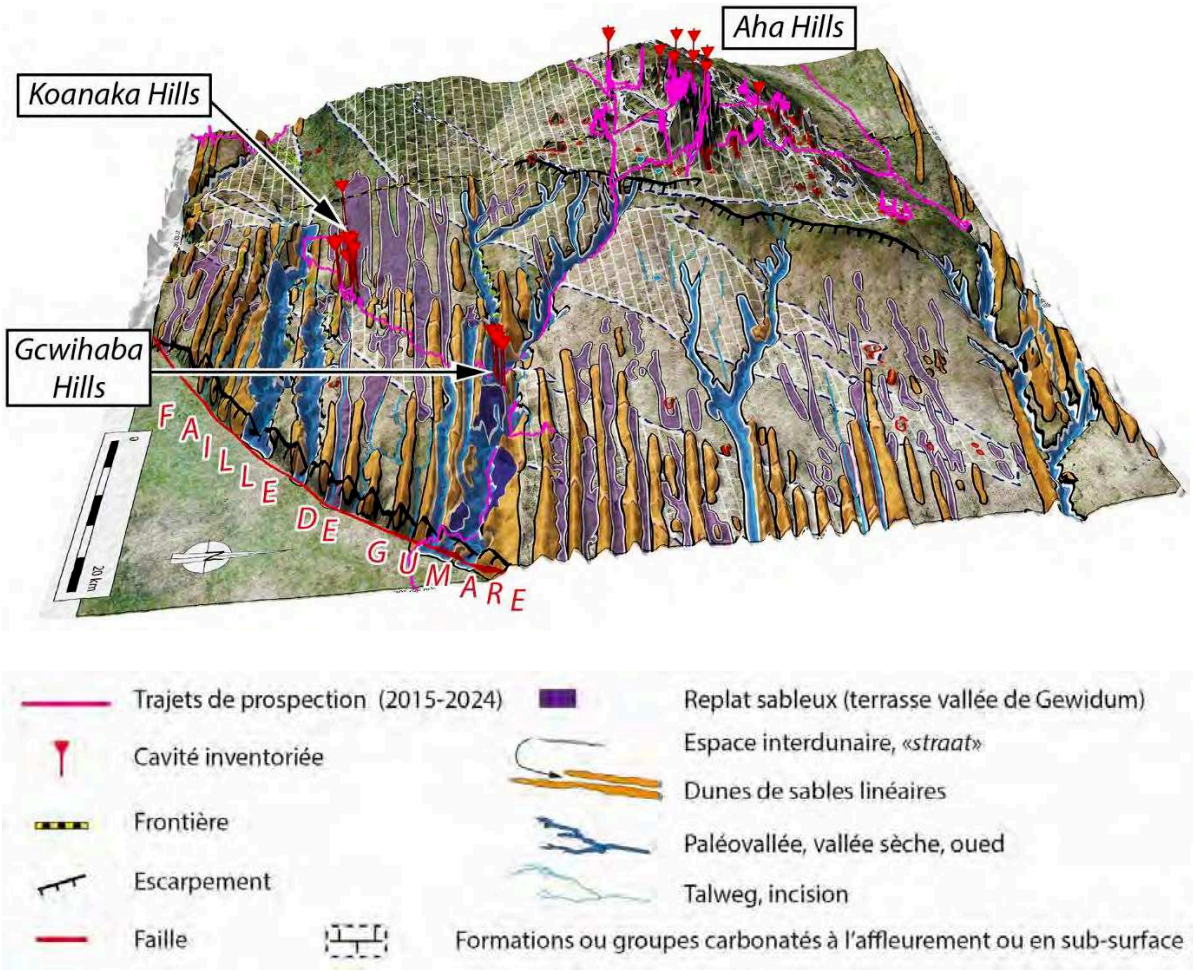


Figure 453 ATLAS n°4 : Analyse morphologique en relief.

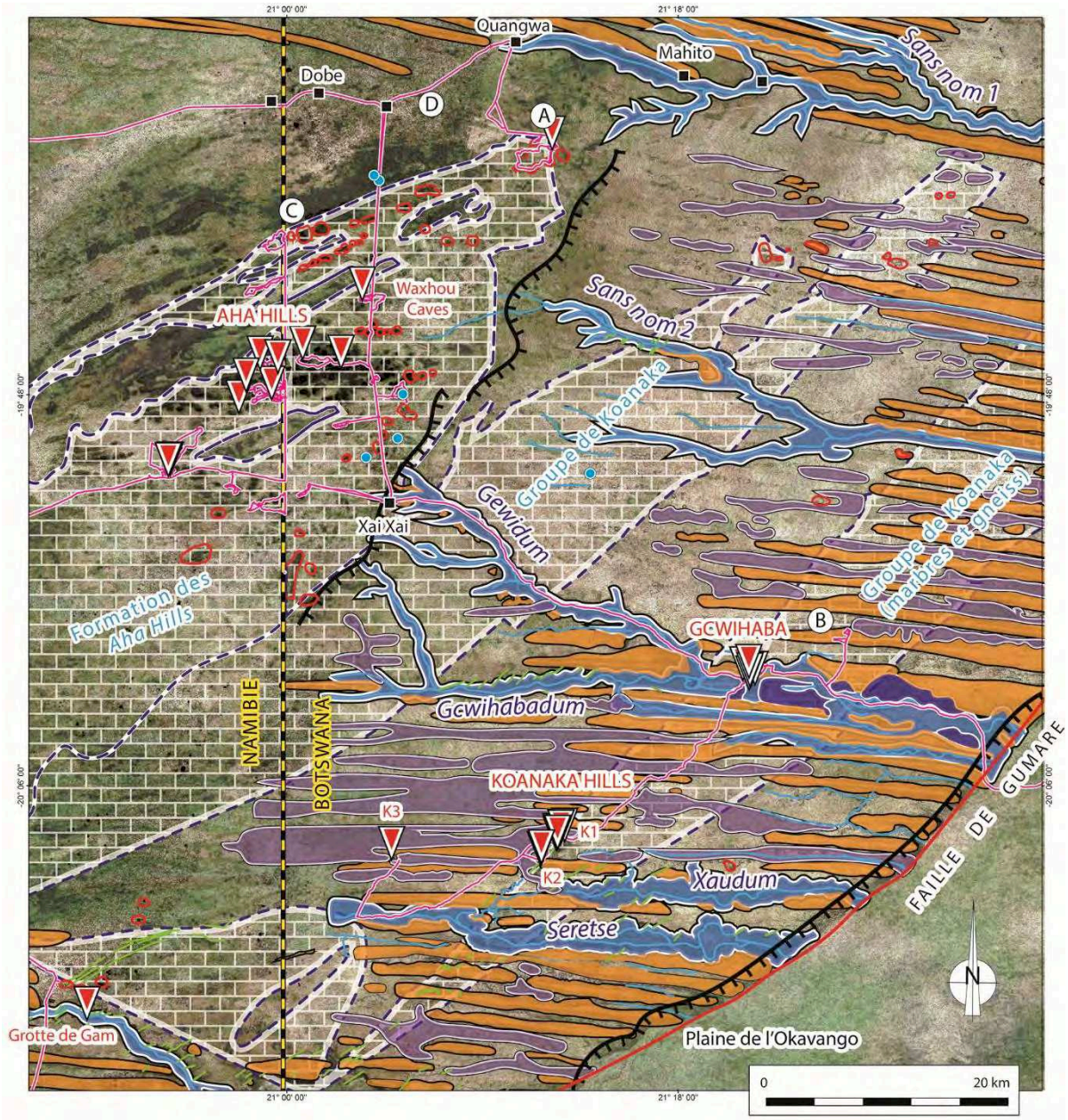


Figure 454 ATLAS n°4 : Analyse morphologique.

En vert, sont indiquées des vallées tributaires orientées NE-SO, identifiées par *Water Surveys Botswana et Aqualogic* (2001, Fig.6) (Figure 1349 p.1389). Cette orientation s'exprime à l'échelle régionale.

4.1.3.1. Les dolomies

La carte géologique (Figure 444) inspirée de la carte intitulée *The Pre-Kalahari Geological Map of the Republic of Botswana* (Machacha, 1997) au 1/1 500 000, distingue deux formations de dolomies : la **formation des *Aha Hills***, constituée de marbres dolomitiques et de silex et la **formation de *Koanaka***, constituée de marbres dolomitiques et de rares gneiss granitiques.

4.1.3.1.1. Descriptions des dolomies

La **formation des *Aha Hills*** est décrite par Ramokate (1995, p.5), au niveau du point C indiqué sur la Figure 448 (p.497). C'est : *« un marbre dolomitique gris-rose, bien stratifié (couches individuelles d'environ 1 m d'épaisseur), exposé à S 19° 40.642' E 20° 59.972'. Le marbre dolomitique est interstratifié avec du silex nodulaire blanc grisâtre et de l'argilite rose clair finement laminée et est orienté à 80°/ 20° S. Le marbre dolomitique et le silex sont intensément clivés ; le clivage est orienté à 42°/ 79° SE. Les niveaux de silex sont plissés (avec un clivage plan axial) et présentent occasionnellement des structures stromatolithiques (silicification des stromatolites). Le marbre est dolomitique à la base et calcitique avec des horizons de silex augmentant vers le sommet »* .

La **formation de Koanaka** est décrite par Cooke et Baillieul (1974) : *« sur une surface altérée, le marbre dolomitique est gris foncé, mais une cassure récente révèle une roche d'un blanc nacré lustré* (Figure 455). *Le marbre est constitué de dolomie presque pure – $CaMg(CO3)2$ – avec de légères bandes de muscovite. On pense que la dolomie est originelle plutôt que d'avoir été formée par la dolomitisation d'un calcaire. Dans le marbre dolomitique, on trouve fréquemment de fines bandes de conglomérat limoneux et des lentilles de sidérite- $FeCO3$ »*. La sidérite donnera la couleur rouge aux sables issus de l'altération des dolomies lorsqu'elles affleurent en surface (p.513). L'épaisseur des dolomies est de 1900 m (Cooke, 1975a, p.433).

Les dolomies se caractérisent par des pendages importants (Figure 458) mesurés sur la carte géologique de Gcwihaba de Cooke (1974) et Cooke et Baillieul (1974) (Figure 710 p.719). Elles forment des collines atteignant environ 30 mètres de hauteur. Certains auteurs les qualifient d'inselbergs (Ellis, 2000), bien que ce terme s'applique généralement à des reliefs de nature métamorphique, tels que les granites. Dans ce contexte, nous préférons parler de collines ou buttes karstiques. Nous verrons que le forage au pied de la colline de la grotte de Gcwihaba révèle qu'en fait la base des buttes - masquée sous des sables et des calcrètes - est située 165 m en-dessous du niveau de sol actuel, comme le montre la Figure 755 (p.759).



Figure 455 Un banc de marbre dolomitique (formation de Koanaka) près de la fouille de la colline de Bone Cave (K2) à Koanaka.

4.1.3.1.2. Âge des dolomies

La carte géologique (Figure 444) inspirée de la carte intitulée *The Pre-Kalahari Geological Map of the Republic of Botswana* (Machacha, 1997) au 1/1 500 000, indique que le Complexe de Chihabadum et le Groupe de Ghanzi sont clairement d'âge néoprotérozoïques. En revanche, l'attribution néoprotérozoïque de la formation Aha et du groupe Koanaka est présentée comme hypothétique *(Neoproterozoic ?)*.

Les dolomies du groupe de Ghanzi-Chobe *(Damara)* sont datées du Protérozoïque supérieur, entre 1020 et 530 Ma (*Department of Geological Survey report*, 2001 in Ellis 2020) ou encore entre 1000 et 590 Ma d'après les cartes géologiques du portail de la BGI.

Plus à l'est, les dolomies du groupe d'Otavi, situées en Namibie (carte p.981) (photographiées Figure 461), sont datées entre 850 et 600 Ma *(Damara supergroup)* (Goudie et Viles, 2015, Table 2.1, p.28) et entre 730 et 650 M selon Haddon (2005, p.59). Pour cet auteur, la formation des *Aha Hills* du Botswana est corrélée avec le groupe d'Otavi de Namibie, comme l'indiquent les figures indiquées en annexe (p.1278), plus précisément avec le « groupe Abenab, près de Tsumeb, à 350 km à l'ouest, où d'autres dolines sont également présentes » (Billiton, 1983 *in Water Surveys Botswana* et *Aqualogic*, 2001, p.13) (Figure 462). Ces formations seraient datées entre **850 et 600 Ma** (Super groupe de Damara) (Goudie et Viles, 2015, table 2.1, p.28).

4.1.3.1.3. Faciès des dolomies dans le nord-ouest du Botswana et à l'est de la Namibie



Figure 456 Lapiaz dolomitique et pendage important au pied de la colline de grotte de Gcwihaba (formation de Koanaka).



Figure 457 Dolomies (formation de Koanaka) à l'intérieur de la grotte de Gcwihaba, entrée nord (Source : Crochet P.).



Figure 458 Pendage vertical des dolomies (formation de Koanaka) sur le versant sud de la colline K1, près du tube d'entrée de la grotte de Gecko et des déblais du forage (n°BHZ12391).

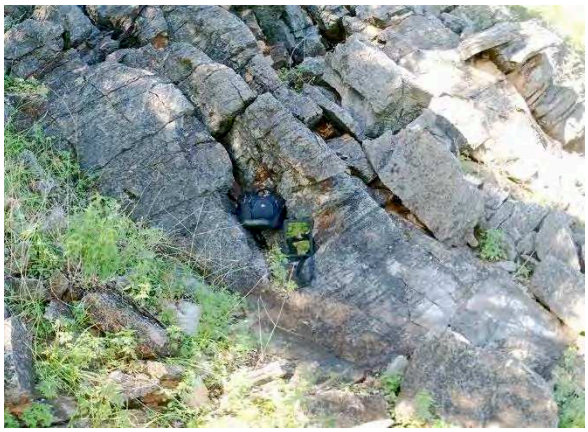


Figure 459 Pendage des dolomies (formation des Aha Hills) du versant de la colline où s'ouvre la grotte de Waxhou north.



Figure 460 Dolomie à bancs de silex à Waxhou (formation des Aha Hills).

Ces photographies prises à Harasib en Namibie montrent des analogies de faciès avec les dolomies du nord-ouest du Botswana, situées 350 km à l'ouest (carte p.981) et aussi avec les dolomies de Malmani du *Cradle of Humankind* en Afrique du Sud (Chapitre n°3).



Figure 461 Dolomies, à banc de silex (groupe d'Otavi), au niveau de la grotte de Scorpion Maze, à Harasib en Namibie (Source : Bruxelles C.).



Figure 462 Effondrement karstique dans les dolomies d'Harasib (groupe d'Otavi), à Otavi, en Namibie.

4.1.3.2. Le groupe du Kalahari

Le **groupe du Kalahari** est constitué de dépôts fluvio-lacustres et de dépôts éoliens. On y reconnait :

- les **sables du Kalahari**, organisés en champs de dunes linéaires pouvant atteindre 50 km de longueur, 2 km de largeur et 8 m de hauteur. Nous les avons représentées en orange à Gcwihaba sur la Figure 767 (p.771) et à Koanaka sur la Figure 824 (p.805) et la Figure 828 (p.809) ;
- **les calcrètes et les silcrètes,** qui sont des dépôts fluvio-lacustres ou lagunaires cantonnés à de vastes dépressions allongées, mesurant plusieurs kilomètres, principalement situées entre les dunes de sable décrites précédemment, c'est-à-dire circonscrites dans les **espaces interdunaires** (appelés « ***straats*** ») et sont principalement orientées est-ouest. Parfois des replats, alors orientés nord-sud, réunissent deux *straats* et sont constituées aussi de calcrètes (Figure 824, p.805). Les forages montrent que les calcrètes et les silcrètes peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres de profondeur et qu'elles sont parfois interstratifiées avec des niveaux sableux. Ces formations riches en argiles retiennent l'eau météorique et peuvent présenter en surface de petites cuvettes d'eau : les ***pans***. On considère que ces vastes surfaces planes constituées de calcrètes correspondent à d'anciennes étendues d'eau aujourd'hui évaporées : que l'on peut appeler des **paléopans**. Le paléopan de K1 est bien visible en violet sur la Figure 828 (p.809) et le paléopan de l'ouest est représenté en violet sur la Figure 767 (p.771). À Gcwihaba, de part et d'autre de la vallée de Gewidum, en amont et en aval, on peut émettre l'idée que ces vastes surfaces planes sont aussi des paléopans (*straats* de la Figure 740 p.738 et de la Figure 742 p.740).

Le groupe du Kalahari se divise en six formations (SACS, 1980 ; Thomas et Shaw, 1991, p.63 ; Linol *et al.*, 2015) :

- conglomérats et graviers ;
- marnes ;
- grès ;
- alluvions et dépôts lacustres, avec des croûtes dures (*duricrust*) de **calcrète**, de **silcrète** et de ferricrète ;
- sables du Kalahari, organisés en champs de dunes linéaires.

L'épaisseur du groupe du Kalahari est variable et diffère selon les auteurs, on trouve :

- 300 m (Haddon et McCarthy, 2005 ; Podgorski *et al.*, 2013 in Vainer *et al.*, 2024);
- 1000 m (Shaw et Thomas, 1993 in Thomas *et al.* 2000, p.245);
- supérieure à 180 m pour Bruxelles *et al.*, (2017, p.24);
- 70 m d'épaisseur pour Pickford et Mein (1988);
- entre 300 m et 1000 m dans le bassin du Congo (Linol, 2013 in Linol *et al.*, 2015).

De nombreux forages ont été effectués dans la région que nous étudions et nous permettent de connaitre précisément l'épaisseur de ces formations à Gcwihaba Hills (p.750) et à *Koanaka Hills* (p.801).

La discordance à la base du groupe du Kalahari correspond à la **Surface Africaine** (Linol *et al.*, 2015 ; Bäumle et al., 2019), définie dans le Chapitre n°2 (p.171).

En Namibie, ces formations recouvrent notamment des dykes du Crétacé, datés de 127 à 132 Ma, appartenant au groupe d'Etendeka (**Miller 2008 *in*** Linol *et al.*, 2015) et qui nous permettent de suggérer que ces formations s'accumuleraient à partir du Crétacé supérieur. Plus localement, au nord de *Tsodilo Hills*, sur le site OGN Vainer *et al.* (2021) datent le début du groupe du Kalahari de **3.75 Ma** (cf. infra p.827).

Ces formations traduisent une succession évolutive : à la base, des conglomérats et graviers fluviatiles se déposent dans des chenaux, ceux-ci sont suivis de dépôts lacustres et palustres (calcrètes, silcrètes et *duricrusts*), enfin l'ensemble est en partie remobilisé par le vent formant des champs de dunes de sable, dont certains épandages de sable peuvent être récents.

Le groupe du Kalahari vient combler les grabens mis en place pendant le Rifting, comme l'indique la Figure 903 (p.896) notamment avec des sédiments apportés par l'intermédiaire des cours d'eau endoréiques suivants : Okavango, Cuando, Zambèze, visibles sur la Figure 854 (p.830). Nous détaillerons ce point p.820.

Lorsque le climat était humide et pluvieux, les grabens étaient mis en eau, ce qui a entraîné des dépôts palustres et lacustres. Par la suite, les calcrètes se sont silicifiées et ont évolué en silcrètes. Watt (1980) citant Cooke (1975) explique que les calcrètes se sont formées durant des épisodes semi-arides, tandis que la formation des silcrètes et la migration des dunes de sable sont associées aux périodes arides. Lorsque le climat était aride, l'érosion était intense et produisait des sables qui, mobilisés par le vent, se sont organisés en champs de dunes linéaires.

En 2003, une nouvelle interprétation de ces formations du Kalahari considère qu'elles sont en partie liées à une altération sur place des substrats. Ils interprètent alors les forages en trois catégories (*Water Surveys Botswana* et *Aqualogic*, 2003, Fig.2 ; Mc Farlane *et al.,* 2005) (Figure 690, Figure 692, Figure 693, Figure 695 p.690 et Figure 703 p.703) :

- les roches en place *(fresh rocks)* ;
- une partie transitoire entre la roche saine et la roche altérée *(saprock) ;*
- les roches altérées, riches en argile (saprolites).

Ces formations n'étant plus considérées comme seulement des apports allochtones il y a une partie de ces roches qui est autochtone (*Water Surveys Botswana* et *Aqualogic*, 2003 ; MC Farlane *et al.,* 2010) (Voir interprétations des données de forages Figure 690 p.690).

4.1.3.2.1. Formes : des champs de paléodunes

Les sables éoliens sont organisés en champs de dunes linéaires de plus de 50 km de longueur, orientées N95° (O-E). Nos mesures sur les MNT, effectuées grâce au logiciel SIG et décrites au Chapitre n°1, permettent de caractériser ces dunes : leur hauteur moyenne est de 8 m, leur largeur de 1,5 km et leur amplitude (c'est-à-dire la distance entre deux sommets) d'environ 2,5 km (Figure 463, Figure 464 et Figure 773 p.777).

Elles auraient initialement atteint 60 m de hauteur selon Groove (1969), cité dans Mc Farlane *et al.* (2005), mais cette estimation nous interroge. La construction et la dégradation des dunes de sable sont discutées par Farlane et al., (2005) notamment l'abaissement des crêtes pendant les périodes humides et les problèmes de datations, que nous verrons par la suite (p.846).

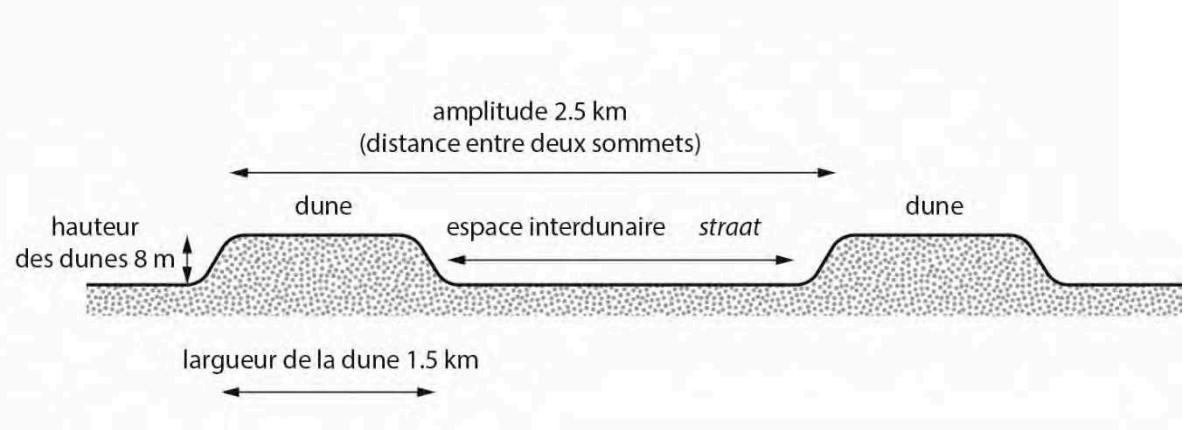


Figure 463 Caractéristiques physiques des dunes de la région de Gcwihaba, mesurées à partir des données du MNT JAXA et schématisées ici (pas à l'échelle).

Remarque :

Les premières analyses des reliefs par satellite réalisées par Benjamin Lans en 2016 indiquent que : *« les zones sableuses et la végétation du terrain d'étude créent beaucoup d'échos radar parasites, qui génèrent une topographie fantôme (présence de dunes et de dépressions sur le MNT, mais qui n'existent pas en réalité), ainsi que de fausses ondulations du terrain à grande échelle »* (Bruxelles *et al.,* 2016, p.19). Aujourd'hui, nous confirmons la présence des dunes.

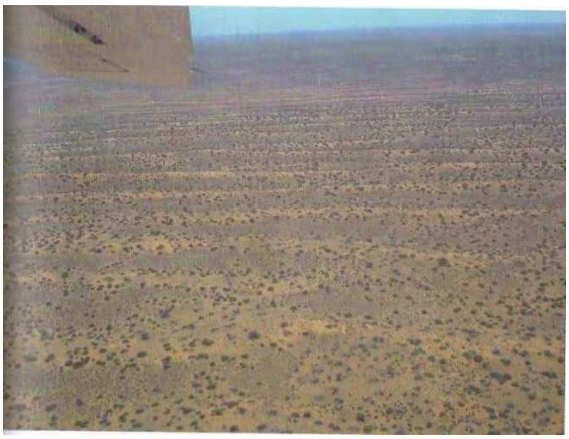


Figure 464 Dunes de sable linéaires, vues par avion, du désert du Kalahari au Botswana (Source : Thomas et Wiggs, 2022. Fig.8.2 p.133).

Le traitement des données satellites (MNT) en modèles ombrés (cf. Chapitre n°1 p.56) permet de distinguer plusieurs morphologies des sables : les dunes linéaires et leurs espaces interdunaires, des dunes en lunettes, les barkhanes, etc. (Thomas et Shaw, 1991, Table 6.1, p.142 et fig.6.1, p.143). Cette diversité montre que l'origine des dunes et leur histoire est très complexe.

Des observations indiquent que les dépôts de sable n'apparaissent pas n'importe où, mais dans des endroits particuliers où le sol est dur. Cela peut être sur des graviers présents dans les espaces interdunaires, ou sur du sable mouillé en lien avec la présence d'une rivière. *« La différence de nature entre une surface meuble, érodable (comme un lit de sable sec) et une surface plus dure, consolidée, semble donc jouer un rôle central »* (Bourdet, 2025). Le rôle du vent a été primordial dans leur édification, mais nous verrons que l'eau a également pu jouer un rôle important, encore peu décrit jusqu'à présent.

La région étudiée est recouverte par des dunes linéaires, séparées par des espaces interdunaires - appelés *straats* - illustrés ci-dessous (*interdune* sur l'image « d » de la Figure 465) et que nous définirons plus loin (p.745). Ce champ de dunes porte le nom **« *Alab dune field* »** (Moore *et al.*, 2012). Ce sont des paléodunes, qui aujourd'hui sont fixées par la végétation et ne se déplacent plus (Ellis, 2020).

Gaudare (2024) identifie des dunes « contraintes par la présence des collines de Tsodilo » (image « c » de la Figure 465). Ce cas ressemble aux dunes édifiées à l'abri des collines de *Koanaka Hills*, représentées en orange foncé sur la Figure 839 (p.815). Nous parlerons de la présence d'un paléolac à Tsodilo plus loin (p.816).

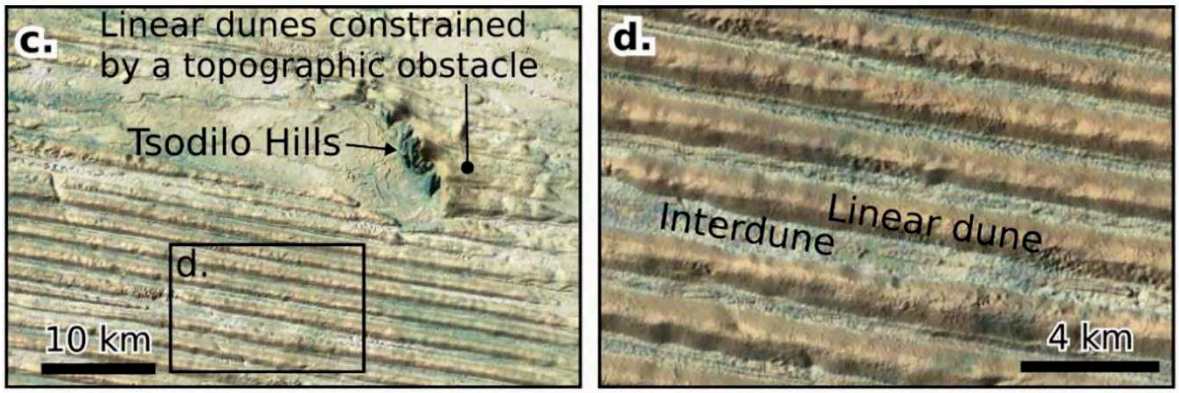


Figure 465 Dunes linéaires du groupe du Kalahari à Tsodilo (Source : Gaudare, 2024, Fig. 1.8, p.29).

Il identifie aussi que des dunes linéaires de plus de 40 km s'interrompent brutalement au niveau de la faille de Gumare (p.491) (en orange sur la Figure 467). Au sud du Rift de l'Okavango, c'est plus complexe (en jaune sur la Figure 467), certaines dunes ne semblent pas interrompues par la faille, mais elles le sont par un autre type de phénomène, non linéaire, qui pourrait correspondre à une ancienne de ligne rivage (en jaune sur la Figure 467), comme le décrivent Mc Farlane et Eckardt (2008) pour le paléolac Makgadikgadi (Figure 843 p.818). Cette faille de Gumare correspondrait à une ancienne ligne de rivage du paléolac *Deception* selon Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Fig.3B) (Figure 854 p.830). Nous reprendrons l'analyse de ce secteur plus tard.

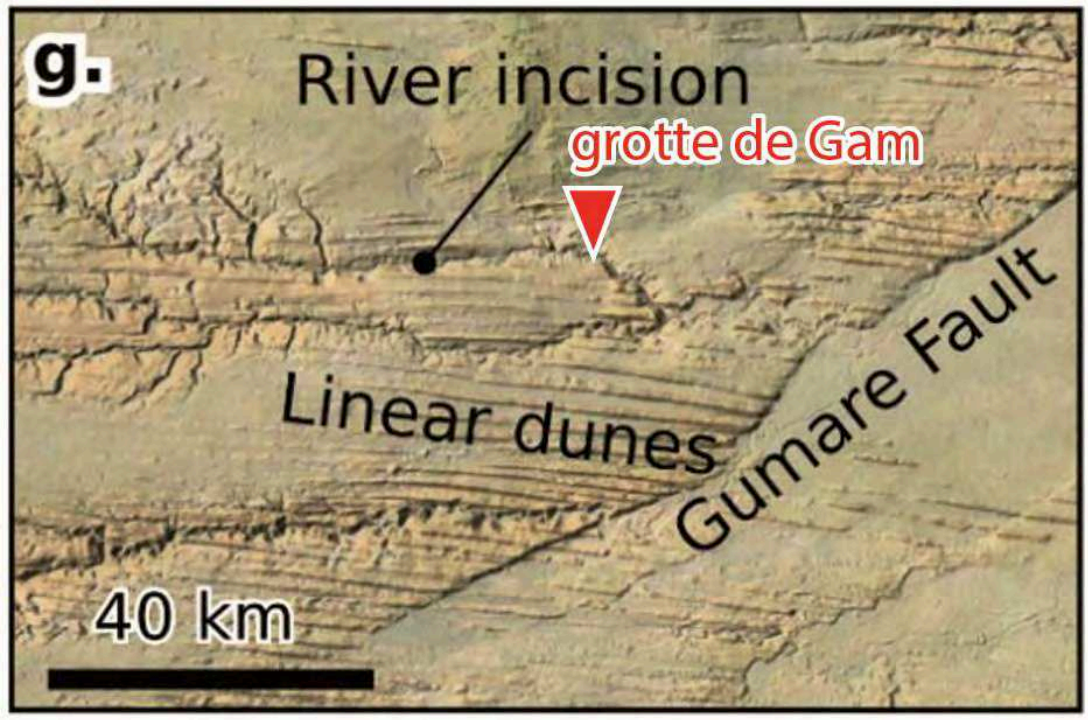


Figure 466 Interruption des dunes par la faille de Gumare (Source : Gaudare, 2024, Fig. 1.8, p.29, modifié).

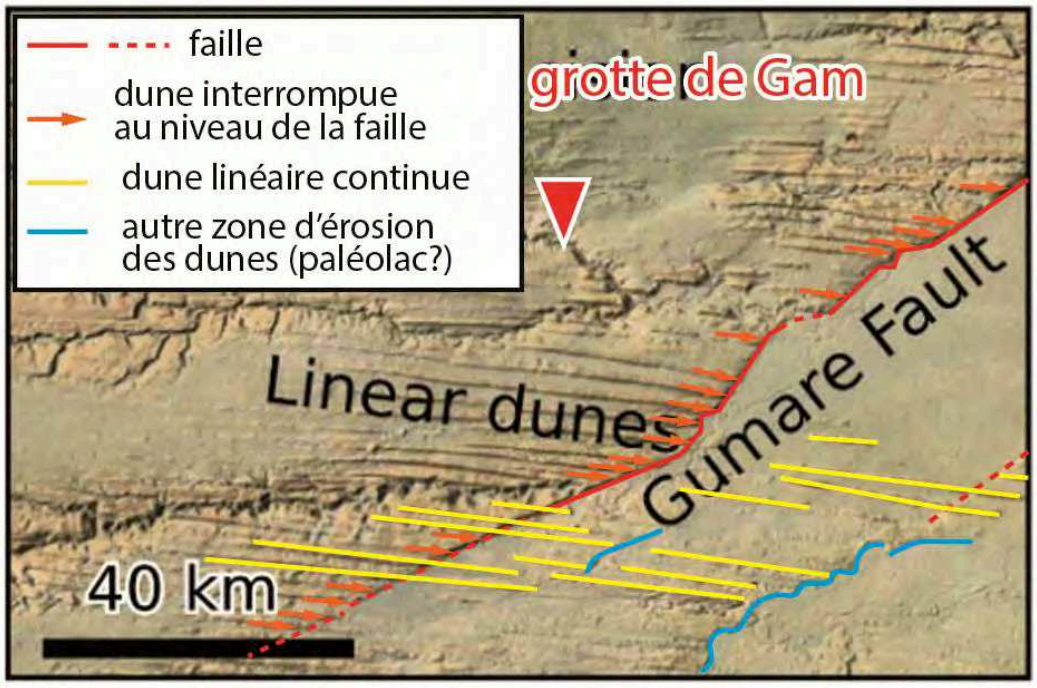


Figure 467 Analyse des dunes au sud du Rift de l'Okavango.

4.1.3.2.2. Formation : plusieurs types de sables forment les Sables du Kalahari

On distingue plusieurs couleurs de sables : des sables rouges, des sables gris et des sables clairs. Les sables gris et les sables clairs se trouvent dans les espaces interdunaires des dunes linéaires (Figure 468), mais également sur les replats où affleurent des calcrètes résiduels, comme au pied de la colline E de Gcwihaba (p.730). Ces sables clairs pourraient provenir de l'érosion mécanique des calcrètes. Tandis que les sables rouges se rencontrent, quant à eux, à deux endroits distincts : au sommet des dunes de sable (Figure 469) et aussi à proximité des affleurement ou sub-affleurements de dolomies, notamment au pied des collines des *Aha Hills*, de *Gcwihaba Hills* et de *Koanaka Hills*.



Figure 468 Sables blanc dans les espaces interdunaires.



Figure 469 Sables rouges au sommet des dunes (Source : Bruxelles C.).

Le schéma suivant (Figure 470) de Poldervaart (1955) montre que les sables rouges présents au sommet des dunes de sable ne se limitent pas à une fine couche superficielle d'altération, mais constituent en fait une dune plus ancienne dont les flancs sont recouverts de sables clairs plus récents. Nous étudierons avec attention ces longues dunes de sable rectilignes.

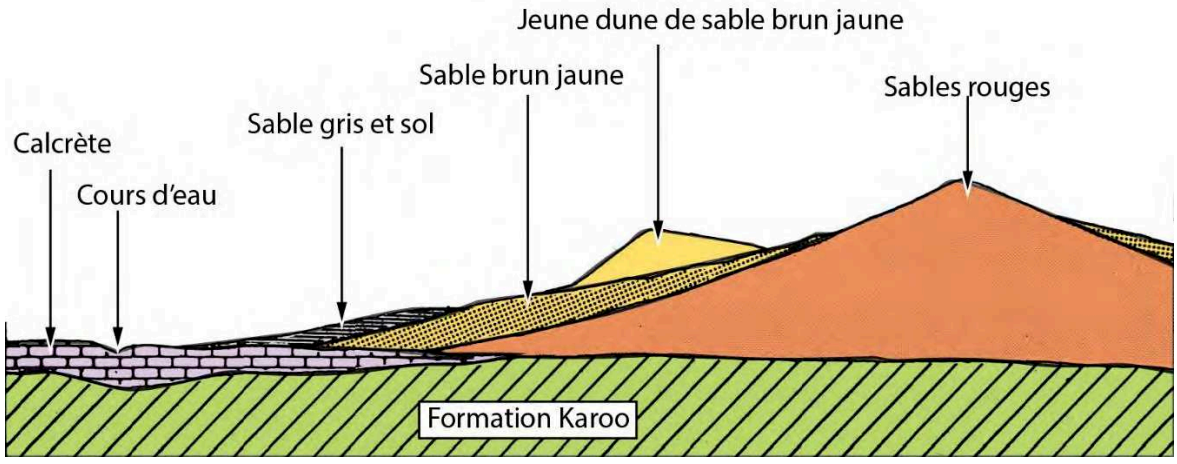
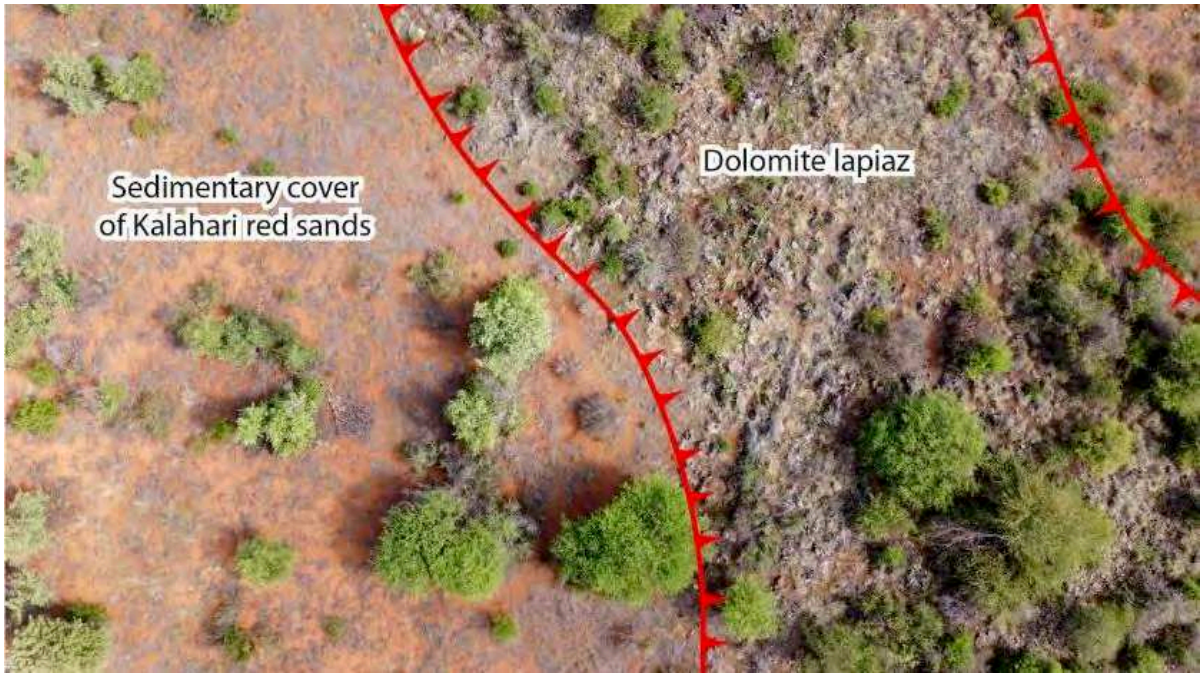


Figure 470 Schéma de la section d'une dune de sables à Artesia-Palla Road (Poldervaart, 1955, modifié).

Cooke et Baillieul (1974) décrivent aussi : *« que les sables récents recouvrent les pentes inférieures des collines et le lit de la rivière. Leur couleur varie du rouge vif sur les niveaux supérieurs au blanc le long de la rivière. Ce changement de couleur est probablement lié à la quantité d'eau disponible localement pour éliminer la couche rouge d'oxyde de fer des grains de sable. Le sable de la région des collines de Gcwihaba est probablement un matériau redistribué provenant du système dunaire voisin ».*

1. Des sables rouges indiquant la présence des dolomies



Dès 2016, l'équipe de Laurent Bruxelles a identifié, sur les images satellites (Figure 471) et sur le terrain, la présence de sols rouges au contact des dolomies, notamment lorsque les dolomies sont recouvertes par une faible épaisseur de sables. Ces sols rouges constituent alors un indicateur fiable de la présence de dolomies subaffleurantes. Ce seront des cibles à prospecter pour la recherche de grottes et de remplissages ossifères.

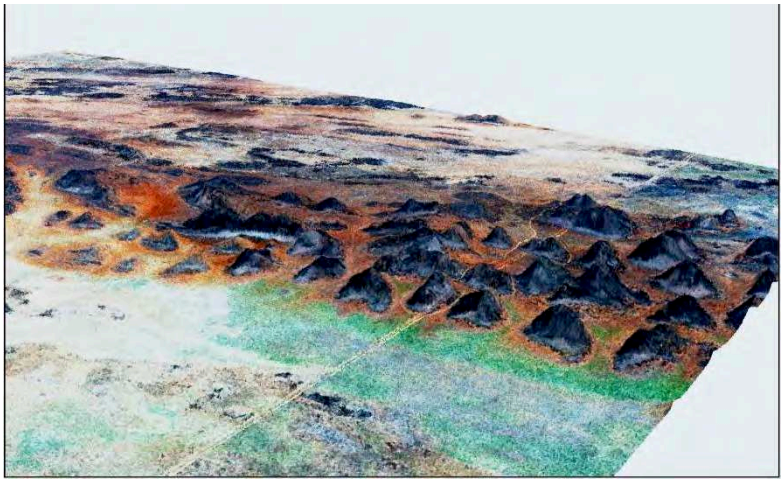


Figure 471 Identification des auréoles de sols rouges autour des buttes dolomitiques dans les Aha Hills sur les blocs 2.5D produit par Benjamin Lans (Source : Bruxelles et al., 2016).

> *« Seule l'auréole rouge d'argile témoigne de la présence d'un affleurement calcaire, même en l'absence de tout relief topographique » (Bruxelles et al., 2016, p.38).*
> *« Nous avons exploré la partie sud des Aha Hills, une zone où les pointements calcaires sont plus modestes. Le substrat karstifiable émerge à peine de la couverture sableuse. À peine perceptible dans le paysage, il est le plus souvent identifiable en photo aérienne par l'auréole orangée plus argileuse qui l'entoure » (Bruxelles et al., 2018, p.20 ; Bruxelles et al., 2020, p.45).*

Ces sols rouges résulteraient de l'altération des dolomies, notamment en lien avec la décomposition de la matière organique qu'elles contiennent (comm. orale Bruxelles).

Le forage n°9698 ci-dessous (Figure 472) analysé par *Water Surveys Botswana* et *Aqualogic* (2003) permet de montrer l'évolution du profil d'altération passant des dolomies sombres en profondeur à des sols rouges en surface. Les sols rouges sont composés d'argiles, de kaolinite, de chlorite, de dolomie, de muscovite et de quartz.

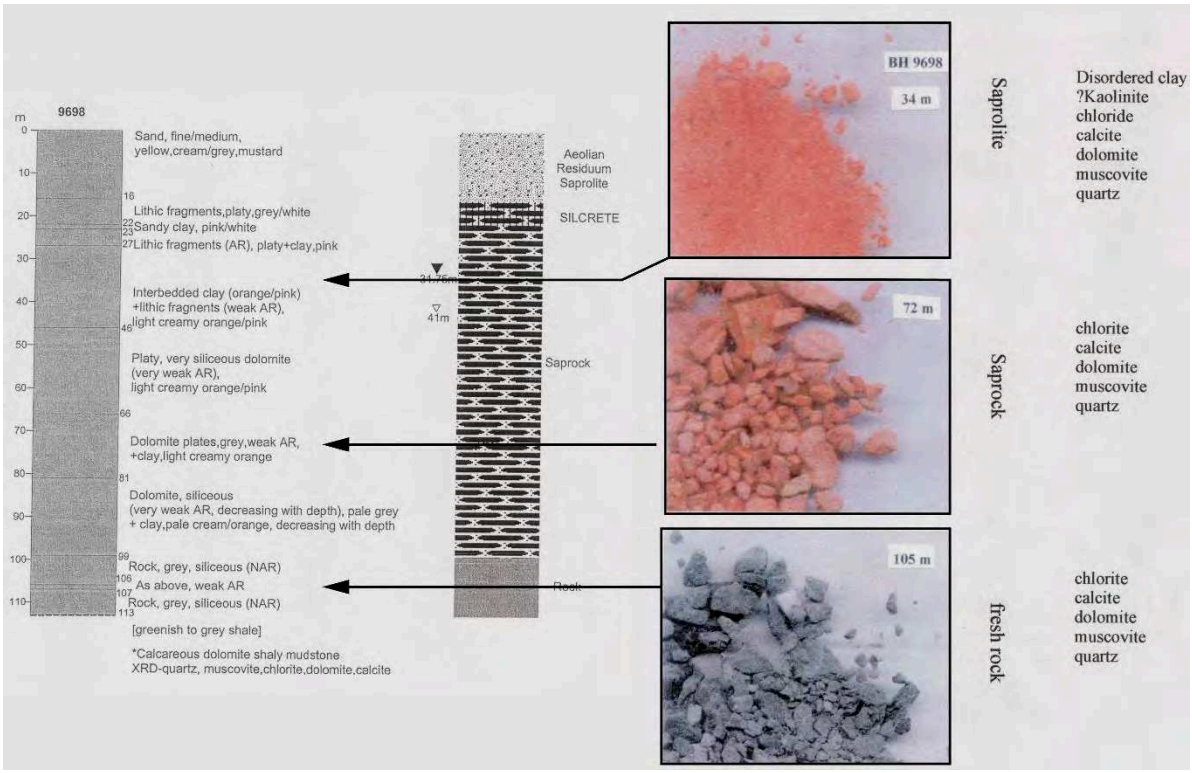


Figure 472 Profil d'altération révélé par le forage n°9698 (Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003, Fig.7, modifié).

La dolomie est décrite par Cooke et Baillieul (1974) comme contenir : « *fréquemment de fines bandes de conglomérat limoneux et des lentilles de sidérite-FeCO3* ». La sidérite pourrait aussi être une autre source pour expliquer la couleur rouge des sables.
Ellis (2020, p.12) écrit concernant la grotte de Dimapo que « *Dimapo, qui signifie « pierres tranchantes », le nom donné à la grotte par les spéléologues de Gcwihaba. Il est ainsi décrit en raison des* ***spaths de sidérite*** *qui dépassent des parois. Nous avons décrit en parlant de la fantômisation que les bancs de silex, présents dans les dolomies, sont moins sensibles à la fantômisation apparaissaient en saillis après l'évacuation du fantôme* (Figure 374 p.417). Peut-être que c'est le cas ici avec les spaths de sidérite ou bien il est possible que les bancs de silices et les spaths de sidérites soient la même chose.

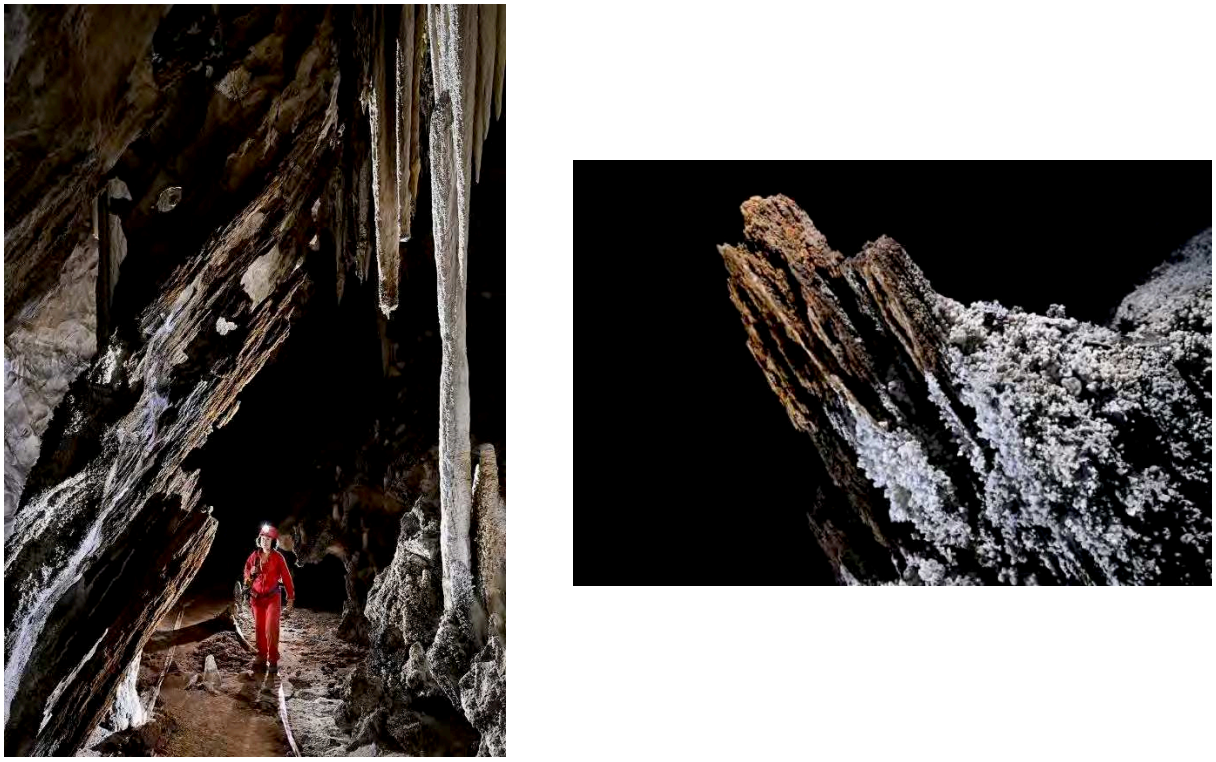


Figure 473 Lame rocheuse de la grotte de Wadoum et détail à droite (Source : Crochet P.).



Figure 474 Lame rocheuse de Blue Cave (Source : Crochet P.).



Figure 475 Lame rocheuse de Blue Cave (Source : Crochet P.).

Pour (Watt, 1980), *« la couleur rouge des sables est due à l'hématite et aux couches limonitiques (terminologie de Brewer, 1964) autour des grains détritiques. Ce fer est attribué à l'altération in-situ des minéraux ferro-magnésiens (par exemple la biotite, la hornblende), le fer libéré migre entre les grains de la manière décrite par Walker (1967), Walker et Honea (1969) et d'autres (voir l'analyse de Van Houten, 1973) ».*

4.1.3.2.3. Les croûtes dures : calcrètes, silcrètes

Les croûtes dures, de type calcrètes et silcrètes, sont présentées brièvement ici et le seront plus en détail plus loin.

1. **Calcrètes**

Il est généralement considéré que les calcrètes sont d'origine pédogénique et datent du Quaternaire, qu'elles se sont développées en surface, illustrées en mauve sur la Figure 470 précédente (p.512), ce que serait confirmé par des traces de racines, des fentes de dessiccation ainsi que leur silicification partielle en silcrètes.

> *« La cimentation précoce de la calcite est induite par l'évaporation et/ou la perte de CO2 ce qui provoque la précipitation de la calcite en déséquilibre thermodynamique avec l'eau vadose. La calcite est également précipitée à partir d'eaux vadoses dans des calcrètes développés sur des lithologies hôtes riches en Mg, et par remontée capillaire à partir d'eaux souterraines peu profondes dans des dépressions salines » (Watts, 1980).*

Dans ce cas, les calcrètes sont considérées comme des formations carbonatées liées à l'évaporation des eaux peu profondes en climat semi-aride. Elles sont appelées « croûtes de type caliche » par Salomon (2006, p.161).

D'autre part, des épaisseurs pluridécamétriques de calcrètes ont été traversées par les forages (lire p. 675), parfois sur plus de 60 m, notamment dans le paléopan de K1 et celui de K3 mais aussi à Gcwihaba. Leur origine reste discutée : s'agit-il de calcrètes comme celles citées précédemment et formées sur une ancienne surface topographique aujourd'hui transgressée ou enfouie ? Ou bien ont-elles une origine plus profonde, comme d'anciens fonds de lacs, comme le pense Watts (1980), qui les considèrent être pliocènes.

Des calcrètes sont présentes à Gcwihaba, le long des bordures des collines E et F (Figure 727 et Figure 728, p.732), ainsi qu'au niveau du vallon de Gewidum, dont les versants présentent quatre niveaux distincts de calcrètes (Figure 710 p.719), décrits en détail par Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975) (Figure 765 p.770) et cartographiés. Des brèches, des encroûtements alguaires, des coquilles de gastéropodes ou de bivalves, des diatomées et des foraminifères sont trouvés dans ces calcrètes. Nous les décrirons en détail après (p.717).

À Koanaka, on observe, en bordure des vastes surfaces planes (paléopans) et au pied des collines K1 et K2 des calcaires contenant des coquilles de gastéropodes et de bivalves, témoignant d'une ancienne proximité de plans d'eau (Affleurement n°1, n°2 et n°3 de la Figure 827 p.808). Elles pourraient correspondre aux calcrètes n°4 décrites par Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975).

Nous remarquons une certaine proximité entre les sables blanc et les calcrètes, comme à l'est de la colline E de Gcwihaba (p.733). Nous supposons que la majorité des calcrètes ont été érodées mécaniquement en sables blancs (par le vent et l'agressivité du climat). Ces sables sont encore conservés sous les sables jaune-orangé comme à Koanaka, comme le montrent nos cartographies (Figure 824 p.805).



Figure 476 De vastes superficies de calcrètes sont trouvées entre Xai-Xai et Quangwa (point C de la Figure 448 p.497).



Figure 477 Encroûtement alguaire constituant les calcrètes du pan de Koanaka, indiqué "calcrètes à oncolithes" sur la Figure 821 (p.801).



Figure 478 Replat à calcrètes au sud du talweg de Gewidum à Gcwihaba et vues en détail sur les encroûtements alguaires (Source : Auriol P.).

Poldervaart (1955) note à ce propos : « l*es relevés de forage et les observations sur le terrain indiquent que les silcrètes et les calcrètes peuvent se trouver à n'importe quel niveau dans les sables et ne font pas partie d'un horizon continu, mais sont probablement présents sous forme de lentilles intercalées de taille variable »,* comme le montrent les coupes stratigraphiques suivantes (p. 895).

Enfin, les calcrètes décrites par Watts (1980) dans la vallée de Serurume, à l'est du Botswana, seront évoquées en annexe (p.1394).

2. Silcrètes

Il existe plusieurs types de silcrètes :

- les silcrètes issues de la silicification des calcrètes ;
- les silcrètes que l'on trouve au toit des dolomies.

Pour les premières, Poldervaart (1955) précise que : *« souvent, les calcrètes se produisent immédiatement sous les silcrètes et l'examen des lames minces indique que pratiquement tous les silcrètes sont des calcrètes remplacés par de la silice. Il existe une série continue entre les silcrètes typiques, contenant peu ou pas de calcite, jusqu'aux calcrètes typiques, avec peu ou pas de silice ».*

Nous en avons identifié à Gcwihaba, à l'est de la vallée de Gewidum, où les horizons sommitaux des versants constitués de calcrètes (Figure 722 p.727) sont *« partiellement silicifiés »* (Cooke,1974, Fig.3). On les trouverait au toit des calcrètes 4 de Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975) (Figure 479) mais cette attribution reste à confirmer.



Figure 479 Silcrète trouvée au pied de la colline E de Gcwihaba.



Figure 480 Silcrète trouvée dans le vallon de Gewidum à Gcwihaba (localisation p.727).

Un autre type de roches porte aussi le nom de **silcrètes**, elles sont fréquentes au sommet des buttes dolomitiques des *Aha Hills* namibiennes (Bruxelles *et al.* 2015, p.29) mais sont liées à un processus d'altération différent, ainsi on les trouve associées à des brèches ferrugineuses (Figure 481).

Poldervaart (1955) écrit que : « l*es ferricrètes se trouvent sous les sables en plusieurs endroits mais dans presque tous les cas, les sables en question se sont redéposés ».*

Nous avons déjà discuté de ces formations oxydées, silicifiées et altérées au toit des dolomies en Afrique du Sud (p.299) comme la formation *Rooihoogte* et *Chert Breccia* du *Cradle of Humankind* (p.299).

Nous avons identifié des silcrètes dans les *Aha Hills* botswanaises, à *Waxhou North*, sous forme de jaspes rouges (Figure 482), utilisés comme matière première pour la fabrication d'outils de l'industrie *MSA*, que nous présenterons (**Figure 870** p.863). Leur nature pétrologique indique clairement que ces roches sont différentes des silcrètes développées sur les calcrètes et que leur origine est liée à d'autres processus d'altération.

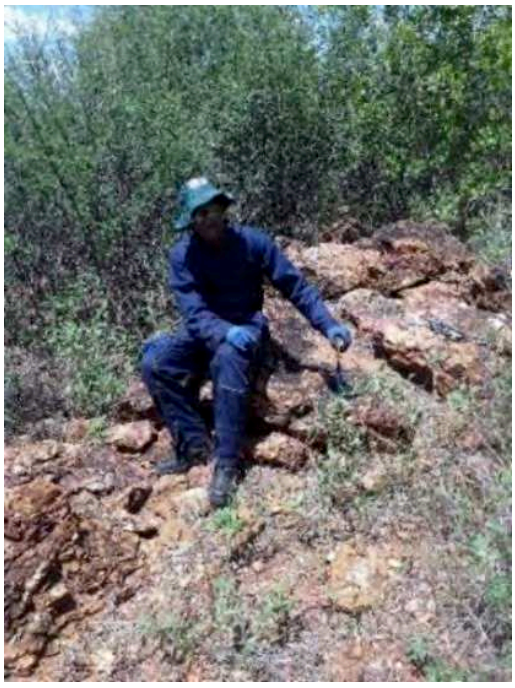


Figure 481 Affleurement de brèches ferrugineuses à Waxhou North.



Figure 482 Affleurement de jaspe rouge à Waxhou North.

4.1.3.3. Brèches pédologiques : modèle géométrique et sédimentaire

Plusieurs types de **brèches** ont été étudiés :

- au niveau des fouilles archéologiques et des prospections au Botswana (Bruxelles *et al.*, 2015 à 2022 ; Bruxelles *et al.,* 2025) et en Namibie (Dandurand *et al.*, sous presse) ;

- sur les sites du *Cradle of Humankind* en Afrique du Sud (Bruxelles, 2017, 2019, 2022) (Chapitre n°3) ;

- au niveau des grottes de Buchane au Mozambique (page suivante et Figure 1043 p.1027)

- sur la colline de Mpatha à Karonga au Malawi (p.1048),

On distingue :

- (1) les **brèches karstiques** sont des dépôts formés à l'intérieur des **grottes**, comme en attestent parfois les spéléothèmes qu'elles renferment (stalagmites ou planchers). Elles sont souvent mélangées à des ossements qui sont accumulés aussi dans la grotte. Ce sont ces brèches que nous cherchons et que nous avons décrites dans le Chapitre n°1 (p.222) ;

  (2) les brèches pédologiques se forment au toit des formations carbonatées et sous une couverture sédimentaire (comme les sables du Kalahari) et sont liées au développement du sol (pédogenèse). Elles sont supergènes, c'est-à-dire qu'elles se développent verticalement depuis la surface topographique vers le bas et jusqu'à l'intérieur des grottes s'il y en a. Ces dépôts sont généralement azoïques, c'est-à-dire dépourvus d'os et de fossiles du fait de l'acidité de ces processus de formation et du fait que ces environnements ne constituent pas de bons pièges comme les grottes ;

- (3) Il convient de noter que, pour compliquer encore la situation, des brèches sont également présentes dans les calcrètes 1 et 2 du vallon de Gewidum, à Gcwihaba (photographiées Figure 711 p.721). Elles ont été décrites par Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975). Pour ces auteurs, elles sont liées à une phase d'érosion. Effectivement, elles pourraient s'être formées à cause de la dynamique des transgressions et régressions lacustres que nous mettons en évidence plus loin (p.714). En plus des descriptions faites par les auteurs à Gcwihaba, nous pensons qu'il y en a aussi à Koanaka (p.799).

Nous présentons ici les brèches pédologiques puis le **modèle géométrique et sédimentaire des brèches pédologiques** qui explique leur distribution spatiale et leur typologie (Figure 496 p.527).

4.1.3.3.1. Formation d'une brèche pédologique supergène de la surface jusqu'à l'intérieur des grottes : exemple de la grotte de Buchane au Mozambique

Dans la grotte de Buchane, au Mozambique, nous faisons le lien entre des brèches pédologiques formées en surface et des brèches retrouvées dans la grotte et qui ont le même faciès. Ce sont des brèches supergènes, c'est-à-dire qu'elles se sont formées au toit des dolomies, et sous les couvertures sédimentaires sableuses, au niveau de la surface topographique et se sont développées verticalement jusqu'à atteindre l'intérieur des grottes notamment par les fissures. Ces brèches sont représentées en orange sur le **modèle géométrique et sédimentaire** (Figure 496). Ces brèches ne contiennent généralement pas d'ossements ou de fossiles. Nous proposons une cartographie des fissures remplies de brèches dans cette cavité plus loin (p.1009).



Figure 483 À l'intérieur de la grotte on trouve des fissures remplies de brèches.



Figure 484 Les fissures peuvent être larges.



Figure 485 Brèches résiduelles dans les fissures.



Figure 486 Idem.



Figure 487 Détail des brèches rouges trouvées dans les fissures à l'intérieur de la grotte.



Figure 488 Les brèches contiennent des dragées de fer (insolubles) qui proviennent de la surface et qui montrent le lien entre les brèches dans la grotte et la surface.



Figure 489 Idem.



Figure 490 Brèches trouvées en surface au-dessus de la grotte. Elles ont le même faciès que les brèches trouvées dans la grotte. On suppose que l'ensemble du secteur est recouvert des brèches pédologiques sous les sables.

4.1.3.3.2. Développement des brèches pédologiques sous les sables du Kalahari : exemples du Botswana

Les brèches pédologiques sont très fréquentes. On les trouve :

- sur le versant ouest de la colline de la grotte de Gcwihaba (p.566) ;
- sur la fouille à l'est de la colline K2 (à Koanaka) où ces brèches pédologiques sont mélangées aux dépôts karstiques ossifères et à stalagmites tronquées (p.645) ;
- sur les fouilles du versant nord de la colline K2 (à Koanaka) (p.647) ;
- sur la fouille au sud de la colline K1 (à Koanaka) (p.617) ;

Au Botswana, près de l'aven de *Waxhou north*, des brèches pédologiques ont été exhumées des sables du Kalahari (Figure 491 et Figure 492) et sur les buttes dolomitiques vers Quangwa (Figure 493 et Figure 494), (indiquées par un A sur la Figure 502 (p.535)).



Figure 491 Brèches pédologiques à clastes rectangulaires rosâtres et à matrice blanchâtre, près de l'aven de Waxhou north.



Figure 492 Brèches similaires à la précédente mais altérées, près de l'aven de Waxhou north.



Figure 493 Brèches à clastes de 1 cm sur les buttes vers Quangwa (Botswana).



Figure 494 Idem.

4.1.3.3.3. Modèle géométrique et sédimentaire des brèches pédologiques et typologie

Nous présentons ici le modèle géométrique et sédimentaire des brèches pédologiques (Figure 496).

Au Botswana, les brèches pédologiques sont trouvées en place sur le sommet des collines dolomitiques, ou sur les flancs, lorsque les sables ont été érodés. Ces brèches présentent un faciès similaire, elles sont rosâtres et sans fossiles.

Au niveau de ces collines dolomitiques, nous avons aussi identifié plusieurs types de reliefs, organisés en paliers, de haut en bas on trouve :

- (1) « un lapiaz aux crêtes acérées et aux cannelures profondes » (Bruxelles et al., 2016, p.53), plutôt récent, situé sur les sommets et sur les flancs des collines dolomitiques ;

- (2) des replats au pied des collines, recouverts par la plaine du Kalahari, constituée de sables, où lorsqu'ils sont exhumés on observe des dolomies aux formes arrondies, de type « *runkarren* ».

Les schémas qui constituent le **modèle géométrique et sédimentaire des brèches pédologiques** (Figure 496) essayent d'organiser ces observations. De plus, sur ces schémas, nous avons positionné plusieurs grottes théoriques afin d'expliquer les différents types de remplissages bréchifiés rencontré sur le terrain. Nous illustrons ces différents faciès par des photographies.

Commentons les différentes étapes de ce modèle.

Étape 1 : fin du Crétacé et au début du Tertiaire.

Étape 2 : abaissement de la topographie lié à l'altération et à l'érosion des sols. Formation des brèches pédologiques au toit des dolomies et sous une couverture sédimentaire et liée à la formation d'un sol.

Étape 3 : on continue l'abaissement de la topographie et la formation des brèches pédologiques. La présence des collines actuelles pourrait peut-être être due à un abaissement différentiel de la surface topographique ou à d'autres phénomènes, tels qu'une surface d'érosion liée à des transgressions lacustres, comme nous le verrons (p.892).

Étape 4 : édification des collines et mise en place des lapiaz au toit des dolomies affleurantes, soumises aux agents météoriques et à l'érosion.

Étape 5 : paysage actuel des collines du nord-ouest du Botswana, marqué par la présence de brèches pédologiques et par des formes particulières d'érosion affectant les dolomies affleurantes.

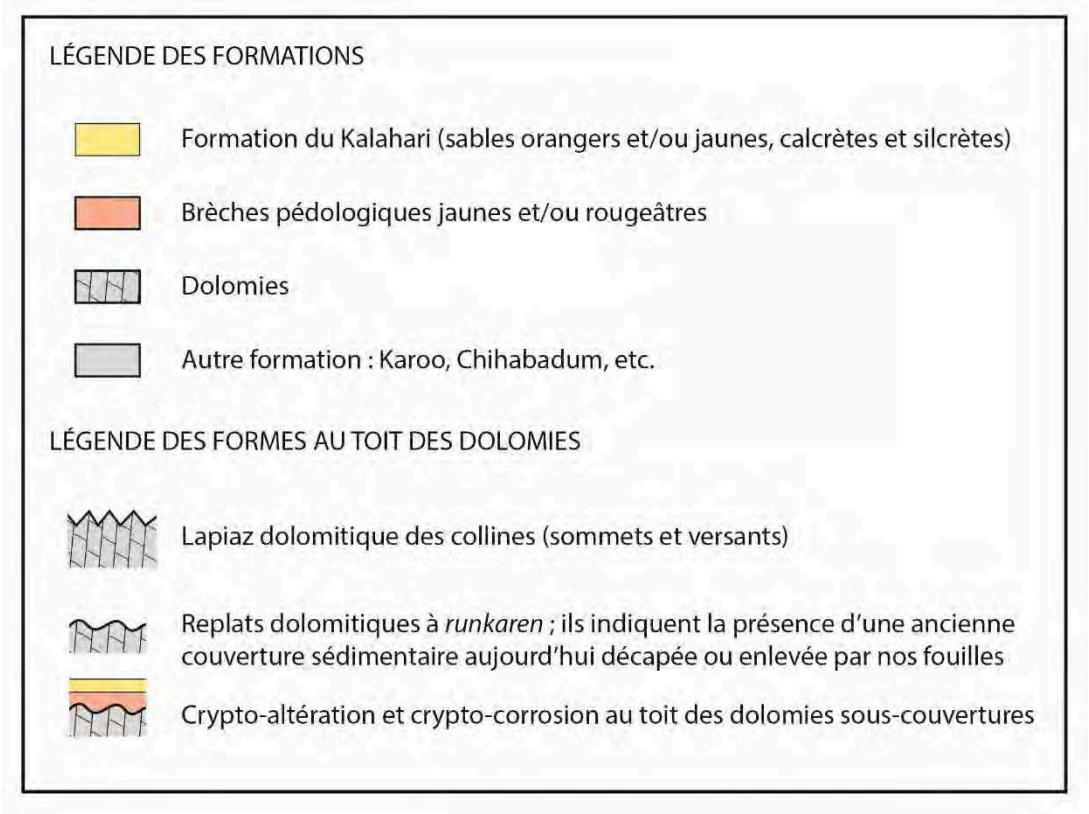


Figure 495 Légende de la figure suivante.

Ce modèle sera ultérieurement complété en y intégrant la karstification des dolomies (Figure 897 p.888), ainsi que par les données paléoenvironnementales relatives à la présence de paléolacs (Figure 899 p.892). Ces modèles permettront de mieux comprendre ce que nous fouillons au pied des collines au Botswana.

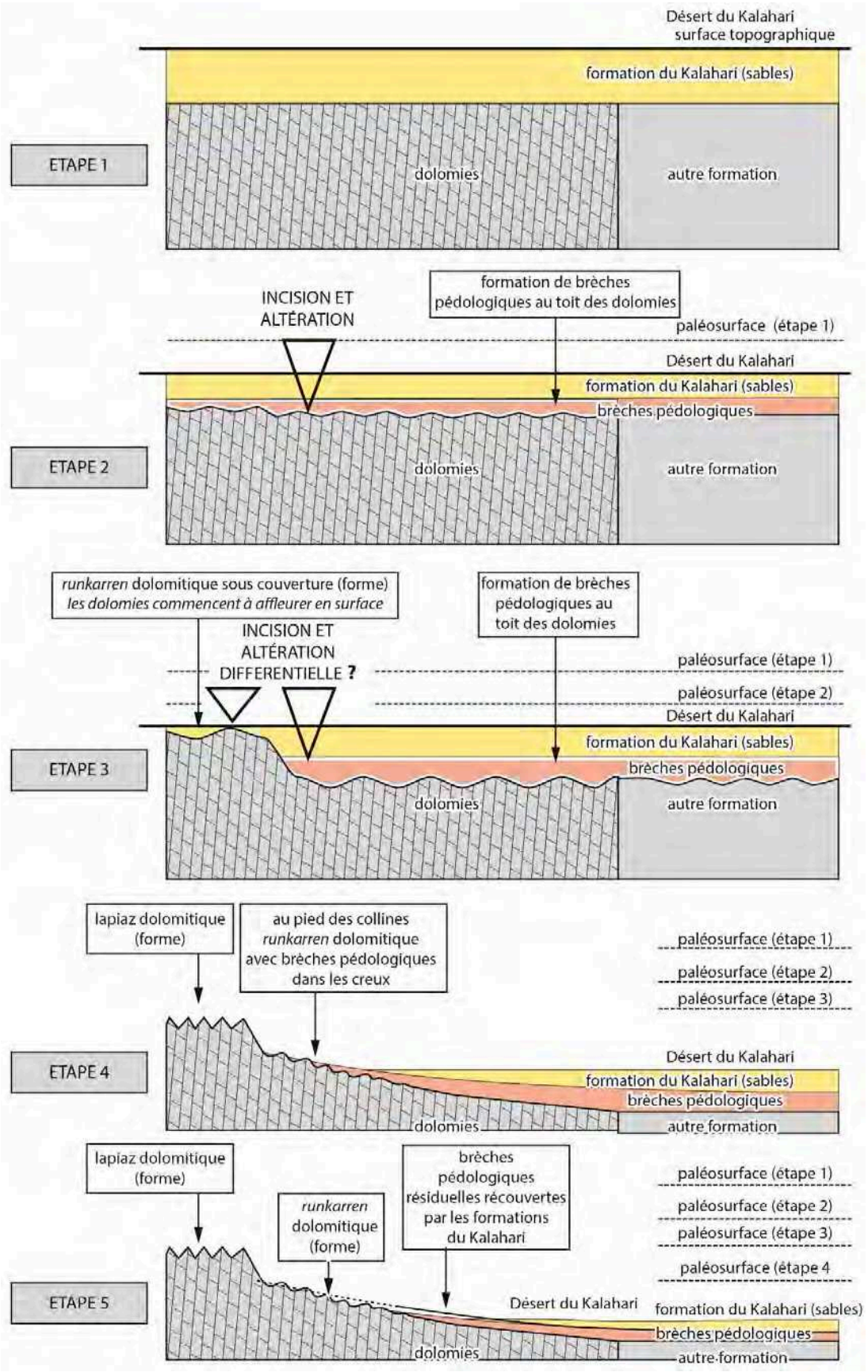


Figure 496 Modèle géométrique et sédimentaire des brèches observées au Botswana.

4.1.3.3.4. Crypto-corrosion des planchers stalagmitiques fossilifères sous les sables, au pied du versant est de la colline K2 de Koanaka

Lors de la fouille du versant est de la colline K2 de Koanaka, une fois la couverture sableuse et le sol enlevés, nous avons trouvé des planchers stalagmitiques, subhorizontaux, en place. Ils étaient creusés de conduits verticaux sur parfois sur plus d'un mètre, comme le montre la photographie ci-dessous (Figure 497). Ces remplissages karstiques se sont formés à l'intérieur d'une grotte. Ensuite le toit de la grotte a été érodé lors de la mise en place du versant de la colline, exposant à l'air libre ces dépôts karstiques fossilifères et ossifères. Recouverts par les sables du Kalahari par la suite, ces dépôts ont été affectés par des phénomènes de crypto-corrosion, qui ont creusé des conduits verticaux en lien avec la pédogenèse. Nous avons représenté ce phénomène au niveau du schéma de la Figure 496. Nous décrirons ces fouilles plus loin (p.645).



Figure 497 Conduits verticaux de crypto-corrosion au toit des formations carbonatées et sous les sables du Kalahari, que nos fouilles ont enlevé. Koanaka Hill K2.

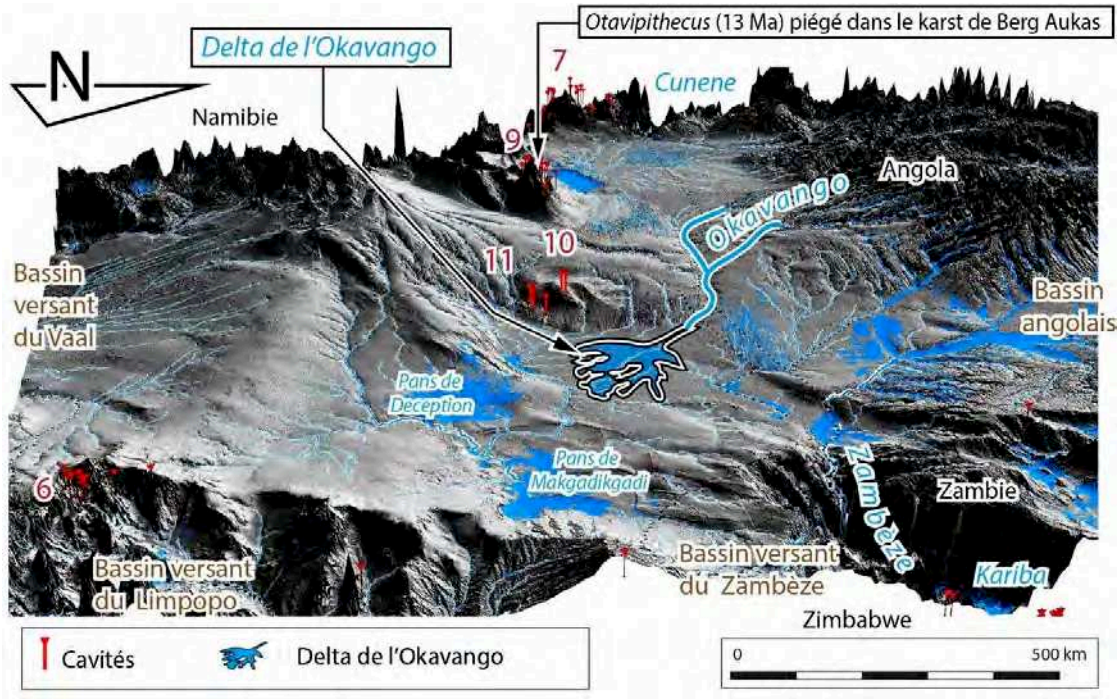
4.2. DESCRIPTION MORPHOKARSTIQUE DES PAYSAGES ET DES GROTTES

Les analyses géomatiques présentées dans le Chapitre n°1, complétées par les prospections géologiques et les fouilles archéologiques, permettent d'élaborer une synthèse descriptive des karsts du nord-ouest du Botswana. Cette région se caractérise par la présence de plusieurs reliefs dolomitiques karstifiés isolés *:* les ***Aha Hills****,* les ***Gcwihaba Hills*** *et* **les *Koanaka Hills***.

- les ***Aha Hills*** (n°10 de la Figure 498) : il s'agit d'un karst à buttes (Figure 508), situé à une altitude de 1170 m, avec des sommets atteignant 1200 m (Figure 25 p.47). On y trouve peu de grottes, mais deux avens profonds sont répertoriés : *Waxhou North* (70 m) et *Waxhou South* (50 m). Cette région se développe de part et d'autre du Botswana et de la Namibie ;
- les ***Gcwihaba Hills*** et les collines K1 et K2 de ***Koanaka Hills*** (**n°11** de la Figure 498) appartiennent à la même unité dolomitique, orientée NE/SO selon la carte géologique de Machacha (1997) (Figure 444) ;
- la **colline K3**, où se situe la grotte de *Blue cave*, est située à 15 km à l'est des *Koanaka Hills* (K1 et K2). Elle correspond à une autre unité dolomitique que la précédente. Cette unité n'est pas représentée sur les cartes géologiques les plus précises disponibles (échelle 1 / 500 000). Ce qui nous a convaincu de proposer une nouvelle interprétation à partir de la carte de Lehman (2015) en annexe (p.1281).

En arrière-plan de la Figure 498 ci-dessous, on aperçoit à l'ouest, en Namibie, le karst d'Otavi (n°9), dont la grotte d'Harasib que nous avons pu visiter. Dans ce secteur, la grotte de Berg Aukas, située à 1380 m d'altitude, a livré des fragments d'un primate *Otavipithecus* daté de 13 Ma (Conroy *et al.*, 1992 ; Pickford *et al.*, 199a ; Pickford et Senut, 2010 ; Pickford *et al.*,22014 ;Pickford, 2019). On aperçoit aussi le karst de Kaokoland (n°7).

Sur l'agrandissement (Figure 499), nous avons indiqué les dunes formées par les Sables du Kalahari, qui ont donné des âges récents (Thomas *et al.*, 2000) mais controversés (Moore et al. 2012), dont nous reparlerons (p.846) :
(1) 48 000 à 41 000 ans,
(2) 36 000 et 29 000 ans et
(3) 23 000 à 21 000 ans.
Ces périodes d'édification des dunes correspondent à celles estimées pour les dunes de l'ouest de la Zambie (O'Connor et Thomas, 1999 in Thomas *et al.*, 2000) ainsi que pour celles de Zimbabwe (Stokes *et al.*, 1997 ; Bateman et Catt, 1996 ; Singhvi et Wintle, 1999 in Thomas *et al.*, 2000). Pour ces deux dernières régions, il y aurait une phase d'édification plus ancienne, datée entre 115 000 à 95 000 ans.
Près de *Tsodilo Hills*, se situe le site OGS, indiqué sur la carte ci-dessous, qui a donné un âge ancien, à **3.06 Ma** pour la base de la formation du Kalahari (Vainer *et al.,* 2021), nous en parlerons plus loin (p.827).



Numéro des karsts : 6 Lobatse ; 7 Kaokoland ; 9 Harasib ; 10 Aha ; 11 Gcwihaba et Koanaka.

Figure 498 Extension supposée du paléolac Déception en perspective (2,5D), exagérée verticalement 10 fois). (Version avec les paléolacs : Figure 856 p.831).

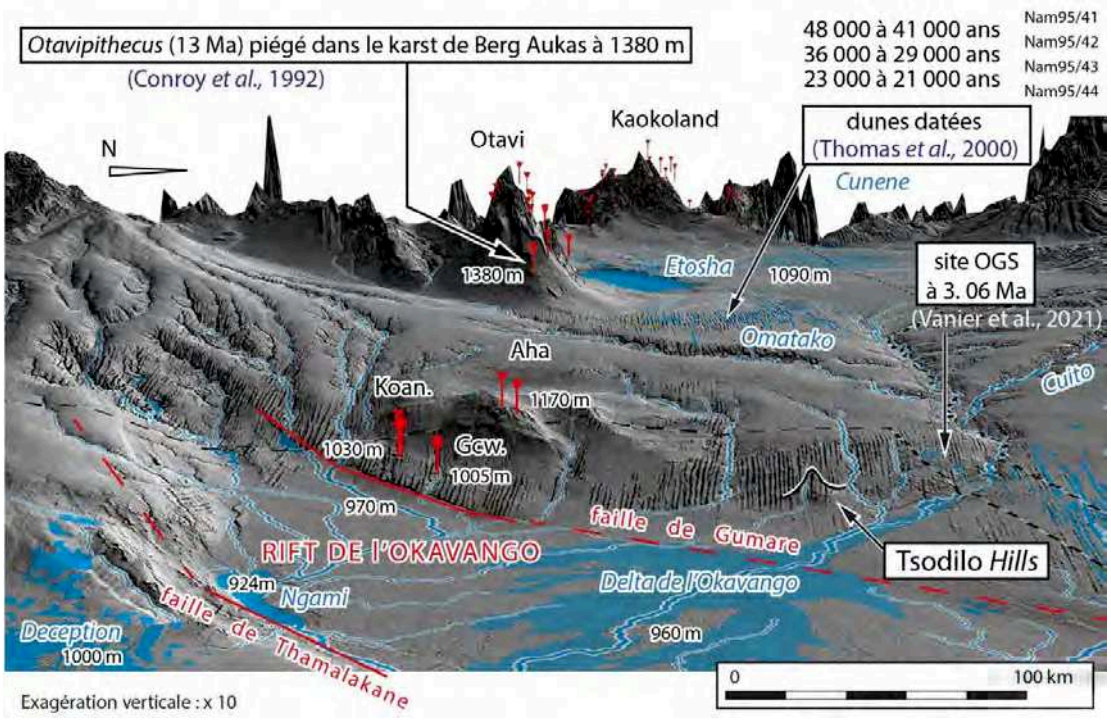


Figure 499 Agrandissement de la vue 2,5D précédente (exagérée verticalement 10 fois).

L'analyse morphologique distingue trois niveaux altitudinaux séparés par des escarpements ou des talus. D'ouest en est, et de haut en bas, on distingue (Figure 500) :

- les *Aha Hills* à 1170 m correspondant aux dolomies de la formation géologique éponyme telle que cartographiée sur la Figure 443 (p.492) ;
- une surface « plane » à 1000 m, incisée par des vallées puis recouverte par les dunes de sables du Kalahari. Lorsque cette surface se développe sur les dolomies de la formation de Koanaka (cartographiée sur la Figure 443) on trouve plusieurs chapelets de collines karstifiées :
    - les *Gcwihaba Hills* incisées par la vallée de Gewidum (Figure 500) ;
    - les collines K1 et K2 des *Koanaka Hills* qui émergent de la surface et où il n'y pas de vallées ;
    - la colline dolomitique karstifiée isolée de K3.
- la plaine de l'Okavango vers 970 m.

Les deux premières régions appartiennent au horst du **Rift de l'Okavango** tandis que la plaine de l'Okavango est installée dans le graben du rift.
Sur cette surface à 1000 m, où les dolomies sont subaffleurantes, on trouve en particulier des dépressions allongées, qui pourraient être des paléo-poljés (voir définition p.90 et indiquées en violet ci-dessous sur la Figure 500, alimentés depuis l'ouest par les eaux souterraines et/ou à des paléolacs alimentés par des transgressions des paléolacs dans l'Okavango, depuis l'est, indiquées en bleu sur la Figure 778.

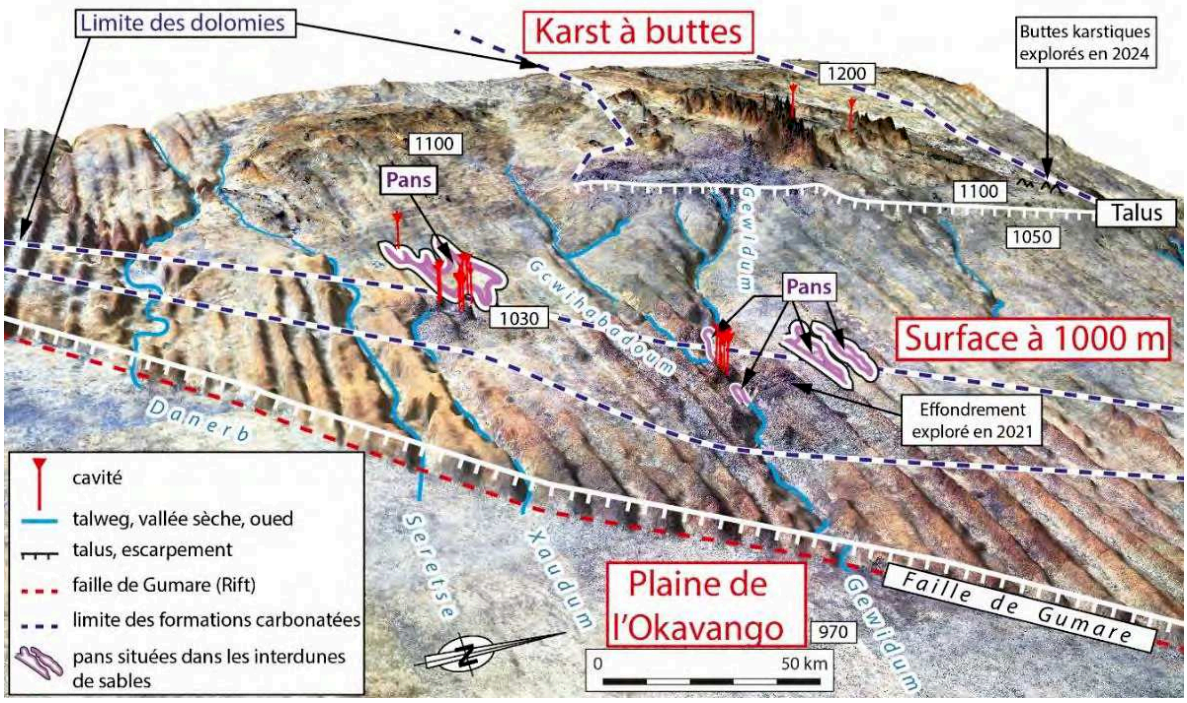


Figure 500 Trois régions morphologiques caractérisent la bordure ouest du Rift de l'Okavango. (bloc 2.5D exagéré verticalement 10 fois).

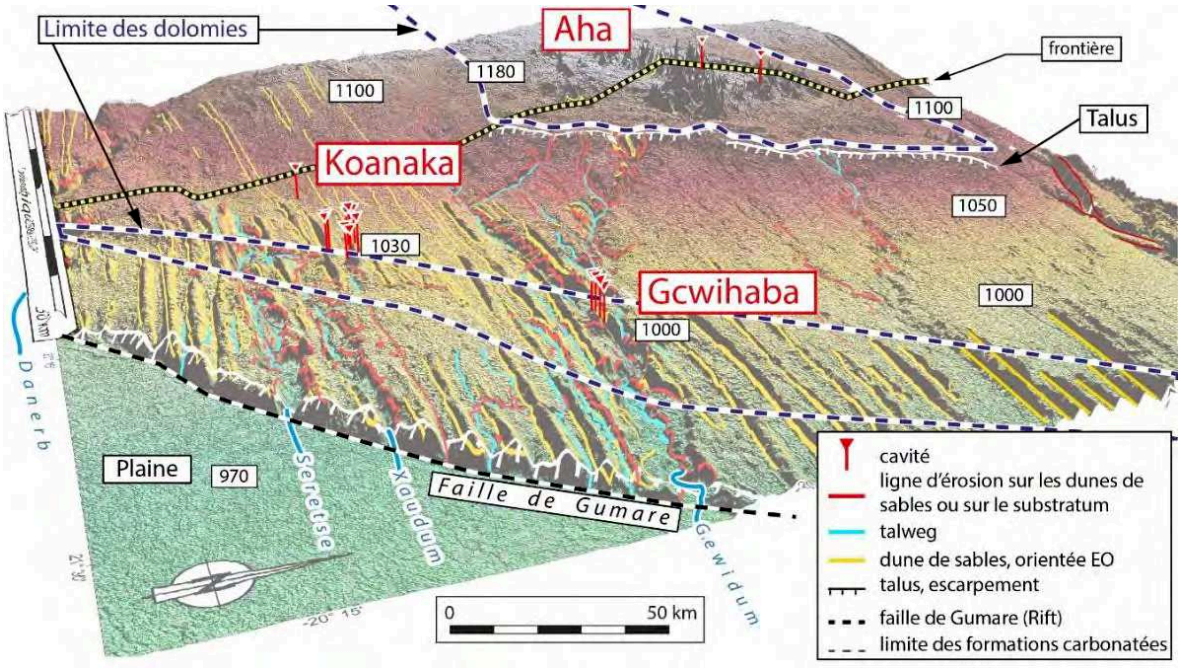


Figure 501 Analyse morphokarstique de la bordure ouest du Rift de l'Okavango (Bloc 2.5D hypsométrique, exagérée verticalement 10 fois).

Les ***Aha Hills*** correspondent, comme nous l'avons dit précédemment à un karst à buttes (Figure 500 et Figure 508). La surface plane, où est située la base des buttes, est à 1170 m d'altitude et les sommets des buttes culminent à 1200 m (Figure 25 p.47). On y trouve peu de grottes mais il existe deux profonds avens : *Waxhou North* et *Waxhou South*, respectivement de 70 et 50 m de profondeur (Figure 515 et Figure 519).

Gcwihaba Hills **et** ***Koanaka Hills*** correspondent à des chapelets de collines isolées qui émergent à une quarantaine de mètres de hauteur au-dessus des sables du Kalahari et sont situées sur la surface à 1000 m d'altitude. À **Gcwihaba**, les collines sont séparées par une vallée peu profonde de 7 m, antérieure aux dépôts des calcaires lacustres qu'elle a incisés et qui seraient datés de 11 430 ± 60 ans BP (Robbins *et al.*, 1996). La base des collines à Gcwihaba est située vers 1005 m d'altitude et le sommet vers 1040 m d'altitude. On compte 6 buttes à Gcwihaba (G1 à G6 ou *A Hill* à *F Hill* selon la terminologie de Baillieul *in* Cooke (1974) et plusieurs grottes : la grotte de Gcwihaba, la grotte de Wadum, la grotte de Motswantsweng et la grotte de Dimapo. Une vallée incisée est indiquée sous les sables du Kalahari par le forage n°11471A (Mc Donald, 2008) (Figure 754 p.758).

On compte 2 collines pour ***Koanaka Hill*** **(K1, K2)**, séparées de 1.8 km et orientées selon la direction des affleurements géologiques régionaux. La plus grande, K1, fait plus d'un kilomètre de longueur et présente un ensemble de grottes connectées : *Diviner's, Gecko Chamber, Fossil Cave et Mongongo cave*. Sur la colline K2, on trouve la grotte de *Bone Cave* et *Small Cave* ainsi que plusieurs grottes trépanées par la surface topographique actuelle et que nous fouillons. En fait, il ne reste plus que des remplissages karstiques bréchifiés fossilifères encadrés par de rares parois de grottes encore en place à l'air libre.

Les **sables du Kalahari**, comme nous l'avons vu, sont quant à eux organisés en longues dunes rectilignes, de 50 km de longueur et orientées est-ouest. Elles sont hautes de 8 m au maximum et leur amplitude est de 2 km (distance entre deux crêtes).

La faille de Gumare qui délimite le horst et le graben interrompt à l'est les dunes de sables du Kalahari. L'altitude de la plaine de l'Okavango est mesurée à 970 m à *Xhaba Borehole* directement à l'est de la faille de Gumare et à 945 m à Maun.

D'est en ouest, on observe un escarpement de 30 m de hauteur qui sépare la plaine de l'Okavango (le graben) du ressaut où se situent les dunes de sables (le horst). Ces dernières recouvrent la surface à 1000 m où se situent entre autres les dolomies karstifiées et les grottes étudiées. Cette limite correspondrait à la faille de Gumare.

Puis, on trouve un autre escarpement, de 40 m de haut, entre les buttes karstiques de *Gcwihaba Hills* et *Koanaka Hills* et les *Aha Hills*. Sur ce talus se positionnent les têtes des vallées. Ce talus serait peut-être lié à la présence d'une faille comme le suggère notre coupe géologique (Figure 888 p.881), il peut correspondre aussi à la limite entre deux formations comme le suggèrent les cartes géologiques de Machacha (1997) (**Figure 1255** p.1301) ou bien correspondre à une éventuelle bordure d'un paléolac situé à 1180 m d'altitude.

Il existe une correspondance entre l'axe des talus (N50°) et la direction des formations géologiques (N50°) suggérant une structuration lithologique des paysages. D'après les cartes géologiques, les collines de Gcwihaba et Koanaka sont situées sur la bordure nord-ouest des dolomies.

Remarque importante :
Selon Mc Farlane *et al.* 2005, p.84 :

- les Aha Hills correspondent à la Surface Gondwanienne ;
- et Gcwihaba et Koanaka Hills et Tsodilo Hills correspondent la Surface Africaine.

Après avoir décrit les paysages que l'on trouve au niveau du horst occidental du Rift de l'Okavango, nos études sur le terrain essayeront de répondre à ces problématiques de mise en place du Rift de l'Okavango et de déterminer l'histoire des karsts que nous étudions.

4.2.1. Missions sur le terrain, prospections et acquisition des données

Dans le chapitre 1 (p.102), nous avons dressé l'inventaire des missions en Namibie avant 2019 (Bruxelles, 2015 ; Bruxelles *et al.,* 2016, 2017, 2018). Ici, sur cette carte (Figure 448), nous avons indiqué les trajets de prospection des missions de terrain menées de 2015 à 2024. Elles nous ont permis de prospecter et de caractériser plusieurs buttes et dépressions pour chercher des grottes. Ces secteurs seront décrits dans ce chapitre.

Dressons ici un bref récapitulatif des secteurs prospectés par les missions HOMINI'KARST au nord-ouest du Botswana depuis 2015.

Le point A, sur la Figure 502, correspond au secteur prospecté du 25 au 28 novembre 2024 où plusieurs collines appartenant à l'extrémité nord du plateau dolomitique des *Aha Hills* vers Qangwa ont été prospectées. Le premier objectif était de déterminer si ces reliefs correspondaient bien aux dolomies. C'est le cas. Un effondrement a été prospecté et correspondrait à une cavité effondrée.

Le point B correspond à la prospection du 28 novembre 2021 d'une dépression découverte par l'analyse SIG, de diamètre 200 m et de profondeur 6 m, au niveau d'une dune de sable linéaire. Le toit des dolomies n'affleure pas et la prospection n'a rencontré que des sables. Dans tous les cas, cet effondrement ne peut être lié qu'à un grand soutirage mais celui-ci est remplie de sables.

Au point C ont été décrites les dolomies de la formation des *Aha Hills* par Ramokate (1995) (p.502).
Le point D correspond au bivouac du 24 novembre 2022 avec Gregory Dandurand et Carole Bruxelles au niveau d'un petit talweg où des calcrètes ont pu être observées le lendemain (Figure 476 p.517).

Le point 1 sur la Figure 504 correspondant à la prospection du 25 novembre 2024 au niveau des collines à l'est de la grotte de *Waxhou North*.
Le point 2 sur la Figure 504 correspondant à la prospection du 29 novembre 2022 des collines au-sud ouest de la grotte de Waxhou North avec Ledimo Oatse (p.863).
Le point **3** sur la Figure 504 correspondant à la prospection du 27 novembre 2024 pour retrouver la grotte de *Small Cave* (p.548), à l'ouest de Waxhou South avec Ledimo Oatse et Gregory Dandurand.
Le point **4** sur la Figure 504 correspondant à la prospection du 27 novembre 2024 autour de la colline de l'antenne à *Waxhou South*.
Le point **5** sur la Figure 504 correspondant à la prospection du 28 novembre 2024 de l'ancienne carrière, à l'air libre, de fer d'après la carte de Ramokate (1995) près la route de *Waxhou*.
Le point **6** sur la Figure 504 correspondant à la prospection du 27 novembre 2024 des anomalies sur le MNT à Waxhou faisant penser à des avens mais ce sont simplement de petites dépressions et prospection de deux sommets.

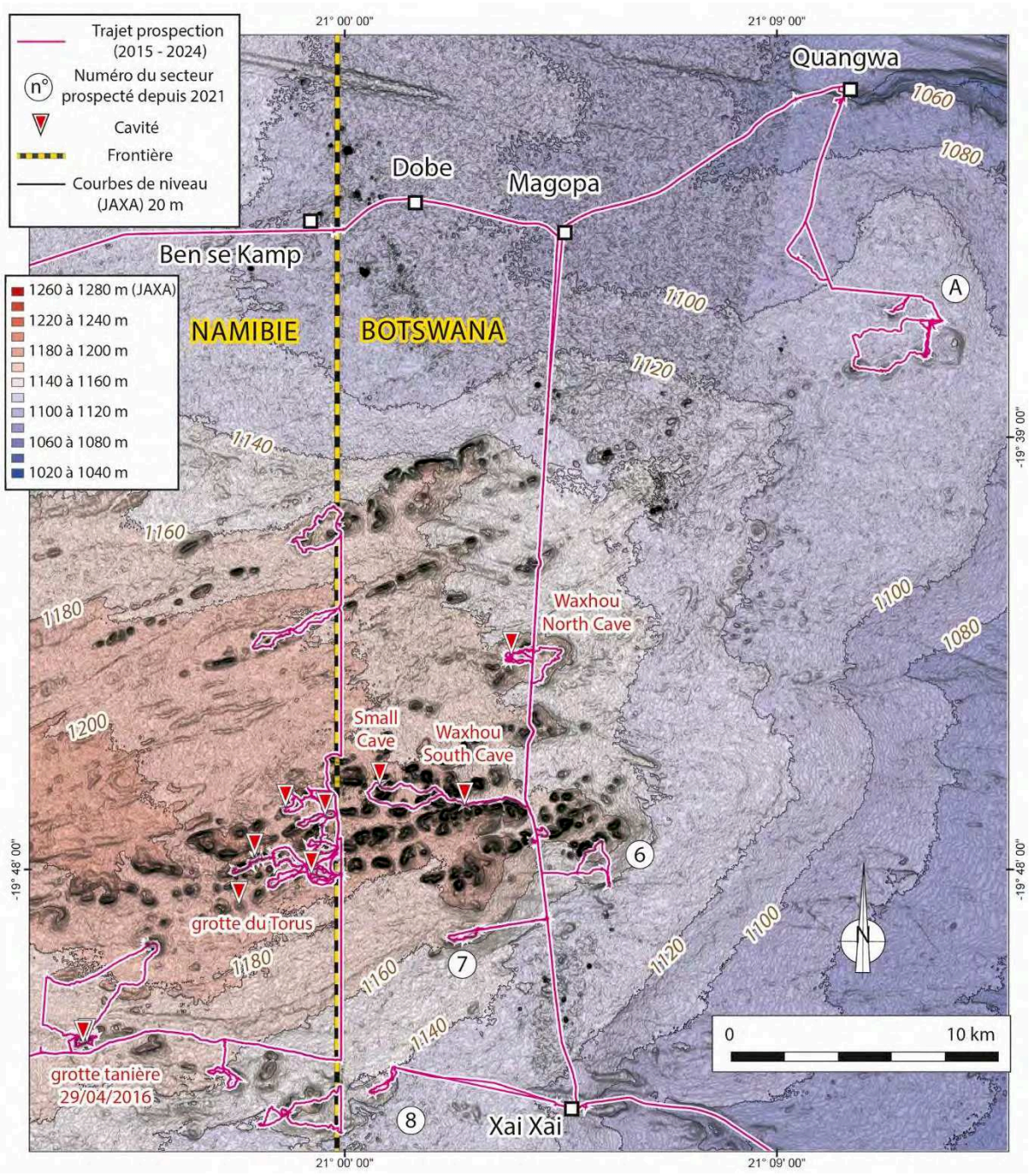


Figure 502 ATLAS n°5 : Prospection des Aha Hills depuis 2015.

Le point **7** sur la Figure 504 correspondant à la prospection du 28 novembre 2024 de deux collines éloignées.

Le point **8** sur la Figure 504 correspondant à la prospection du 28 novembre 2024 d'une colline éloignée.

Nous remarquons des dunes sous abri des collines au nord de *Waxhou North Cave* et sont orientées en direction du ONO. Nous avons observé des dunes sous abri de la colline K2 à *Koanaka Hills* (en orange Figure 606 p.610) mais elles ont des directions différentes que celles de Waxhou, elles vont en direction du SSO et elles relient, en fait, les dunes linéaires orientées EO plus anciennes (Figure 824 p.805).

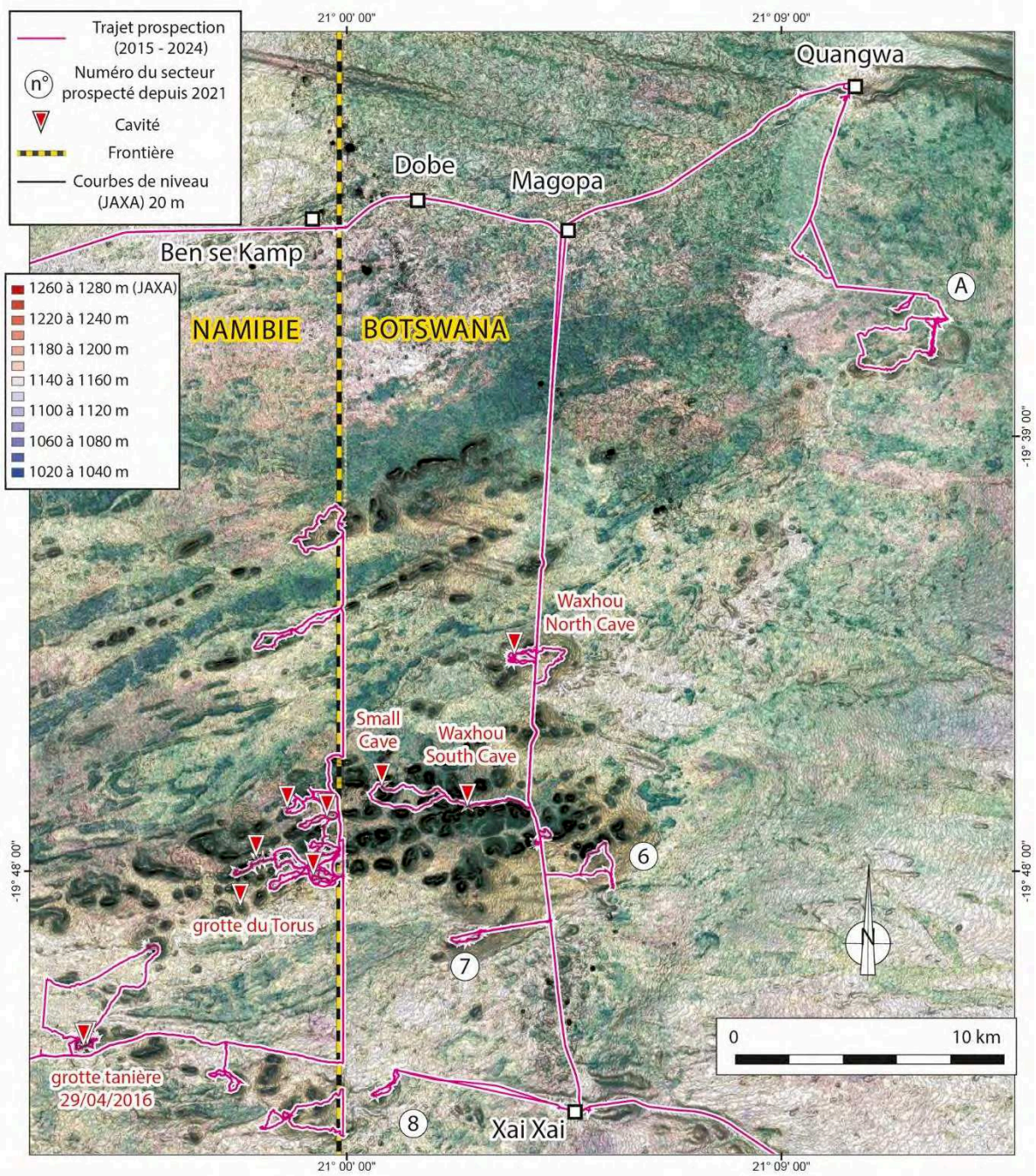


Figure 503 ATLAS n°5 : Image satellite (ARCGIS WB_2016_R15).

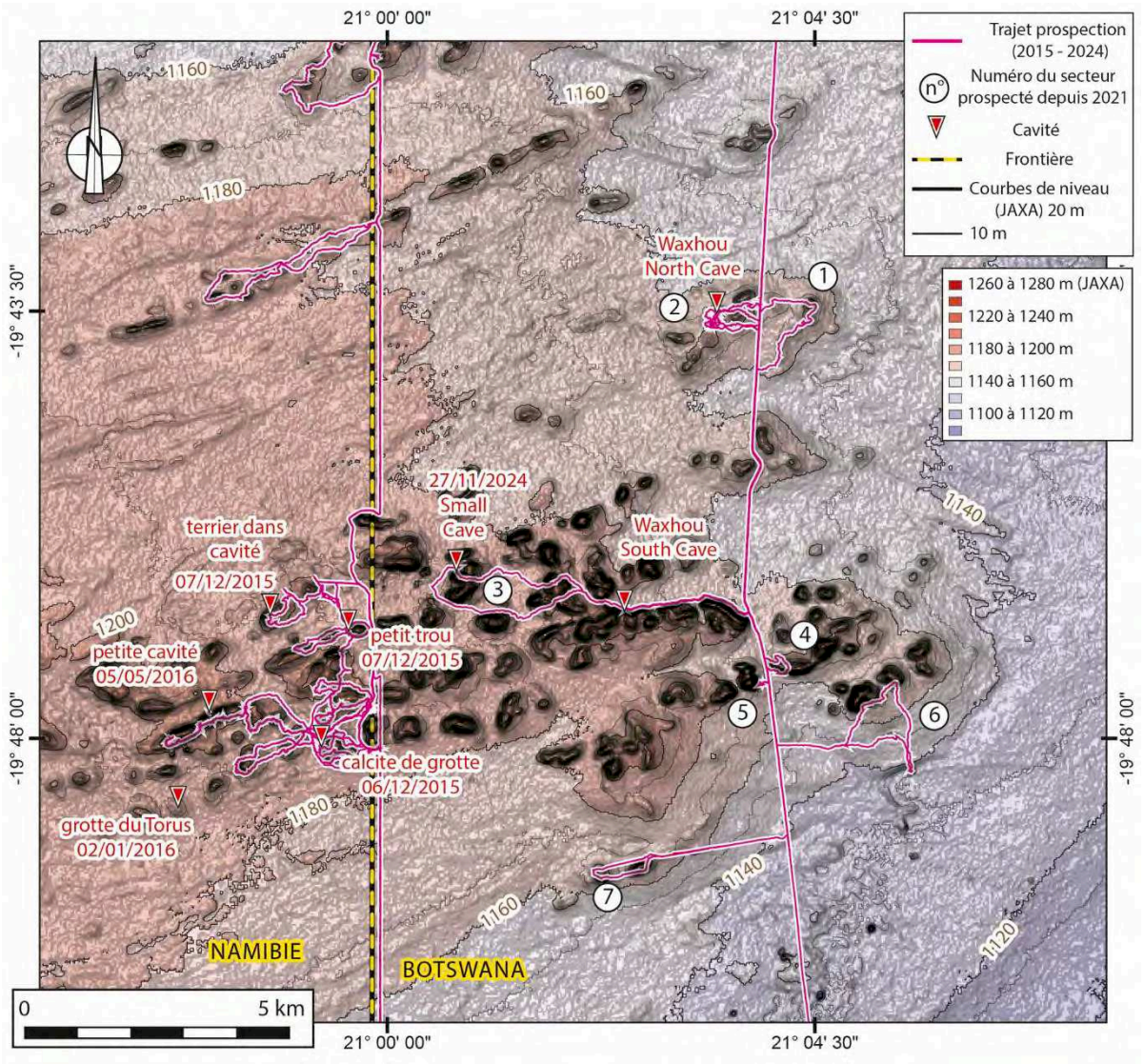


Figure 504 ATLAS n°6 : Prospection à Waxhou.

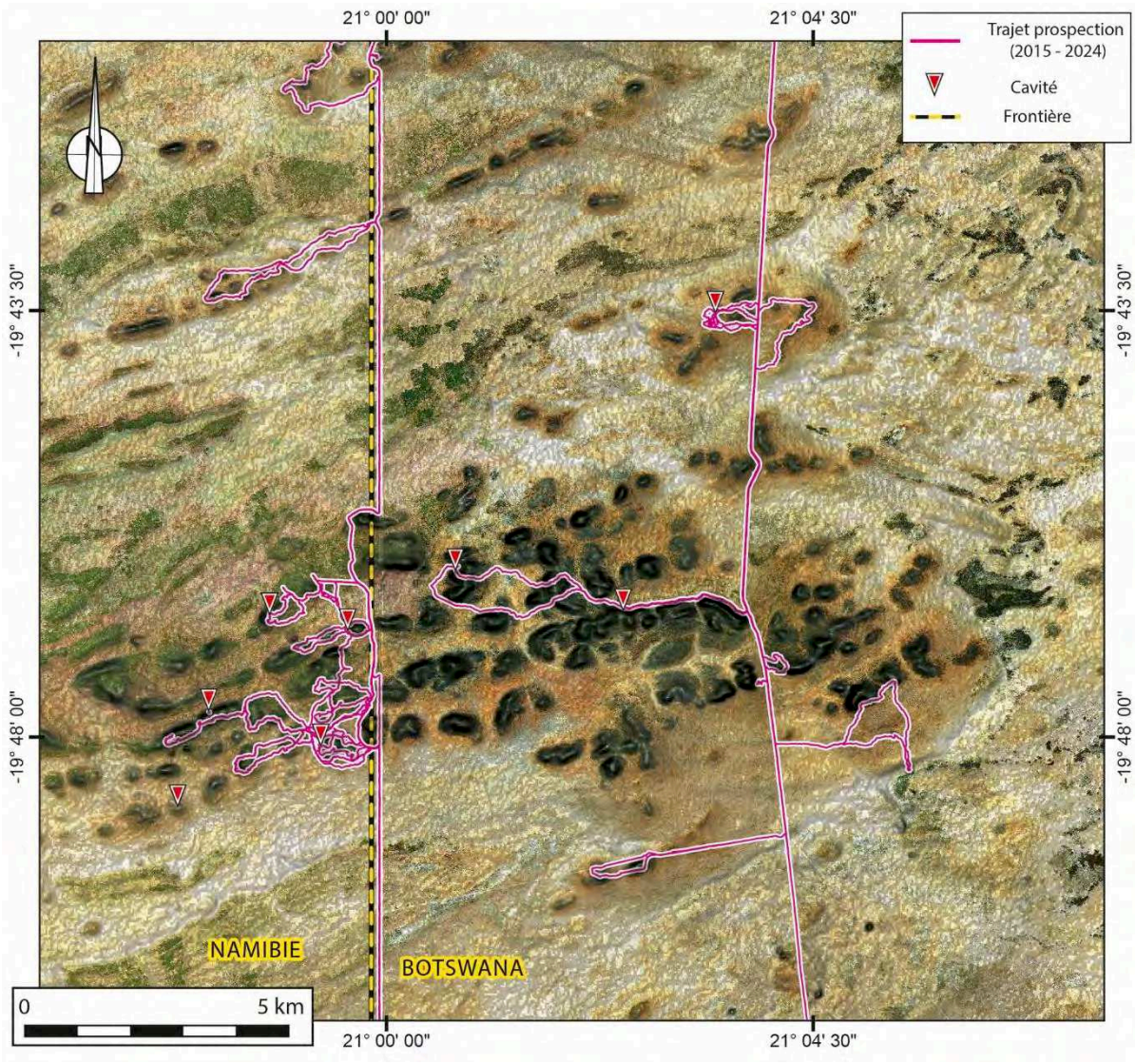


Figure 505 ATLAS n°6 : Cavités et trajets des prospections dans les Aha Hills (image satellite MAXAR).

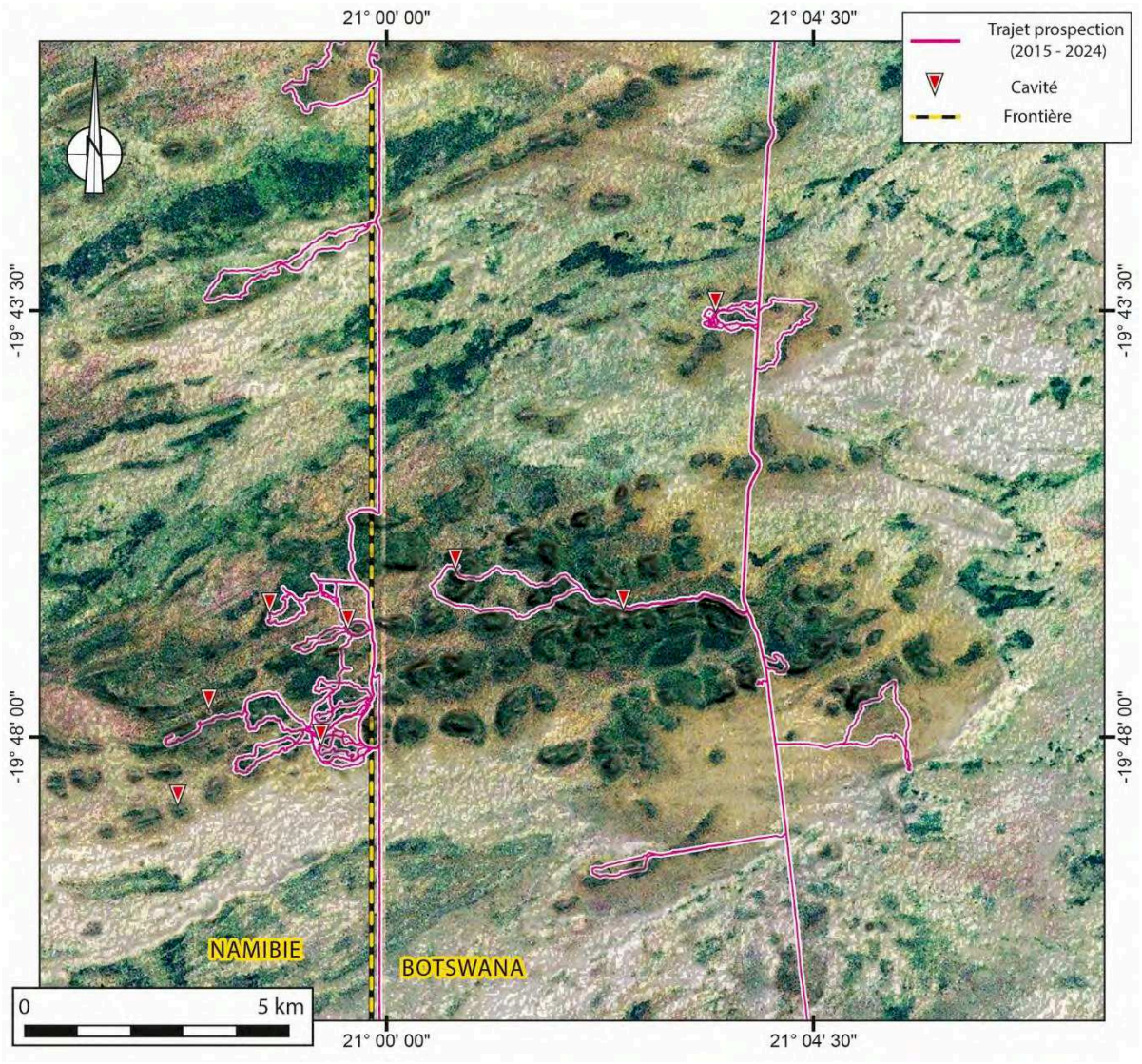


Figure 506 ATLAS n°6 : Cavités et trajets des prospections dans les Aha Hills (image satellite : ARCGIS WB_2016_R15).

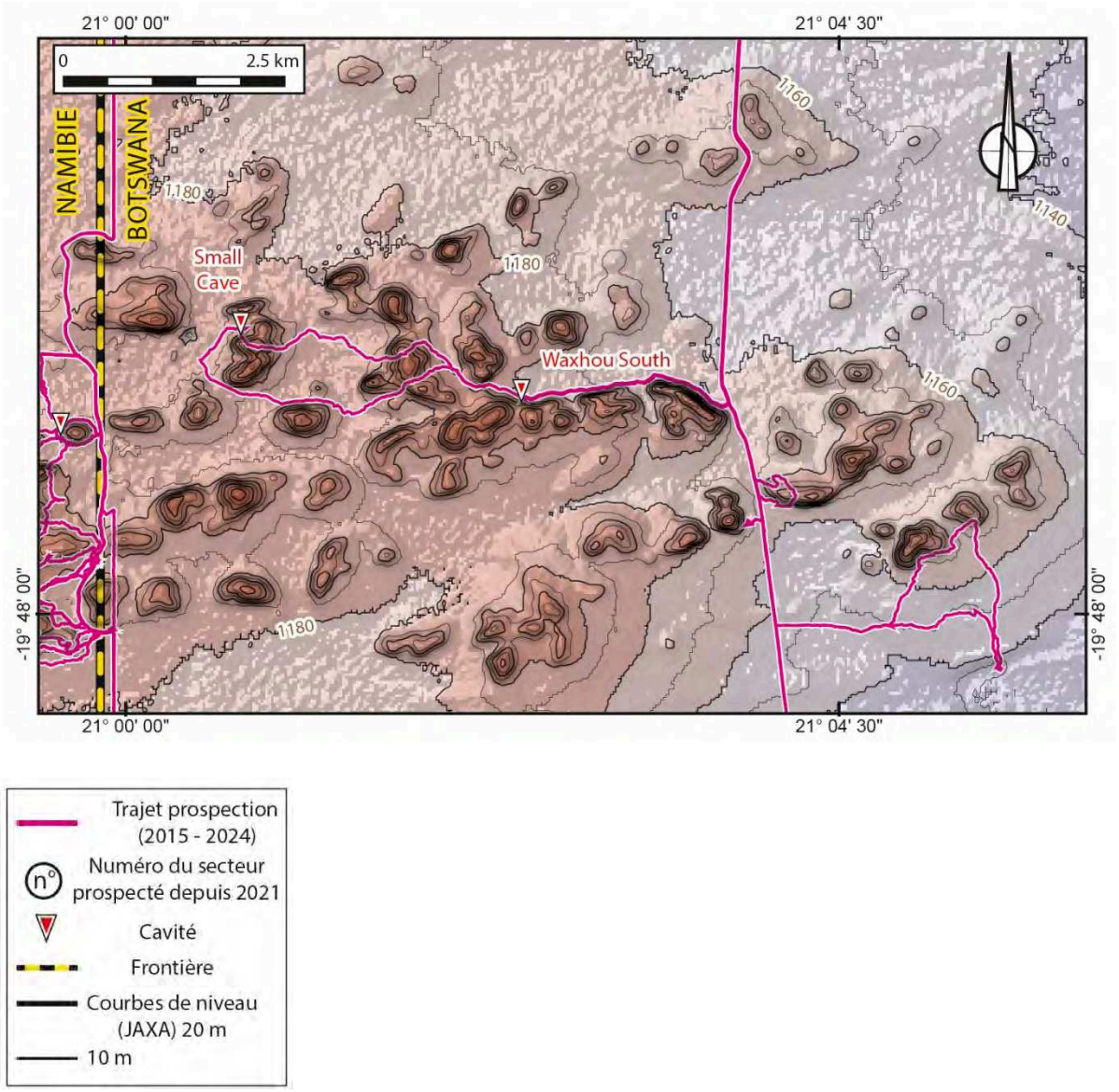


Figure 507 ATLAS n°7 : Détail des prospections à Waxhou South.

Rappelons que de nombreux reliefs existent au Botswana et ont déjà été inventoriés (Issacs et Stephens (2022). Ils ne sont pas tous constitués de roches karstifiables, mais nécessitent néanmoins des études complémentaires afin de mieux caractériser leur potentiel karstique.

4.2.2. Aha Hills

Les *Aha Hills* correspondent à une surface à buttes karstiques (Figure 508) qui se situe à 1170 m d'altitude et dont les sommets des buttes culminent à 1200 m (Figure 25 p.47). Les longues missions de prospection depuis 2015 montrent que ces dolomies sont peu karstifiées comme le montre la carte récapitulative des prospections des *Aha Hills* en annexe page 1219. Les **formations des *Aha Hills*** sont intercalées de niveaux imperméables qui sont absents dans le **groupe de Koanaka** et qui pourraient expliquer une karstification plus importante de Gcwihaba et Koanaka.

En 1973, ont été découverts l'aven de *Waxhou North* (anciennement appelé *Sink Hole*), un puits de 70 m de profondeur et l'aven de *Waxhou South* (anciennement *Independence Cave*), un puits exploré jusqu'à 55 m de profondeur (Cooke, 1973), topographiés et visités en 1979. Notre équipe a pu visiter ces grottes à plusieurs reprises.

Il existe aussi *Small Cave*, découverte par les spéléologues sud-africains en 2009 (Grant & Ingold, 2015) et que nous avons pu retrouver lors de la mission de 2024 et qui est seulement liée à un petit effondrement des strates de dolomies occupés par des porc-épic.

Les réseaux karstiques de Waxhou, dont leurs parties pénétrables, sont des puits verticaux. *Water Surveys Botswana* et *Aqualogic* (2001) indiquent qu'ils pourraient se développer horizontalement, plus bas, dans les parties que nous ne pouvons pas visiter et comme le suggère notre coupe morphokarstique (Figure 888 p.881).

Ces avens s'ouvrent à la base des buttes *(Waxhou North)* ou sur leur versant *(Waxhou South)*. *Waxhou North* s'ouvre au milieu des sables du Kalahari en formant un entonnoir. Ce puits s'ouvre dans les dolomies. Celles-ci affleurent au nord du puits et forment une petite surface arasée, que nous avons pu prospecter en 2022 sans trouver de brèches karstiques en surface (tracé de prospection en rose sur la Figure 875 p.865). Plus au sud, nous avons prospecté de petits reliefs métriques de dolomies qui émergent des sables (Figure 874 et Figure 873 p.864) et qui parfois sont recouverts de silcrètes. Nous y avons découvert de nombreux artefacts en silcrète attribués au *MSA* par G. Porraz (comm. orale) que nous présentons plus loin (p.863).



Figure 508 Une partie des collines des Aha Hills vue par drone à 140 m de haut (Source : Bruxelles L., 29/11/2022).

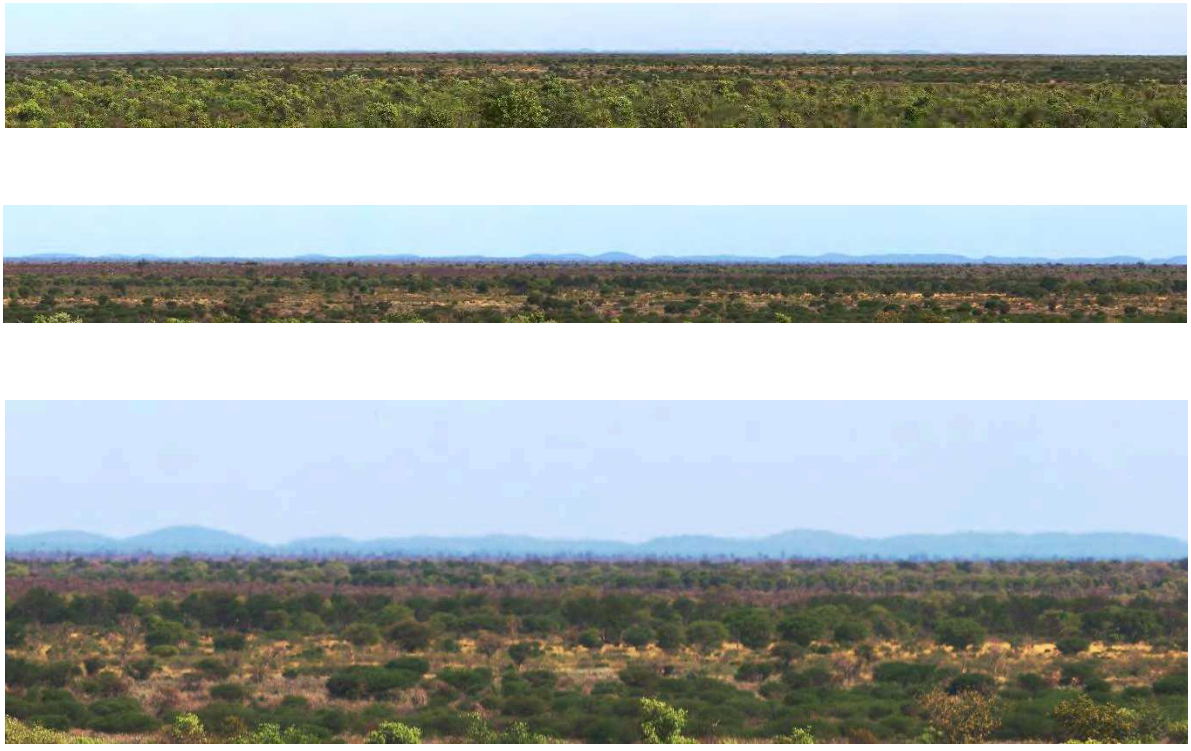


Figure 509 Panoramas et agrandissements des Aha Hills observées depuis le nord de la colline de K1 à Koanaka Hills.

4.2.2.1. La grotte Waxhou North

La grotte de *Waxhou North* était nommée « *Unamed Sinkhole* » et a été topographiée par R. Howell en juillet 1979 (ANON, 1979) (Figure 515) et redessinée par Dickie en 2009 (Grant & Ingold, 2015, p.25) (Figure 513). Une version déformée de la coupe a été publiée dans le même bulletin (Figure 514). Des ossements de Kudu, un grand herbivore, montrent que le puits a fonctionné comme aven-piège et qu'il pourrait contenir d'autres fossiles et potentiellement de l'Hominine si le puits existait à cette époque. La profondeur est de 70 m.

Source	X	Y	X	Y	UTM 34S East (X)	UTM34S North (Y)	Altitude en mètre MNT JAXA
SASA Bulletin 2015 Volume 41	S19°43.532'	E21°03.489'	-19.7255533	21.05			
Ledimo Oaitse (GPS garmin)	S19°43'32,91"	E21°3'30,19"	-19.72580833	21.05838611			
Chadelle (GPS garmin)	S19°43'32,304"	E21°3'28.148"	-19.725640	21.057819	506058.580	7818877.882	1177

Tableau 12 Coordonnées de la grotte de Waxhou North.

Localisation *googlemaps* : https://maps.app.goo.gl/4MZsGzjoe7i1xz1W6



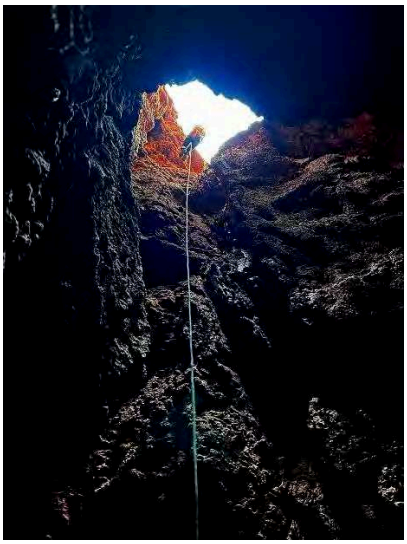


Figure 510 L'accès difficile de Waxhou North (Source : Bruxelles L.).

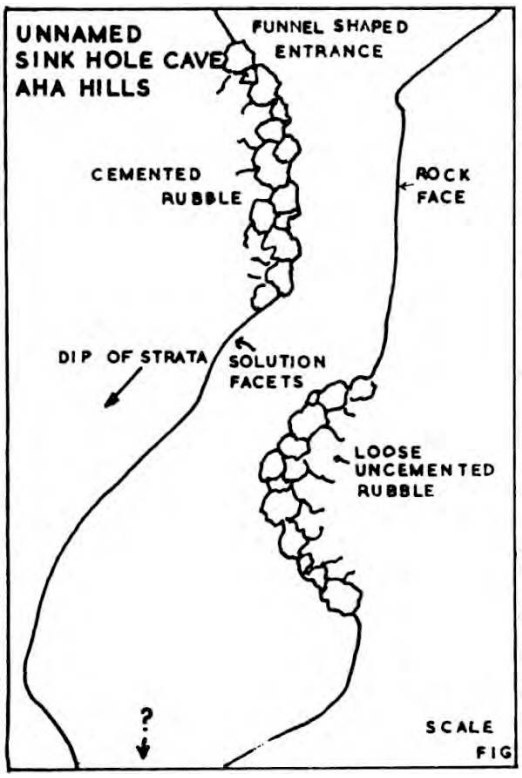


Figure 511 Coupe topographique de Waxhou North selon Cooke et Baillieul (1974).

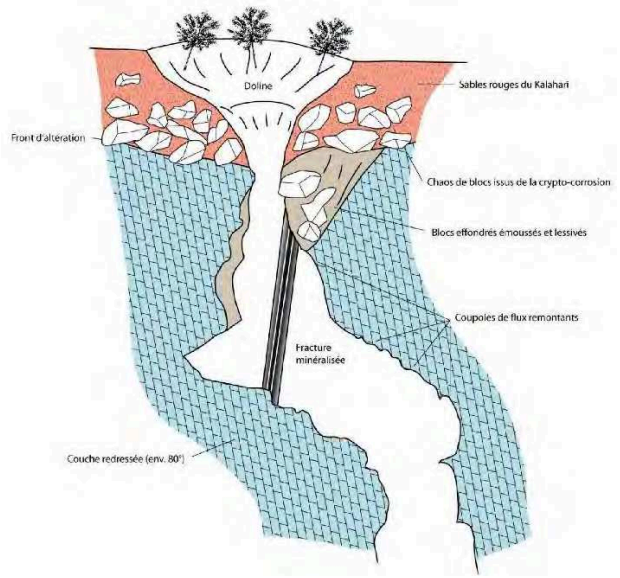


Figure 512 Coupe topographique de Waxhou North selon Bruxelles et al. (2017, Fig.14).

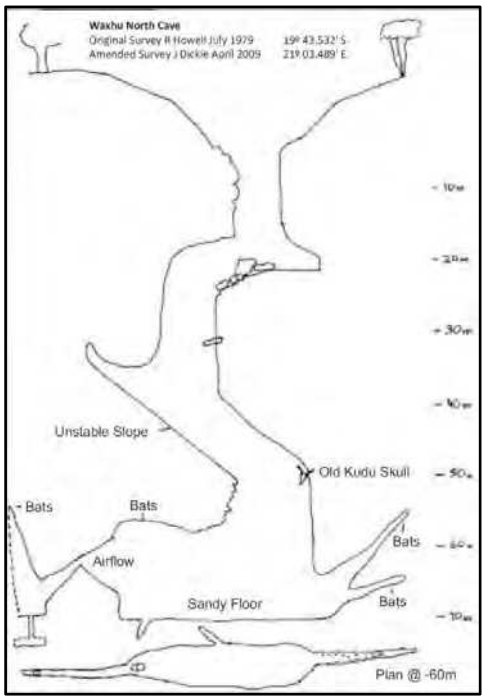


Figure 513 Coupe topographique de Waxhou North selon Dickie en 2009 (Grant & Ingold, 2015, p.26).

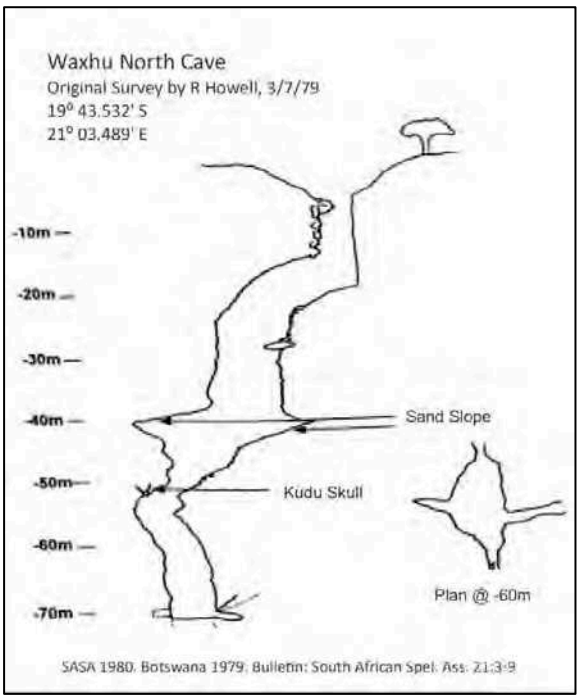


Figure 514 Coupe topographique déformée de Waxhou North (Grant & Ingold, 2015, p.25).

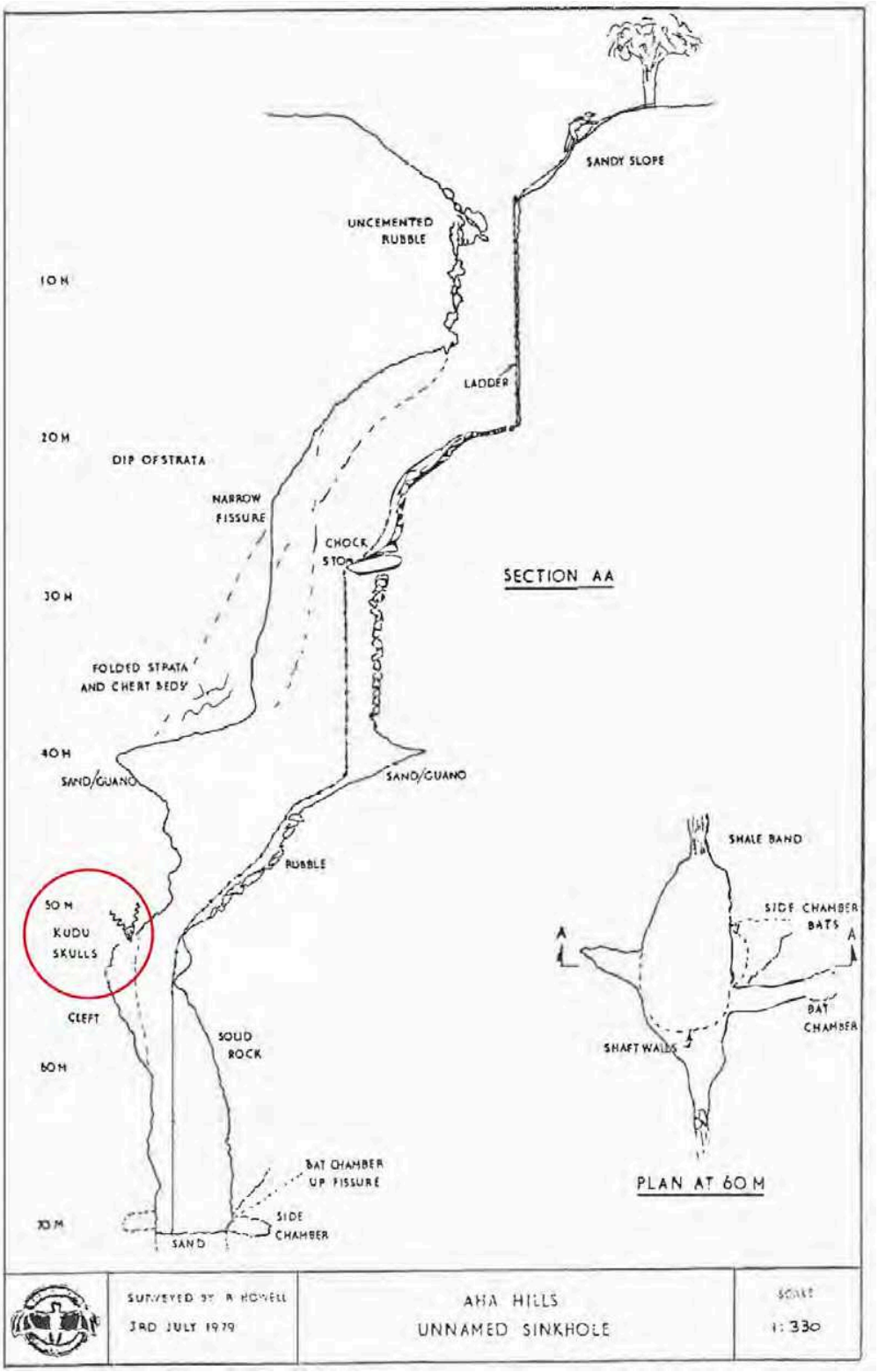


Figure 515 Coupe topographique de Waxhou North selon Howell en 1979 (ANON, 1979, modifié), où des ossements de koudou sont indiqués en rouge.

4.2.2.2. La grotte Waxhou South

La grotte de *Waxhou South* a été découverte en octobre 1972 lors d'une expédition dirigée par John Cooke. La grotte a été nommée « *Independence Cave* ». Elle a été topographiée par P. Snook (FRGS) en juillet 1979 et publiée dans le Bulletin SASA n°21 1979-1980 (ANON, 1979). La profondeur est de 56 m.

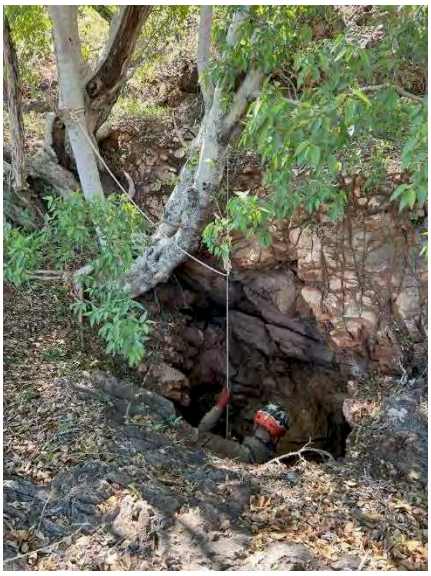


Figure 516 Entrée de Waxhou South (Source : Bruxelles L.).

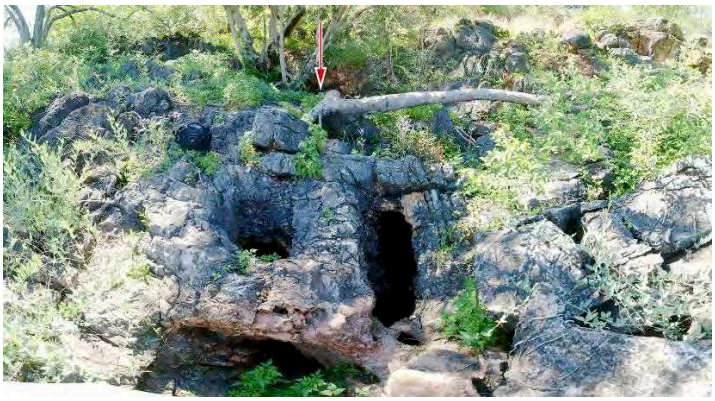


Figure 517 Le versant karstifié de l'entrée. L'aven d'entrée photographié à gauche est indiqué en rouge.

Source	X	Y	X	Y	UTM34S East (X)	UTM34 S North (Y)	Altitude (en mètre MNT JAXA)
Grant & Ingold (2015)	S19°46.680'	E21°02.496'	-19.7755333	21.05815			
Ledimo Oaitse	S19°46' 40,70"	E21°2'31,78"					
Chadelle (gps garmin)	S19"46' 40.65"	E21°2'29.78"	-19.7779583	21.041605	504358.171	7813088.996	1217

Tableau 13 Coordonnées de la grotte de Waxhou South.

Localisation G*ooglemaps* : https://maps.app.goo.gl/HqSrDoA3KymB9Azq5

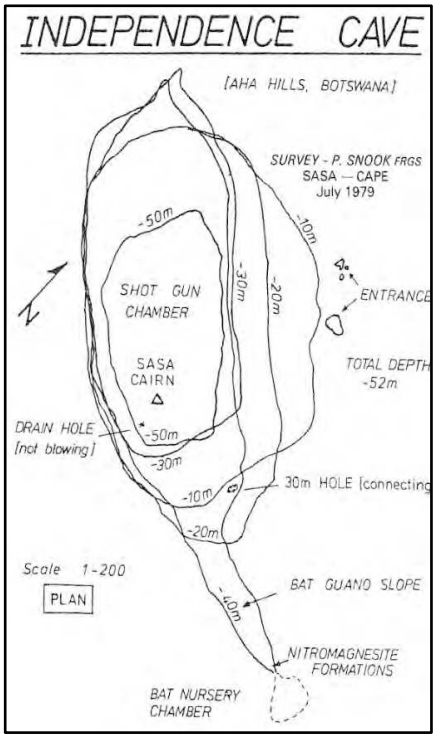


Figure 518 Plan de Waxhou North (Independence Cave) (ANON, 1979, p.8).

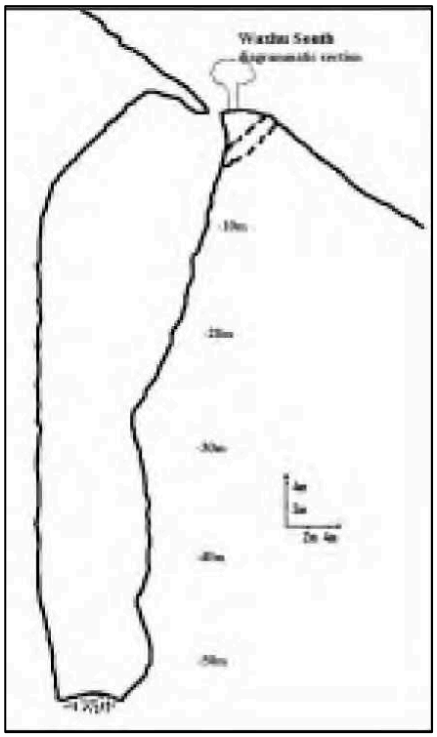


Figure 519 Coupe de Waxhou South (Source : Grant & Ingold, 2015, p.24).

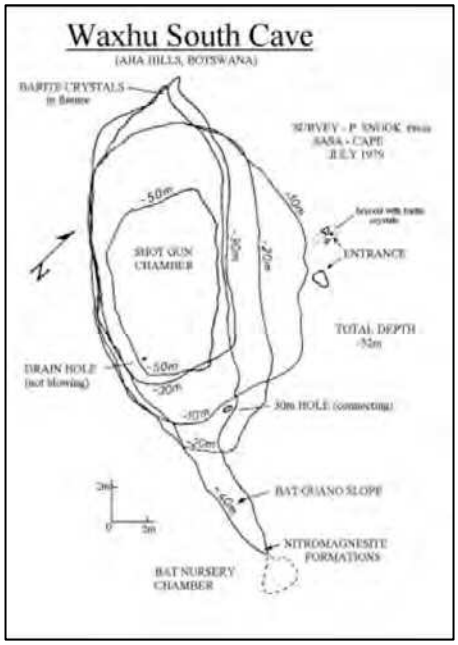


Figure 520 Indication de brèches dans l'entrée (Grant & Ingold, 2015, p.24).

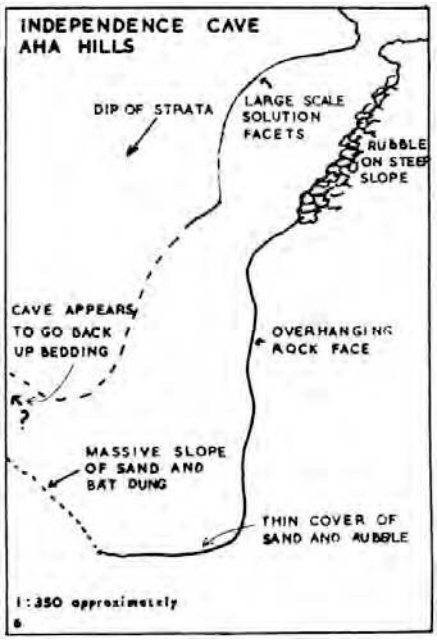


Figure 521 Coupe topographique de Waxhou South selon Cooke et Baillieul (1974).

4.2.2.3. La grotte Small Cave à Waxhou South

La grotte *Small Cave* était mentionnée dans le bulletin spéléologique *SASA* (*South African Spelaeological Association*), volume 41, publié en 2015. Elle y était cartographiée de manière schématique et décrite comme de petite taille (Figure 522) (Grant & Ingold, 2015, p.22). Malgré cela, nous voulions la visiter car nous ne connaissions que peu de grottes dans les *Aha Hills*. Nous avons décidé de nous y rendre dans la matinée du 27/11/2024 avec Ledimo Oatse et Gregory Dandurand. Nous sommes partis à pied depuis le *Dancing Spot*, près de la grotte de *Waxhou South*, la piste étant impraticable en véhicule en raison de la densité de la végétation arborée. Nous avons trouvé la grotte sans difficulté, bien que la position indiquée dans le bulletin ne soit pas exacte.

La visite a révélé l'absence de toute possibilité de continuation du réseau : la galerie se développe derrière une dalle basculée, probablement en lien avec une détente mécanique du versant. Aucun fossile ni brèche n'a été observé, bien que quelques ossements récents aient été repérés (Figure 533). Des polissages sont présents dans la galerie indiquant que c'est une tanière, probablement de porcs-épics. La position de la grotte et le trajet de prospection sont indiqués sur la Figure 526 et Figure 504 (p.537). À pied, nous avons longé de nombreux versants de collines, qu'il serait intéressant de prospecter plus en détail. La prospection a duré 2 heures et demie.

Source	X	Y	Altitude
Position imprécise (Grant & Ingold, 2015, p.22)	S19°46.202	E21°00.711	1225 m
Chadelle (GPS Garmin) (2024/11/27)	501268 (UTM34) -19,77090486	7813870 (UTM34) 21,01210435	1216 m (MNT JAXA)

Tableau 14 Coordonnées de la grotte de Small Cave.

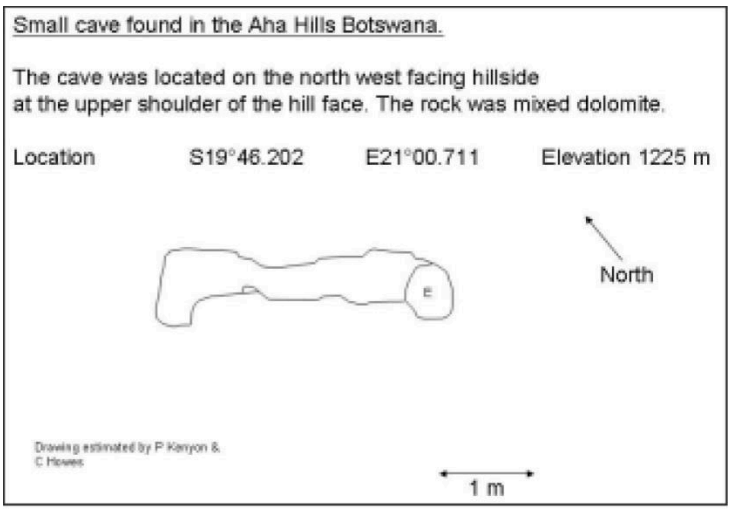


Figure 522 Plan de Small Cave (Grant & Ingold, 2015, p.22).

Depuis le sommet de la colline où se situe la grotte de Waxhou, aux coordonnées suivantes (Latitude : 19°46'42.23"S Longitude : 21° 2'31.71"E) le panorama montre plusieurs collines (Figure 523 à Figure 525) que nous avons reportées sur les cartes suivantes (Figure 526).

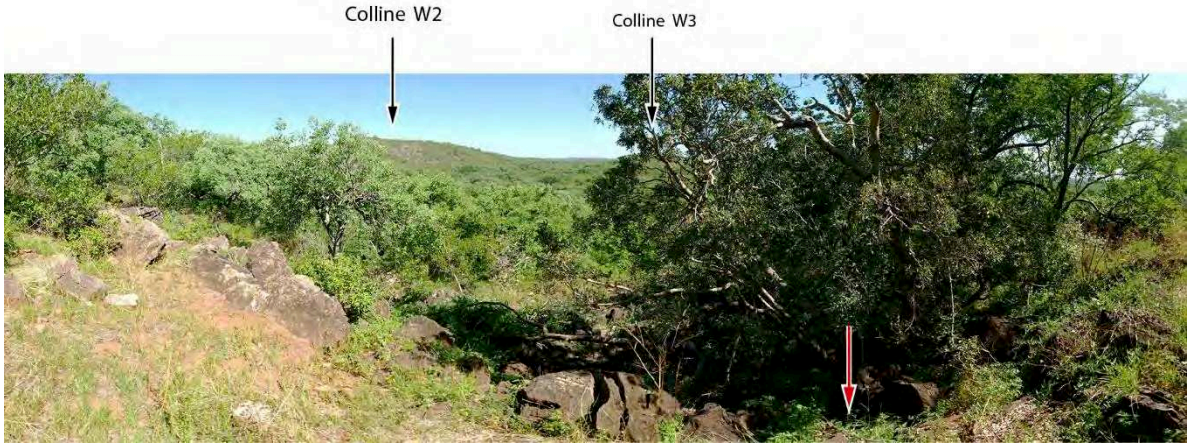


Figure 523 Panorama depuis la grotte de Waxhou South.

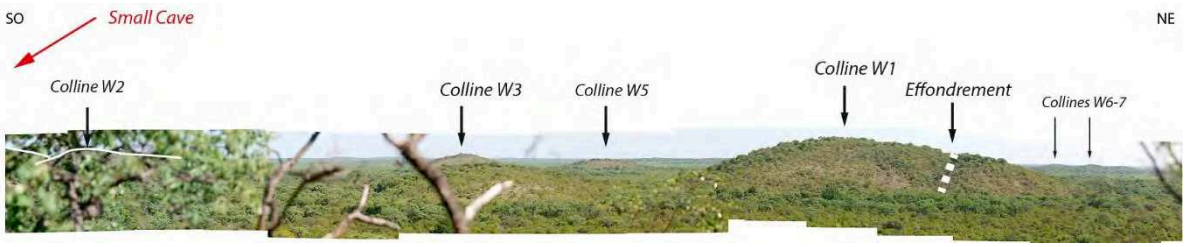


Figure 524 Panorama depuis le sommet de la colline de la grotte de Waxhou South. Le nom des collines fait référence aux cartes suivantes (Figure 526).

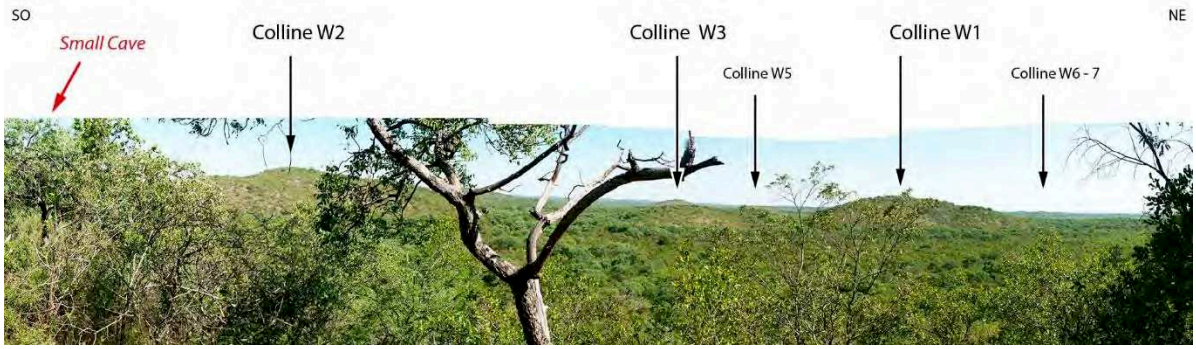


Figure 525 Idem.

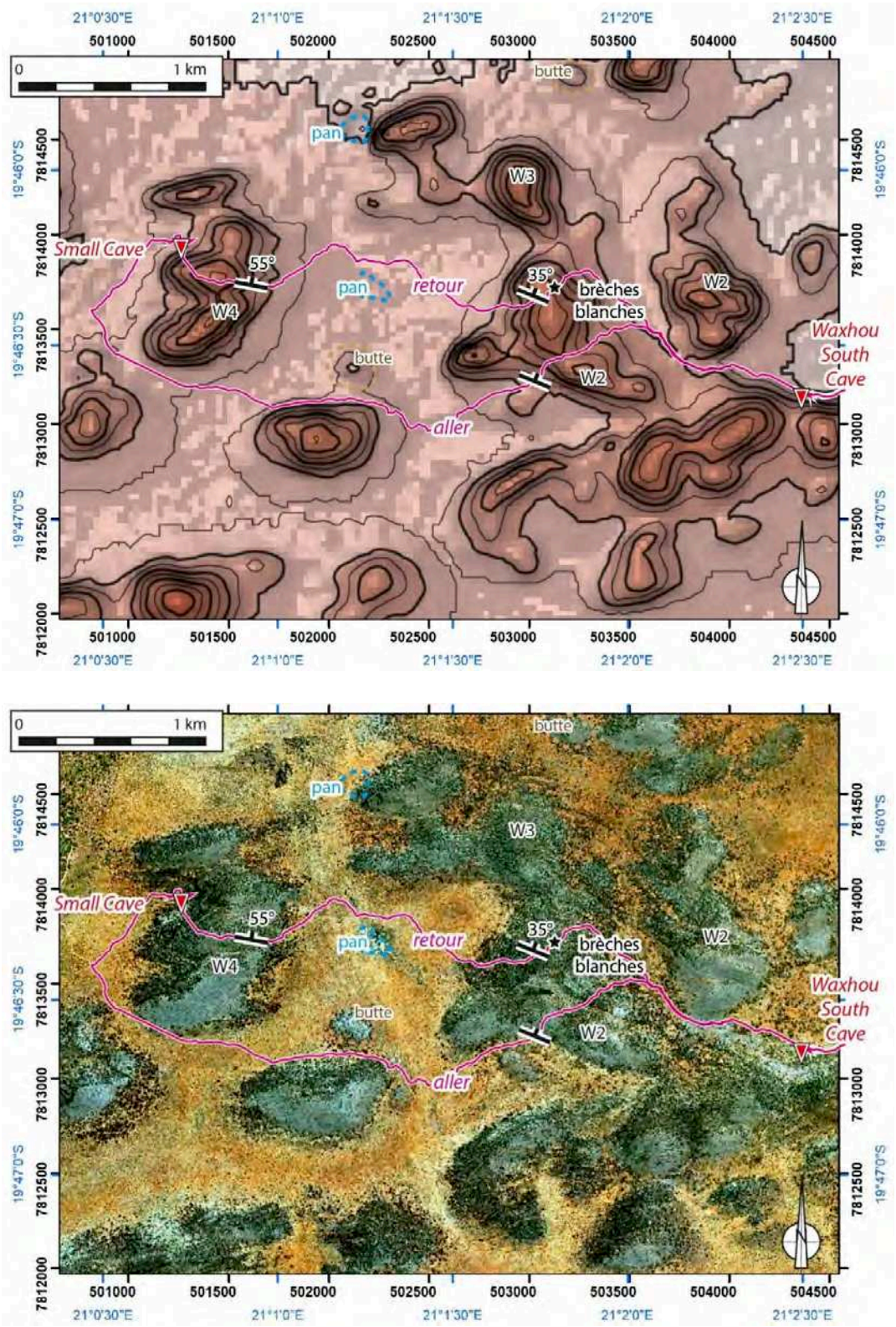


Figure 526 Trajet de prospection du 27/11/2024 de Waxhou South à Small Cave sur un modèle ombré (JAXA) en haut et sur une image satellite (MAXAR) en bas. Sont indiquées les collines visibles sur le panorama de la Figure 525. En annexe, le récapitulatif des prospections des Aha Hills est réalisé (Figure 1192 p.1219).

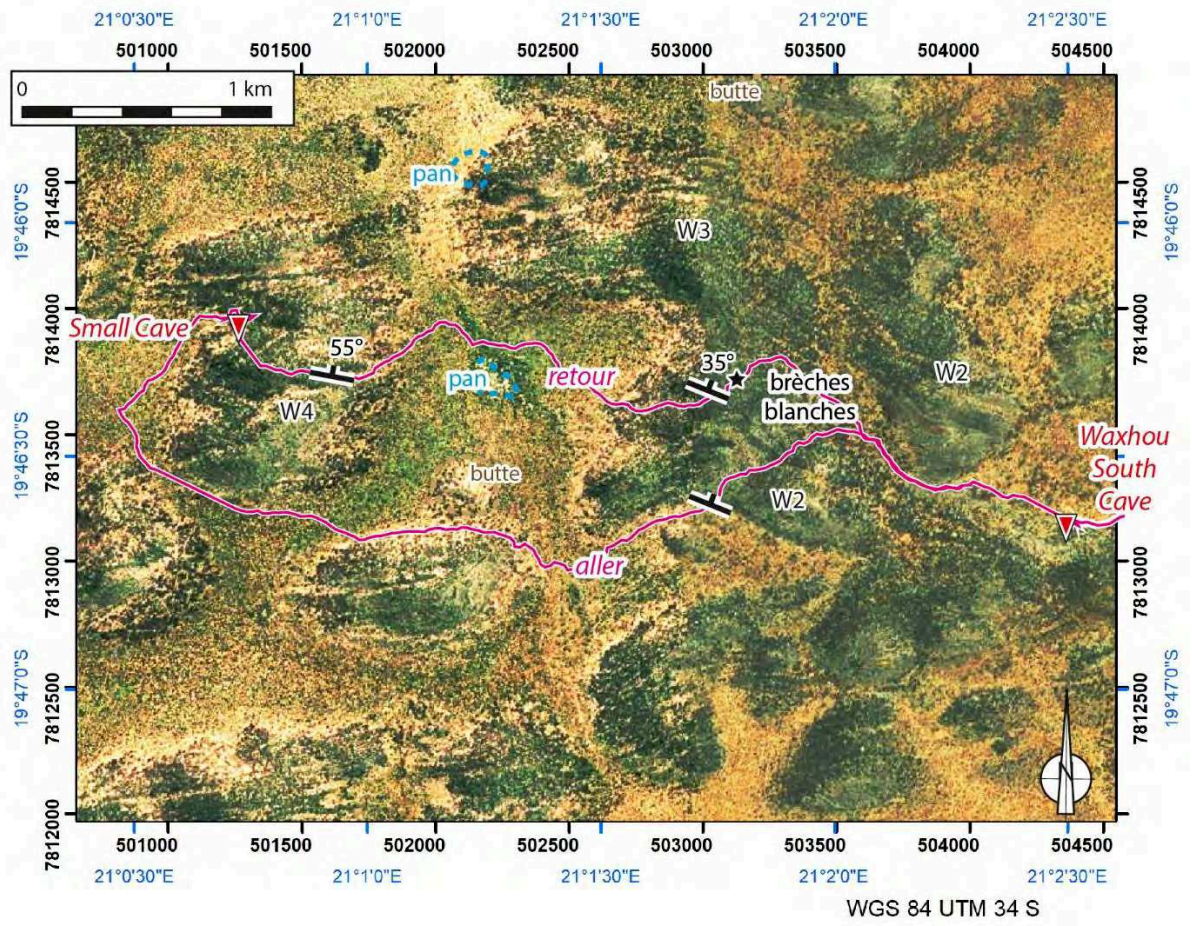


Figure 527 Idem mais avec une image satellite (Arcgis Wayback 2022-05-18) montrant plus de détail pour les collines dolomitiques.



Figure 528 Barre rocheuse où se situe Small Cave.



Figure 529 Entrée de Small Cave.

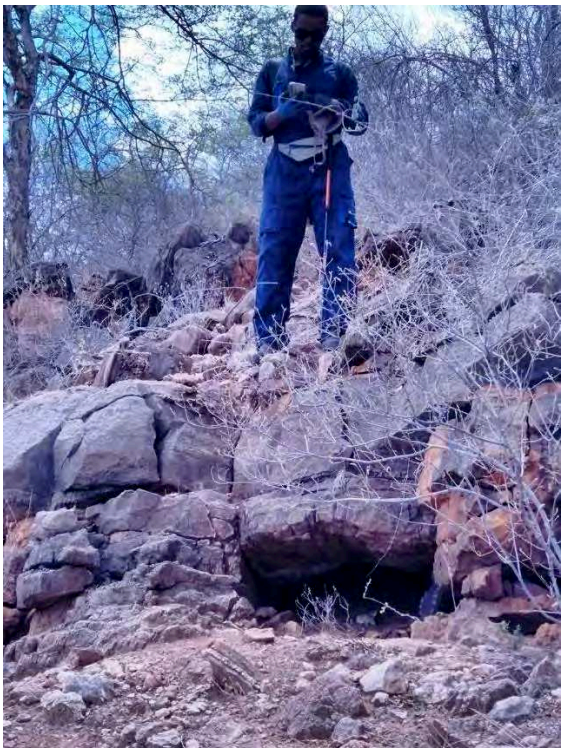


Figure 530 Entrée de la cavité.

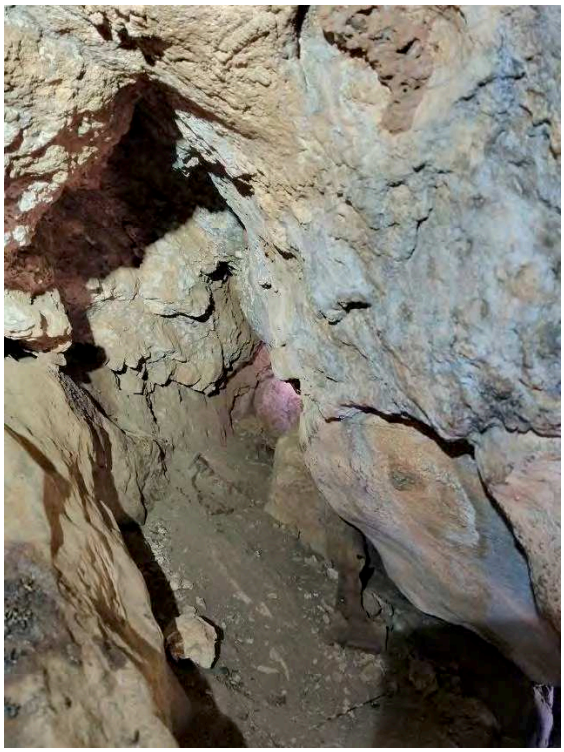


Figure 531 Intérieur de la cavité impénétrable.



Figure 532 Lithologie où s'ouvre l'entrée de la galerie.

Ce versant est constitué d'un banc épais de calcaire, qui surmonte des niveaux plus fins, fissurés et en cours de démantèlement (Figure 532). La galerie s'ouvre derrière ce banc épais, qui a basculé en raison de la désagrégation des niveaux fins sous-jacents. Il ne s'agit donc pas d'une grotte formée par la circulation de l'eau et aucun développement souterrain supplémentaire n'est possible.



Figure 533 Os récent trouvé dans la grotte.

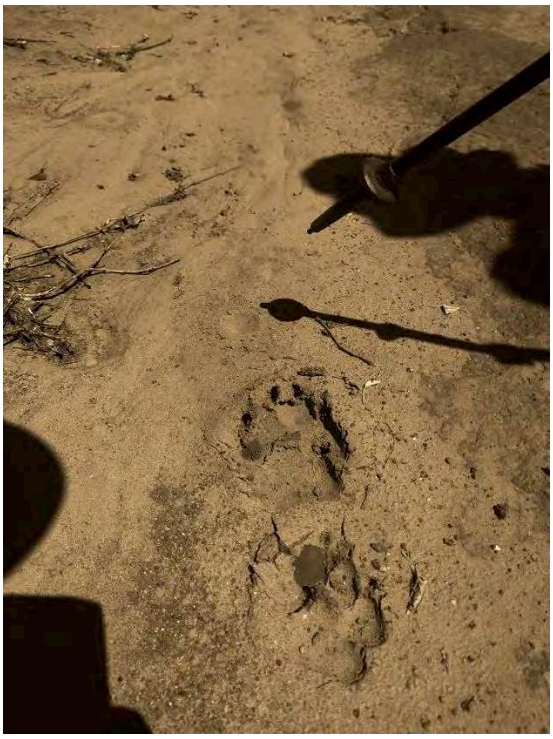


Figure 534 Empreintes fraîches de félins dans les sables sur la piste que l'on suit.

4.2.3. Gcwihaba Hills

Le secteur de Gcwihaba se développe dans les dolomies et est en partie recouvert par les sables du Kalahari (définis p.507). Il est constitué de six affleurements de dolomies formant des collines. Trois collines émergent clairement de la plaine sableuse et atteignent 30 m de haut (colline A, B et D), tandis que les trois autres ont des altitudes plus faibles et présentent des sommets plats (colline C, E et F) (Cf. Tableau 15).

Nom des collines de Gcwihaba	Altitude en mètre (calée MNT JAXA)	Altitude des cavités (cf. p.655)
Colline A (Gcwihaba)	1047	1006 (1003 à 1028)
Colline B (Dimapo)	1032	995
Colline C (Gisement de Roger 1971)	1014	1006 (1007 à 1010)
Colline D (Wadoum)	1032	1009 (993 à 1011)
Colline E	1004	pas de réseau
Colline F	1006	pas

Tableau 15 Altitudes des collines de Gcwihaba.

Les cartes (Figure 538 à Figure 540) et les vues 2.5D (Figure 773 p.777) montrent qu'à *Gcwihaba Hills*, la **vallée de Gewidum** sépare deux ensembles de cavités :

- au nord de la vallée, en rive gauche : la grotte de Wadum et les sites fossilifères de la colline C (Figure 535), ces derniers étant d'anciens remplissages karstiques trépanés par la surface topographique où ont été découverts les premiers fossiles de la région en 1971 (Pickford et Mein, 1988) (lire annexe p.1321 le contexte de la première découverte) ;

- au sud de la vallée, en rive droite : la grotte de Dimapo et la grotte de Gcwihaba.

Hormis la grotte de Gcwihaba, qui présente deux grands porches d'entrée naturels, et la grotte de Wadum, accessible par un aven naturel de 9 m de profondeur nécessitant l'usage d'une corde et d'un équipement spéléologique, les autres grottes ne sont accessibles que par des forages de 60 cm de diamètre et de plusieurs dizaines de mètres de profondeur (Tableau 29 p.659).

Entre la colline de la grotte de Gcwihaba et la colline C, la vallée entaille des calcrètes subhorizontales sur une hauteur de 7 mètres, tandis que les dolomies affleurent dans le fond de la vallée, plus en amont. Ces observations sont indiquées sur la carte géologique (Figure 741 p.739), sur la coupe géologique schématique et sur le profil topographique de la vallée (p.759-759).

Nous verrons que l'analyse des forages réalisés dans ce secteur révèle que la base des collines dolomitique est masquée sous les sables jusqu'à 148 m de profondeur (p.752).

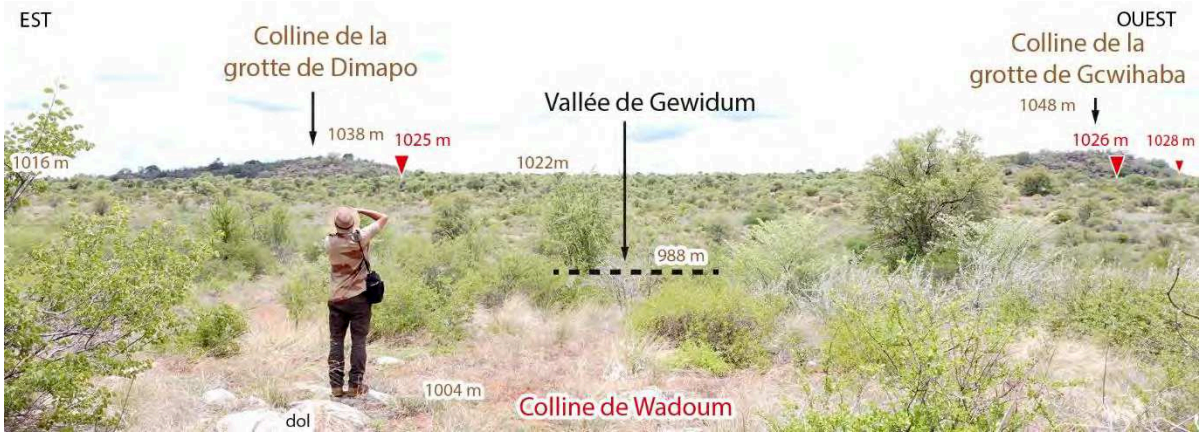


Figure 535 Panorama vers le sud depuis la colline de Wadoum, où on observe la colline de Dimapo et la colline de Gcwihaba. (Source : Bruxelles L.) (Coordonnées WGS : -20.0161111 ; 21.35416668 ; Lien Google Maps).

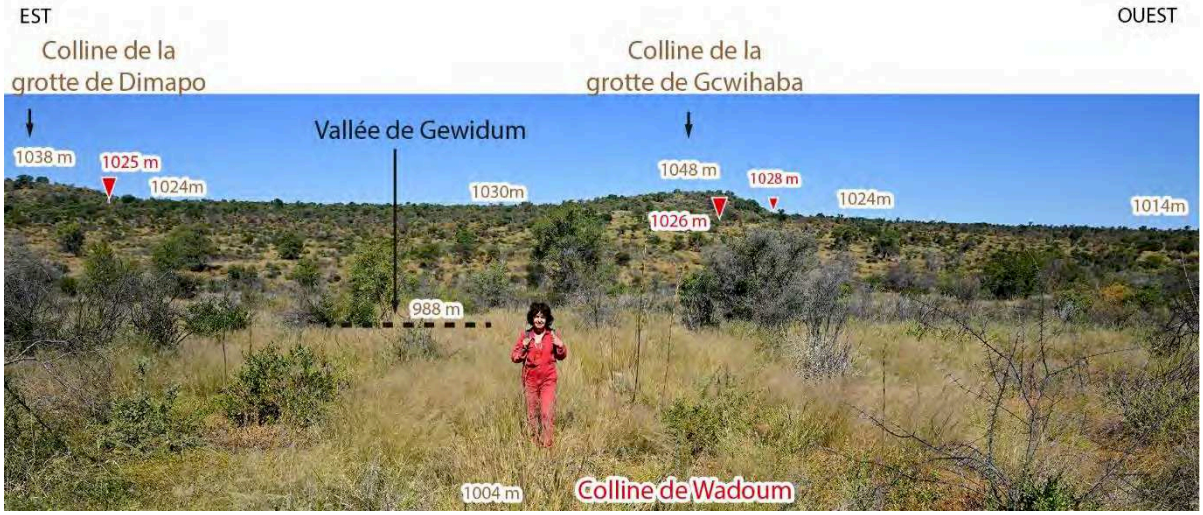


Figure 536 Même endroit que le panorama précédemment mais on distingue la pente sableuse qui se développe vers l'ouest au pied de la grotte de Gcwihaba (Source : Crochet P.).

Remarque :

Gcwihaba est parfois écrit Cwihaba, Kwehaba, Kwihabe (Cooke et Baillieul, 1974 ; Cooke, 1975), Khnihabe (Wayland, 1944), /twihaba (Helgren et Brooks., 1983, p.193), Tsihaba (Helgren et Brooks, 1983), Qwihaba (Ramokate, 1995) ou Qwihabe (Chatupa *et al.*, 1996).

4.2.3.1. Cartographies des Gcwihaba Hills

Nous présentons la première carte de *Gcwihaba Hills* publiée par Martin Pickford en 1990 (Figure 537) puis, en décrivant les données utilisées, nous proposerons une cartographie actualisée des *Gcwihaba Hills*.

4.2.3.1.1. La première carte de Gcwihaba Hills de 1990

La première carte de Gcwihaba localise trois zones fossilifères (Pickford, 1990, Fig.2, p.9), correspondant aux points orange sur la Figure 537. Deux sites fossilifères se trouvent sur la colline C, et un autre est situé près de l'entrée nord de la grotte de Gcwihaba (colline A). Ce plan indique également la présence de six collines, représentées en rouge et désignées de A à F. Un talweg, le Gewidum, représenté en bleu, sépare ces collines.

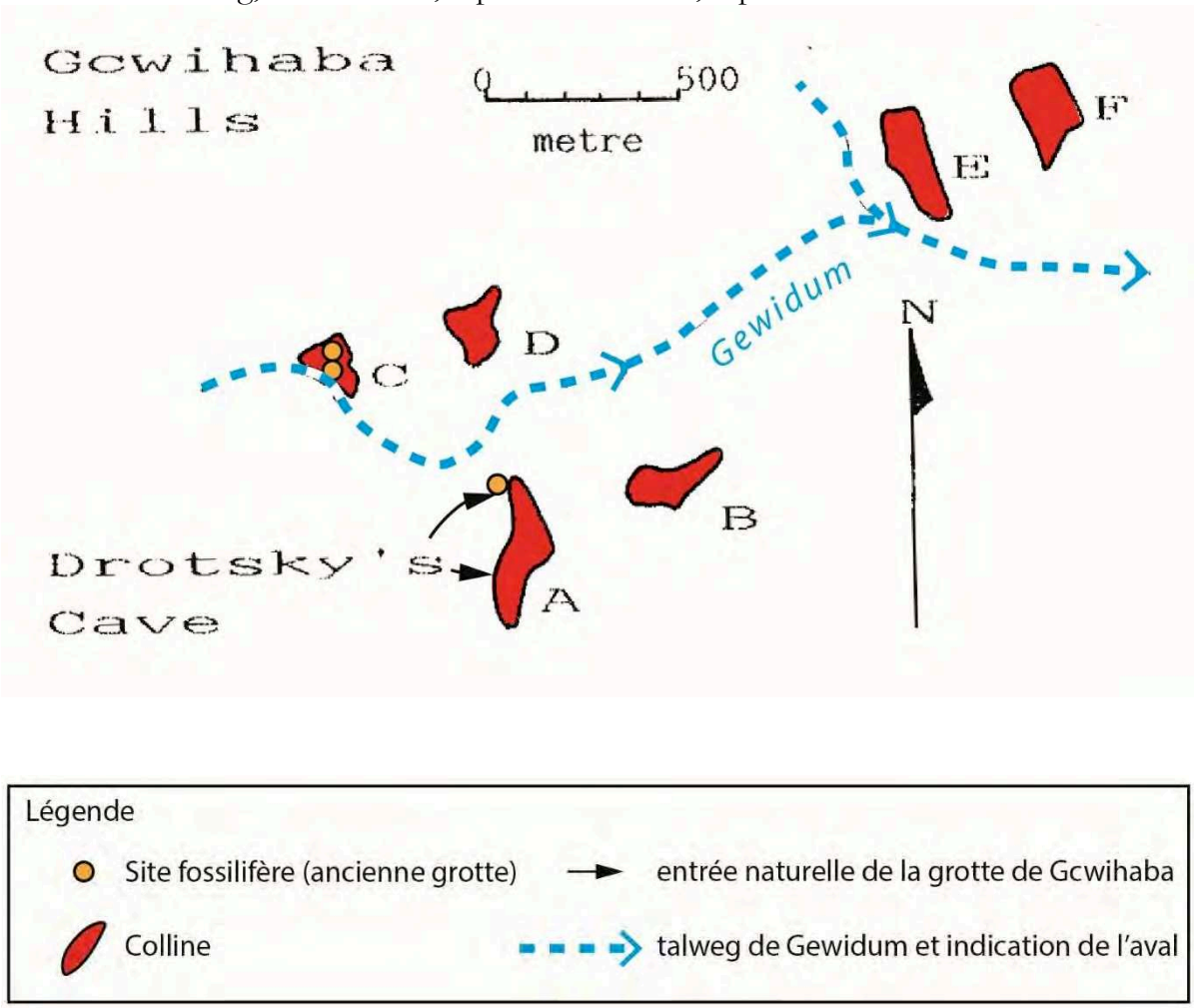


Figure 537 Premier plan de Gcwihaba et indication des zones fossilifères (Source : Pickford, 1990, Fig.2, p.9, modifié).

D'après cette carte, les brèches situées au sud du versant ouest de la colline de Gcwihaba (p.566), qui n'y sont pas indiquées, ne seraient pas fossilifères.
Nous supposons que cette carte a été dessinée à partir de photographie aérienne.

4.2.3.1.2. Données topographiques récentes et actualisation de la carte des Gcwihaba Hills

Les nouvelles cavités découvertes, et leurs topographies, permettent aujourd'hui d'établir une nouvelle cartographie de cette région fossilifère karstique majeure (Figure 538).

Cette cartographie montre cinq cavités indiquées en rouge : Gcwihaba, Dimapo, Wadoum, Motswantsweng et les remplissages fossilifères de la colline C, correspondant à d'anciennes galeries de grottes tronquées par la surface topographique et aujourd'hui exposées à l'air libre.

Seules deux cavités possèdent des entrées naturelles : la grotte de Gcwihaba, avec ses deux grands porches, et la grotte de Wadoum, qui s'ouvre par un puits naturel (aven) de 9 mètres de profondeur.

Dimapo n'est pénétrable qu'à travers un forage de 60 cm de diamètre et de 35 m de profondeur (Ellis, 2020, p.14). Aucun forage n'a encore percée la grotte de Motswantsweng, qui demeure inexplorée et n'a été découverte que par gravimétrie (Selfe / GRS Consulting 2005a, b, 2013).

La vallée de Gewidum sépare les collines. En rive droite, on trouve la colline de Gcwihaba (colline A), la colline de Dimapo (colline B), la colline E et la colline F et en rive gauche la colline de Wadoum (et Motswantsweng) (colline C).

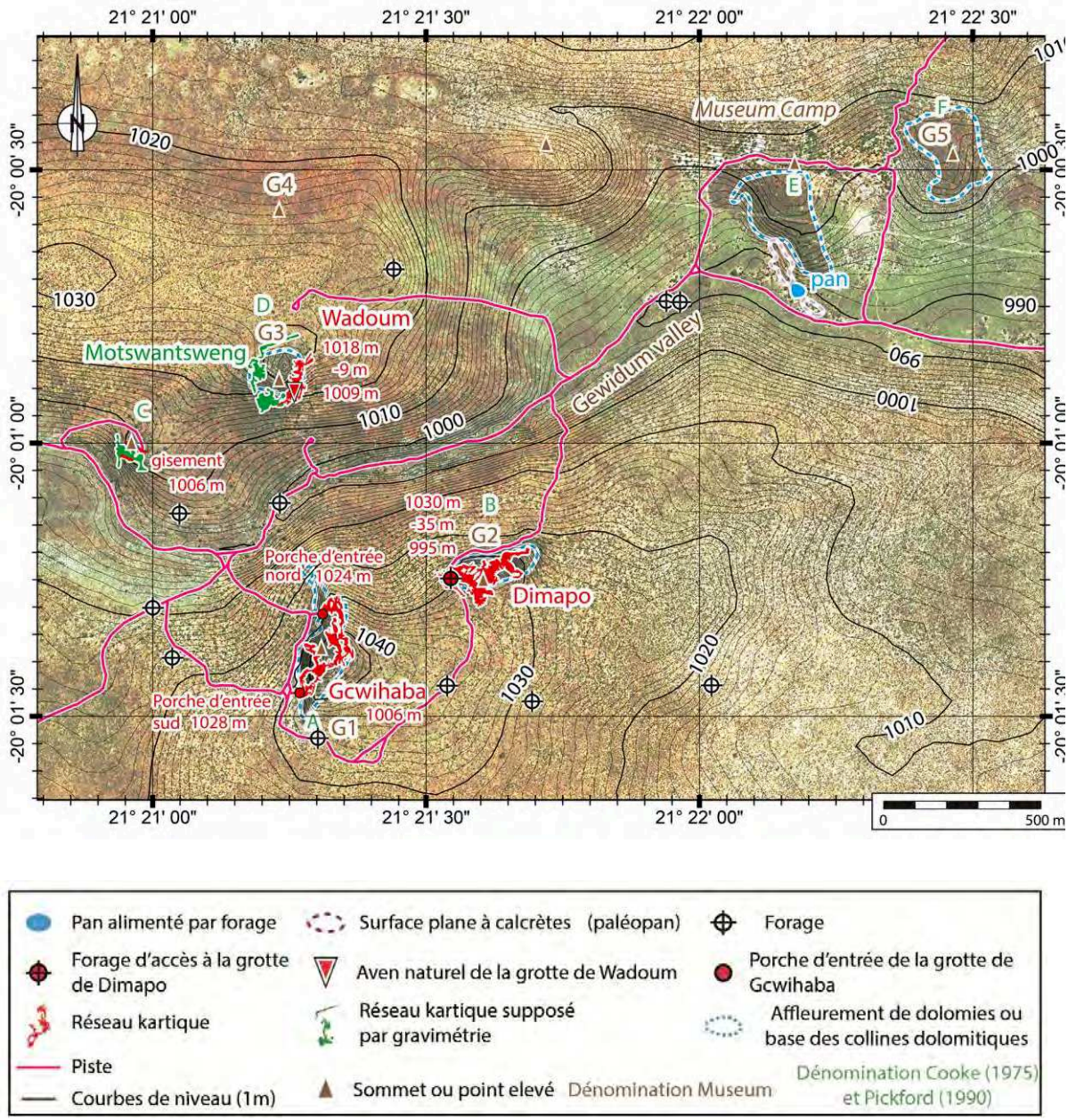


Figure 538 Collines karstifiées de Gcwihaba et altitudes des réseaux karstiques.

1. Levé au GPS différentiel de la région de Gcwihaba par Gavin Selfe et le GRS Consulting

Les courbes de niveau de la carte précédente (Figure 538) proviennent du traitement géomatique que nous avons effectué des levés bruts réalisés par Selfe G. / GRS Consulting (2005a, b ; 2013) (en annexe p.1305) au GPS différentiel et mises à notre disposition.

Ces données nous ont permis de réaliser la carte hypsométrique ci-dessous (Figure 539).

Cette carte est primordiale pour étudier et identifier les paléosurfaces (lire définition p.165) - comme nous l'avons fait dans le Chapitre n°3 (p.287) pour le *Cradle of Humankind* - et pour caractériser l'histoire des paysages ainsi que leur évolution, comme l'édification des buttes karstiques.

Par exemple, ces données ont servi à faire la coupe géologique (Figure 739 p.736) et pour réaliser les vues en 2.5 D de la colline E (Figure 727 p.732).

Ces données et cette carte sont nécessaires pour identifier les surfaces karstifiées et orienter la recherche de nouveaux gisements fossilifères.

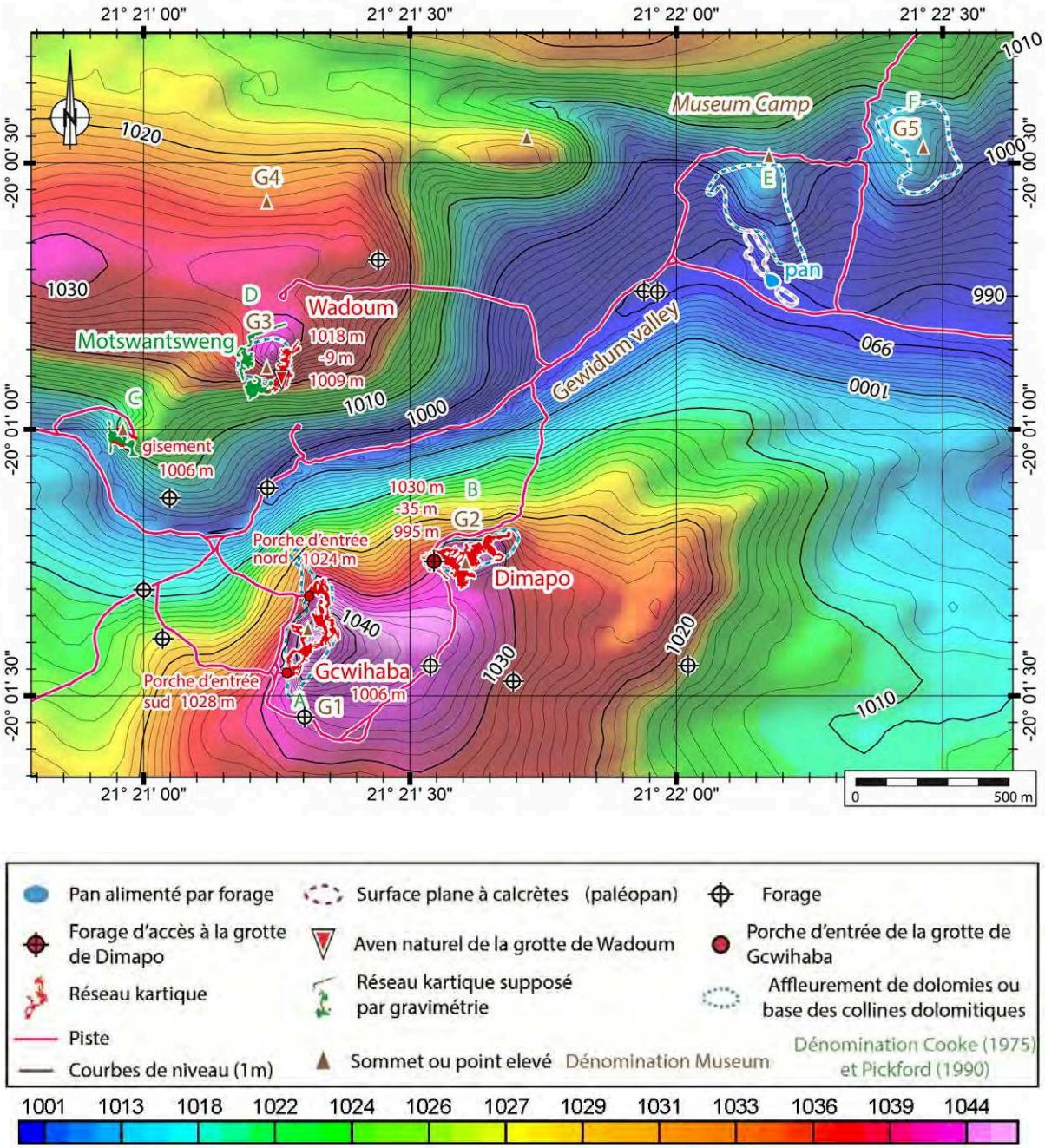


Figure 539 Hypsométrie des collines karstifiées de Gcwihaba et altitudes des réseaux karstiques.

2. Détail sur les réseaux karstiques de la région de Gcwihaba

Sur les cartes que nous avons réalisées, nous avons redessiné les plans topographiques des cavités à partir de plusieurs sources bibliographiques, principalement Ellis (2020).

Les plans originaux sont indiqués en annexe :

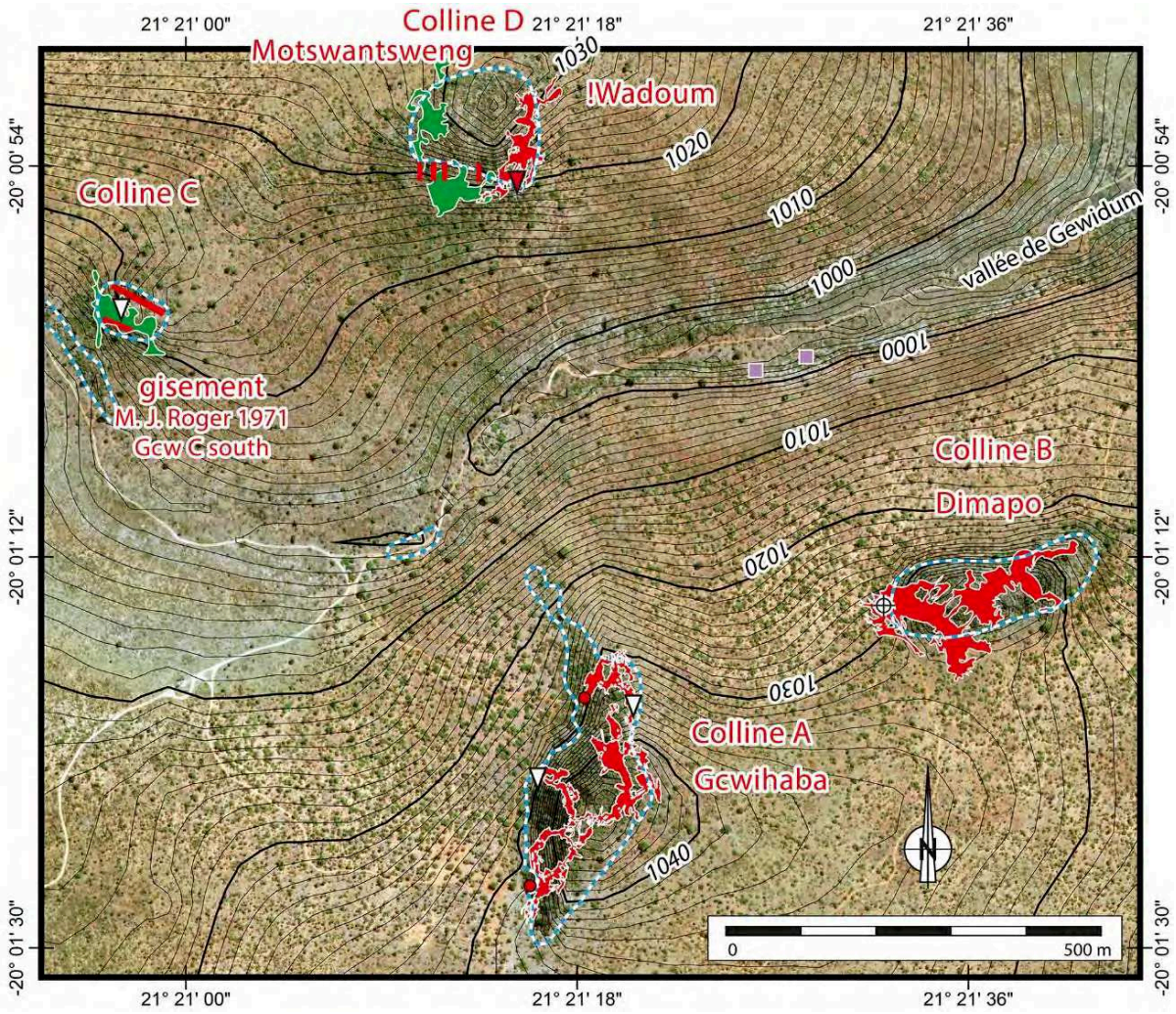
- Grotte de Motswantsweng : d'après le relevé gravimétrique de *Poseidon Geophysic* (*Independent Cave Explorers* (lien internet) (Figure 1312 p.1357).

- Grotte de Wadoum : Mann & Ritter (1995) (Figure 1295 p.1340).

- Grotte de Dimapo : Ellis, Jacobs, Ntungwana, Jankie, Matako & Ledimo en 2023 et publiée dans Du Preez *et al.* (2015) (Figure 1313 p.1358).

- Grotte de Gcwihaba : BSES en 1991, publié dans Garner et Riter (1994) (Figure 1294 p.1339).

Nous avons ajouté les galeries identifiées au niveau de la colline C (gisement fossilifère découvert par M.J. Roger en 1971) et de celles de la colline D et recoupées par le versant. Les phénomènes karstiques des calcrètes (Figure 708 p.718) formant le talweg de Gewidum n'ont pas été cartographiés. Nous avons indiqué les affleurements de calcrètes coquilliers dont nous reparlerons plus loin (p.717).



- Porche naturelle de la grotte de Gcwihaba
- Aven comblé de sédiments
- Aven naturel de la grotte de Wadoum
- Forage d'accès à la grotte de Dimapo
- Réseau karstique topographié
- Réseau karstique supposé par gravimétrie *(GRS Consulting, Poseidon Geophysic)*
- Affleurement étudié de calcrètes coquilliers subhorizontales
- Galerie de grotte tronquée par la surface topographie
- Courbes de niveaux (1 m) Selfe G. / *GRS Consulting* (2005a)
- Affleurement de dolomies ou base des collines dolomitiques

Figure 540 Réseaux karstiques de la région de Gcwihaba.

4.2.3.2. La grotte de Gcwihaba sur la colline A

La grotte de Gcwihaba a été montrée par les *Bushmans* à Martinus Dortsky en 1934 (Cooke et Baillieul, 1974) (Voir annexe p.1312). Elle est parfois écrite Twihaba, Cwihaba ou Kwihabe. Elle a longtemps été appelée « *Drotsky's cave*", parfois écrit Drodsky (Wayland, 1944) ou Drotzky (Heine, 1992, p.160). C'était la plus grande grotte du Botswana (Martini, 1996) avant la découverte des grottes sur K1 à *Koanaka Hills (Diviner's, Gecko, Mongongo)*. Elle a été visitée et décrite par Bruxelles et son équipe en 2015 (Bruxelles *et al.*, 2016, p.52 ; Dandurand *et al.*2019). L'entrée nord de la grotte est située à 1024 m d'altitude (MNT JAXA) et l'entrée sud à 1028 m. L'étagement des galeries est situé à 1006 m d'altitude (Figure 739 et synthèse p.655). Cette grotte accueille une faune importante de chauves-souris et d'insectes (Mazebedi & Hesselberg, 2020).

Latitude SUD	Longitude EST	Source
20°2'	21°25'	(Wayland, 1944)
20°2'	21°20'	(Quick, 1970) (Falcon College) (Cooke et Baillieul, 1974)
20°3'	21°26'	(Cooke et Verhagen, 1977)
20°01'	21°21'	(Pickford et Mein, 1988)
20°01.262'	21°21.309'	(Ramokate, 1995)

Entrée nord de Gcwihaba (WGS 84)		
20°1'18,48"	21°21'18,34"	Ledimo Oatse (GPS Garmin) *App 6 Coordinates of Features* (p.1242)
-20,0218	21,3550944	

Entrée sud de Gcwihaba (WGS 84)		
20°1'27,14"	21°21'15,83"	Ledimo Oatse (GPS Garmin) *App 6 Coordinates of Features* (p.1242
-20,0242056	21,3543972	

Tableau 16 Evolution de la précision des coordonnées de la grotte de Gcwihaba.

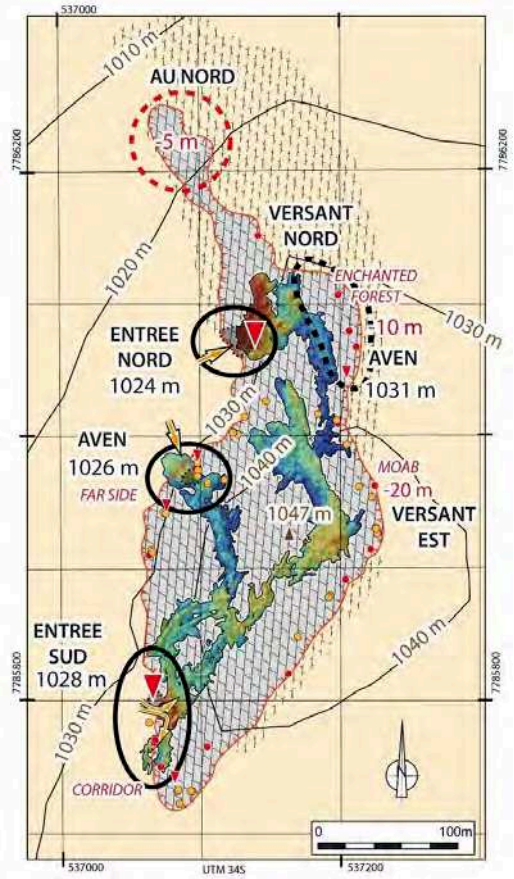
Localisation *googlemaps* approximative de l'entrée nord de la grotte de Gcwihaba : https://maps.app.goo.gl/zfcHmHuto3zVhYcy5

Localisation *googlemaps* approximative de l'entrée sud de la grotte de Gcwihaba : https://maps.app.goo.gl/NfTweC62gBkXvaHu6

> *« Dans un petit koppie (colline) juste à côté de la grotte de Drotsky est exposé un marbre dolomitique blanc, très déformé. Le marbre dolomitique est porteur de phlogopite et de sidérite. Les fissures dans le marbre dolomitique sont remplies de calcaire sableux post-tectonique, rouge, parfois bréchifié. La foliation est orientée à 21°/ 79° SE et présente une linéation plongeant de N40° vers N190°. La linéation est définie par des tiges de quartz. Les tiges de quartz sont probablement dues à la déformation tectonique des veines de quartz pré-tectoniques. Les veines de quartz syntectoniques sont plissées avec un clivage plan axial » (Ramokate, 1995, p.6).*

4.2.3.2.1. Cartographie de la surface de colline où se situe la grotte de Gcwihaba

Nous avons recherché autour de la colline, où se situe la grotte de Gcwihaba, notamment au pied et sur les versants, des fissures, des ouvertures ou des avens mettant, ou ayant mis par le passé, en contact l'extérieur et l'intérieur de la cavité. Ces zones d'échange constituent en effet les potentiels pièges à sédiments et à os. Nous avons identifié plusieurs zones d'échange propices aux piégeages de sédiments venant de la surface (Figure 541). Bien évidement, les ouvertures naturelles de la cavité, comme le grand porche de l'entrée sud qui a permis de combler le corridor de sables récents (Fourvel *et al.*, 2024). L'aven situé à mi-distance des entrées, où l'on trouve des brèches fossilifères. Les versants nord et est qui se situent à l'aplomb du réseau et où nous avons calculé la profondeur supposée du réseau à partir du relevé 3D (Genuite *et al.*, 2024) et de la topographie réalisée au GPS différentiel par le *GRS Consulting* (Selfe, 2005b, 2013). Nous considérons que le réseau karstique se développe autour d'une altitude moyenne de 1006 m et que son amplitude verticale est autour de 20 m (entre 996 et 1016 m) comme le montre le relevé 3D (Figure 565 p.576). Évidement, il faut prendre en compte que le réseau connu a été élargi par la biocorrosion (Dandurand *et al.*, 2016). Malgré de nombreux indices de brèches et de fissures sur le versant est de la colline, le réseau karstique est trop profond à cet endroit, c'est la salle de reproduction des chauves-souris *(MOAB)*. Au nord, il existe un secteur potentiel où la surface topographique rejoint l'altitude théorique du réseau karstique, vers 1006 m, mais dans ce secteur rien n'indique que les dolomies soient karstifiées.



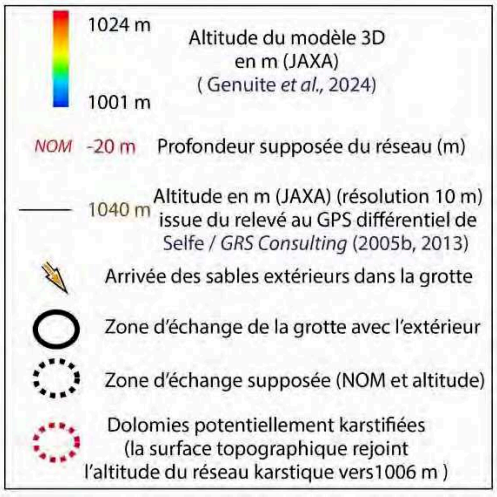


Figure 541 Secteurs propices aux piégeages de sédiments au niveau de la colline de la grotte de Gcwihaba.

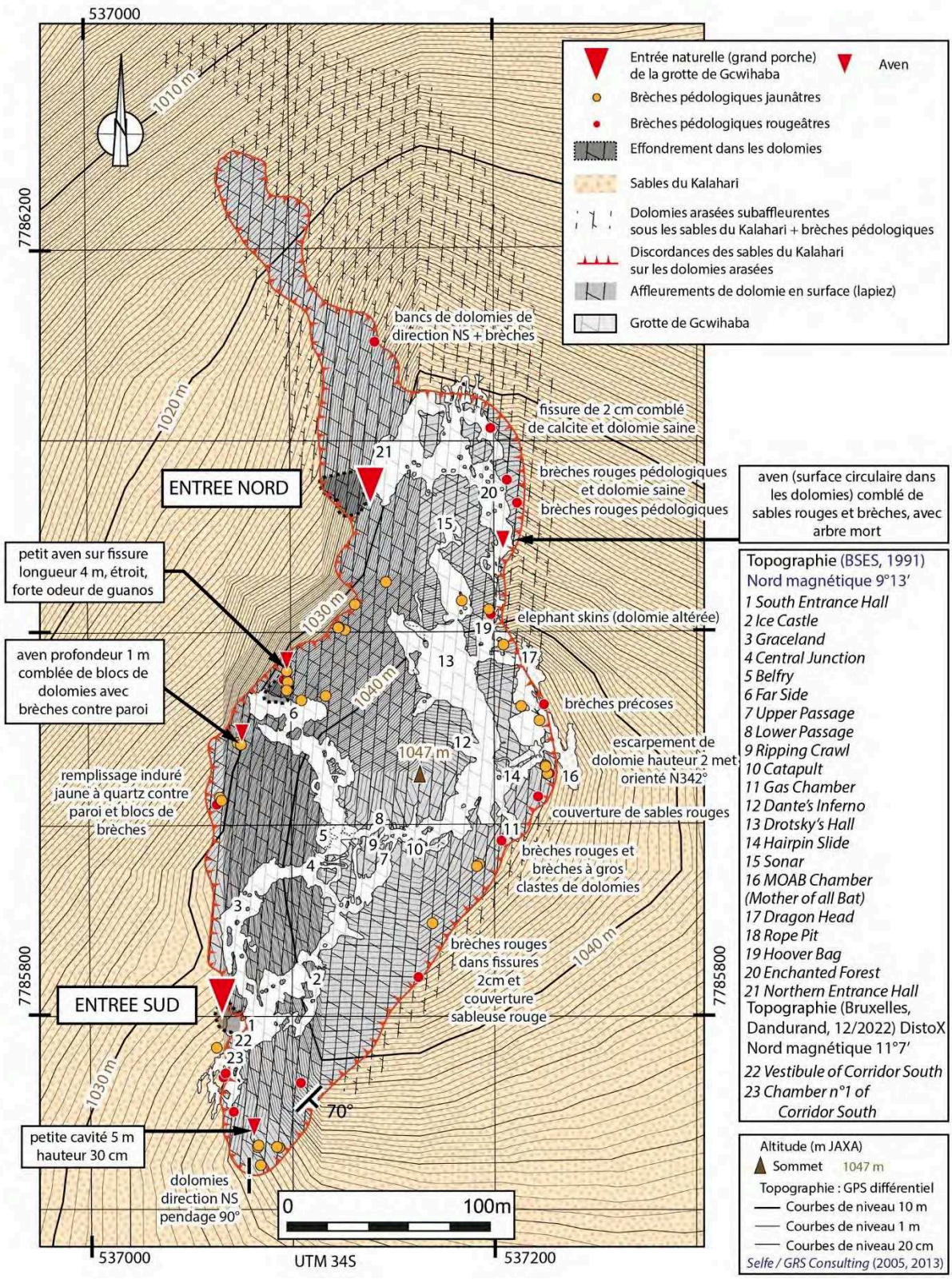


Figure 542 Cartographie de la colline de la grotte de Gcwihaba.

4.2.3.2.2. Brèches fossilifères de l'aven du versant ouest de la colline de Gcwihaba

Deux zones de brèches sur le versant ouest de la colline de Gcwihaba sont décrites par Pickford (1990, p.1) et localisées en orange sur son plan (Figure 544). Elles ont été réidentifiées par Bruxelles et al. (2016, p.68). Les brèches du sud, nommées « *Gcw A South* » par Pickford (1990), correspondent à plusieurs avens (photographiés Figure 544), dont un qui est large de 4 m mais qui est vite impénétrable au bout d'un mètre du fait d'une grande quantité de blocs de dolomies et de blocs de brèches qui le comblent. La forte odeur de guano qui se dégage des ouvertures indique que la grotte de Gcwihaba n'est pas loin en-dessous. Effectivement, le report de la topographie indique que la salle nommée « *Far Side* » se situe sous les ouvertures. Des brèches pédologiques jaunâtres, à grains siliceux, sont conservées contre les parois de l'aven. Ce secteur, où Pickford a trouvé des os (Pickford, 1990, p.1), est propice pour commencer une fouille. Ces secteurs qui mettaient en communication la grotte avec l'extérieur sont susceptibles d'avoir conservé des os.

Position de l'aven sur le versant ouest de la colline de la grotte de Gcwihaba
Latitude : -20,02257714 ; Longitude : 21,35467739 (Coordonnées en WGS84 UTM34K 0537096,-7785981); Altitude : 1026 m (MNT JAXA).



Figure 543 Avens qui s'ouvrent sur le versant ouest de la colline de la grotte de Gcwihaba.

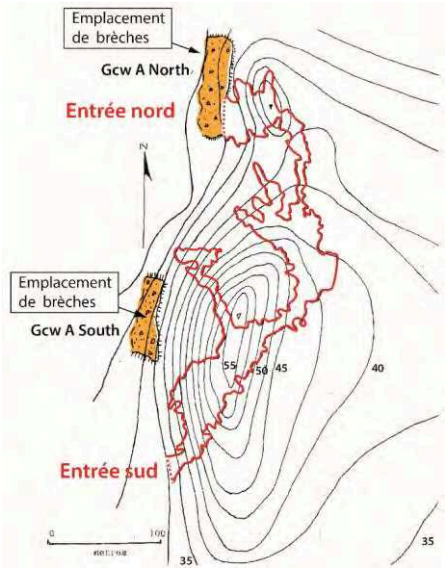


Figure 544 En orange les zones à brèches découvertes par Pickford (1990) sur le versant ouest de la colline de la grotte de Gcwihaba (Source : Pickford, 1990, Fig. 3, p.10, modifié).

Les brèches au nord (*Gcw A North)* ont livré un squelette partiel de bovidé (Pickford, 1990, p.1).

Les brèches du sud (Gcw A South) sont riches en silice. Nous supposons que ce sont des brèches pédologiques (lire définition p.521).



Figure 546 Limite entre les dolomies en haut et le remplissage en bas correspondant à une ancienne paroi de grotte.



Figure 545 Détail de la photographie précédente.



Figure 547 Brèches à gros clastes de dolomies et à gros grains de quartz.



Figure 548 Limite entre les dolomies en haut et le remplissage en bas correspondant à une ancienne paroi de grotte. Remarquons un bloc de quartz qui pourrait avoir été taillé.

4.2.3.2.3. Les remplissages fossilifères sableux du corridor de l'entrée sud de la grotte de Gcwihaba

Les travaux de désobstruction des sables en 2007 et 2008 (Ellis, 2020) qui comblaient le corridor de l'entrée sud (Figure 564), menés par le Museum de Gaborone, ont mis au jour des ossements. La majorité se trouve aujourd'hui à Gaborone où ils sont étudiés par notre équipe (Fourvel et al., 2024). Cette désobstruction avait pour objectif de relier la cavité découverte par forage n°Z12387 (Ellis, 2025) (Tableau 44 p.763), située à 168 m de l'entrée sud. La cavité a été trouvée à partir de 35 m de profondeur, soit à 995 m d'altitude (Figure 1315 p.1362). Ces remplissages ont fait l'objet de fouilles archéologiques par notre équipe depuis 2020 (Bruxelles *et al.,* 2020a et b, 2021 et 2022 ; Fourvel *et al.,* 2024). Ils constituent également le sujet de la thèse de doctorat d'One Clayes, débutée en 2023 et intitulée : *« Paléoenvironnements et taphonomie de l'occupation humaine ancienne dans les karsts fossilifères du Botswana : Assemblage de petits mammifères des grottes de Gcwihaba et de Koanaka, district de Ngamiland »*.

La topographie du Corridor a été réalisée par Laurent Bruxelles et Gregory Dandurand en 2022 à l'aide de Topodroid. Nous avons ajouté ce réseau à la topographie de la grotte de Gcwihaba qui manquait.

Nous avons également effectué plusieurs relevés photogrammétriques du Corridor (Figure 549) afin de produire des coupes stratigraphiques (Figure 552 à Figure 556). Avec Laurent Bruxelles, nous avons formé nos collègues à la réalisation d'une coupe stratigraphique (Figure 550), en prenant pour exemple le vestibule du *Corridor South* de la grotte de Gcwihaba.

En 2023, Kim Genuite, aidé par Grégory Dandurand sur le terrain, a réalisé un modèle 3D de l'ensemble du réseau karstique de Gcwihaba (Genuite *et al.,* 2024) et comprenant le *Corridor South*. Nous avons pu utiliser ces documents pour lever des coupes stratigraphiques du Corridor (Figure 558 et Figure 559). Nous avons calé ces documents en altitude (JAXA).

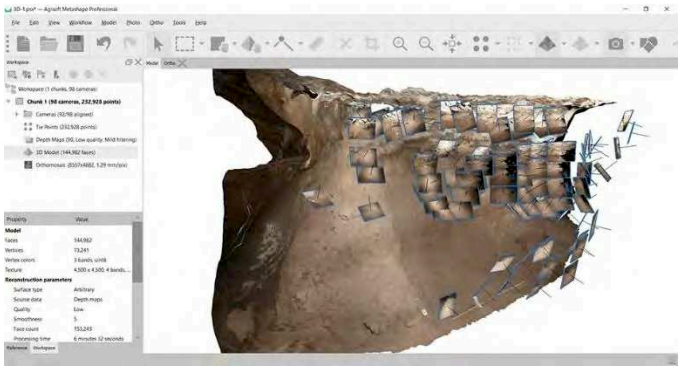


Figure 549 Interface du logiciel de photogrammétrie et position des photographies pour réaliser l'orthophotographie de la face nord du vestibule.



Figure 550 Séance du levé de la coupe stratigraphique du vestibule.

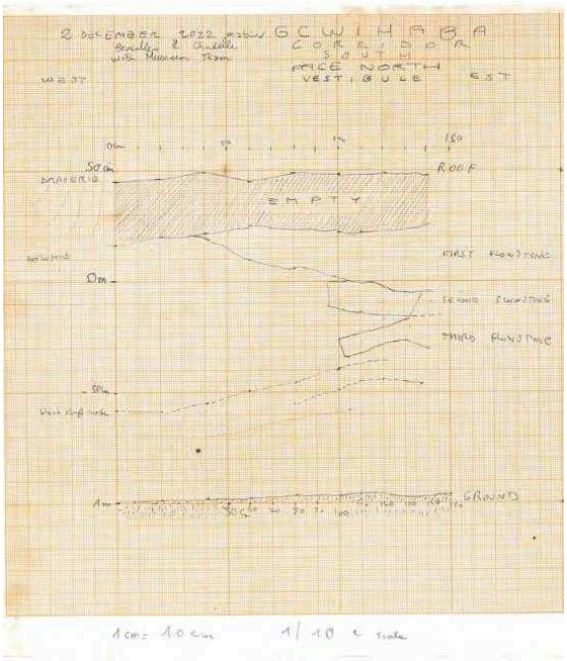


Figure 551 Levé stratigraphique brute du vestibule du Corridor South de la grotte Gcwihaba.

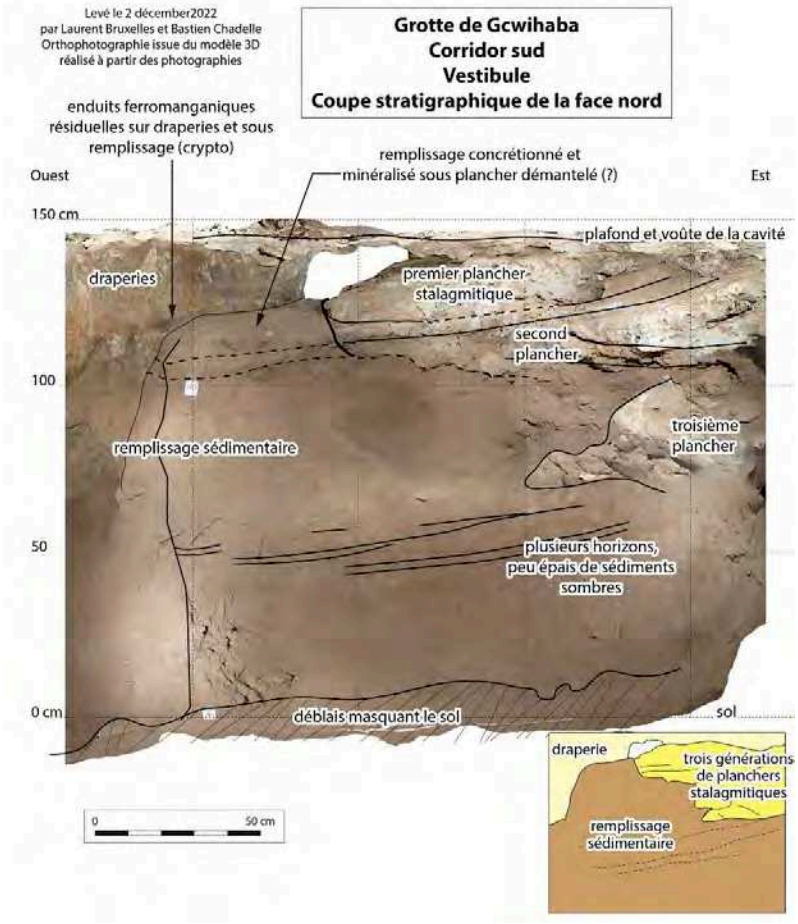


Figure 552 Coupe stratigraphique du vestibule du Corridor South de la grotte de Gcwihaba.



Figure 553 Analyses stratigraphiques des photographies de Main Chamber du Corridor South de la grotte de Gcwihaba.

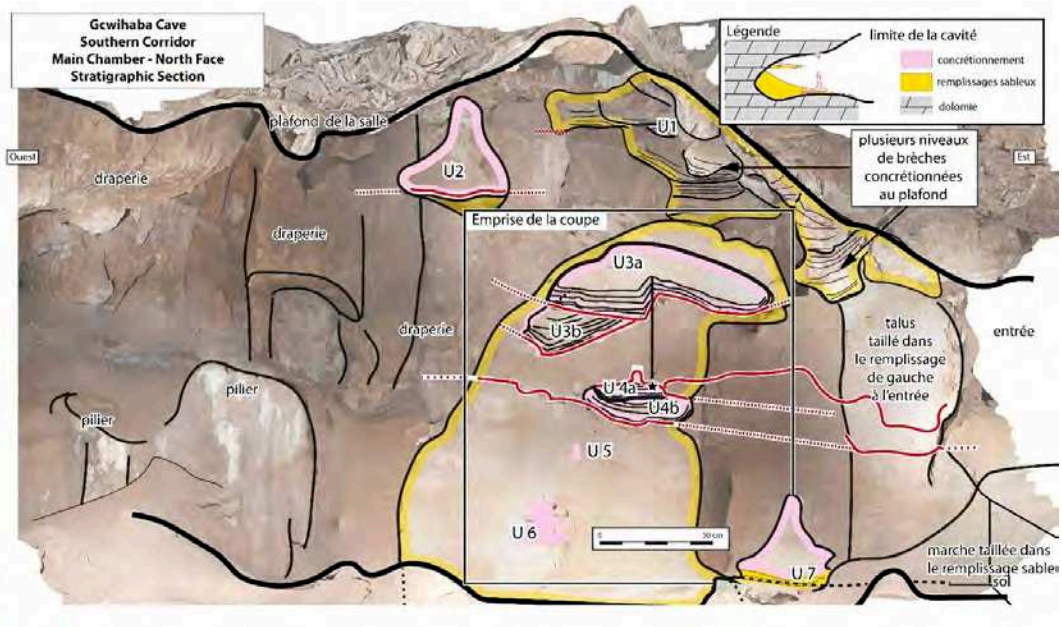


Figure 554 Relevé stratigraphique de Main Chamber (face nord) du Corridor South de la grotte de Gcwihaba.

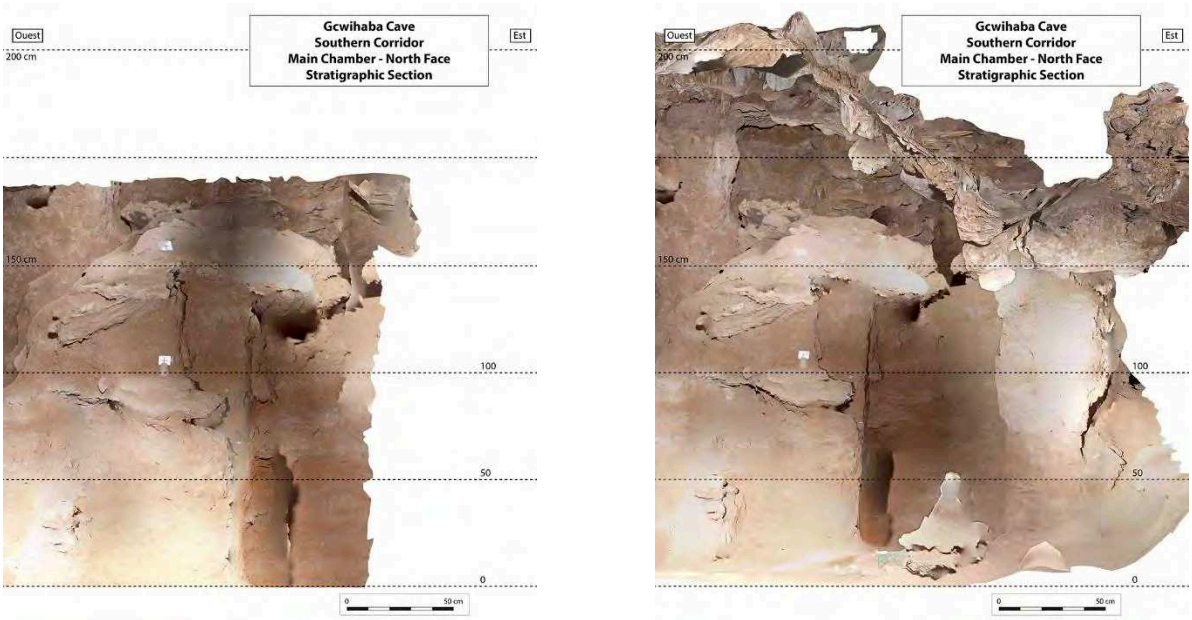


Figure 555 Relevés photogrammétriques de la coupe de Main Chamber du Corridor South de la grotte de Gcwihaba utilisée pour lever la coupe.

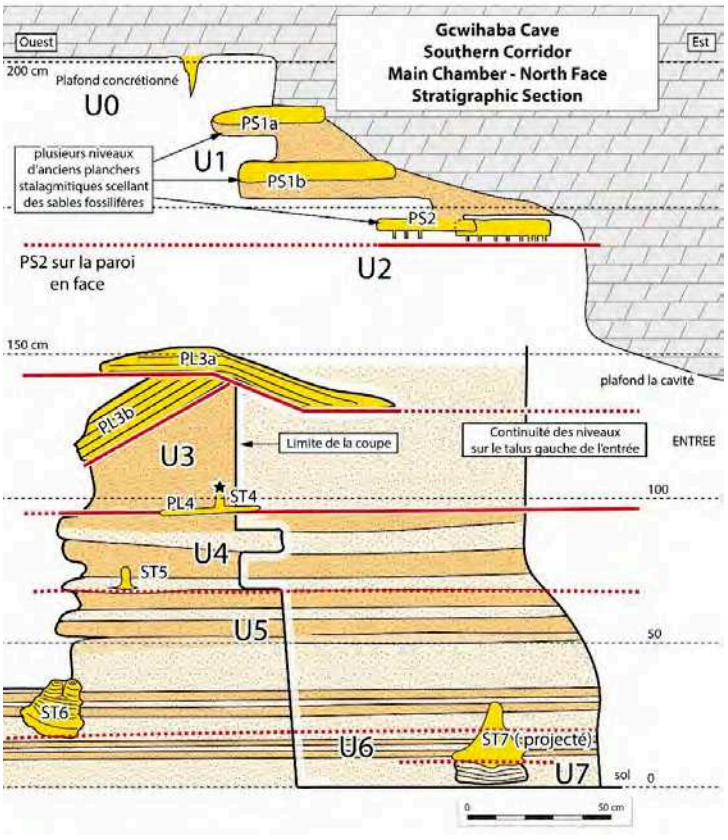


Figure 556 Relevé stratigraphique de la coupe de Main Chamber du Corridor South de la grotte de Gcwihaba.

Les relevés bruts du modèle 3D (Figure 557), acquis au scanner laser terrestre par Kim Genuite et Grégory Dandurand en 2023, ont été calés sur les altitudes du MNT JAXA et le modèle de la colline que nous avons effectué par photogrammétrie drone. Ensuite, les observations stratigraphiques du *Corridor South* de la grotte de Gcwihaba ont été ajoutées (Figure 558 et Figure 559).

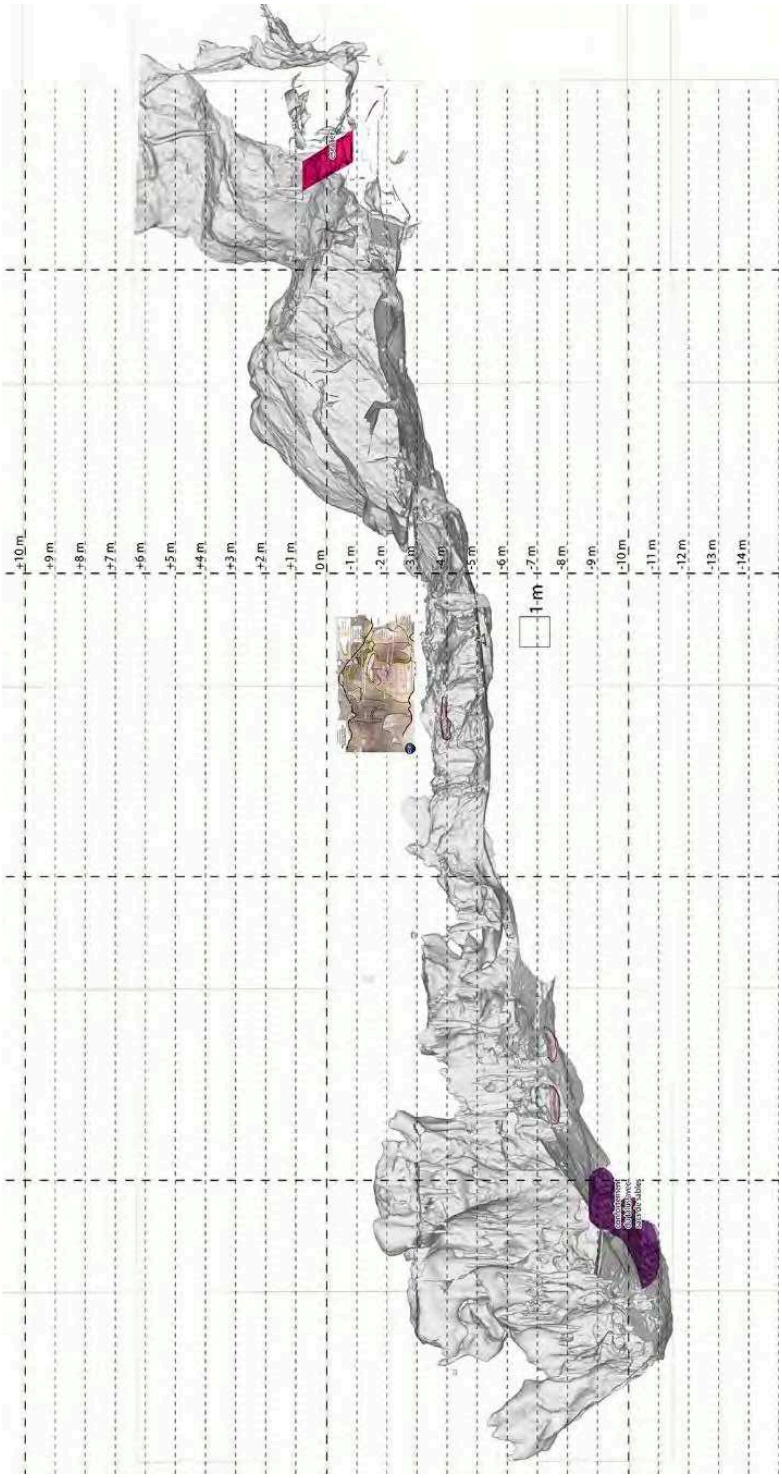


Figure 557 Calage en altitude (JAXA) du relevé de l'entrée sud et du commencent du Corridor south (face est).

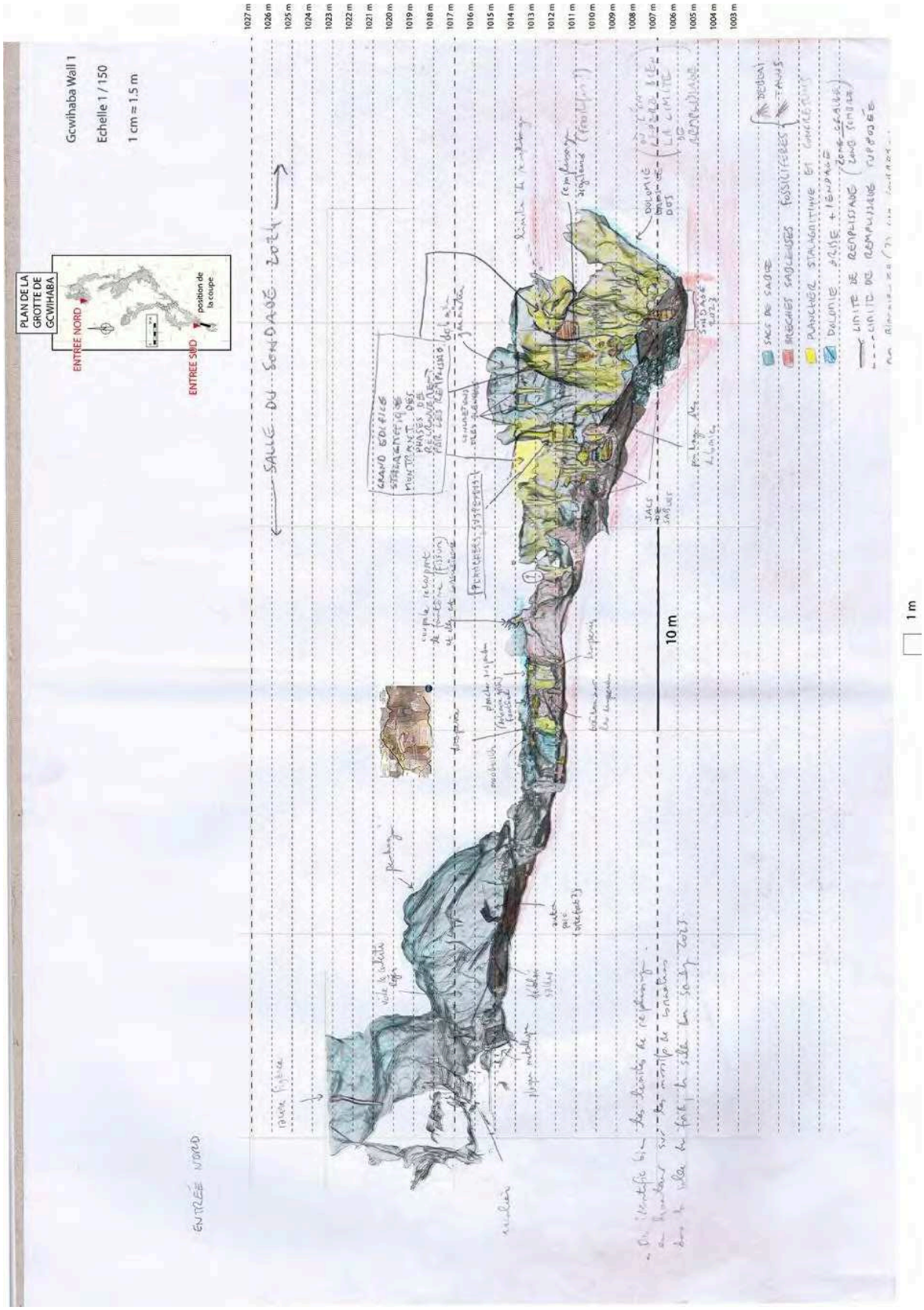


Figure 558 Relevé brut de la face ouest du Corridor south.

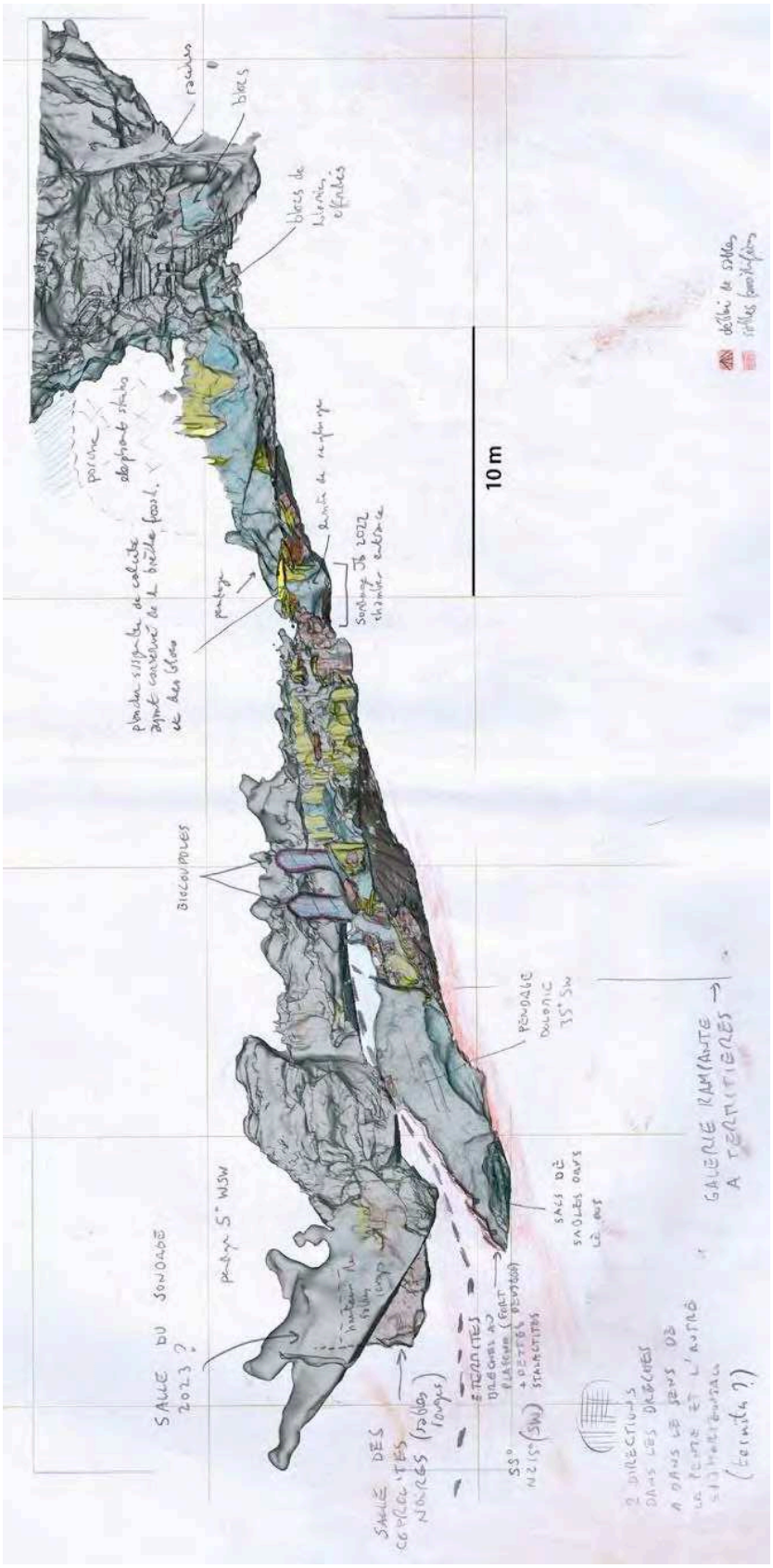


Figure 559 Relevé brut de la face est du Corridor south.

4.2.3.2.4. Petite galerie impénétrable au sud

Une petite galerie impénétrable se développe entre des dalles effondrées au sud de l'entrée sud de la grotte de Gcwihaba (Figure 560).

Position de petite galerie impénétrable au sud de l'entrée sud de la grotte de Gcwihaba
Latitude : -20,02478231 ; Longitude : 21,35454848 (Coordonnées en WGS84 UTM34K 0537082, 7785737).



Figure 560 Petite galerie impénétrable au sud de l'entrée sud de la grotte de Gcwihaba.

4.2.3.2.1. Evolution des techniques de levés spéléologiques de la grotte de Gcwihaba de 1969 à aujourd'hui

Ces cinq profils ci-dessous (Figure 561 à Figure 565) rendent compte de l'évolution des techniques de levés spéléologiques qui nous permettent de mieux appréhender la géométrie du réseau karstique de la grotte de Gcwihaba et de mieux comprendre l'histoire de la cavité et de ses remplissages fossilifères.

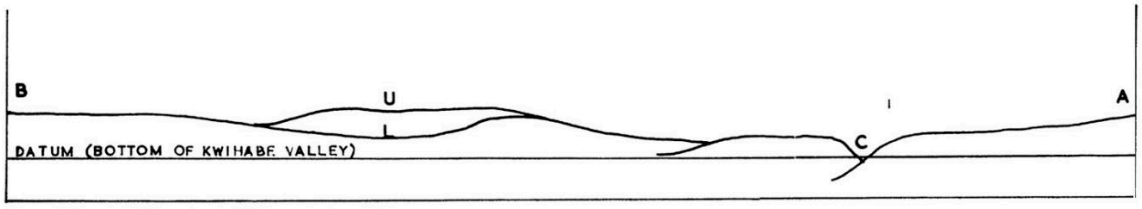


Figure 561 Profil topographique de la grotte de Gcwihaba par Cooke et Baillieul (1974, Fig.4, p.153).

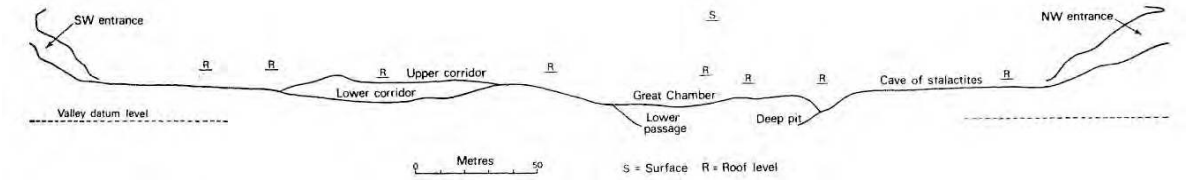


Figure 562 Profil topographique de la grotte de Gcwihaba par Cooke, Glyn et Rohrmann en 1973 (Cooke, 1975, Fig.4, p.435).

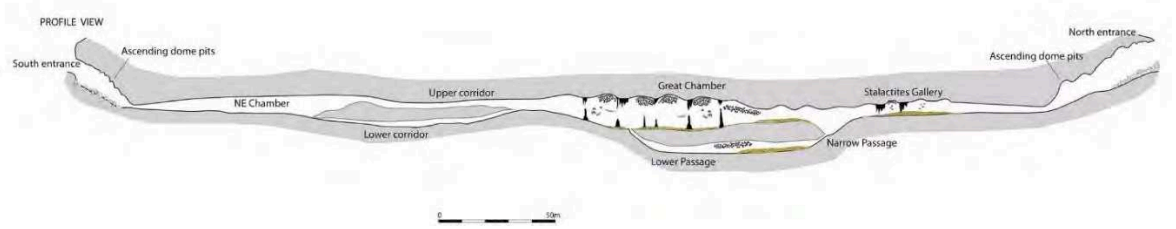


Figure 563 Ajout d'un contour succinct par Dandurand et al. (2018) à la suite de la visite de 2015.

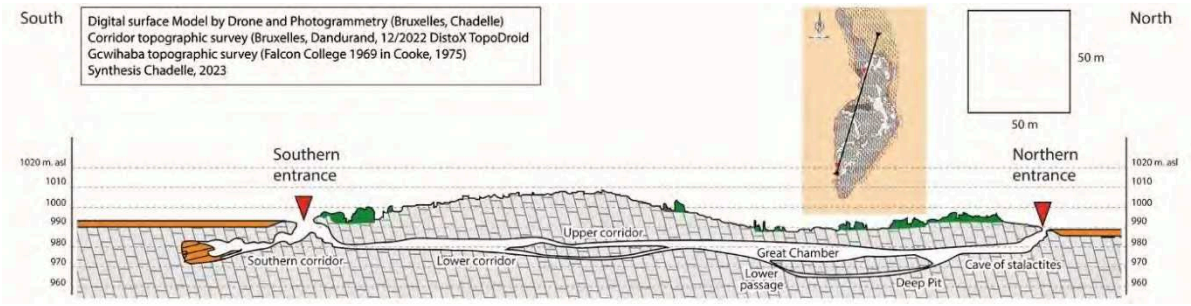


Figure 564 Profil topographique de la colline calculé à partir du modèle 3D réalisé par photogrammétrie drone (MNS, en vert la végétation) et du MNT JAXA.



Figure 565 Vue du modèle 3D de la cavité de Gcwihaba, réalisé par Kim Genuite ajouté au modèle 3D photogrammétrique par drone de la colline (Source : Genuite et al., 2024, modifié).

4.2.3.3. La grotte de Dimapo sur la colline B à Gcwihaba

La grotte de Dimapo est découverte par forage en décembre 2008 par Roger Ellis (Ellis, 2020). La topographie est réalisée en 2010 (Kenyon, 2015). L'altitude de la tête du forage est de 1030 m (MTNT JAXA), le tube de forage descend jusqu'à 35 m de profondeur (Ellis, 2020, p.12). L'altitude du réseau karstique de Dimapo est donc de 995 m (MNT JAXA).

Aucune prospection n'a été menée sur le contour de la colline.

Latitude SUD	Longitude EST	Altitude (m)	Auteurs
20°1'14,24"	21°21'32,11"	1030 (MNT JAXA)	Ledimo Oatse (GPS Garmin) *App 6 Coordinates of Features* (p.1242)
-20,02062222	21,35891944		

Tableau 17 Coordonnées GPS de la grotte de Dimapo (WGS 84).

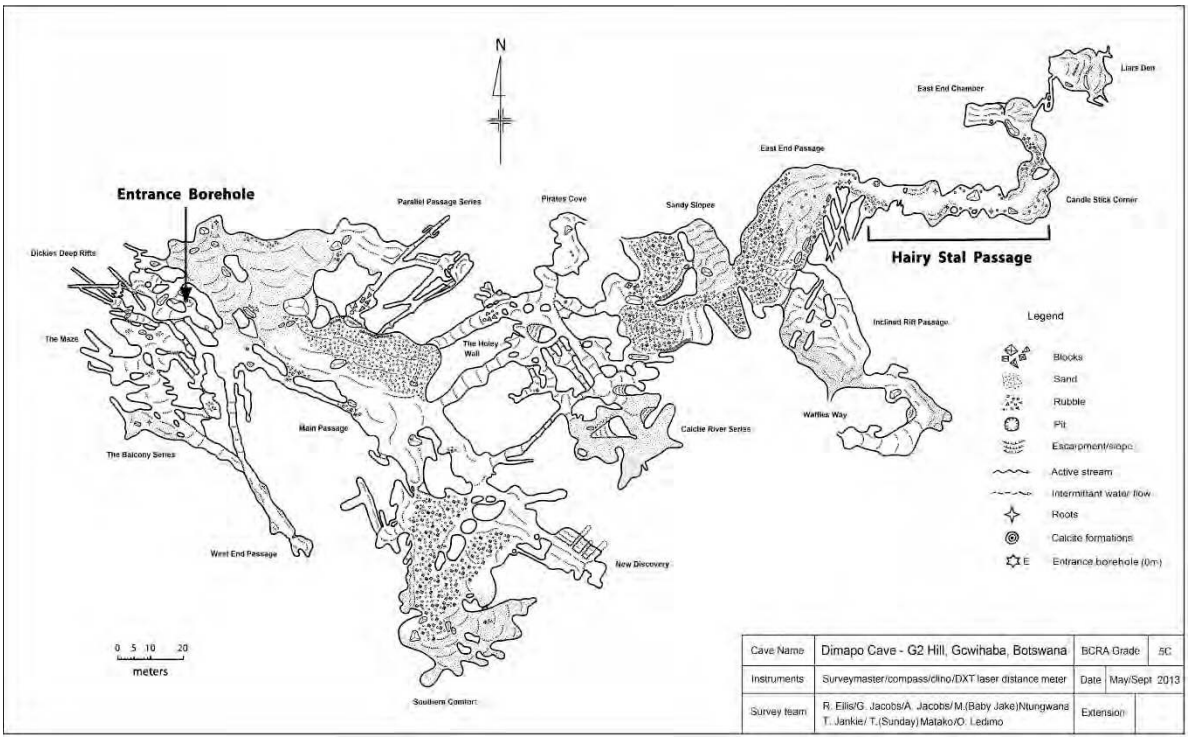


Figure 566 Topographie de la grotte de Dimapo découverte en 2008 (Source : Du Preez et al., 2015).

4.2.3.4. La grotte de Wadoum sur la colline D à Gcwihaba

Wadum ou Wadoum signifie « gorge de pierre » en bushman et décrit l'étroiture de l'aven d'entrée (Ellis, 2020). Découverte en 1992 par Ron Ritter, après plusieurs missions de prospection décrites dans Garner et Riter (1994). Il publie un premier plan en 1994 (Figure 1293 p.1336, en annexe) et un second en 1995, visible ci-dessous (Figure 572). L'année d'après, en 1993, après 65 jours sur le terrain, ils découvrent deux grottes supplémentaires (*Bone Cave* et *Blue Cave*) que nous présenterons plus loin.
L'altitude de l'aven d'entrée est de 1018 m (MNT JAXA) et le puits pour descendre dans le fond de la cavité est de 9 m. L'étagement de la galerie principale qui est subhorizontal est donc situé à 1009 m d'altitude. Ritter et Garner (1994) et Ritter et Mann (1995) décrivent plusieurs puits, dont *Hell Hole* qui descend jusqu'à 25 m, ce qui indique que la partie la plus profonde se situe autour de 984 m (MNT JAXA).

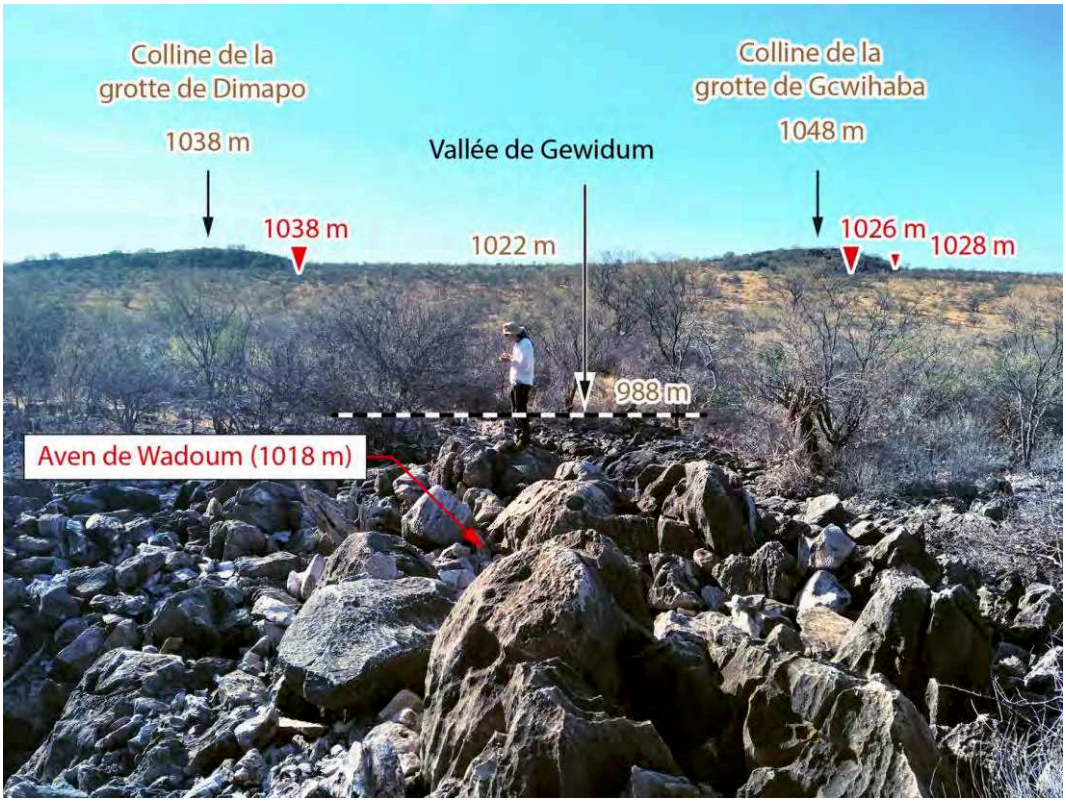


Figure 567 Lapiaz dolomitique à 1011 m d'altitude au sommet de la colline de la grotte de Wadoum, qui est plus basse en altitude que les collines de Gcwihaba et Dimapo, en arrière-plan.

Localisation *googlemaps* approximative de l'entrée nord de la grotte de Wadum : https://maps.app.goo.gl/NdgTztMux7FSwSgy9

Latitude SUD	Longitude EST	Altitude (m)	Auteurs
20°0'55,17"	21°21'15,39"		Ledimo Oatse (GPS Garmin) *App 6 Coordinates of Features* (Tableau 68p.1242)
20°0'55,093"	21°21'15,231"	1011	Chadelle Bastien (GPS Garmin)
-20,01530362	21,35423086	1017	Chadelle Bastien (GPS Garmin)
537051 (UTM 34K)	7786786	1017	Chadelle Bastien (GPS Garmin)
20°0'54,78"	21°21'15.26"		Chadelle Bastien (Tablette)

Tableau 18 Coordonnées GPS de la grotte de Wadoum mesurées au GPS garmin (WGS 84).

Dans la grotte de Wadoum nous découvrons une grande quantité de fantôme de roche, c'est inédit pour le Botswana (Bruxelles et al.,2022, p.88 ; Bruxelles *et al.*, 2025). Nous avons parlé du fantôme de roche dans le Chapitre n°2 (p.214). En annexe, les notes de nos visites dans la grotte de Wadoum ont indiqué (p.1384). Des encoches (de niveau de d'eau ?) ont été observées (Figure 569). Elles pourraient être anciennes car elles sont parfois calcitées (Figure 571).

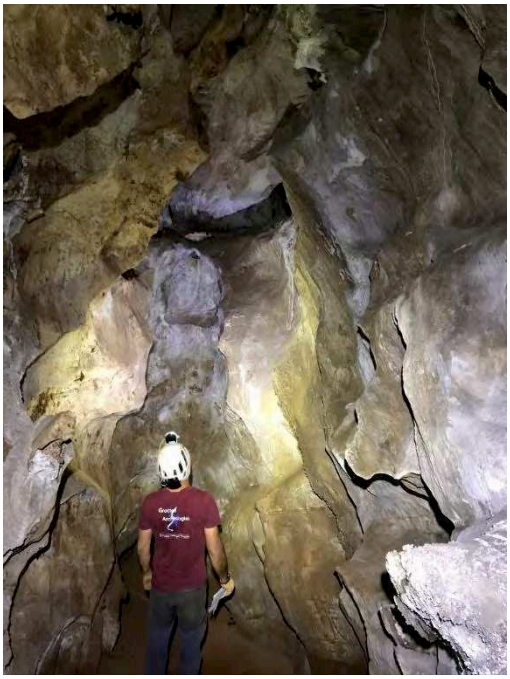


Figure 568 Morphologie typique d'un fantôme évidé dans la grotte de Wadum.

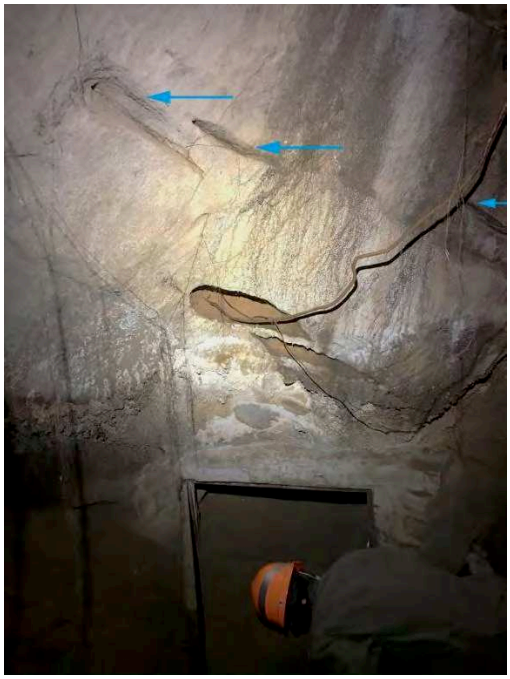


Figure 569 Des encoches sont visibles sur les parois.



Figure 570 Détail des encoches.

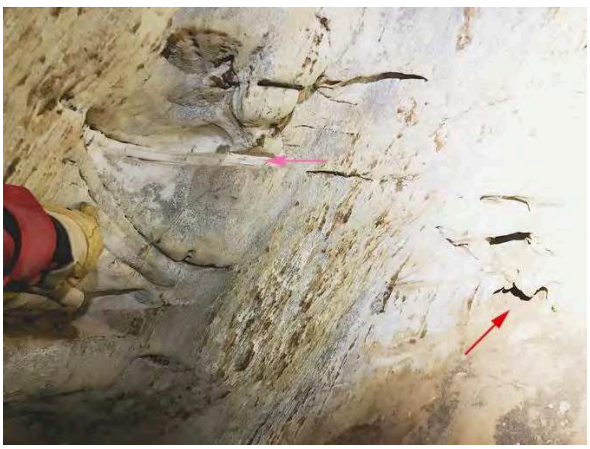


Figure 571 Certaines encoches sont concrétionnées (flèche rose) d'autres sont vides (flèche rouge), indiquant une histoire complexe.

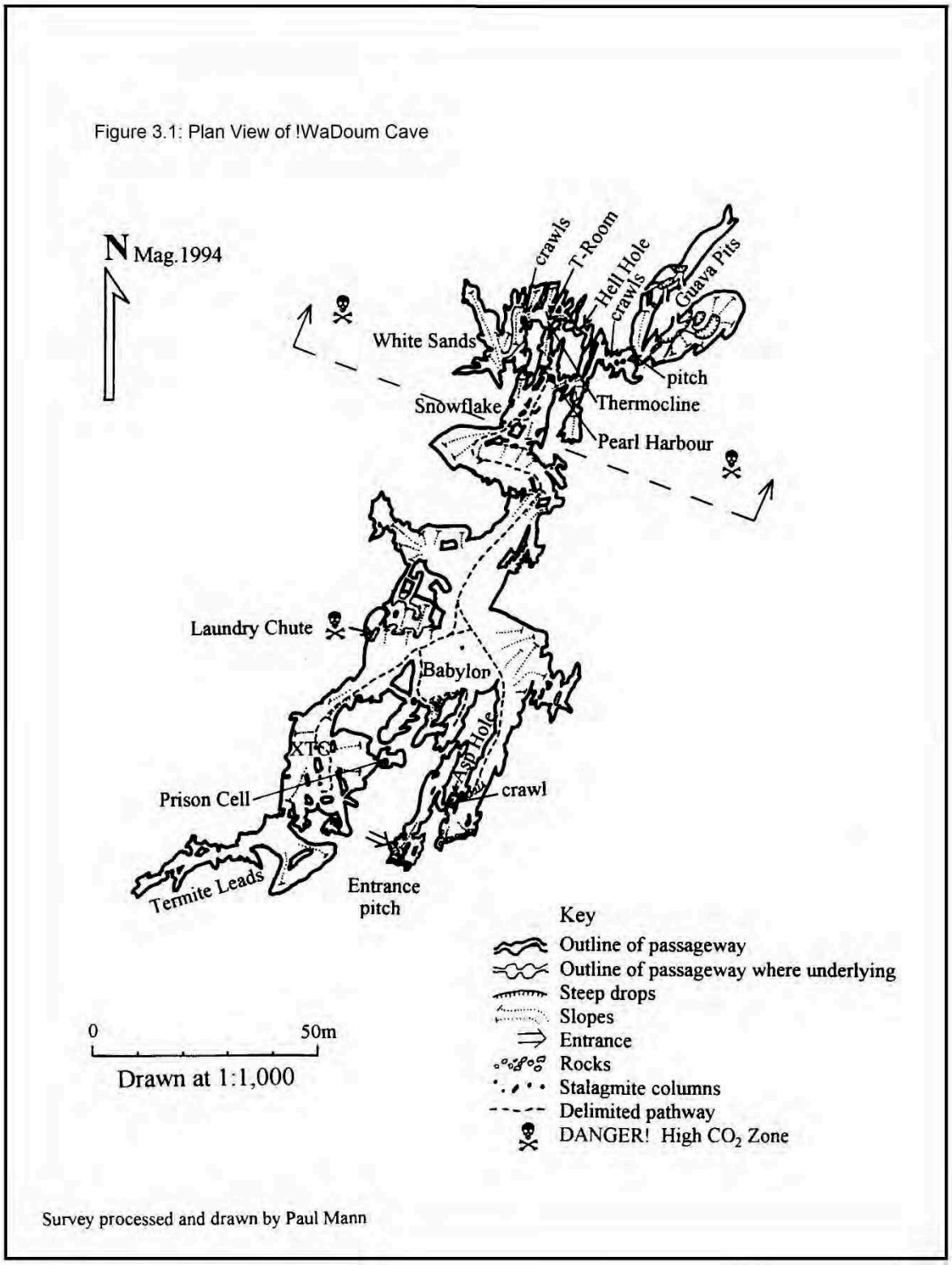


Figure 572 Plan topographique de Wadoum (Source : Mann et Ritter, 1995, Fig.1, p.14).

4.2.3.4.1. Détection de l'extension potentielle de la grotte de Wadoum : la grotte de Motswantsweng

Les relevés gravimétriques (Figure 573), dont nous décrirons la méthodologie plus loin (p.661), ont permis de détecter une extension potentielle de la grotte de Wadoum à l'ouest, indiquée par des contours noirs. Notons que des forages sont indiqués (a, a1, a2, b, b2, etc.).

Nous avons reporté, sur la Figure 581 (p.588) ci-dessous, le réseau karstique topographié de Wadoum ainsi que le réseau karstique supposé par la gravimétrie, auxquels nous avons ajouté les observations de terrain sur la colline C que nous présenterons juste après. Nous avons également fourni d'autres relevés gravimétriques en annexe (Figure 1316 p.1363).

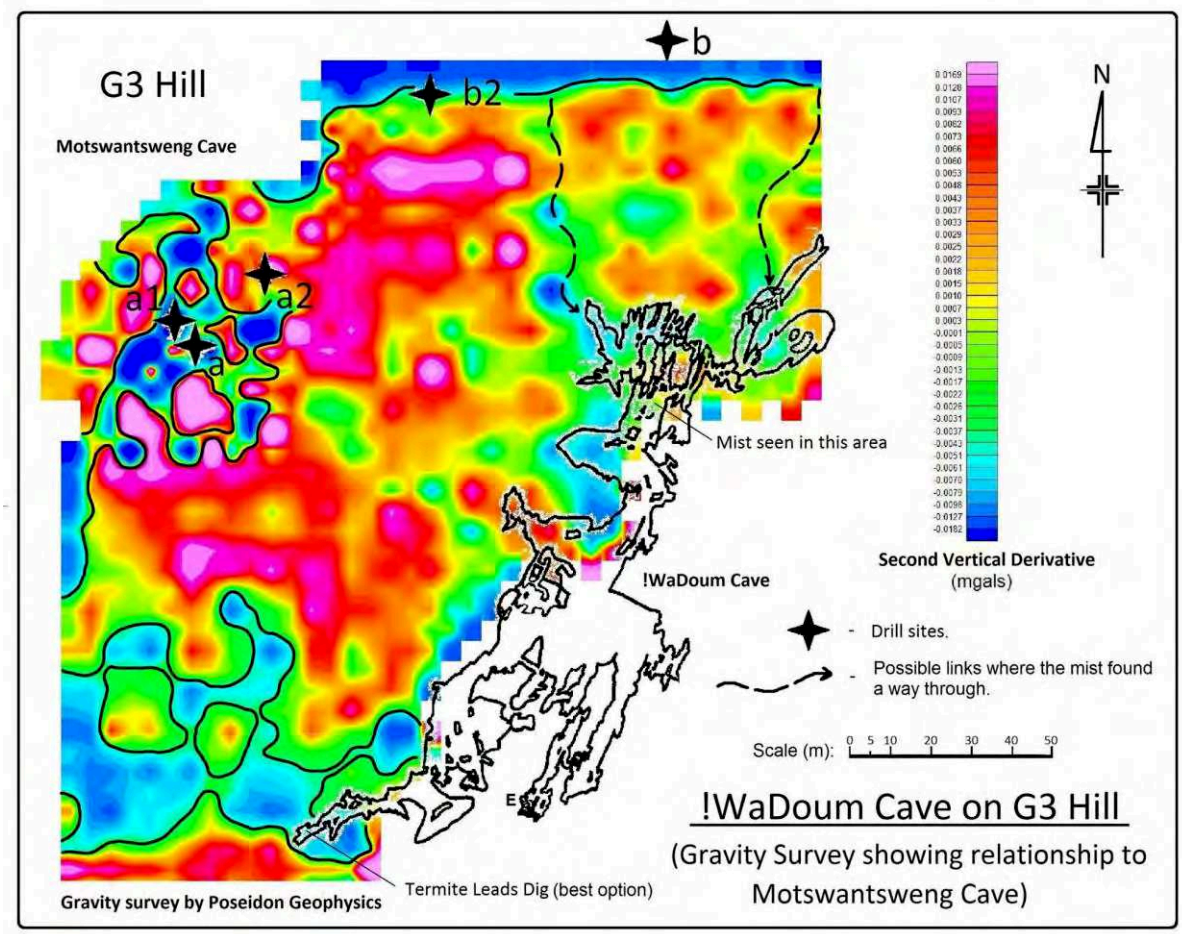


Figure 573 Relevé gravimétrique de la grotte de Wadoum à Gcwihaba, réalisé par Poseidon Geophysics (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers)).

4.2.3.5. Les gisements paléontologiques de la Colline C à Gcwihaba

La première découverte paléontologique dans cette région du nord-ouest du Botswana a été faites sur la colline C de Gcwihaba en 1971 par M.J. Roger, sur le site « *Gcw C south* ». Cette découverte est décrite par Pickford et Mein (1988) et Pickford (1990) et est rajoutée en annexe (p.1318).

4.2.3.5.1. Découverte paléontologique majeure de 1971

La colline C est située en rive gauche de la vallée de Gewidum (Figure 540) on y trouve deux remplissages ossifères, dont l'épaisseur ne dépasse pas 30 cm, selon Pickford (1990, p.1) :

- « *Gcw C south* » est une lentille de 50 m, de direction NO-SE, sur 30 m, de direction SO-NE. Elle contient des fragments de squelettes de grands mammifères ;
- à 20 m au nord du sommet se trouve un petit gisement correspondant à un remplissage de grotte, de 25 m dans le sens NO-SE et d'environ 10 m dans le sens SO-NE. Il contient plutôt des micromammifères.

Nom des observations	Latitude	Longitude	Altitude (m GPS)	Source
MD OTO	20° 1'1.64"S	21°20'57.07"E	1006	Chadelle (GPS Garmin)
Brèches mammifères	20° 1'1.44"S	21°20'57.07"E	1006	Chadelle (GPS Garmin)

Tableau 19 Position GPS du bloc et des brèches à mammifères de la colline C de Gcwihaba.

4.2.3.5.2. Prospection de février 1988

En surface de cette colline, on trouve des gisements de microfaunes (rongeurs) indurés qui sont d'anciens remplissages karstiques, aujourd'hui à l'air libre, car sur cette colline les grottes ont été trépanées par l'enfoncement de la surface d'érosion. Sur le terrain, ces paléokarsts sont orientés N130°, nous les avons cartographiés par des traits rouges sur la Figure 540. Pickford (1990, Fig.4, p.11) a décrit ce processus d'érosion et a cartographié ces grottes trépanées (Figure 575), dont nous avons essayé de géoréférencer sa carte ancienne (Figure 576).

Les études de Pickford et Mein en 1988 apportent des précisions importantes sur ces gisements et permettent d'en faire une première estimation de l'âge : *"la faune de petits mammifères de Gcwihaba C est voisine de celle de Makapansgat avec, en particulier, les deux mêmes rongeurs muroïdes Palaeotomys gracilis et Prototomys campbelli* (Figure 574, Figure 1278 et Figure 1279, p.1321). *L'âge de ce dernier gisement, par analogie avec les sites d'Afrique de l'Est, est estimé entre 3,2 et 2,6 Ma"* (Pickford et Mein, 1988).

Chiroptera
- Famille indet.
- *Rhinolophus* sp. 1
- *Rhinolophus* sp. 2
- *Vespertilionidae* sp.

Insectivora
- *Myosorex* sp.
- *Suncus* sp.
- *Elephantulus* sp.

Gliroidea
- *Graphiurus* sp.

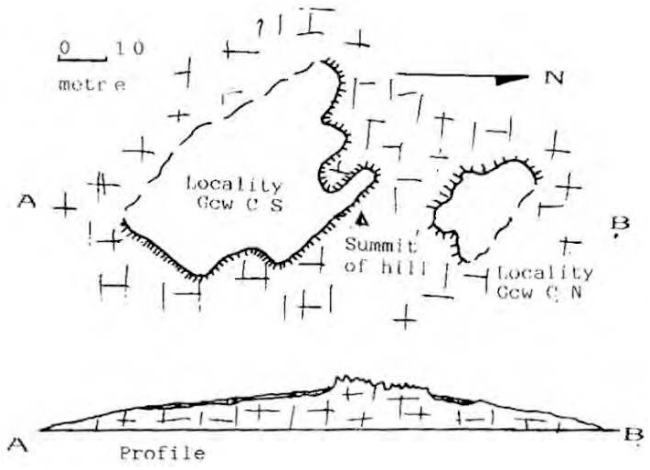
Bathyergoidea
- *Georhychus* sp.

Rodentia

Muroidea
- *Zelotomys* aff *woosmani*
- *Millardia* aff *kathleenae*
- *Murinae* gen. et sp. indet.
- *Mus* sp.
- *Steatomys* cf *opimus*
- *Malacothrix* sp.
- *Dendromus* sp.
- *Tatera* cf *brantsi*
- *Taterillus* sp. 1
- *Taterillus* sp. 1
- *Taterillus* sp. 2
- *Gerbillus* sp.
- *Palaeotomys gracilis*
- *Prototomys campbelli*

Figure 574 Liste de la faune découverte sur la colline C de Gcwihaba étudiée et publiée par Pickford et Mein (1988).

4.2.3.5.3. Premier plan de Pickford, relevé gravimétrique de Selfe / GRS Consulting de 2013 et proposition d'une nouvelle synthèse cartographique



Nous avons repris cette délimitation proposée par Pickford sur le plan ci-dessous, en orange (Figure 576).

Figure 575 Plan des cavités tronquées par la surface topographique sur la colline C selon Pickford (1990, Fig.4, p.11). En bas, est indiqué le profil topographique de la colline montrant un lapiaz au sommet.

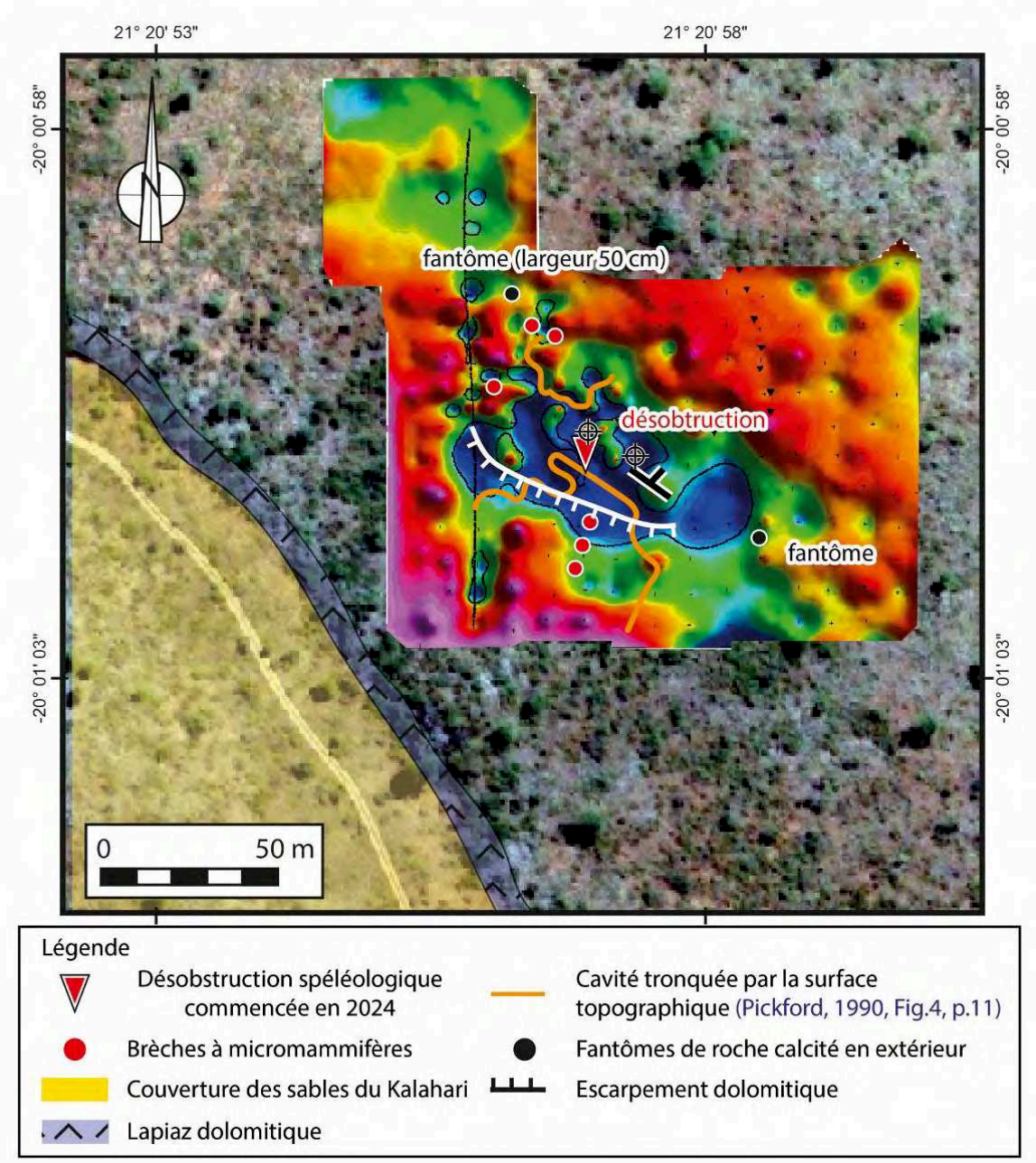


Figure 576 Levé gravimétrique (Selfe / GRS Consulting, 2013, Fig.2, p.8) et données de terrain concernant le paléokarst fossilifère de la colline C.

Selfe / GRS Consulting (2013, p.2) indique la présence d'une faille, représentée en noir. Cette carte localise le réseau karstique supposé par le relevé gravimétrique de Selfe /GRS Consulting (2013) qui est estimé à une dimension de 80 m x 35 m à partir de 269 mesures gravimétriques et situé à une profondeur de moins de 10 m (Selfe / GRS Consulting, 2013, p.2). L'interprétation proposée par GRS Consulting des relevés gravimétriques en bleu foncé, sur la Figure 576 ne correspond pas à des morphologies de cavités linéaires. Nous proposons une autre analyse des relevés de la gravimétrie pour la colline C, en vert pâle (Figure 577) qui correspondrait à une cavité un peu plus large (indiquée comme réseau karstique étendu en légende). Le but est d'identifier où les versants recoupent la cavité pour y rechercher des brèches. C'est au droit de cette cavité hypothétique que nous avons commencé à désobstruer une galerie en 2024 (FFS, 2025, p.142).

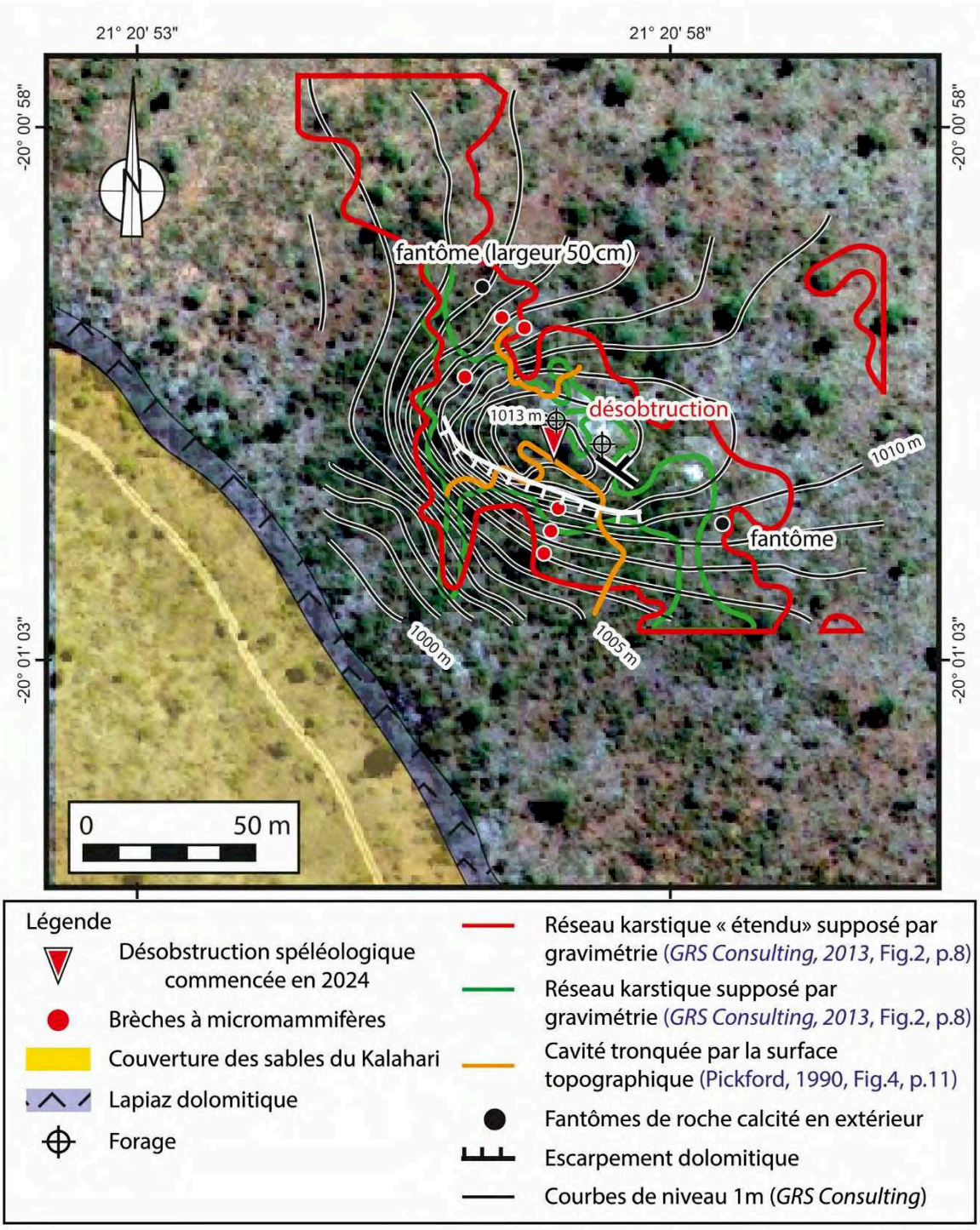


Figure 577 Réseau karstique supposée par la gravimétrie (GRS Consulting, 2013, Fig.2, p.8) et données de terrain.

Nos observations de terrain montrent également la présence de galeries de cavités en extérieur, soulignée par la présence de fantôme de roche calcité (Figure 579 et Figure 580). Nous avons schématisé les gisements fossilifères comme deux galeries orientées NO-SE sur d'autres figures (Figure 540 (p.562) et Figure 581). Les prospections, la désobstruction et la cartographie de gisements seront à continuer dans le futur.

4.2.3.5.4. Les prospections des brèches fossilifères de la colline C

Nous avons à notre tour prospecté cette colline, lors de notre première mission, le 22/11/2021. Nous avons effectivement retrouvé ces gisements dont les coordonnées sont indiquées dans le tableau ci-dessus (Tableau 19).



Figure 578 Gisement paléontologique sur le versant ouest de la colline C, le 24/11/2024. En arrière-plan, on distingue la colline où se situe la grotte de Gcwihaba. Entre les deux se situe la vallée de Gewidum. A droite, on distingue le commencement d'une vaste surface plane.

Nous avons aussi observé des galeries de grotte. Celle, photographiée ci-dessous, mesure 50 cm de large (Figure 579) et a été tronquée par la surface topographique. Elle était comblée de fantôme calcité (Figure 580).



Figure 579 Galerie de cavité tronquée par le versant, encore remplies de fantôme calcité. Elle est située à l'extrémité de la cavité supposée par le relevé gravimétrique.



Figure 580 Détail sur le fantôme calcité.

4.2.3.5.5. Prospections de la colline de Wadoum et de la colline C

Des prospections ont été menées au niveau des collines de Gcwihaba, notamment à Wadoum et sur la colline C (Figure 581). Elles visaient à identifier d'éventuelles entrées de grottes ou des cavités recoupées par l'érosion qui pourraient contenir des remplissages fossilifères comparables à ceux découverts en 1971 par M.J. Roger (découverte décrite en annexe p.1320) sur la colline C.

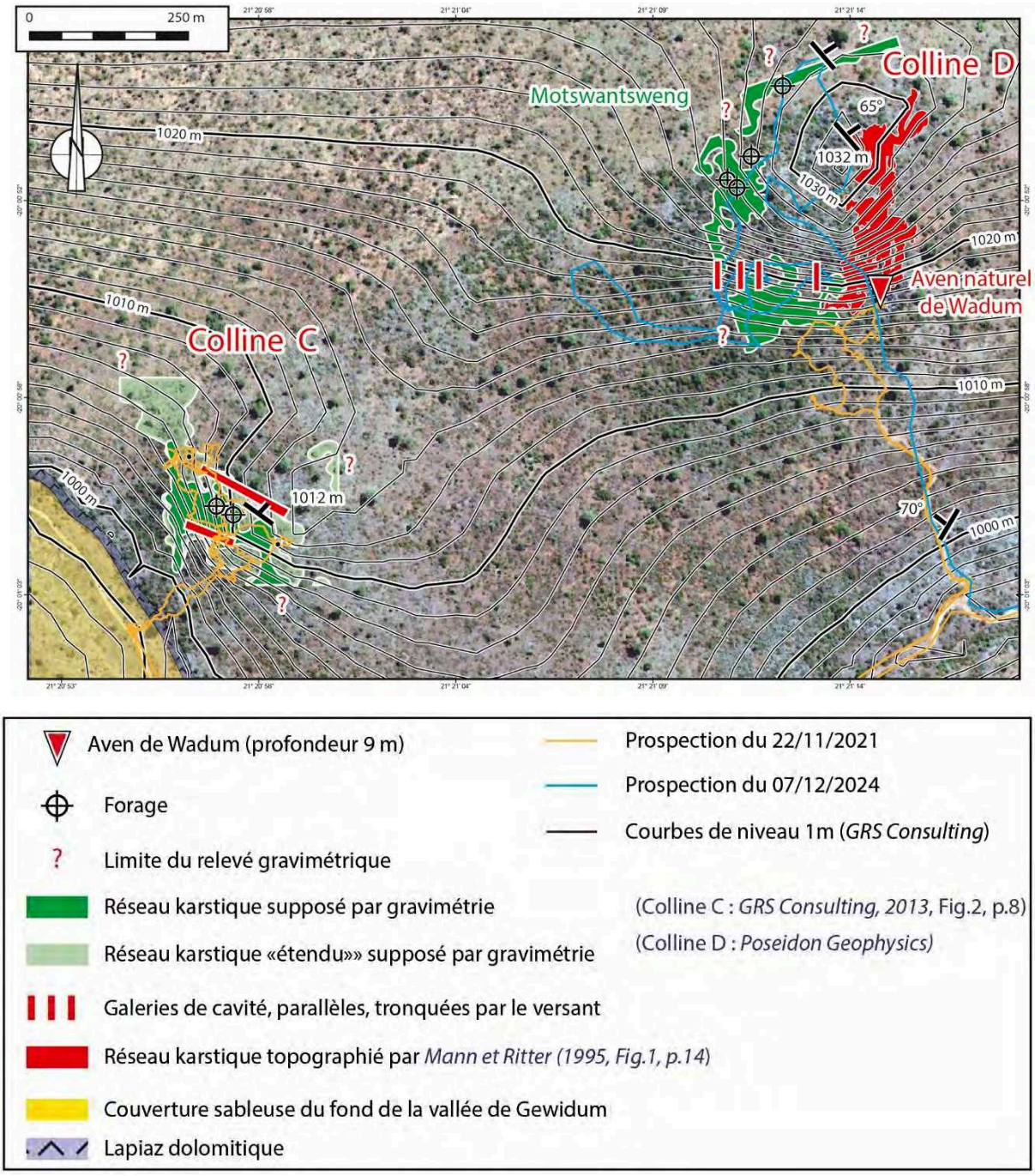
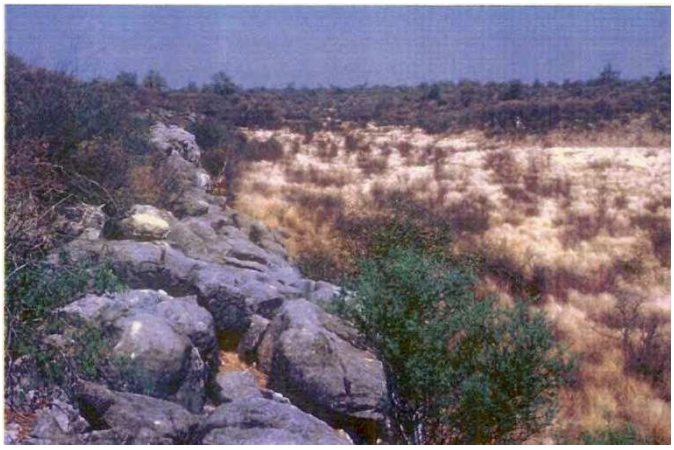


Figure 581 Prospections de la colline C le 22/11/2021 et le 24/11/2024 et prospection de la colline de Wadoum le 07/12/2024.

4.2.3.5.6. Un lapiaz dolomitique au pied de la colline C.

Un important lapiaz est rencontré au contact entre le pied de la colline E et la vallée de Gewidum (Figure 582 et Figure 583). Des forages ont été réalisés sur cette colline pour découvrir des réseaux karstiques, mais sans succès. On retrouve les déblais du forage, en blanc, sur les images satellites et sur le terrain (Figure 585) (20°01'01.2"S ; 21°20'58.3"E) (lien Google Maps). Certains de ces dépôts blanchâtres pourraient être des calcrètes, comme nous allons le voir page suivante.



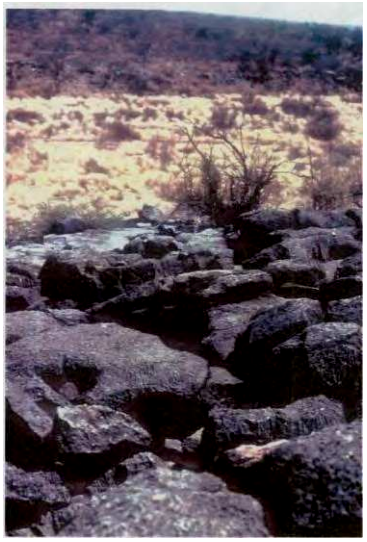
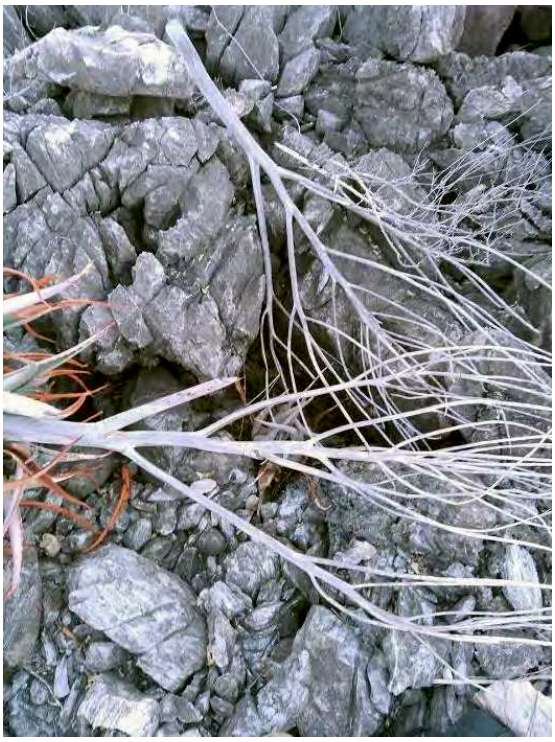


Figure 582 Lapiaz situé au pied de la colline E (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic,2001, Fig.5c, d).



Une recherche approfondie au niveau des profondes cannelures de ce lapiaz nous permettrait peut-être de découvrir une nouvelle cavité.

Figure 583 Lapiaz au pied de la colline C, cartographié sur la Figure 576 (p.585).

4.2.3.5.7. Des calcrètes résiduelles sur la colline C à 1004 m d'altitude ?

Latitude SUD	Longitude EST	Altitude (m)	Source
20°1'3,3"	21°20'57,6"	1004 (MNT JAXA)	Chadelle (24/11/2024)

Tableau 20 Coordonnées des brèches blanchâtres de la colline C à Gcwihaba.



Des brèches cimentées par un dépôt blanchâtre sont conservées sur la colline C (lien Google Maps). Il se pourrait que ce soit des calcrètes. Elles sont situées à 1004 m d'altitude (MNT JAXA). Effectivement, nous trouvons des calcrètes de part et d'autre de la vallée de Gewidum.

Figure 584 Brèches cimentées par un dépôt blanchâtre sur la colline C à Gcwihaba.

4.2.3.5.8. Cuttings d'un forage sur le sommet de la colline C



Plus haut sur la colline C, plusieurs plaquages blancs visibles sur les images satellites (Figure 783 p.786) ont attiré notre attention. Sur le terrain, nous avons constaté qu'il s'agissait de déblais laissés par un ancien forage (Figure 585). Les forages sont indiqués sur les relevés gravimétriques et ont été ajoutés à notre carte (Figure 581).

Figure 585 Déblais d'un ancien forage.

Latitude SUD	Longitude EST	Altitude (m)	Source
20°1'1,20"	21°20'58,30"	1022 (MNT JAXA)	Chadelle 20241124

Tableau 21 Coordonnées du forage au sommet de la colline C (WGS 84).

4.2.3.6. La doline au niveau d'une dune de sable à 6 km du campement

Les analyses géomatiques réalisées des reliefs de la région, à savoir le calcul de courbes (Figure 586) de niveau à partir du MNT JAXA (lire Chapitre n°1) et les différences de couleur de l'image satellite (Figure 587), mettent en évidence une dépression fermée de 230 m de diamètre pour 10 m de profondeur, située au niveau d'une dune de sable linéaire, orientée E-O. À 6 km du campement de Gcwihaba, nous l'avons exploré le 29/11/2021[1]. L'objectif était de rechercher une grotte, car nous supposons qu'il s'agit d'une dépression karstique liée à l'effondrement des dolomies sous-jacentes, par la fantômisation et ayant provoqué la formation d'une doline en surface, à la manière d'un sablier. Nous avons en effet observé ce type d'effondrement sous terre dans le réseau de *Gecko Chamber* (*Tselakgopo Chamber*) (Figure 608 p.612), également visible dans ce reportage. Malheureusement, le toit des dolomies n'affleure pas en surface, la dépression étant comblée par des sables, et nous n'avons pas pu découvrir de réseau karstique pénétrable.

Une seconde dépression, plus petite (130 m de diamètre et 5 m de profondeur), est localisée à 2.2 km au sud-est. Nous ne l'avons pas prospectée. Son altitude est de 1000 m (MNT JAXA), comme l'ensemble des réseaux karstiques de la région (Cf. Tableau 15 p.554).

Latitude SUD	Longitude EST	Altitude (m)	Source
-19,988459° 19°59'18,452" 543863	21,419286° 21°25'9,43" 7789741	1005 (MNT JAXA)	Chadelle (29/11/2021)

Tableau 22 Coordonnées de la grande doline à Gcwihaba.

Latitude SUD	Longitude EST	Altitude (m)	Source
-20,001° 20°0'3,6" 545608	21,436° 21°26'9,6" 7788349	1000 (MNT JAXA)	Chadelle

Tableau 23 Coordonnées de la petite doline à Gcwihaba.

[1] Cette exploration a fait l'objet d'un reportage télévisé pour le journal de TF1 (p.1763). Nous y avons découvert seulement un terrier d'Oryctérope.

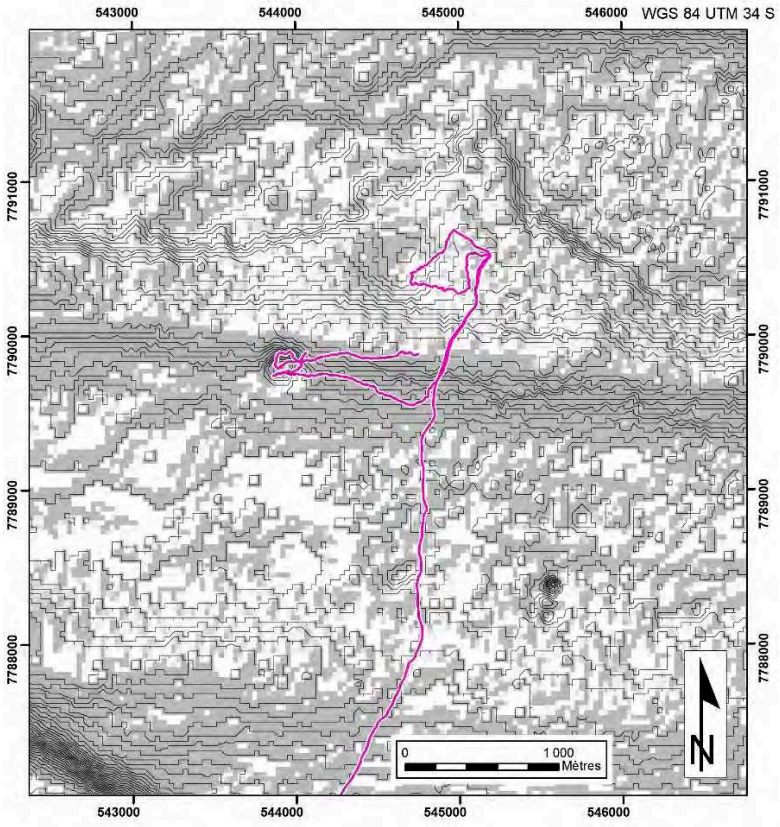


Figure 586 Prospection de la doline, en rose, située au niveau d'une dune de sable linéaire orientée E-O. Fond cartographique constitué par des courbes de niveau, un modèle ombré et une carte des pentes.

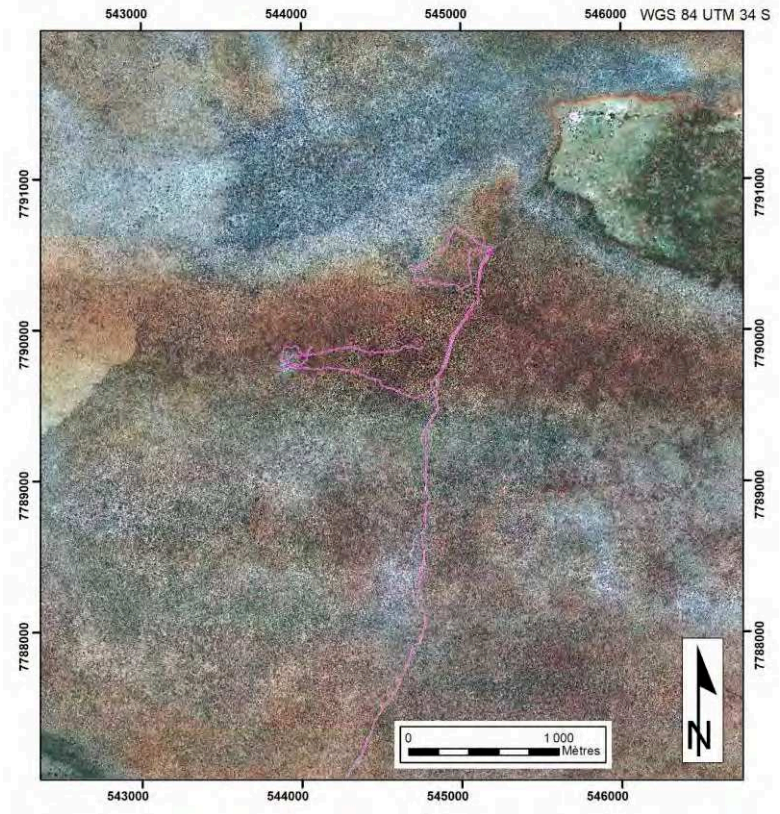


Figure 587 Image satellite (MAXAR) de la zone prospectée montrant les sables blancs à l'intérieur d'une doline, située sur une dune de sable linéaire.

Plusieurs forages ont été réalisés dans le secteur (forage n°11881A et n°11931A selon Mc Donalds, (2008, Table 1 et p.7)) en lien avec la présence d'anomalies magnétiques, comme nous le verrons plus loin.
Nous n'avons pas eu accès à ces données, mais il se pourrait que le toit des dolomies affleure à faible profondeur, comme semblent l'indiquer les dolines.
Sur la carte ci-dessous (Figure 588), les dolomies sous-jacentes sont encadrées par deux traits bleus. On y trouve les forages et les dépressions discutées. En rouge, est représentée la courbe de niveau à 1000 m, correspondant à l'altitude des réseaux karstiques dans le secteur. Nous en reparlerons plus loin (p.654). Il est donc possible que le toit des dolomies soit karstifié et que certaines cavités affleurent en surface de cette zone.

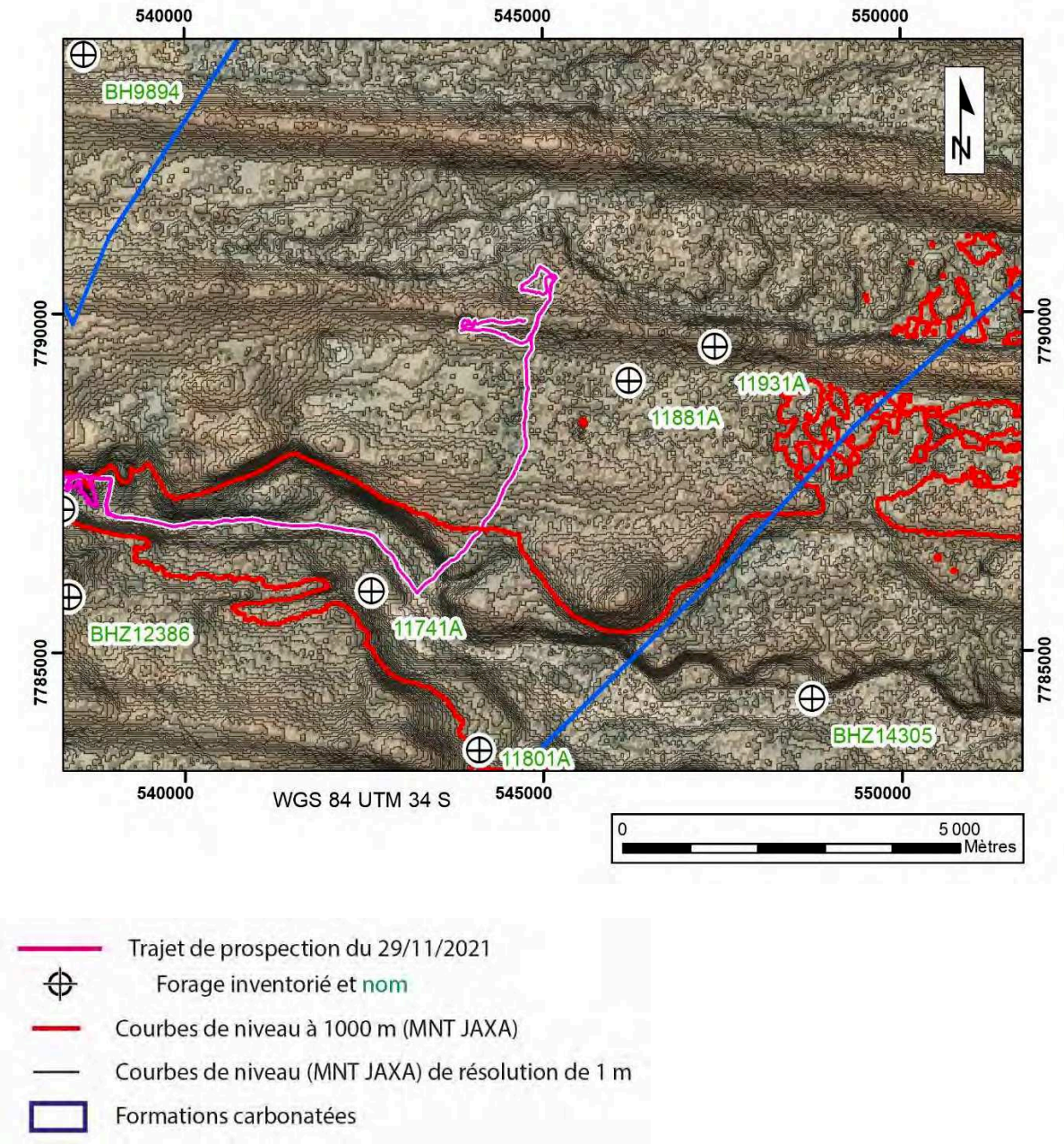


Figure 588 Carte élargie montrant les dépressions, les forages et la courbe de niveau à 1000 m d'altitude. Des dolomies karstifiées pourraient affleurer dans les zones en rouge et entre les deux traits bleus.

4.2.4. Koanaka Hills

On appelle *Koanaka Hills*, la région située à 20 km au sud-ouest de *Gcwihaba Hills*, où se trouve trois collines (K1, K2 et K3 sur la Figure 589). Koanaka est parfois orthographié Koanakha (Van Bruggen, 1966) ou désigné sous le nom de *!Nqumtsa* (Pickford et Mein, 1988) ou *!Ncumtsa* qui signifie « deux collines » (Williams *et al.*, 2012). Effectivement, il existe deux collines qui sont seulement séparées de 1,4 km (K1 et K2) mais il y a une troisième colline (K3) qui elle est éloignée de 13 km vers l'ouest.

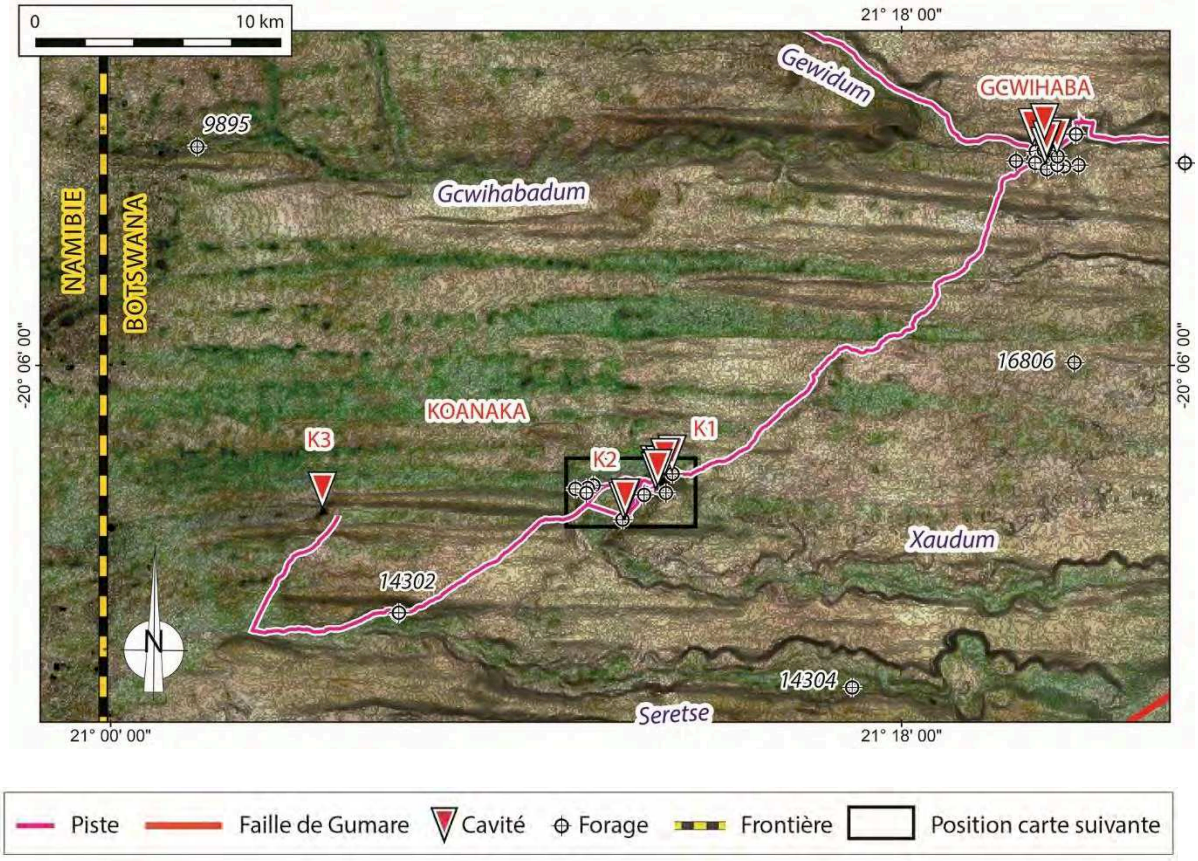


Figure 589 Localisation des Koanaka Hills par rapport à Gcwihaba Hills et nom des vallées (Le rectangle noir correspond à l'emprise de la Figure 596 p.599) (Voir version avec l'analyse géomorphologique en annexe Figure 1368 p.1408).

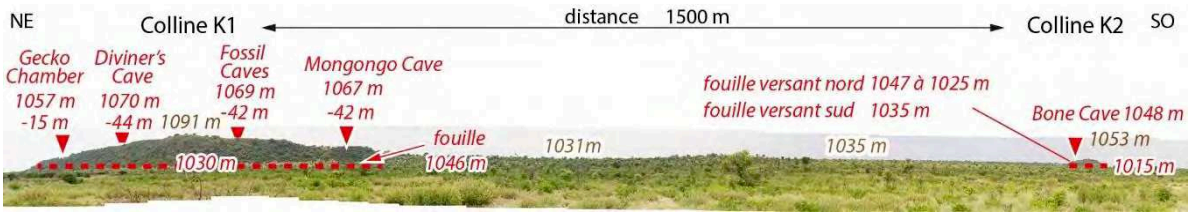


Figure 590 Analyse du panorama des collines K1 et K2 de Koanaka Hills et informations concernant les réseaux karstiques (altitude des têtes de forage, profondeur des forages et étagement des réseaux karstiques et des fouilles (grottes trépanées par la surface topographique).

4.2.4.1. Cartographies de la région de Koanaka

Après avoir présenté (a) le premier plan de la région de Koanaka et (b) les nouvelles données altimétriques de la région, (c) nous présenterons le nouvelle cartographie issue de ce travail de synthèse.

4.2.4.1.1. Premier plan de Koanaka (Pickford, 1990)

En 1988 et 1989, dans la région de Koanaka, Martin Pickford, Pierre Mein et Brigitte Senut découvrent :

> *« cinq sites fossilifères majeurs dans d'anciennes grottes […].*
> *Tous datent de la fin du Pliocène au début du Pléistocène, mais un seul Koanaka North (site Koa N de la , soit le versant nord de la colline K2) a livré des cercopithécidés (Parapapio sp.) similaires au matériel de Makapansgat.*
> *Un site voisin Koanaka South (site Koa S de la , soit le versant sud de la colline K2) a livré de nombreux éclats de quartzite in situ, attestant la présence humaine dans la région au Pléistocène inférieur, mais aucun reste d'hominidé n'a été localisé.*
> *La microfaune, dominée par des espèces nocturnes, indique que le paléoenvironnement était semi-aride à aride pendant la période d'accumulation des fossiles, mais que le climat fluctuait autour de cette moyenne, étant parfois plus humide, parfois plus aride » (Pickford, Mein et Senut, 1994, p.227, modifiée en bleu nos ajouts).*

Un premier plan de Koanaka a été publié en 1990 (Pickford, 1990, Fig.5, p.12), reproduit ci-dessous (). Il montre les deux collines de Koanaka (K1 et K2), ainsi que deux grands pans représentés en bleu. Sur la colline K2, deux sites paléontologiques majeurs sont indiqués : Koa N et Koa S.

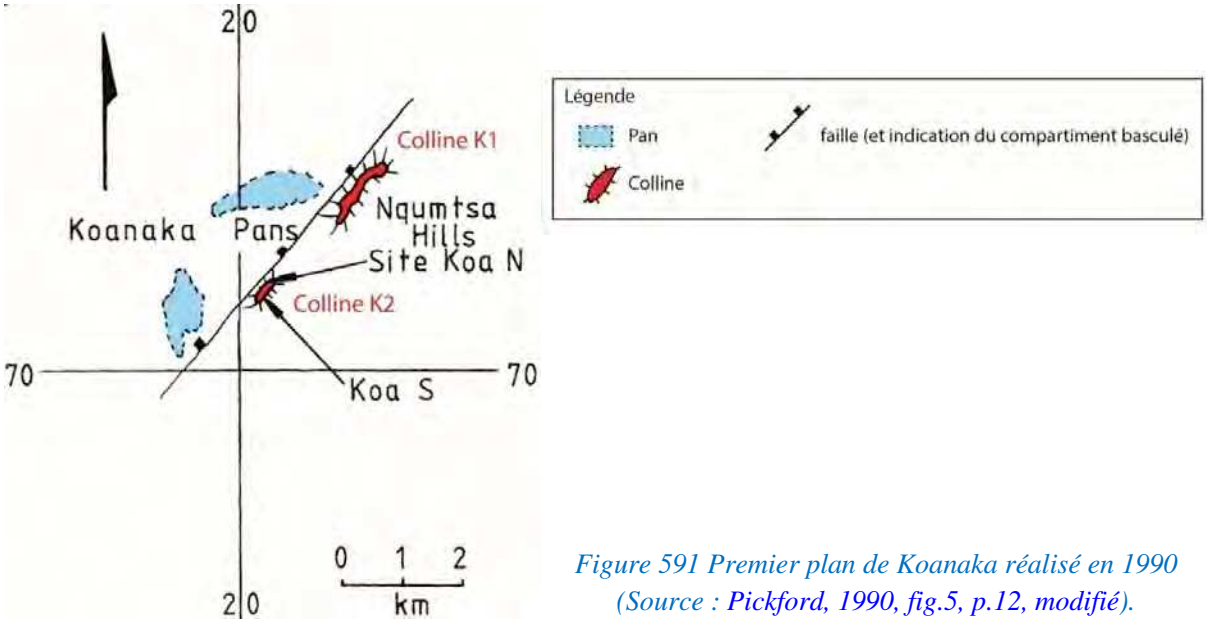


Figure 591 Premier plan de Koanaka réalisé en 1990 (Source : Pickford, 1990, fig.5, p.12, modifié).

4.2.4.1.2. De nouvelles données altimétriques à évaluer

Comme pour la région de Gcwihaba, de nouvelles données topographiques, spéléologiques ainsi que celles issues des prospections et des fouilles archéologiques permettent de proposer une cartographie actualisée de cette région fossilifère karstique.

De nouvelles cavités ont été découvertes et topographiées (Ellis, 2020). Les *Koanaka Hills* (K1 et K2) ont été relevées au GPS différentiel par le *GRS Consulting* au cours d'une mission de 35 jours (Selfe / *GRS Consulting* 2005a, Fig.5, p.11) (Figure 596 et relevé brut en annexe Figure 1305 p.1350).

Nous disposons également de plusieurs jeux d'images satellites. Par ailleurs, plusieurs affleurements inédits de calcrètes et de calcaires coquilliers (lacustres ?) ont été identifiés lors de la mission de 2024. L'ensemble de ces éléments permet d'étudier plus finement les paysages et les paléosurfaces des *Koanaka Hills* et de proposer une analyse morphologique nouvelle et fiable.

1. **Évaluation des altitudes mesurées au GPS différentiel, par satellite ou sur les modèles 3D photogrammétriques par drone**

Nous avons évoqué Chapitre n°1 (p.36 et p.48) les différences de mesures d'altitude selon les satellites (MNT) ou les navettes utilisées (SRTM).

Ici, au Botswana, nous avons également comparé les altitudes relevées au GPS différentiel (Selfe / *GRS Consulting*) avec celles obtenues sur les modèles 3D photogrammétriques (MNS) que nous avons réalisés par drone. Ces différentes mesures d'altitude sont illustrées pour la région de *Koanaka Hills* (Figure 592 à Figure 595).

Les données topographiques relevées au GPS différentiel (Figure 594) offrent une excellente résolution des reliefs, au centimètre près. Nos modèles 3D photogrammétriques sont aussi d'excellente résolution (Figure 595) et sont couplés d'orthophotographies, comme pour la colline K1 de Koanaka (Figure 609 p.613 et Figure 622 à Figure 808 p.621). Ces données sont donc essentielles pour réaliser des analyses des paléosurfaces et des paysages de *Koanaka Hills* (p.782).

Cependant, les données topographiques relevées au GPS différentiel n'ont pas pu être calibrées en altitude en raison de l'absence de points géodésiques sur le terrain. Les données en X, Y, Z sont très précises au centimètre près mais en relatif. Les incertitudes sur les altitudes absolues restent intrinsèquement liées aux erreurs classiques du GPS, soit de l'ordre de 20 m (comm. orale Gavin). En comparaison, ces incertitudes ne sont que de 6 m pour le MNT JAXA (Tadono *et al.* 2014, p.73) et de 4 m pour le SRTM (Rodriguez *et al.*, 2006) (Tableau 1 p.43). Nous avons donc harmonisé les altitudes des relevés au GPS différentiel avec celles mesurées par le satellite DAICHI JAXA, puis vérifié la cohérence avec le SRTM. Nous pourrons ainsi comparer les altitudes entre les sites étudiés : *Aha Hills*, *Koanaka Hills* et *Gcwihaba Hills*, qui sont à 25 km de distance pour les deux dernières.

Gavin Selfe (*GRS Consulting)* nous a transmis les relevés altimétriques des collines de *Gcwihaba Hills* et *Koanaka Hills*, obtenus au GPS différentiel conjointement aux levés gravimétriques. Ils sont disponibles en annexe : Figure 1300 (p.1345) pour *Gcwihaba Hills* et Figure 1305 (p.1350) pour *Koanaka Hills*.

Pour *Koanaka Hills*, le fichier MNT nommé : « K-elev.grd » indique des altitudes comprises entre 1042 et 1110 m d'altitude, avec une valeur moyenne à 1054 m. En revanche, le relevé altimétrique publié (Selfe / *GRS Consulting*, 2005a) et reproduit en annexe (Figure 1259 p.1305) semble incohérent : l'échelle des altitudes y varie de 1039 à 1067 m, mais les intervalles graphiques sont irréguliers (4 m, 3 m ou 2m). Nous préférons donc nous fier aux données brutes du MNT, avec des altitudes comprises entre 1042 et 1110 m, comme le montre la Figure 594.

Nous avons également modélisé les collines en 3D par photogrammétrie (MNS) (Figure 595), à partir de vues par drone réalisées par Laurent Bruxelles. Les incertitudes sur les valeurs d'altitudes des modèles sont, elle aussi, liées aux mesures GPS effectuées par le drone pour chaque cliché, soit environ 20 m (en z).

Enfin, nous avons corrigé les altitudes sur le relevé topographique (Figure 608 p.612) en utilisant l'altitude du forage de *Diviner's Cave*, soit 1070 m (MNT JAXA), au lieu des 1056 m indiqués dans le document original (Cardoso et al., 2021, Fig.4, p.97), soit une différence de 14 m.

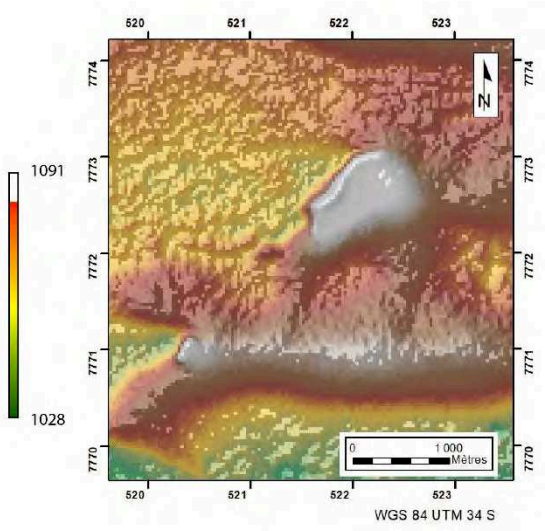


Figure 592 Koanaka Hills, d'après les données satellitaires JAXA (taille du pixel : 30 m).

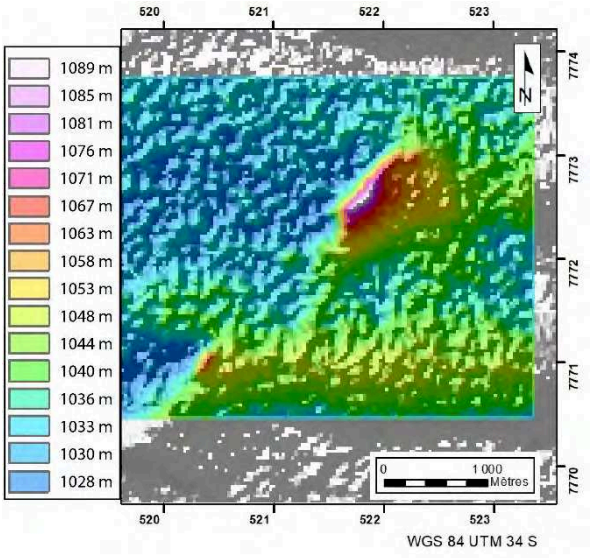


Figure 593 Koanaka Hills, d'après les données de la navette SRTM (Botswana SRTM DEM 30meters disponible sur le site Africa geoportal (lien)).

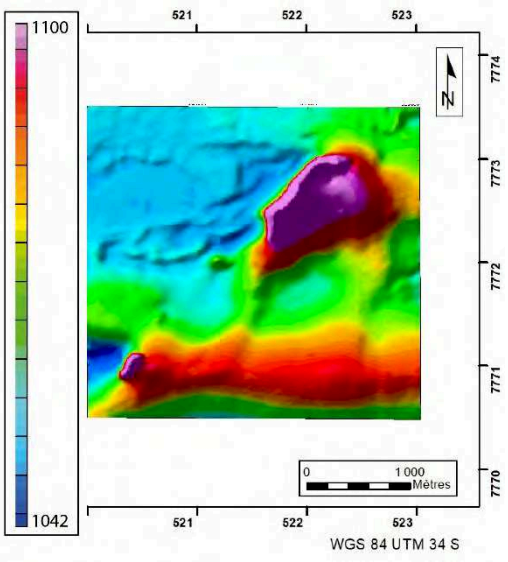


Figure 594 Koanaka Hills, d'après les données GPS différentielles mesurées sur le terrain par Selfe Gavin et le GRS Consulting (taille du pixel : 25 m).

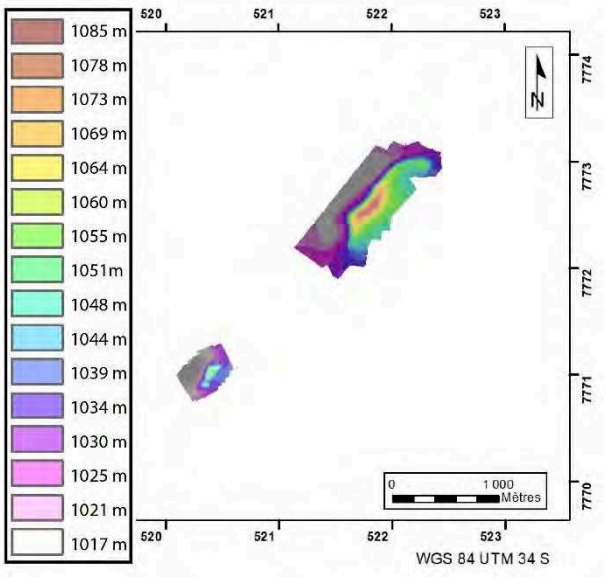


Figure 595 Koanaka Hills, d'après nos modèles 3D photogrammétriques par drone.

4.2.4.1.3. Nouvelles cartographies de la région des Koanaka Hills

Après avoir calé et harmonisé les altitudes des différents relevés altimétriques disponibles, nous sommes en mesure de proposer une nouvelle cartographie de la région karstique fossilifère de *Koanaka Hills* (Figure 596, p.599 ; Figure 597 et suivantes), intégrant les relevés topographiques des nouvelles cavités découvertes, les données issues de nos fouilles archéologiques et de nos prospections géologiques.

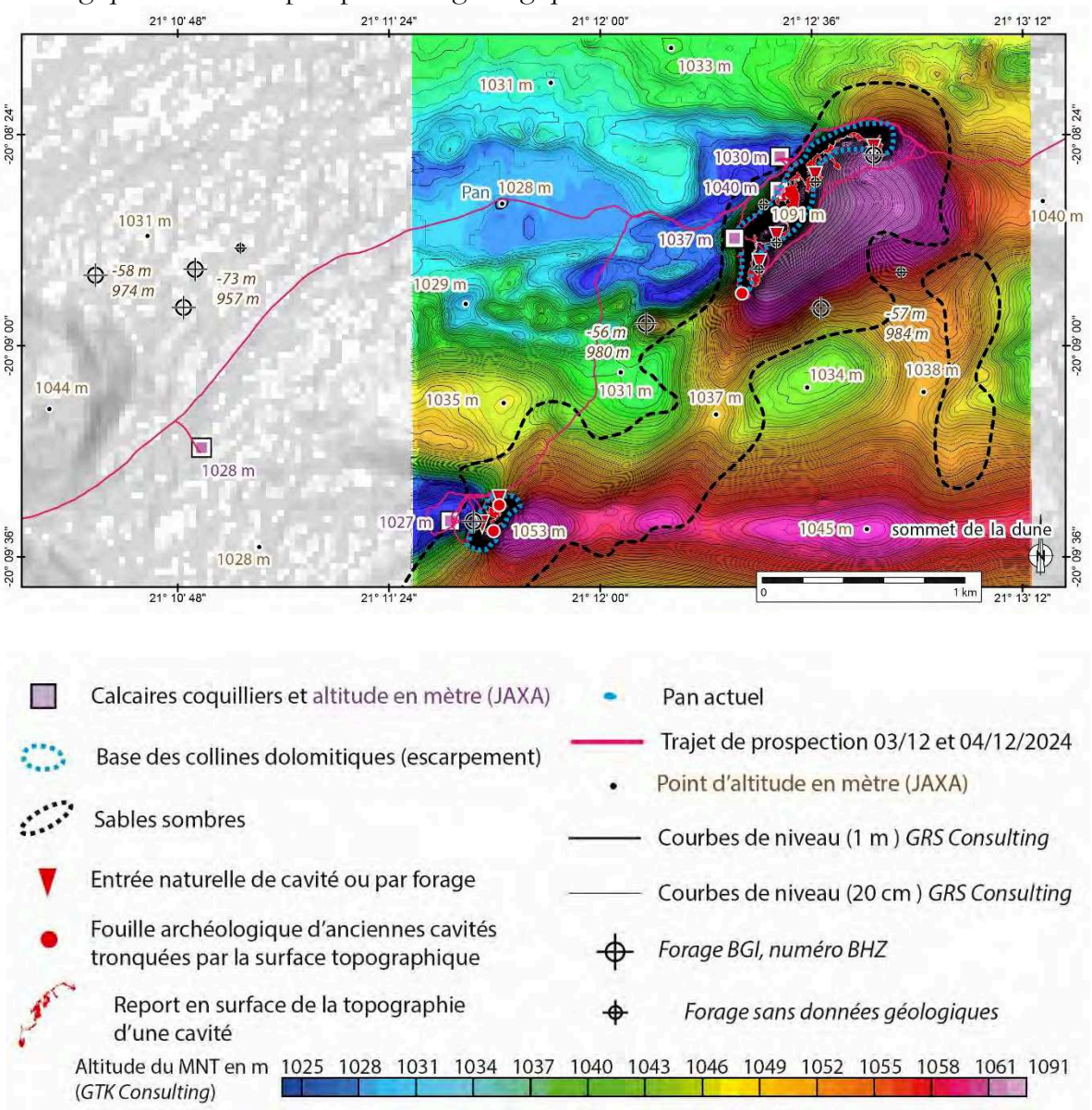
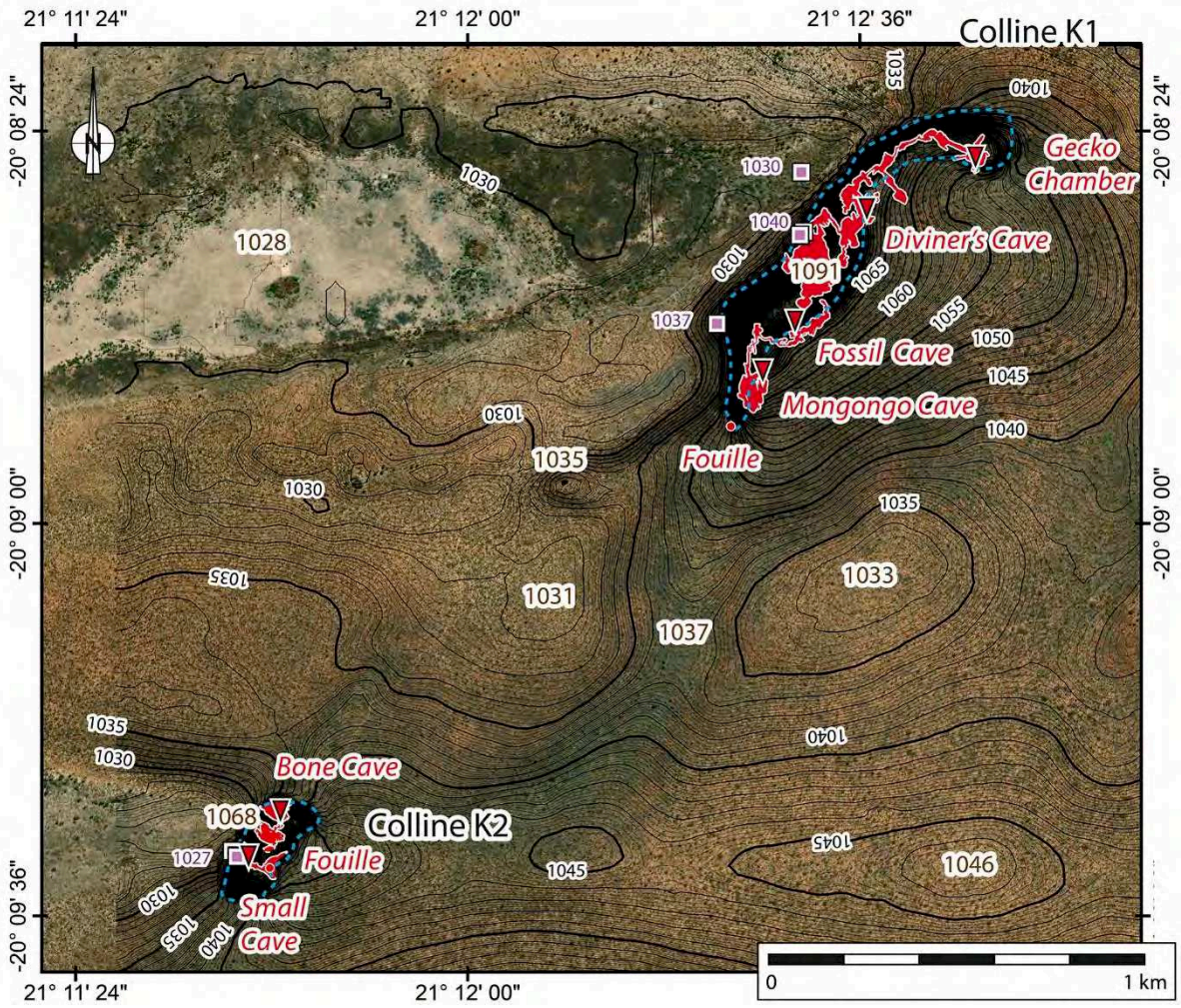


Figure 596 Hypsométrie de Koanaka Hills (K1 et K2) issue du relevé au GPS différentiel (Gavin Selfe / GRS Consulting). Changer altitude K2 1068



Affleurement de calcrètes en place, exhumé des sables du Kalahari et altitude en mètre (JAXA)

Base des collines dolomitiques

Courbes de niveau (5 m) *GRS Consulting*

Courbes de niveau (1 m) *GRS Consulting*

Courbes de niveau (20 cm) *GRS Consulting*

Entrée de cavité (nom de la cavité)

Fouille archéologique d'anciennes cavités tronquées par la surface topographique

Report en surface de la topographie d'une cavité

Figure 597 Réseaux karstiques de Koanaka Hills (K1 et K2).

1. Analyse de l'image satellite (Bing Maps) et discussion sur les sols sombres

Les collines dolomitiques émergent d'une vaste plaine caractérisée par les unités stratigraphiques du groupe du Kalahari, décrites précédemment (p.507). Ce sont (1) de vastes dépressions (paléopans), caractérisées par des calcrètes claires qui peuvent apparaître sombres lorsqu'elles sont humides (Laurent Bruxelles, comm. orale), et (2) des dunes rectilignes de sable orangé s'étendant sur plusieurs dizaines de kilomètres. Ces dernières ont été cartographiées en orange (Figure 500 p.531 et Figure 774 p.778, Figure 835 p.812) et seront décrites en détail plus loin (p.512). Elles ont également été photographiées depuis un avion (p.509). On remarque que, dans cette région nord-ouest du Botswana, les dunes de sables rectilignes sont orientées est-ouest. La vaste dépression à l'ouest de la colline K1, orientée elle aussi est-ouest, contient un petit *pan** (voir définition p.742). Celui-ci ne contient que très peu d'eau actuellement car il n'est alimenté que par l'eau de pluie. Mais, dans le passé, celui-ci a été beaucoup plus vaste comme l'indique la vaste dépression caractérisée par plusieurs niveaux de calcrètes (d'une épaisseur de 73 m au niveau du forage BHZ21872 et de 58 m pour le forage BHZ21871) et comme nous allons le voir aussi pour Gcwihaba (p.717) (Cooke et Baillieul, 1974 et Cooke 1975) (p.554). Nous verrons aussi que la présence de vastes paléopans au pied des collines dolomies suggèrent que ces paléopans ont pu fonctionner comme des poljés et ont pu connaitre des épisodes de mise en charge *per ascensum* lors des phases pluviales par recharge de la nappe aquifère par la pluie.

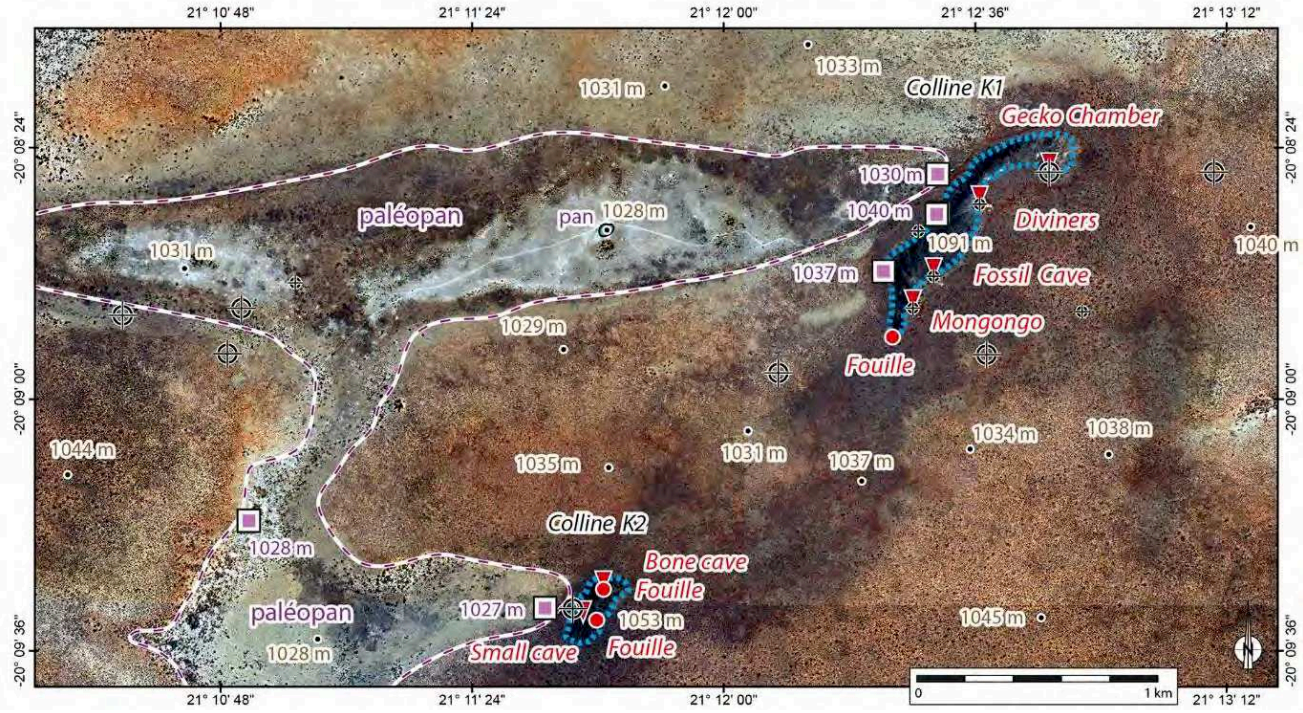


Figure 598 Analyse de l' image satellite (Bing Maps) de Koanaka Hills : identification des collines dolomitiques, des paléopans, des réseaux karstiques et des fouilles.

Rappelons que le toit des dolomies est situé à 58 m (forage BHZ21871) et 73 m de profondeur (forage BHZ21872) sur la bordure du paléopan à l'ouest de la colline K1. Sur la colline de K1, le forage BHZ12391 traverse sur toute sa longueur (20 m) les dolomies. Le forage BHZ12392 est intéressant car il trouve les dolomies à la profondeur de 57 m.

Sur le terrain, nous avons identifié la position de plusieurs forages non répertoriés par le *BGI*. De plus, les images satellites montrent la présence d'un autre forage, à 440 m au nord-est du forage BHZ12392 et qui n'est pas mentionné sur le portail internet du *BGI*. Il pourrait se révéler être la vraie position du forage BHZ12392, qui ne semble pas montrer de forage sur les images satellites à sa position indiquée par le *BGI*, ce qui pourrait vouloir indiquer que l'anomalie gravimétrique n'aurait pas été foré au bon endroit.

La végétation arborée présente sur les collines dolomitiques, apparait sombre sur les images satellites, et permet bien de discerner les collines sur les images satellites (Figure 598).

Nous avons vu précédemment (p.513) que des sables sombres apparaissent en surface lorsque les dolomies sont subaffleurantes et recouvertes d'une faible épaisseur de sables du Kalahari. Ici, les teintes sombres identifiées sur les images satellites de *Koanaka Hills* (Figure 598 et Figure 601) sont corrélées au levé gravimétrique de Selfe / *GRS Consulting* (Figure 600 et Figure 602) et semblent bien être liées à la présence de dolomies sous couverture.

Savoir où se situent les dolomies est essentiel pour cibler les zones à prospecter en vue de trouver des grottes ou d'anciens remplissages de grottes décapés par la surface topographique et exhumés des sables.

Nous présenterons les levés gravimétriques juste après (Figure 603 p.608).

Nous indiquons ici les liens vers les différentes images satellites utilisées ici pour l'analyse des sols sombres.

Lien vers l'image satellite de Bing Maps : lien.

Lien vers l'image satellite de Google Maps : lien.

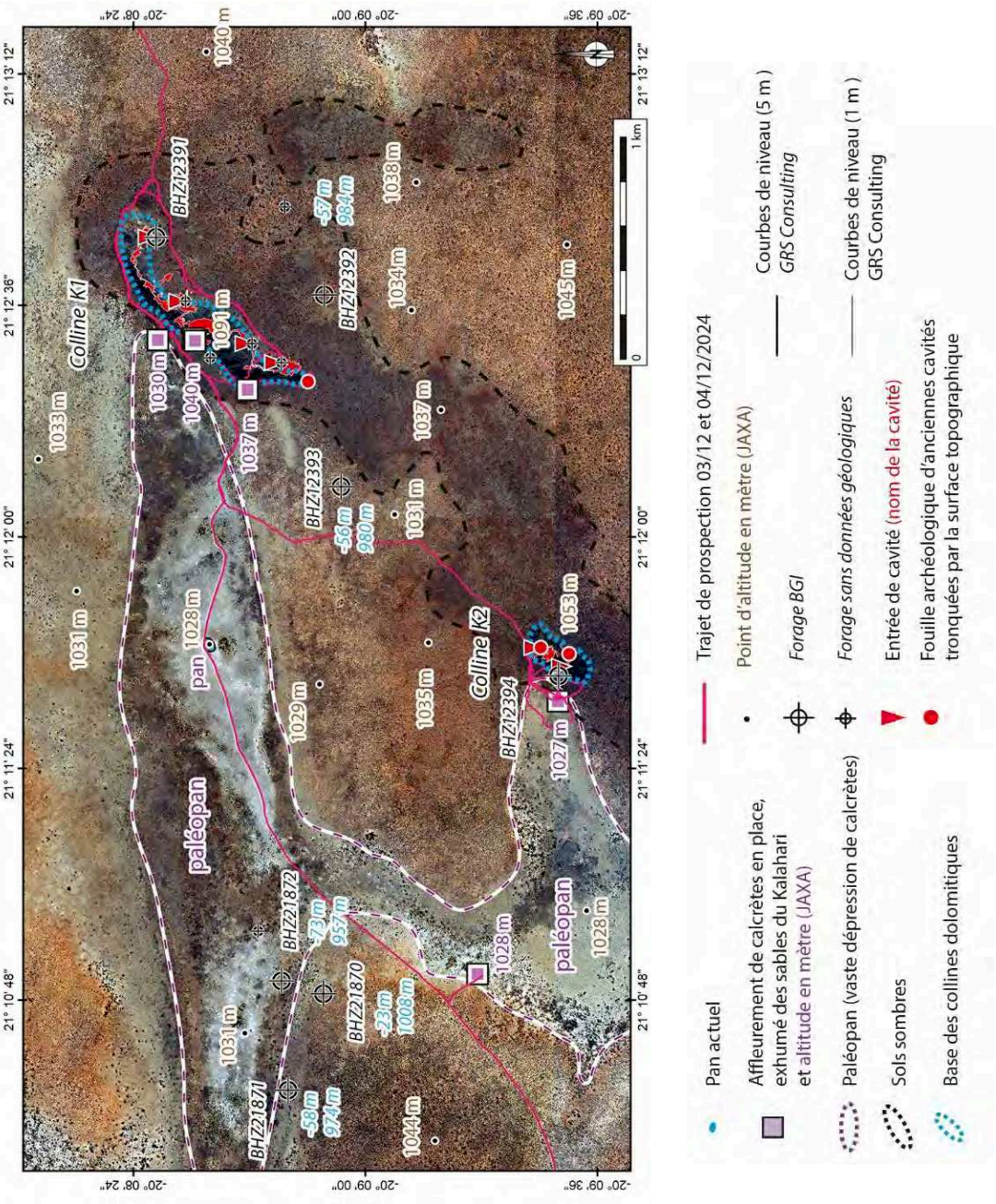


Figure 599 En haut, image satellite (ESRI Arcmap) et en bas, levé gravimétrique.

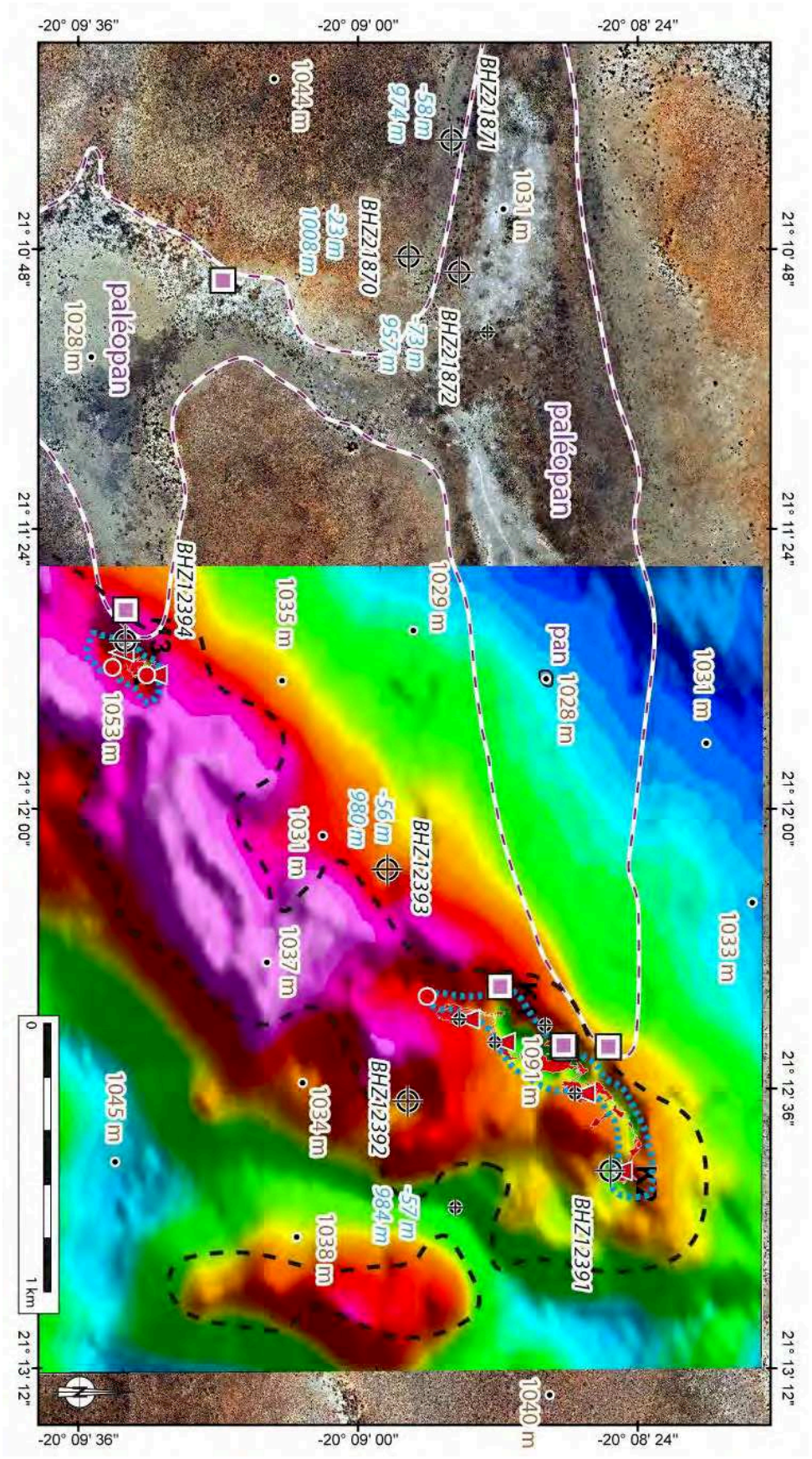


Figure 600 Ajout du levé gravimétrique réalisée par Selfe / GRS Consulting (2005a) sur la carte précédente.

2. Analyse de l'image satellite ESRI Arcgis

Une autre image satellite (ESRI Arcgis) (Figure 601) indique une répartition différente des sols sombres. Une fois encore, ces sols sombres sont corrélés avec les levés gravimétriques et liés à la présence des dolomies sous couverture. Il est possible que ces teintes soient dues à la capacité des dolomies à absorber l'humidité.

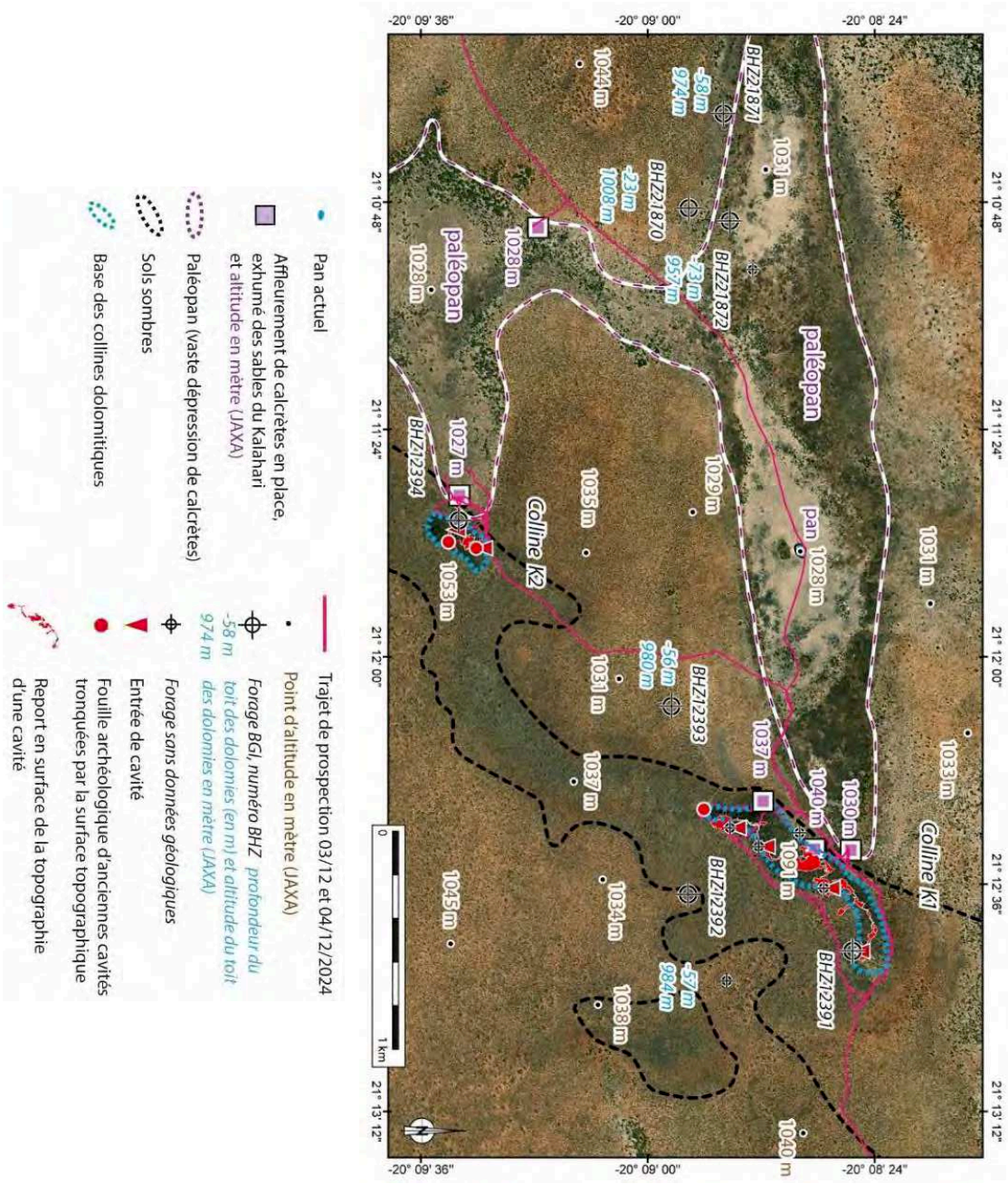


Figure 601 En haut, autre répartition des sols sombres sur l' image satellite (ESRI Arcgis).

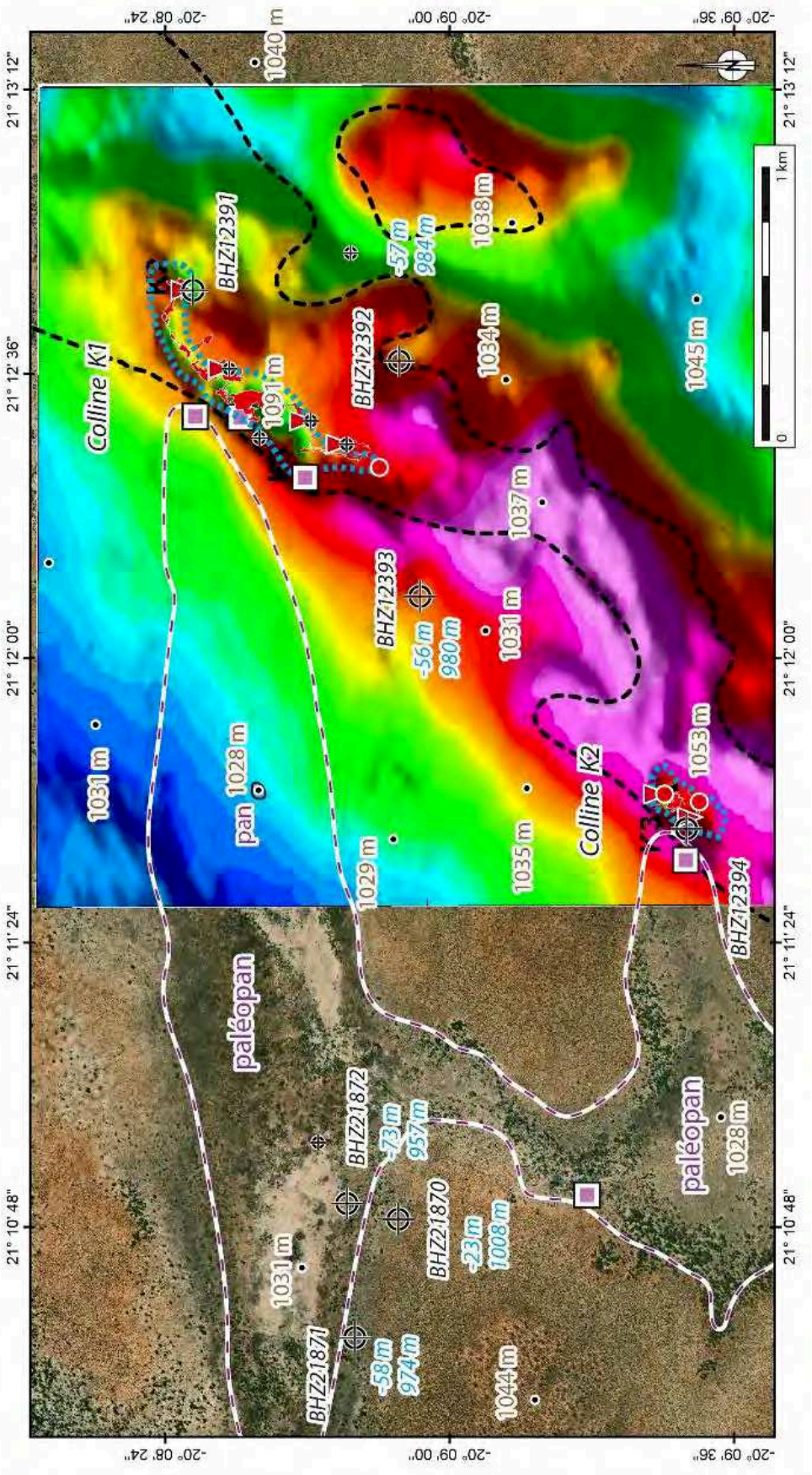


Figure 602 Ajout du, levé gravimétrique réalisée par Selfe / GRS Consulting (2005a) sur la carte précédente.

3. Gravimétrie et paléovallée, détection des réseaux karstiques et forages

Le levé gravimétrique (anomalie du champ de gravité de Bouguer) réalisé par Selfe / GRS Consulting (2005a) indique la présence d'une paléovallée à l'est de la colline K1. Celle-ci est un autre indice, en plus de la présence des réseaux karstiques fantômisés, d'une régression importante du niveau de base régional du Rift de l'Okavango et venant impacter le horst dolomitique où se situe les *Koanaka Hills*, *Gcwihaba Hills* et *Aha Hills*.

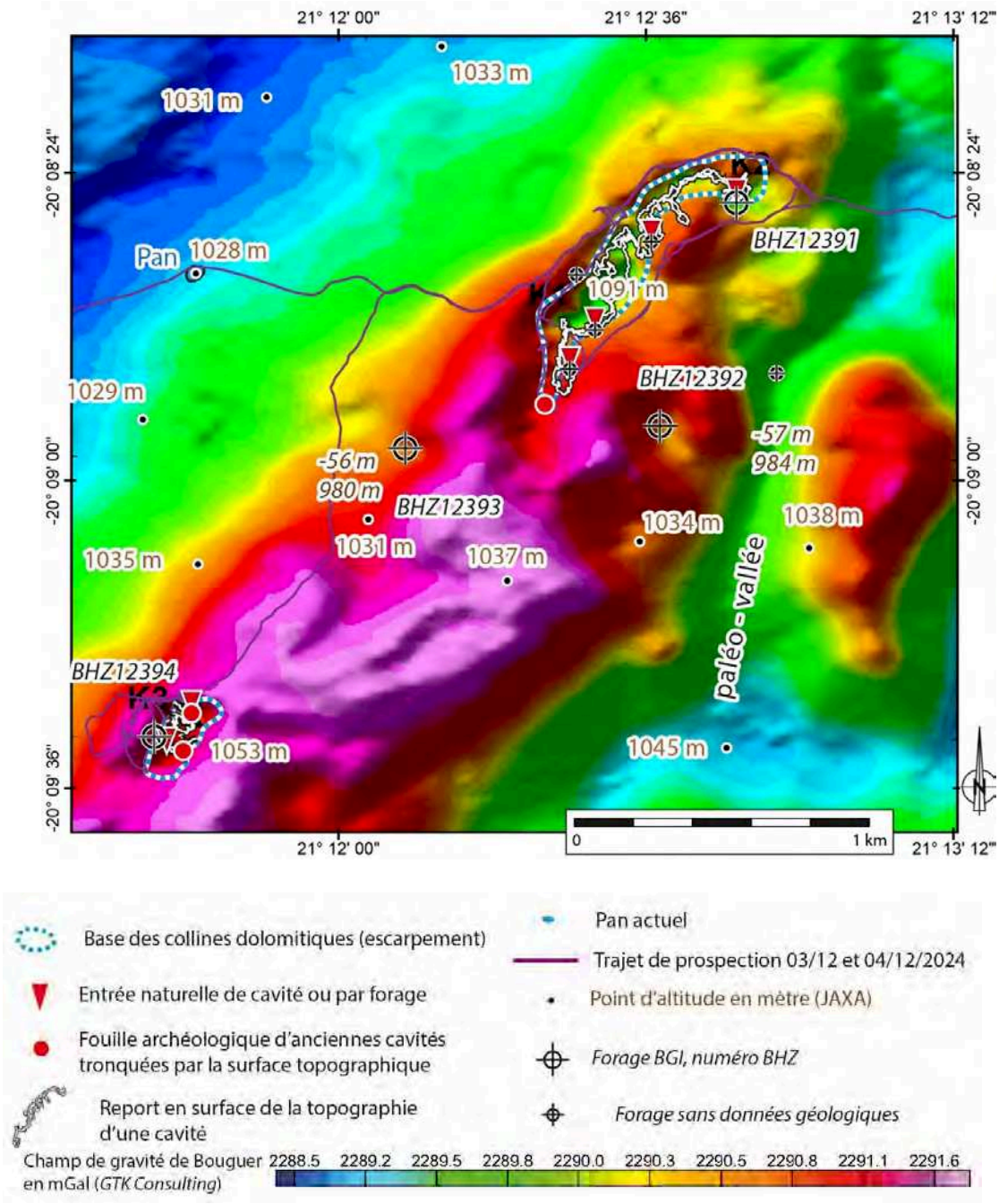


Figure 603 Report des réseaux topographiques sur les levés gravimétriques pédestres de Selfe / GRS Consulting (2005a, modifié) (Bouguer Gravity Field) ayant permis de découvrir le réseau karstique, indiqué ici en noir.

Ajouter les courbes de niveau de la topographie au levé gravimétrique permet de mieux visualiser le toit des dolomies indiqué par les données gravimétriques. Les zones en rouge signalent la présence des dolomies en sub-surface ou en surface. Les dépressions situées à l'intérieur des zones rouges peuvent correspondre à des cavités. Ces données ne permettent toutefois pas de déterminer la profondeur. Des forages ont donc été réalisés dans ces secteurs. C'est ainsi que le grand réseau karstique de la colline K1 *(Gecko Chamber, Diviner's Cave, Fossil Cave et Mongongo Cave)* a été découvert. Présentons maintenant ce réseau.

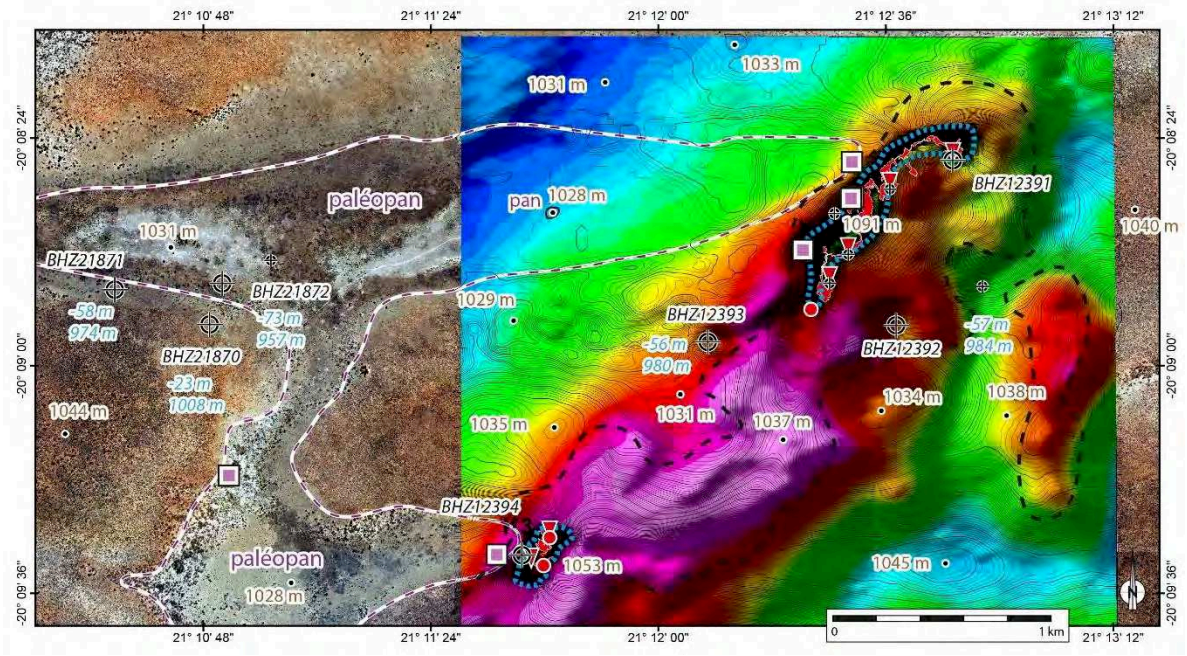


Figure 604 Ajout sur le levé gravimétrie des courbes de niveau de la topographie actuelle issues des levées au GPS Différentiel de Selfe / GRS Consulting.

4.2.4.2. La Colline K1 de Koanaka et le plus grand réseau karstique du Botswana

La base de la colline se situe à 1030 m d'altitude et son sommet atteint 1091 m (MNT JAXA). Un replat, à 1060 m d'altitude, est présent (photographie Figure 458 p.505), où se situe le forage d'entrée de *Gecko Chamber*. En bas, les sables du Kalahari sont situés à 1035 m. On remarque que la hauteur des dunes de sables n'est pas la même de chaque côté de la colline K1 : elles sont plus élevées sur la face abritée du vent, comme indiqué sur la Figure 606, la Figure 838 (p.814) et la Figure 824 (p.805).



Figure 605 La colline karstifiée et fossilifères de K1.

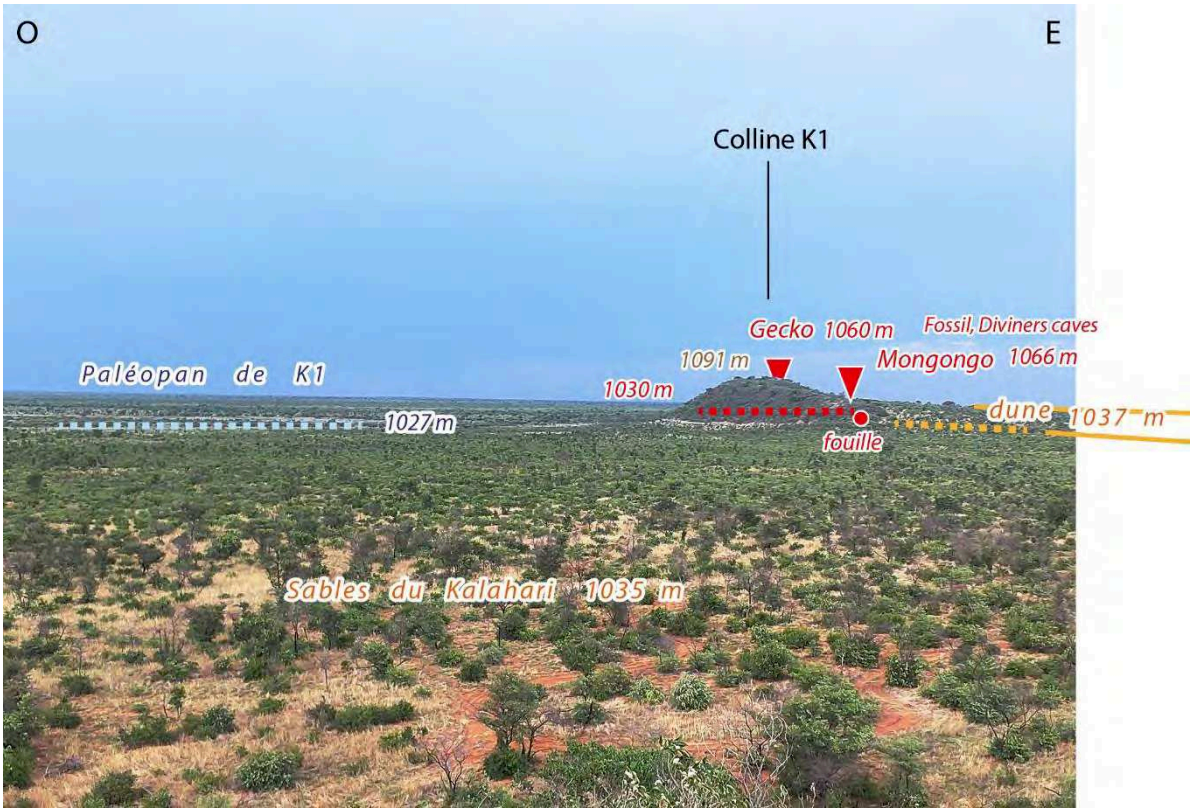


Figure 606 Analyse du panorama de la colline K1, depuis la colline K2, à Koanaka Hill.

Altitude du forage de *Gecko Chamber* : 1060 m.
Altitude du forage de *Mongongo Cave* : 1066 m (MNT JAXA)

4.2.4.2.1. Le plus grand réseau karstique du Botswana : Gecko Chamber, Nqumtshaa Cave, Diviner's Cave, Fossil Cave and Mongongo Cave est situé dans la colline K1 de Koanaka Hills

Les mesures gravimétriques effectuées sur la colline K1 en janvier 2006 (voir annexe p.1343 et figures p.1353)) (Selfe/*GRS Consulting* 2005, 2005a, 2013) ainsi que celles de *Poseidon Geophysics*, ont mis en existence l'existence d'un grand réseau karstique. Des forages ont été réalisés par *De Wet Drilling* en décembre 2008 et août 2009 afin de localiser des vides au sein de la colline (Figure 1320 p.1367). Ils ont ensuite été élargis pour permettre l'accès aux grottes en avril 2011 (Ellis, 2020). Ces investigations ont conduit à la découverte du plus grand réseau karstique du Botswana, selon le *South African Spelaeological Association (SASA) Cave Register* . Ce réseau karstique comprend notamment *Gecko Chamber, Nqumtshaa Cave, Diviner's Cave, Fossil Cave et Mongongo Cave*. À l'extérieur de la colline, sur le versant sud, l'érosion a recoupé une partie de ce réseau karstique, où nous avons entamé des fouilles en 2023 ayant livré des spéléothèmes (stalagmites) ainsi que des brèches karstiques fossilifères (*Fossil bones and palaeo cave floors* du Tableau 68 p.1242 fourni en 2021 par Ledimo O.).

Les relevés topographiques, réalisés par Ellis R., Jacobs G., Ledimo O., Stander H., Tucker S. et Clark T en 2011, (Figure 608 p.612) indiquent que ce réseau karstique présente :

- un développement de 2341 m ;
- une profondeur de 59 m ;
- une extension de 668 m ;
- et un volume de 145 737 m^3.

Aucune de ces cavités n'atteint naturellement la surface, et les grottes n'ont pu être accessibles que par forages.

Le forage de *Gecko Chamber* mesure 60 cm de diamètre et 19 mètres de profondeur (Ellis, 2020, p.76), il permet d'atteindre le réseau subhorizontal de la grotte. L'étagement des galeries des grottes se situe autour de **1027 m d'altitude** (lire synthèse p.654).

Entre 2016 et 2018, ces cavités ont été désobstruées par l'*ICE* (*Independent Cave Explorer*) (lien internet vers des photographies) (Ellis, 2020). Aujourd'hui, pour aller dans ces cavités, il faut descendre et remonter avec des cordes à travers un forage de 43 m et de 60 cm de diamètre, tubé dans sa partie supérieure.

Dans *Gecko Chamber*, nous avons observé des dolomies et une formation différente appartenant peut-être au Complexe de Chihabadum.



Figure 607 La grotte se développe au contact de deux formations géologiques, les dolomies et des schistes.

Nous avons corrigé les altitudes du document original en utilisant l'altitude de 1070 m (MNT JAXA) pour le forage de *Diviner's* et non l'altitude de 1056 m, soit une différence de 14 m.

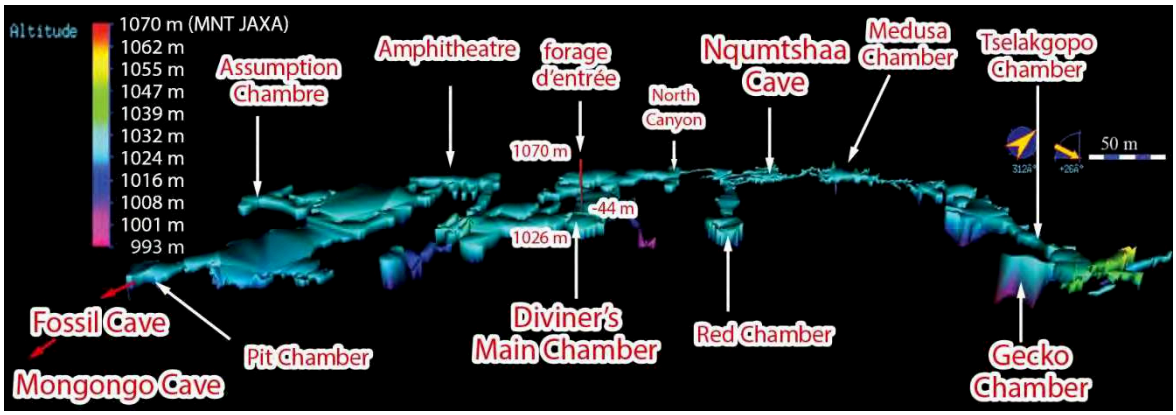
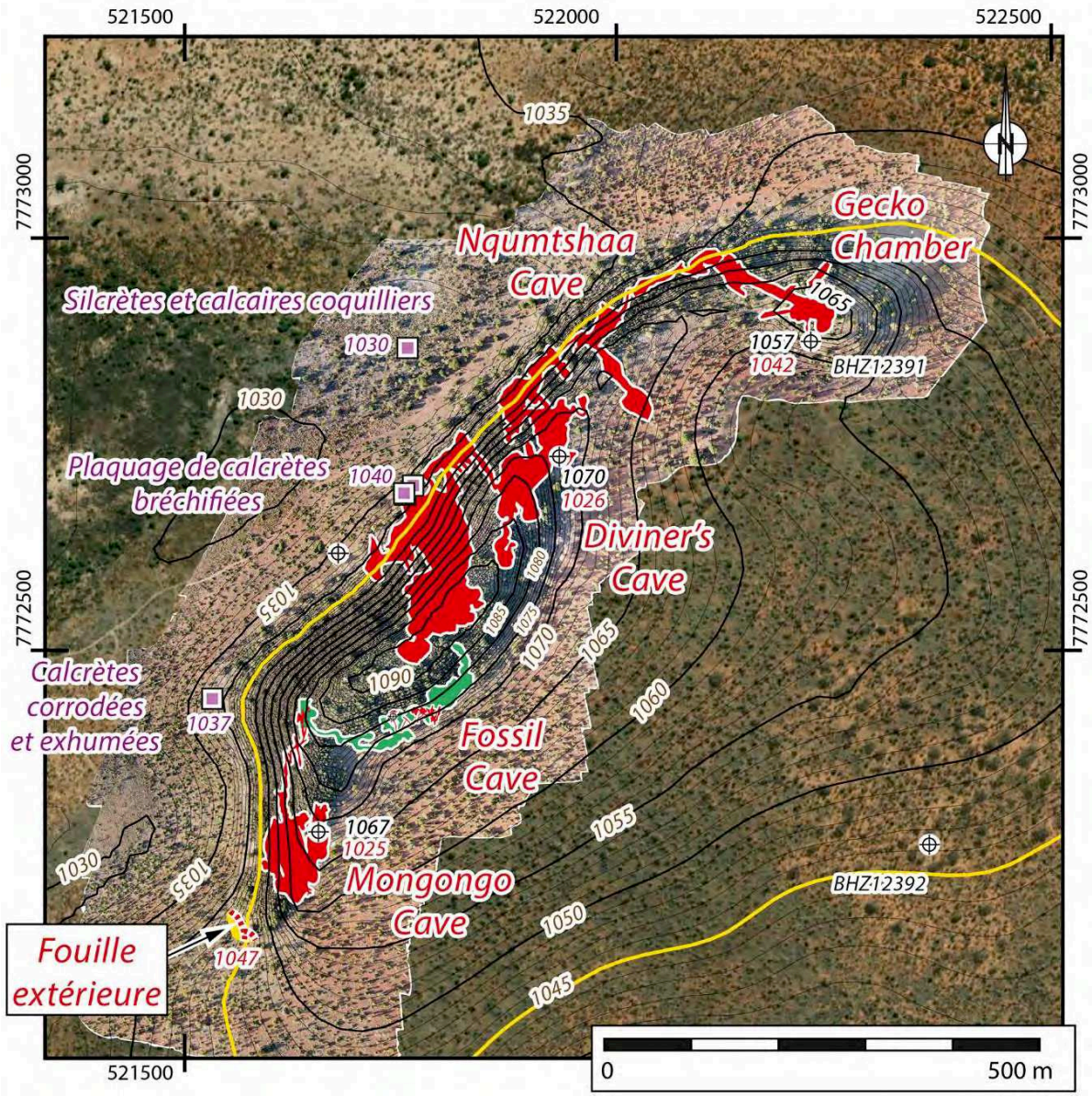


Figure 608 Relevé topographique d'une partie du réseau karstique de K1 (il manque Fossil Cave et Mongongo Cave), avec les altitudes et notamment l'altitude du forage d'entrée de Diviner's situé à 1070 m (MNT JAXA) (Source : Cardoso et al., 2021, Fig.4, p.97, modifié).



Source des topographies : Ellis R., Jacobs G., Ledimo O., Stander H., Tucker S. et Clark T (2011). Orthophotographie par drone de la colline K1 que nous avons effectué en 2021 par photogrammétrie drone (source des photographies Laurent Bruxelles).
Image satellite (ESRI Arcgis).

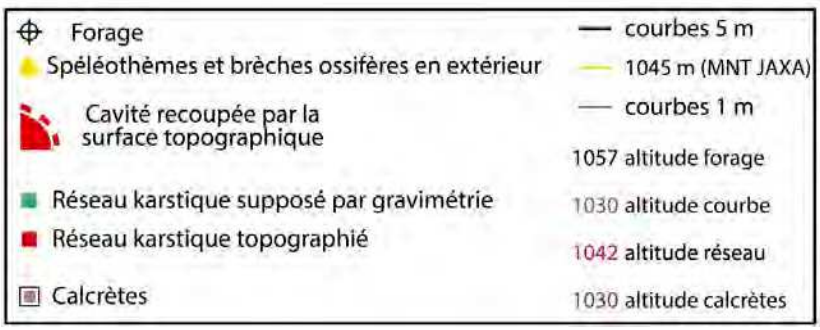


Figure 609 Réseau karstique de la colline de K1 à Koanaka Hills. (Cf. Figure 779 p.784).

4.2.4.2.2. La grotte pénétrable de Fossil Cave

La grotte de *Fossil Cave* a été découverte par des levés gravimétriques réalisés par *Geophysic Poseidon*, puis pénétrée grâce à un forage de 42 m de profondeur. Une première salle de 2 m de hauteur en moyenne est visitée et topographiée par Alan Grant (Figure 1331 p.1374) puis a été retopographiée en avril 2017 par Ledimo O. et Jankie T. (Figure 611). Une galerie étroite a ensuite été désobturée dans les sables, sous un plancher stalagmitique, et a débouché dans quatre salles plus grandes, de nouveau topographiées (Figure 611). Cette longue opération est décrite par Ellis (2000) et illustrées de photographies et de divers plans topographiques, reports en surface et relevés gravimétriques sur le groupe facebooke ICE *(Independent Cave Explorers)* (lien internet) (en annexe p.1375 à 1383).

Latitude SUD	Longitude EST			Altitude (m)	Source
20°8'42,4"	21°12'30,06"	21.208350000	-20.14511111100		Ledimo Oatse (GPS Garmin) *App 6 Coordinates of Features* (Tableau 68p.1242)
20°8'42.4"	21°12'29.9"	21.2083055600	-20.14511111100		Ledimo Oatse (GPS Garmin) Existing caves coordinates (Tableau 671238)
		21.208278000	-20.145115000	1073 MNT JAXA	Chadelle Bastien 20221209 (Tablette)

Tableau 24 Coordonnées GPS du forage d'entrée de la grotte de Fossil Cave.

Le forage qui permet de pénétrer la cavité est profond de 42 m et la première salle est environ 2 m d'hauteur en moyenne. L'altitude de l'entrée du forage étant de 1073 m (mesurée sur le MNT JAXA à l'aide des logiciels SIG), nous pouvons estimer que l'étagement du réseau se situe à 1029 m d'altitude (MNT JAXA).

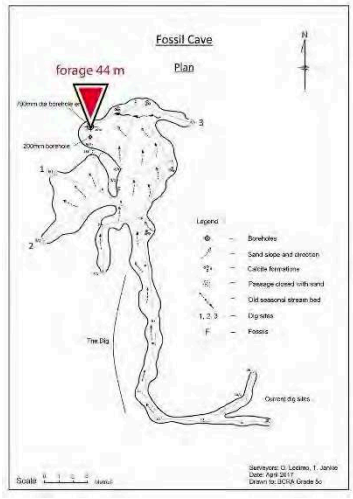


Figure 610 Premier plan topographique de la première salle de Fossil Cave d'après Alan Grant (Source : Document fourni par Selfe Gavin) (En grand Figure 1332 p.1375)

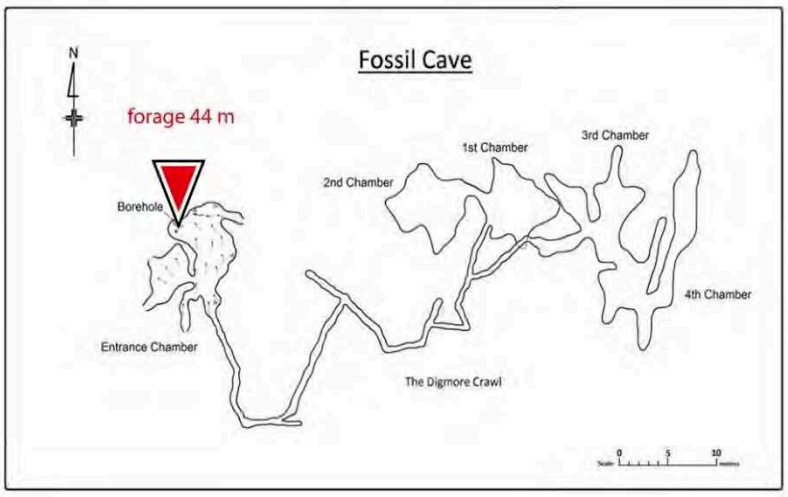


Figure 611 Plan topographique du réseau de Fossil Cave (Source : Ellis, 2020, p.41) (En grand Figure 1337 p.1379).



Figure 612 Report de la topographie du réseau karstique de Fossil Cave.

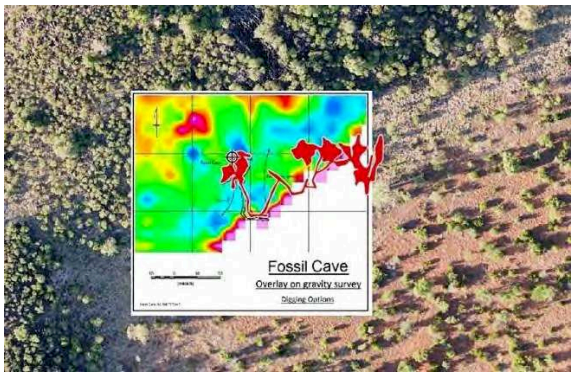


Figure 613 Calage d'un premier relevé gravimétrique (Geophysic Poseidon).

4.2.4.2.3. La grotte hypothétique entre Diviner's Cave et Mongongo Cave

Sur nos cartes, une erreur de positionnement du réseau karstique hypothétique (en vert) est possible du fait que nous ne possédons pas les relevés gravimétriques originaux.

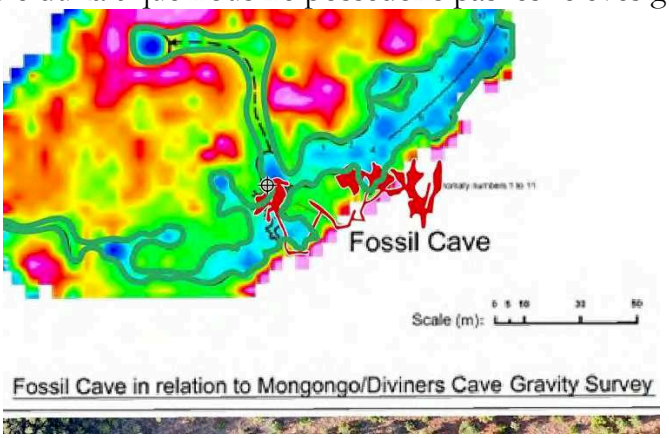


Figure 614 Calage d'un deuxième relevé gravimétrique et dessin du réseau karstique hypothétique (en vert).

Les plans topographiques des cavités ont été calées en utilisant :

- les échelles graphiques ;
- la position des forages qui est indiquée sur les plans.

Nous n'avons pas pris en compte de déclinaison magnétique, expliquée dans le Chapitre n°1 (p.117), car il semble que les plans soient déjà au nord géographique. Nous avons pu caler les plans car nous avons mesuré sur le terrain les coordonnées géographiques des puits de forages au GPS (Tableau 24 et inventaire des cavités p. 1090). Nous proposons un calage n°1 du relevé gravimétrique à partir de la position du forage de *Fossil Cave* mais il existe un décalage entre le report des réseaux (contour en rouge) et celui indiqué sur le plan (contour noir). Effectivement certains documents consultés montrent des erreurs, comme indiqué sur la figure suivante. Comme nous ne possédons pas les relevés gravimétriques originaux nous n'avons pas réussi à déterminer d'où provient l'erreur. C'est peut-être seulement l'échelle graphique qui est fausse.

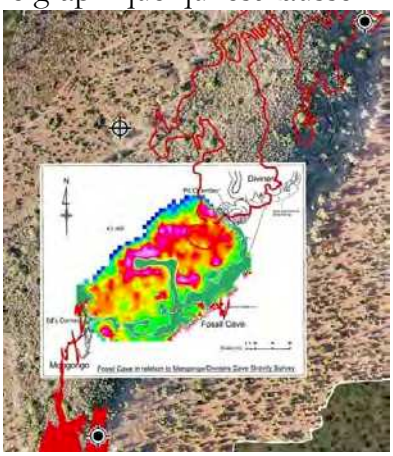


Figure 615 Proposition d'un autre calage n°1 du relevé gravimétrique.

4.2.4.2.4. La fouille débutée en 2023, en extérieur, au sud de la colline K1 : la suite de la grotte de Mongongo trépanée par la surface topographique

Au sud de la colline K1, où se situe le grand réseau que nous venons de décrire : « *Gecko Chamber, Diviner's, Fossil Cave et Mongongo Cave* », on trouve cette fois-ci en extérieur une grotte recoupée par le versant topographique (indiquée fouille extérieure sur la Figure 609).

Une fouille a débuté en 2023 dans ce secteur. Des stalagmites et des os sont signalés dès 2021 (*Fossil bones and palaeo cave floors* dans la base de données fournie par le Muséum de Gaborone (Tableau 68 p.1242)). L'altitude de cette ancienne grotte se situe autour de 1047 m (MNT JAXA). Ces anciens remplissages karstiques ont la particularité d'avoir été corrodés sous une couverture sédimentaire et présentent des morphologies arrondies (Figure 619 et Figure 620). Nous avons décrit ces phénomènes de corrosion plus haut (p.525). Les brèches karstiques ont la particularité de contenir des stalagmites, dont certaines sont encore en position verticale (Figure 621). Ces dépôts, et les stalagmites même, sont traversés de plusieurs générations de fissures dont certaines sont anciennes et cimentées, tandis que d'autres sont récentes et vides (Figure 620 et Figure 621).

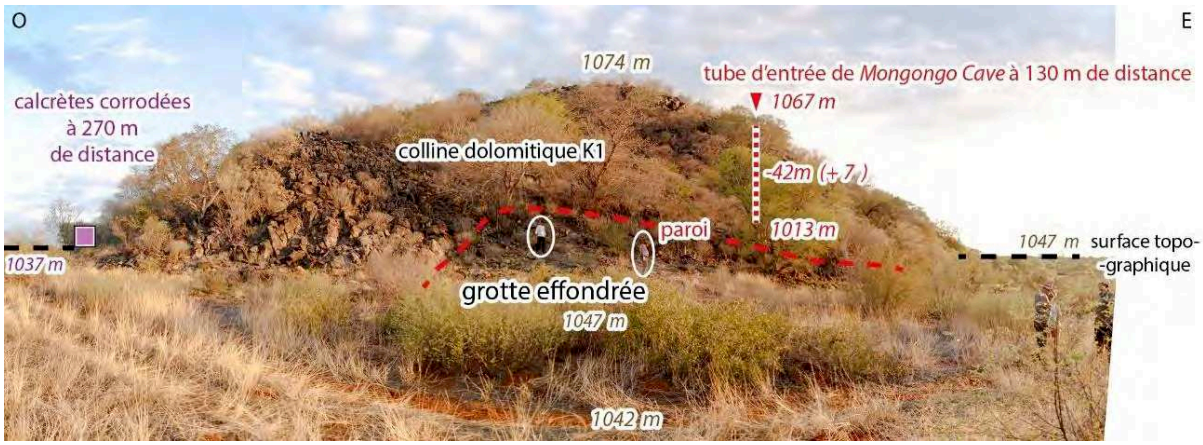


Figure 616 Fouille archéologique du versant sud de la colline de K1 à Koanaka, qui est fouillé depuis 2023. Les deux personnes entourées en blanc donnent l'échelle.

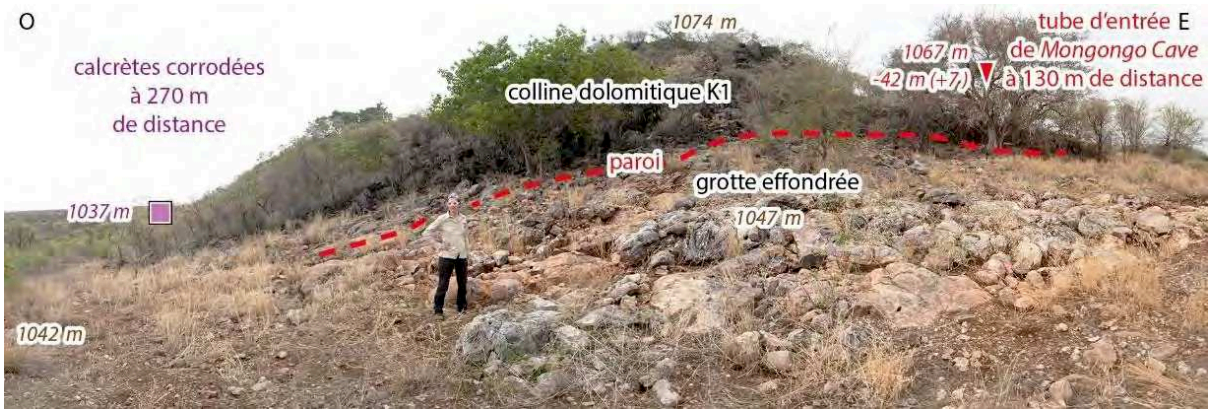


Figure 617 Secteur de la fouille débuté en 2023 correspondant à la partie de la grotte de Mongongo éventrée par la surface topographique actuelle.

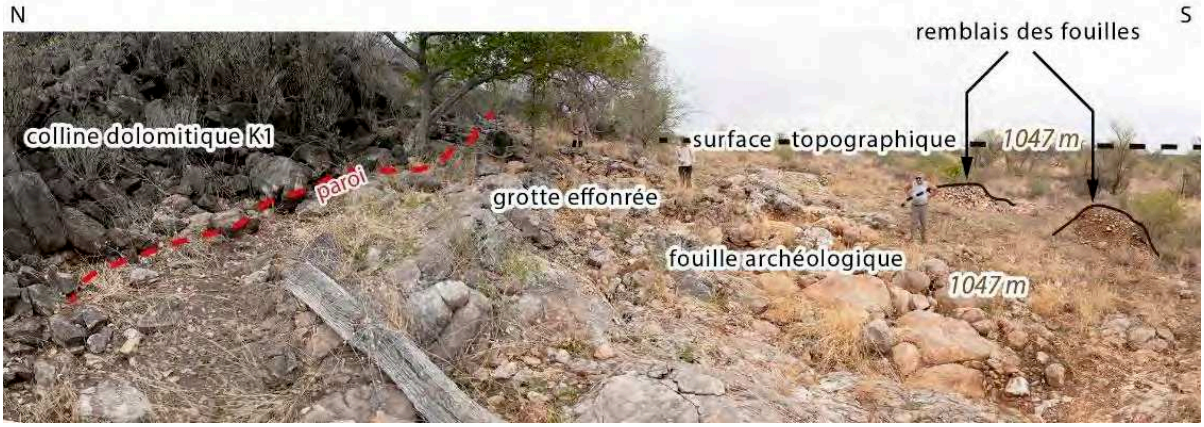


Figure 618 Idem.



Figure 619 La fouille montre que les remplissages karstiques ont des morphologies arrondies typiques de la corrosion sous couverture.



Figure 620 Deux photographies d'une stalagmite prise dans la brèche. L'ensemble était traversé par plusieurs générations de fissures, certaines étant cimentées par des sédiments clairs.

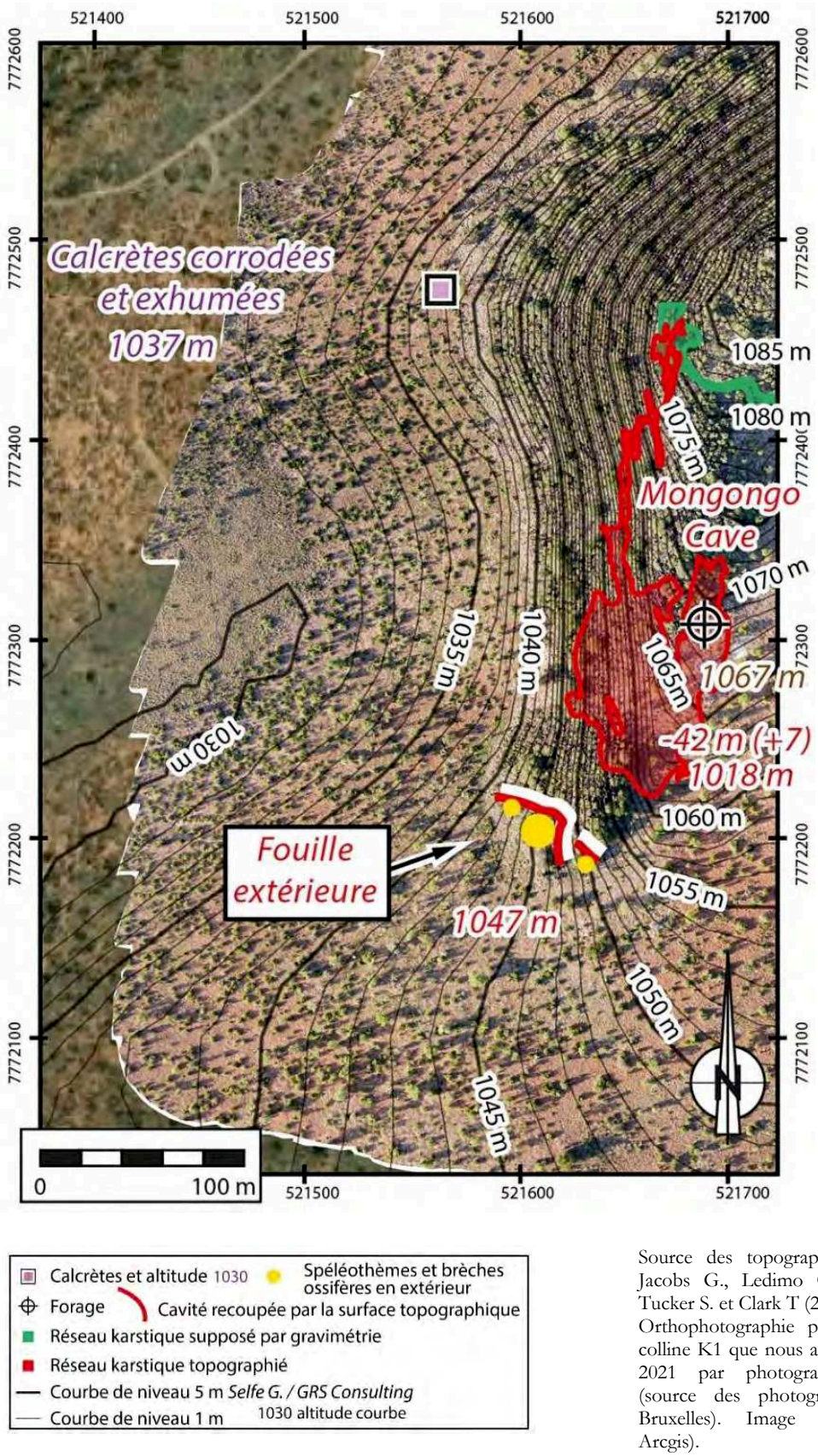


Figure 621 Deux photographies d'une autre stalagmite en place emballée dans la brèche. L'ensemble était traversé par une fissure recimentée.

4.2.4.2.5. La grotte de Mongongo

Le puits d'entrée de la grotte de Mongongo est situé à 130 m de distance de la fouille commencée en 2023. Il se trouve à une altitude de 1067 m (MNT JAXA). Le tube mesure 42 m de profondeur (Ellis, 2020) et débouche dans la cavité de Mongongo, dont la hauteur sous plafond atteint au maximum 7 m (Ellis, 2020, p.21) et 15 à 20 m pour FFS (2025, p.38). L'étagement du réseau karstique est situé donc aux environs de 1013 m d'altitude (MNT JAXA), ce qui nous laisse envisager un enregistrement de dépôts karstiques de 34 m de puissance au niveau de la fouille débutée en 2023 qui se situe à 1047 m d'altitude (MNT JAXA). Nous avons indiqué sur cette carte les calcrètes corrodées et exhumées des sables que nous trouvons à 1052 m d'altitude (MNT JAXA) et à 270 m de distance. Nous les présenterons en détail plus loin (p.794). La fouille ne serait qu'à 35 m de distance de la grotte de Mongongo.

Nous avons soustrait 15 m aux altitudes des courbes de niveau issues du levé par GPS différentiel de Selfe / GRS Consulting (voir Tableau 29 p.659) afin de les harmoniser avec les altitudes mesurées dans le SIG à partir du MNT JAXA, ce dernier étant continu et harmonisé entre les différents secteurs étudiés.



Source des topographies : Ellis R., Jacobs G., Ledimo O., Stander H., Tucker S. et Clark T (2011). Orthophotographie par drone de la colline K1 que nous avons effectué en 2021 par photogrammétrie drone (source des photographies Laurent Bruxelles). Image satellite (ESRI Arcgis).

Figure 622 Localisation des fouilles au niveau de la cavité recoupée par le versant topographique et cartographie (en rouge) du contact entre les remplissages karstiques et la paroi dolomitique.

4.2.4.3. La Colline K2 de Koanaka

Son sommet culmine à 1068 m d'altitude, d'après les mesures sur le MNT JAXA, comme expliqué dans le Chapitre n°1 (p.36). Le modèle 3D de la colline que nous avons réalisé par photogrammétrie indique un sommet un peu au-dessus de 1050 m d'altitude (MNS DRONE) (Figure 639 p.637). La plaine à l'ouest vers 1010 m (MNS DRONE) et la plaine à l'est vers 1040 m (MNS DRONE). Les données topographiques de Selfe (*GRS Consulting*), générées au GPS différentiel, s'échelonnent entre 1042 à 1084 m pour cette colline et de 1042 à 1108 m sur l'ensemble de Koanaka, comprenant les collines K1 et K2 (Figure 596 p.599). Nous avons harmonisé ces données avec celles du MNT JAXA qui est le jeu le plus complet dans la région, c'est-à-dire nous avons soustrait 17 m aux données de Selfe (*GRS Consulting*). La gamme d'altitude est donc ramenée entre 1025 et 1091 m pour les deux collines et entre 1025 et 1067 m pour la colline K2.

Sur la colline K2 de Koanaka s'ouvre l'entrée de la grotte appelée *Bone Cave*. C'est une entrée naturelle étroite qui s'ouvre au niveau d'une corniche située presqu'au sommet de la colline. L'altitude de l'entrée est de 1062 m (MNT JAXA). Un puits se développe sur une vingtaine de mètres pour atteindre un réseau subhorizontale situé vers **1015 m** d'altitude. Comme le montre la Figure 658 (p.647) où la coupe topographique de la cavité levée par Laurent Bruxelles et Grégory Dandurand en 2022, sous Topodroid, a été reportée à un profil topographique, que nous avons relevé du versant (Figure 657). Ces données ont été confirmées par le modèle 3D levé par Kim Genuite en 2023 (Genuite *et al.*, 2024).

Le versant sud de la colline K2 recoupe d'anciens remplissages karstiques, notamment avec des stalagmites, affleurent aujourd'hui à la surface, sous quelques décimètres de sables (Pickford, 1990). Ce secteur est fouillé par l'équipe d'HOMINI'KARST depuis 2021. En 2024, nous avons commencé à fouiller le versant nord de cette colline qui correspond au prolongement de la grotte de Bone Cave qui s'est effondrée et/ou qui est recoupé par le versant topographique. La colline karstifiée de K2 s'élève de 25 m au-dessus de la plaine du Kalahari, constituée de formations sédimentaires appartenant au groupe géologique du Kalahari (décrites p.507), et aujourd'hui recouverte par la savane. La formation de la colline et la mise en place de ses versants ont recoupé d'anciennes grottes et leurs remplissages karstiques ossifères affleurent désormais en surface.

La colonisation de ces grottes par les chauves-souris a favorisé l'effondrement des porches d'entrée par la biocorrosion, notamment l'extension verticale, vers le haut, des biocoupoles de nichage (Dandurand *et al.* 2019 ; Bruxelles). Ce processus a contribué à l'exposition des remplissages karstiques ossifères à l'air libre. Aujourd'hui, nous fouillons ces versants à la recherche de fossiles. Les remplissages karstiques, en particulier sur le versant nord, ont été perturbés par l'activité des termites, qui sont venues y établir leurs colonies lorsque la grotte était encore intacte et que les remplissages étaient meubles. On remarque également que la hauteur des dunes de sable n'est pas la même de chaque côté de la colline de K2 : elles sont plus élevées, de presque 30 mètres (Figure 639 p.637) sur la face abritée du vent.



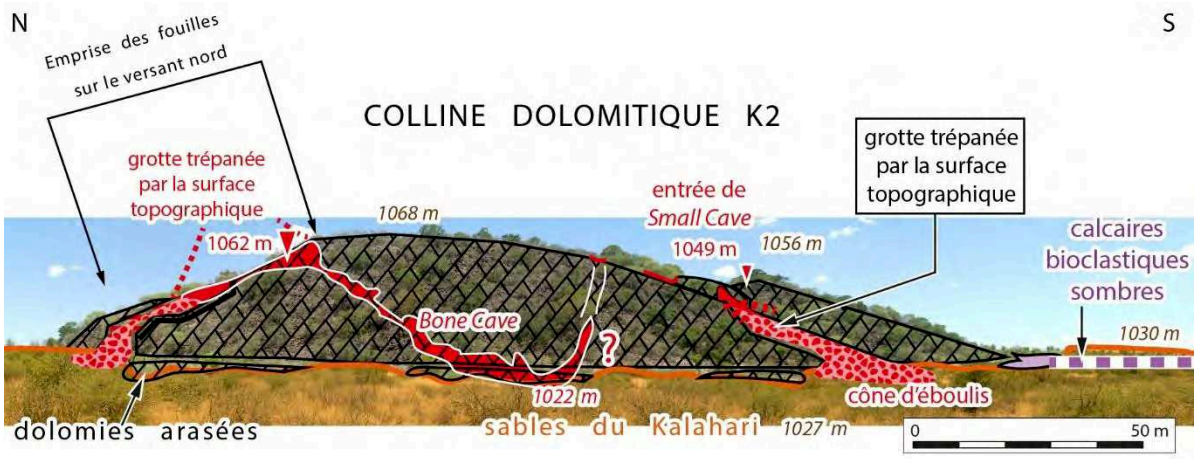




Figure 623 Analyse morphokarstique du versant nord-ouest de la colline K2 à Koanaka.

4.2.4.3.1. Découverte de molaires de cercopithèque dans des brèches karstiques sur le versant nord de la colline K2 à Koanaka.

En 1988 et 1989, cinq dents cercopithécoïdes isolées ont été récupérées dans des brèches à *Koanaka Hills* (Pickford et Mein, 1988 ; Pickford et coll., 1994 in Williams *et al.*, 2012 ; Senut, 2008) et plus précisément sur le versant nord de la colline K2 (p.647) (*Koanaka North*, site Koa N de la p.595) d'après Pickford, Mein et Senut (1994, p.227).



Figure 624 Molaire de Cercopithèque (Parapapio) in situ dans une brèche de remplissage. (Source : Senut, 2008, p.80).

4.2.4.3.2. Découverte de fossiles de primates (Papio) dans la grotte de Bone Cave en 1997

Trois fossiles de primates ont été découverts en 1997 dans la grotte de *Bone Cave* (Williams *et al.*, 2012).

Ce sont :

- un crâne d'un jeune adulte mâle *Papio* portant le numéro BNMM FC346 (Figure 625) ;
- un os frontal cercopithécidé ;
- une mandibule et des dents d'une femelle *Papio* juvénile.

Ces ossements appartiennent à un primate éteint représentant un nouveau taxon, nommé ici sous-espèce : *Papio hamadryas— Papio hamadryas botswanae. Am J Phys Anthropol 000:000–000, 2012* (Williams *et al.*, 2012).



Le crâne était situé dans la *Short Drop Room* indiquée en rouge sur la topographie de Ritter et Mann (1995) (Figure 1298) et était emballé dans les sédiments karstiques concrétionnés.

Un prélèvement d'une concrétion, numérotée BC97-14, a été effectué dans la grotte *Bone cave* (Railsback *et al.*, 2018, Fig.5). La datation, publiée en 2012, donne un âge supérieur à 317 000 ± 114 000 ans (TL) pour ce crâne, soit au Pléistocène moyen ou plus ancien (Williams *et al.*, 2012). Il n'est pas mentionné ce que ces fossiles sont devenus.

Figure 625 Crâne de babouin (mâle) trouvé dans la grotte de Bone Cave en 1997. Il est daté de > 317 000 ± 114 000 ans (Source : Williams et al., 2012, modifié).

4.2.4.3.3. Grotte de Bone Cave sur la colline K2 à Koanaka

La grotte est mentionnée pour la première fois sur le plan de Pickford (1990, Fig.7, p.14) que nous avons redessiné (Figure 626) et où les contours de la grotte sont indiqués en rouge. Elle a ensuite été visitée par Ron Ritter en décembre 1993 qui publie un plan topographique (Figure 627) (Ritter et Mann, 1995). En raison de la grande quantité d'ossements pris dans la brèche à l'intérieur de la grotte, Ritter appelle cette grotte « *Bone Cave* ».

Latitude SUD	Longitude EST	Altitude (m)	Auteurs
20°09'27,2"	21°11'42,8"	1062 (MNT JAXA)	Ledimo Oatse

Tableau 25 Coordonnées de la grotte de Bone Cave sur K2 (Koanaka).

4. **Premier plan et première coupe de Pickford (1990) montrant l'entrée de Bone Cave**

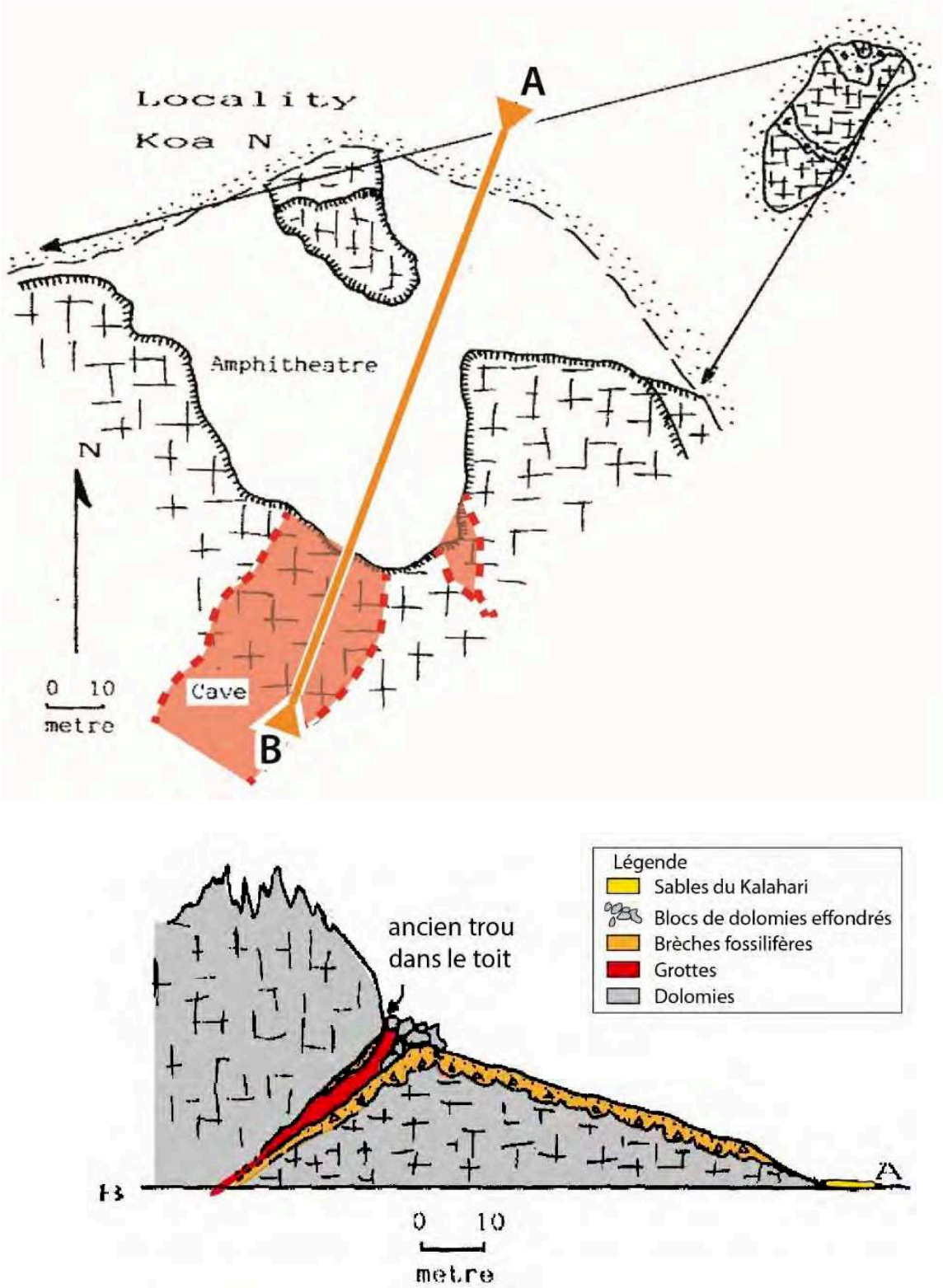


Figure 626 Plan et coupe de l'amphithéâtre au nord de la colline de K2 à Koanaka et localisation de l'entrée de Bone Cave selon Pickford (1990, Fig.7). (Source: Pickford (1990, Fig.7, modifié).

5. Première topographie de Bone Cave (1995)

Un premier plan topographique de *Bone Cave* est publié par Ritter et Mann (1995) (Figure 627). Nous avons indiqué en rouge sur ce plan la localisation du crâne de babouin trouvé en 1997 par Williams décrit *supra*.

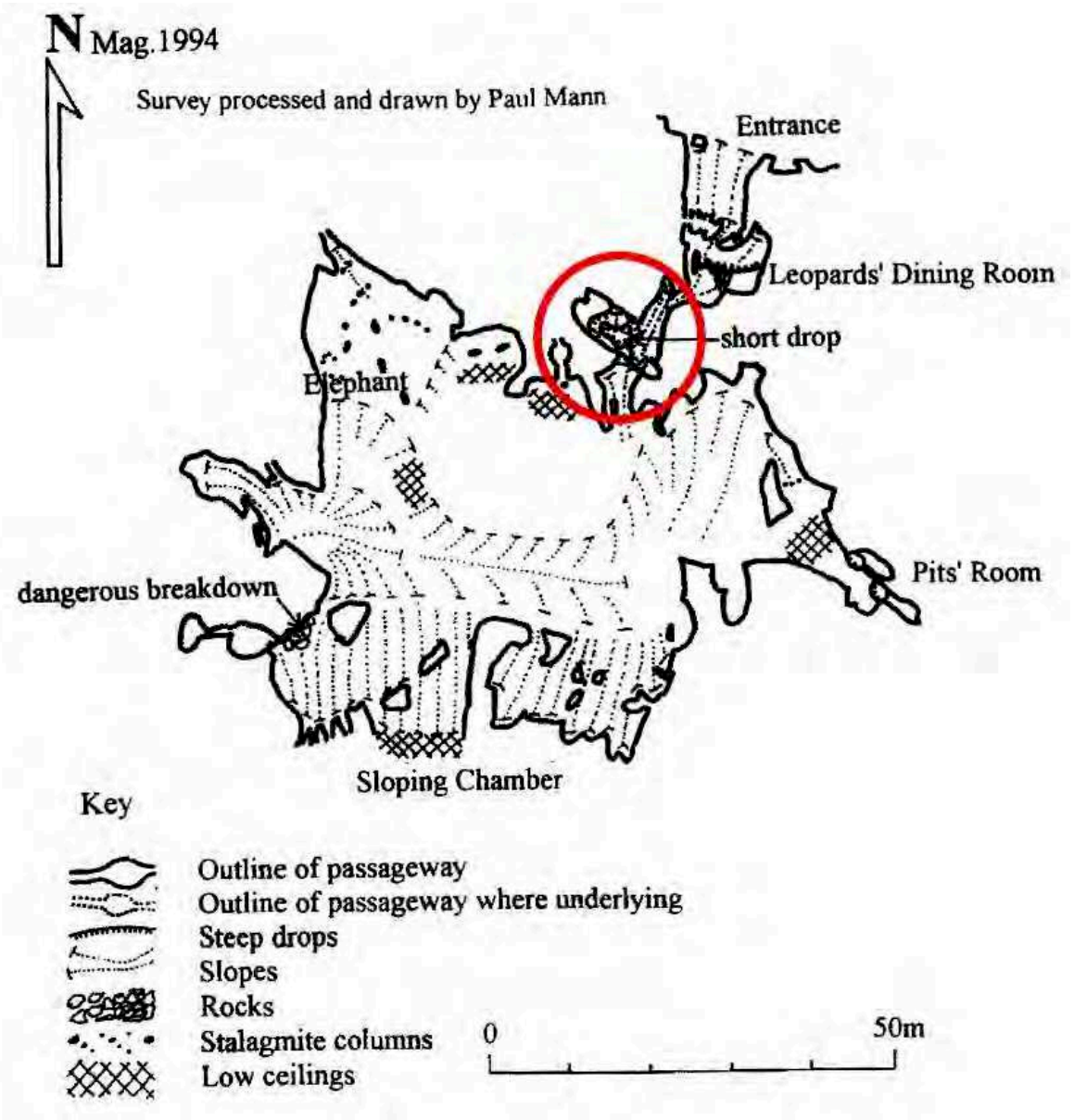


Figure 627 Topographie de Bone Cave (Source : Ritter et Mann, 1995).

Nous avons reporté les plans de Pickford (1990) et ceux de Ritter et Mann (1995) sur une image satellite (Figure 628). Ils indiquent la présence d'une petite cavité, de 10 m de long, au sud de la colline K2 de Koanaka. Elle est aujourd'hui baptisée *Small Cave* et nous a été montrée par Oatse L. En 2024, nous avons commencé à désobstruer l'entrée (FFS, 2024).

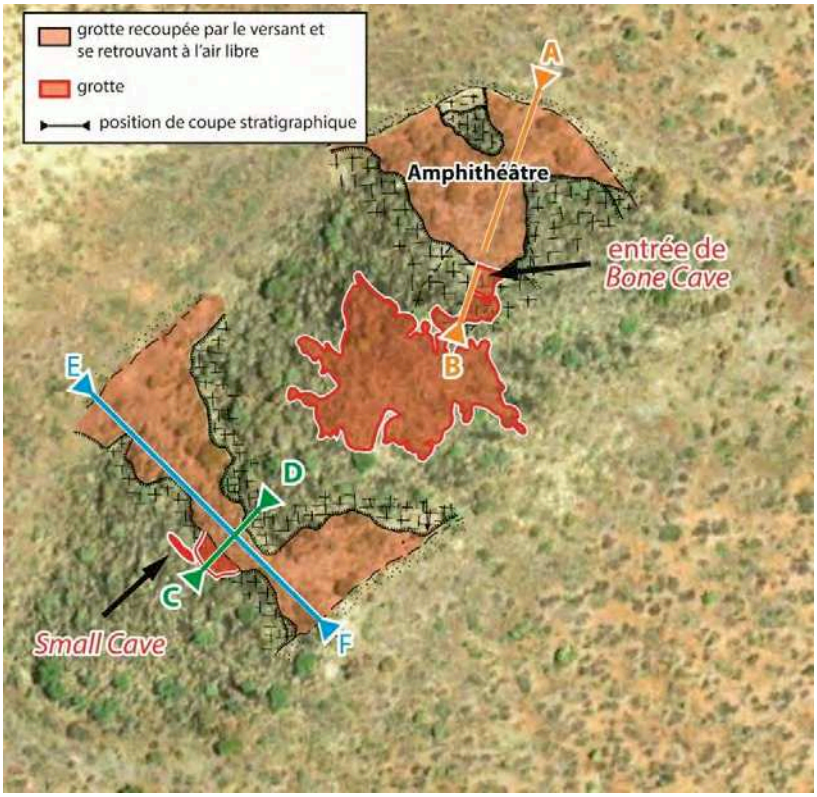


Figure 628 Report des cartes de Pickford (1990) et du plan topographique de Bone Cave levé par Ritter et Mann (1995) sur une image satellite.

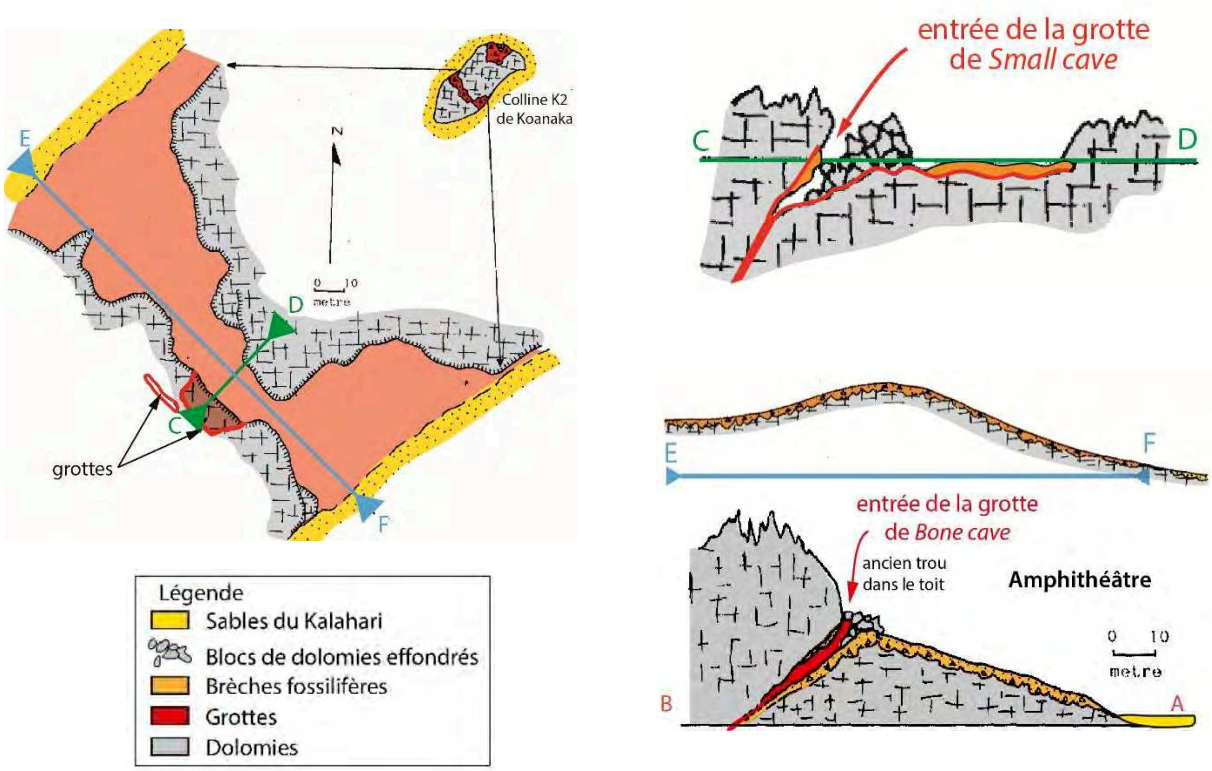


Figure 629 Plans et coupes de Pickford (1990, modifiés).

Le plan de Ritter et Mann (1995 p.3) (Figure 630) montre, quant à lui, deux grottes au sud de la colline de K2. Celle au sud est encore à retrouver.

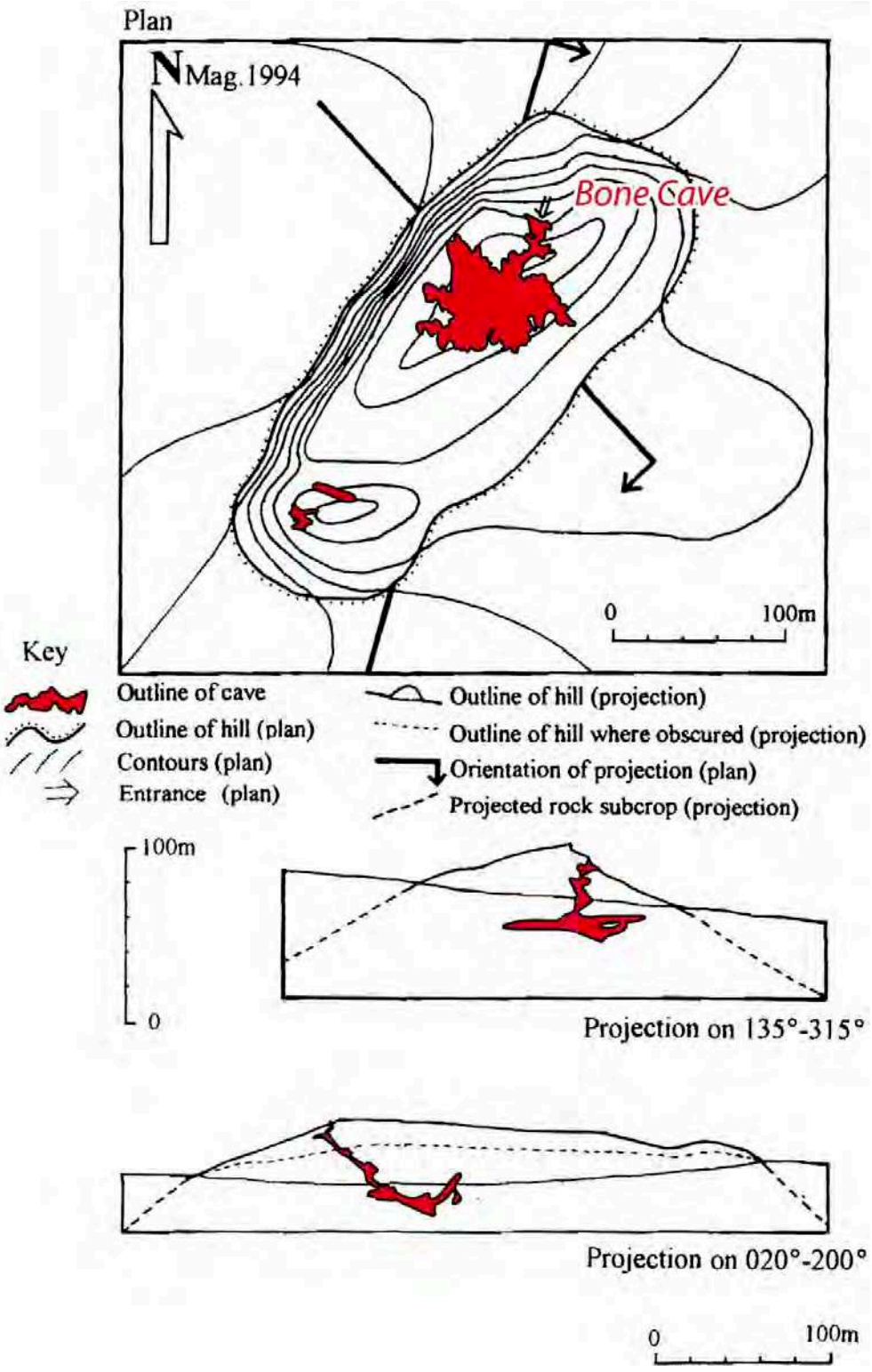


Figure 630 Plan et coupe du réseau karstique de Bone Cave sur la colline K2 à Koanaka (Source : Ritter et Mann, 1995 p.3, modifié).

6. Nouvelle synthèse cartographique de la colline K2

À l'aide des logiciels SIG décrits au Chapitre n°1 et des levés de terrain effectués, nous proposons une nouvelle synthèse cartographique de la colline K2 (Figure 631) comprenant :

- des orthophotographies de la colline et des fouilles de 2021 et 2022 réalisées par photogrammétrie, à partir de photographies prises par drone par Laurent Bruxelles (Figure 638 à Figure 643). Elles nous permettent de cartographier l'extension des fouilles ;

- la topographie de la grotte de *Bone Cave*, levée par Laurent Bruxelles et Grégory Dandurand en 2022 à l'aide d'un télémètre Leica et de l'application Topodroid fonctionnant sous tablette (Figure 645). Elle nous permet de rechercher des anciennes entrées de la cavité vers l'extérieur et aujourd'hui rebouchées, comme l'aven au sommet de la colline qui devait communiquer avec la cavité ;

- la cartographie de terrain des parties de cavités aujourd'hui à l'air libre, c'est-à-dire tronquées par les versants, et identifiables par les remplissages karstiques indurés résiduels conservés contre les anciennes parois dolomitiques de la grotte, comme nous allons l'illustrer (p.637).

Cette carte a été publiée dans Fourvel *et al.* (2024, Fig.5, p.65) et FFS (2024, p.59). Nous l'avons mise à jour ici (Figure 631) en y ajoutant la fouille de 2024. L'année 2023 a été consacrée à l'ouverture d'une nouvelle fouille au sud de la colline de K1.

Pour cette carte, nous avons utilisé une nouvelle topographie de la grotte *Bone Cave* réalisée par Laurent Bruxelles et Grégory Dandurand en 2021 (Figure 645 p.640). La grotte a également fait l'objet d'un scan 3D levé par Kim Genuite en 2023 (Genuite *et al.,* 2024) (Figure 646 p.641, Figure 647).

Nous présentons tout d'abord la cartographie synthétique de la colline de K2 (Figure 631), puis les données intermédiaires que nous avons réalisées et qui ont servi à son élaboration, telles que les photogrammétries, le levé topographique et les observations de terrain ayant permis de cartographier les anciennes parties de cavités aujourd'hui à l'air libre. Nous présenterons ensuite d'autres documents finalisés comme des vues 2.5D (Figure 644 p.639), des profils morphokarstiques des fouilles (Figure 648 à Figure 658).

Un inventaire des blocs flottants a été réalisé par Jean-Baptiste Fourvel dans Bruxelles *et al.* (2021, Tableau 1, p.36) et une liste faunique (Bruxelles *et al.* 2021, Tableau 3, p.43).

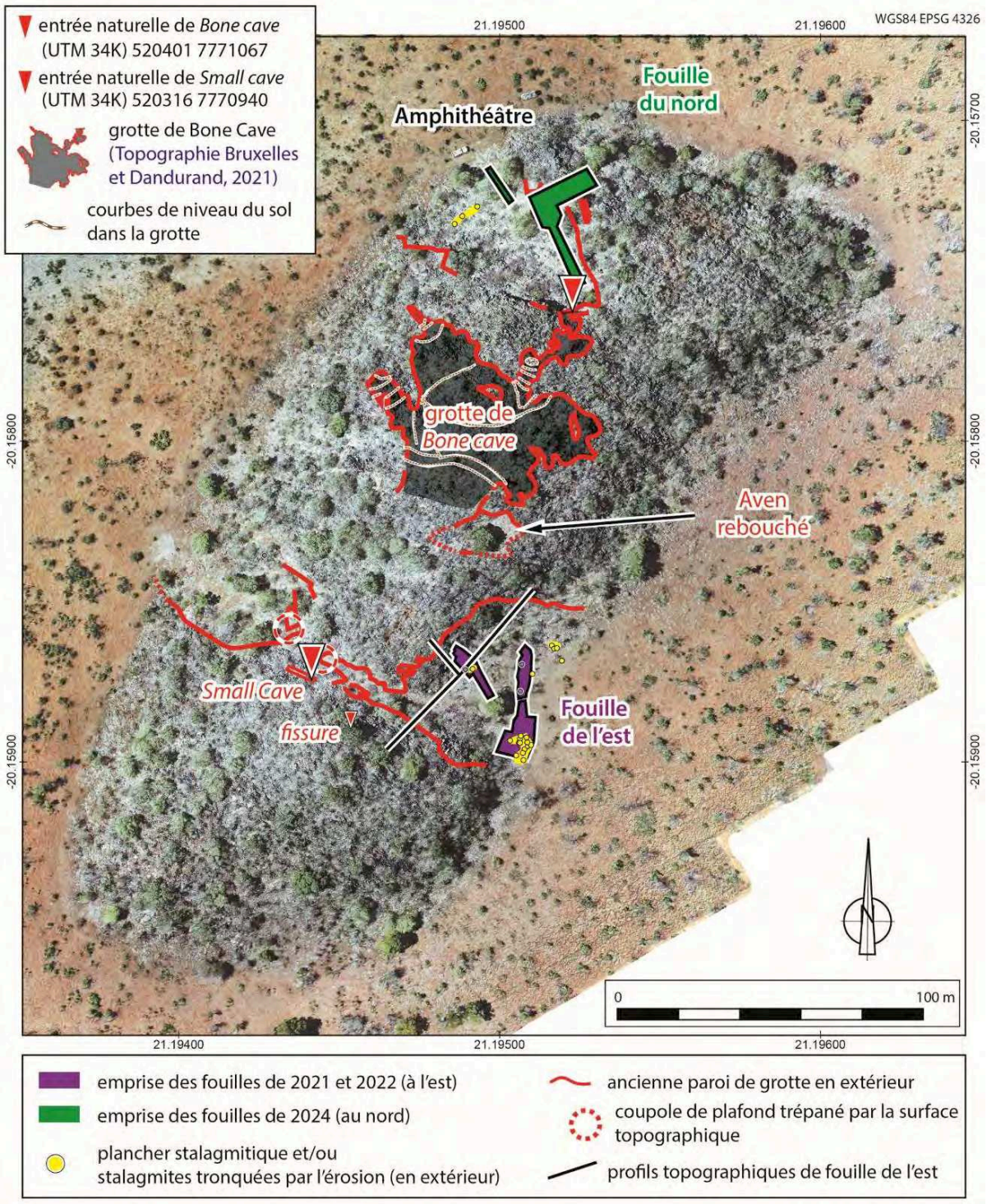


Figure 631 Cartographie synthétique de la colline de K2 à Koanaka.

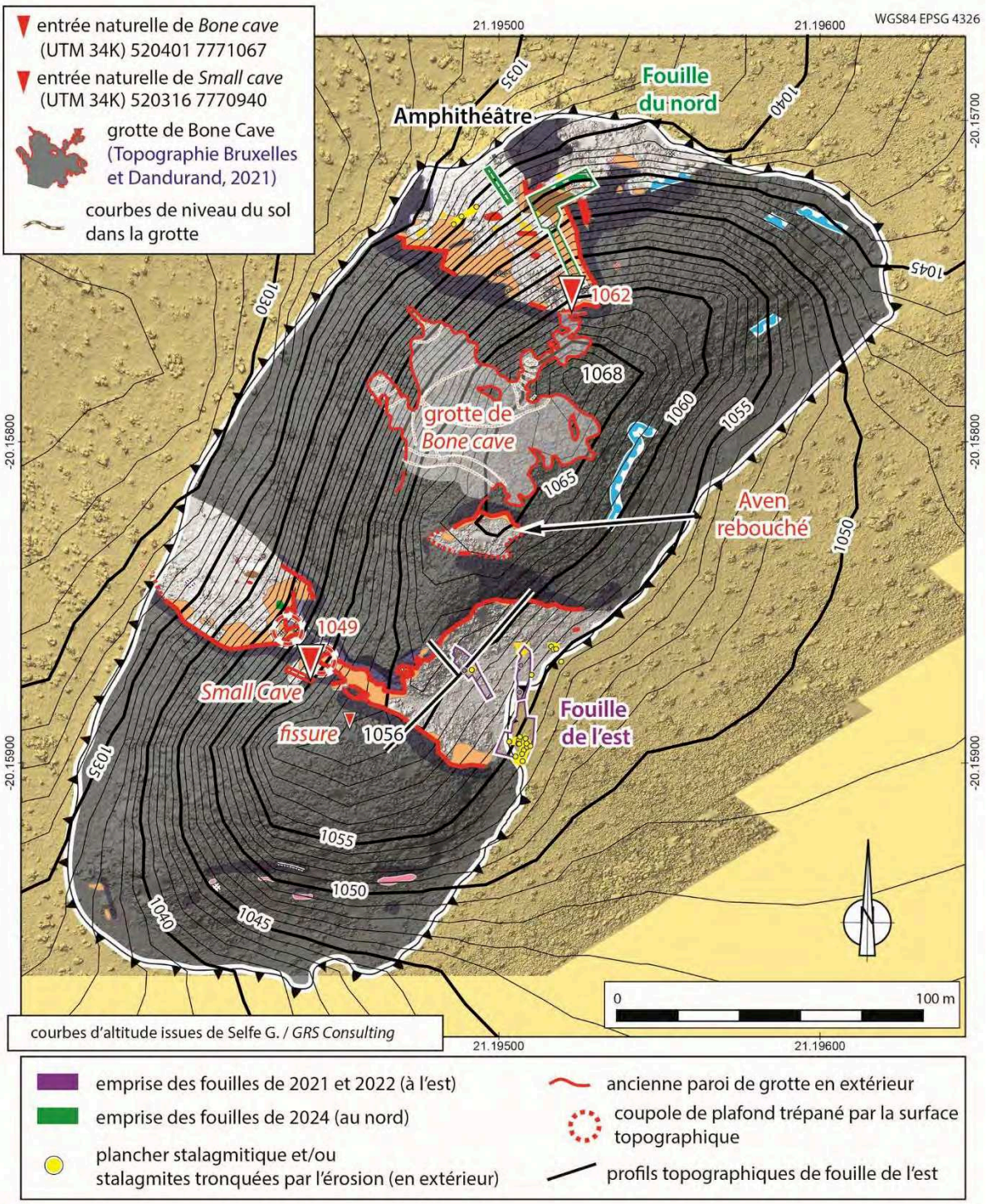


Figure 632 Cartographie de la colline.



Figure 633 Légende de la carte de la colline K2 de Koanaka.

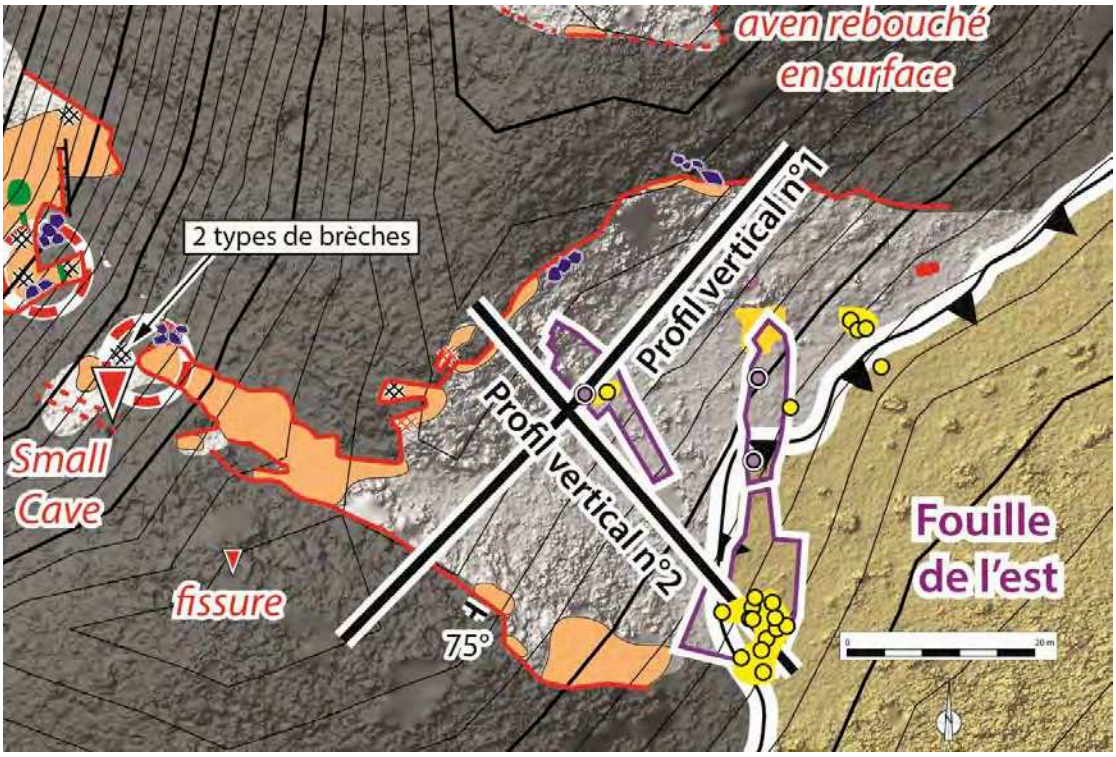


Figure 634 Plan de la fouille commencé en 2021.

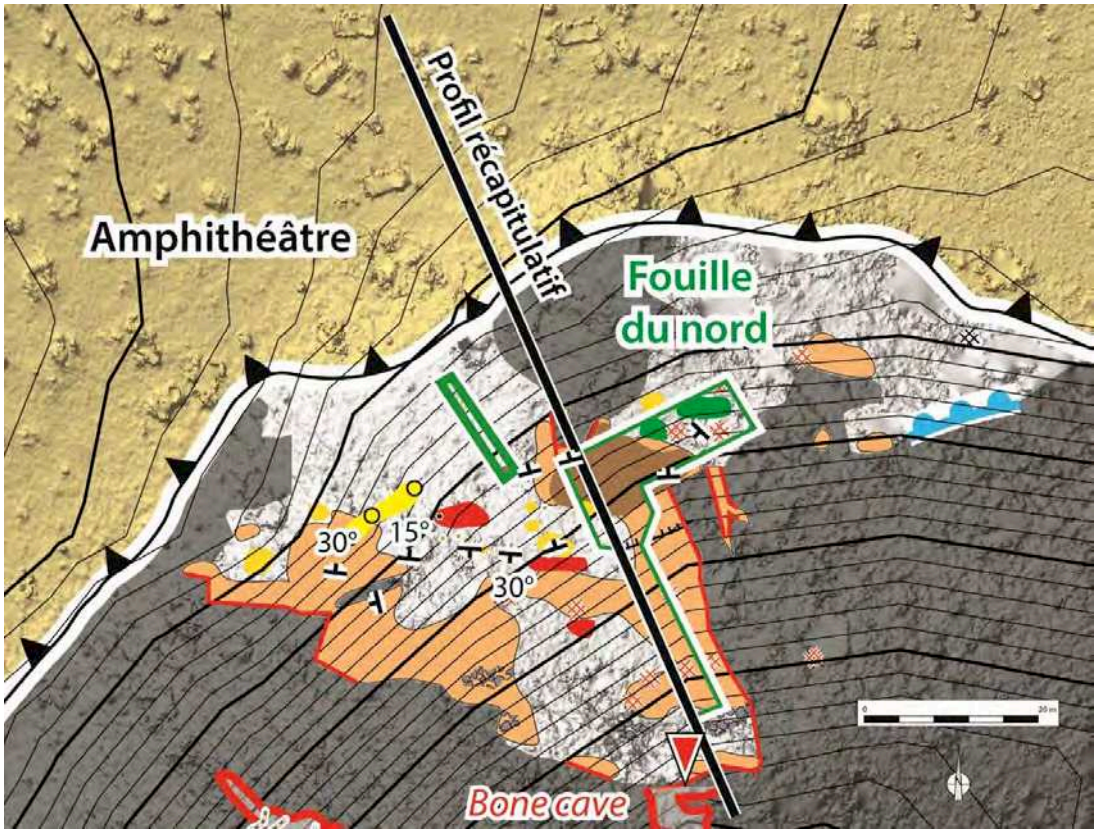


Figure 635 Plan de l'amphithéâtre et de la fouille commencée en 2024.

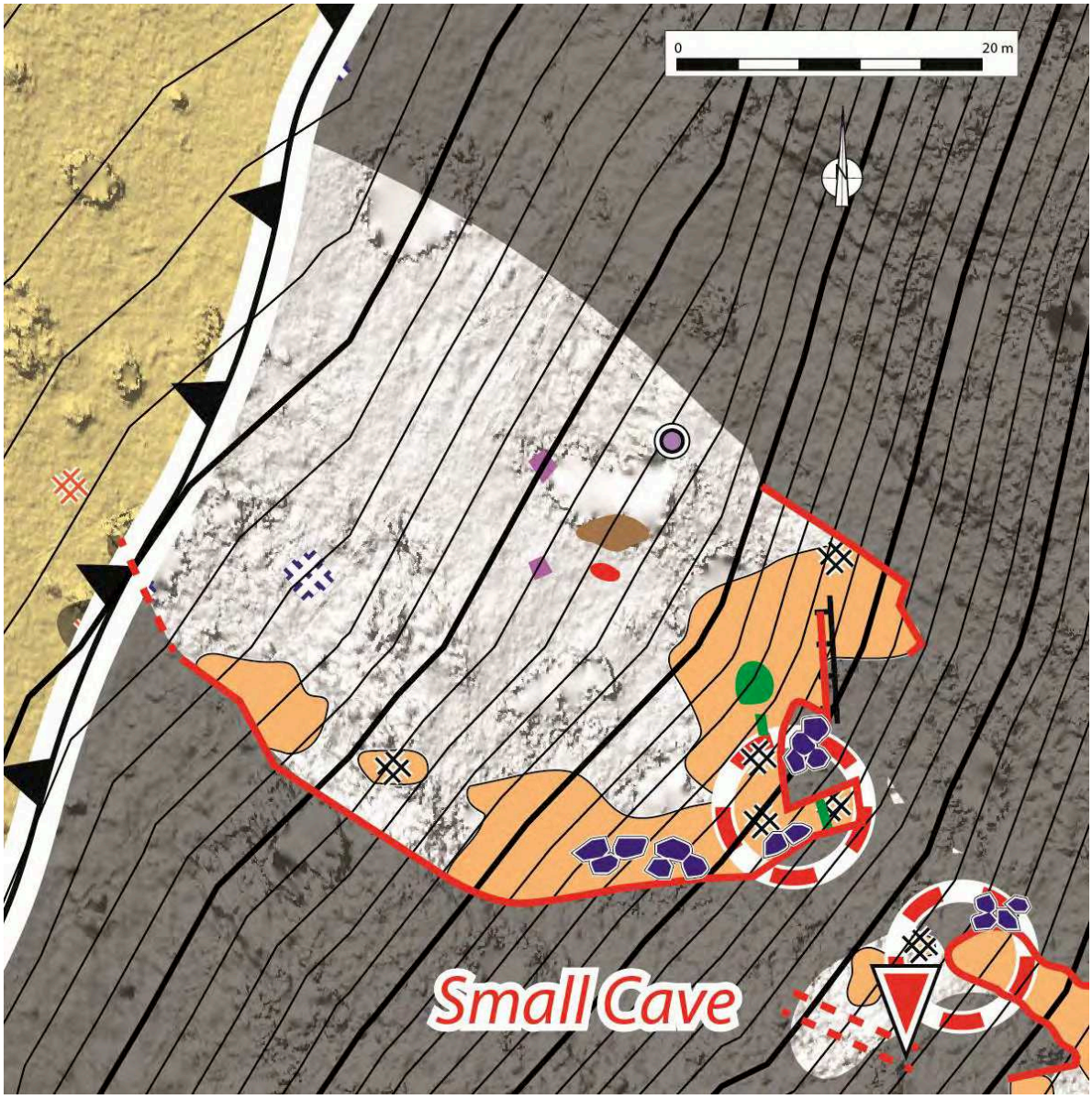


Figure 636 Carte du versant ouest.

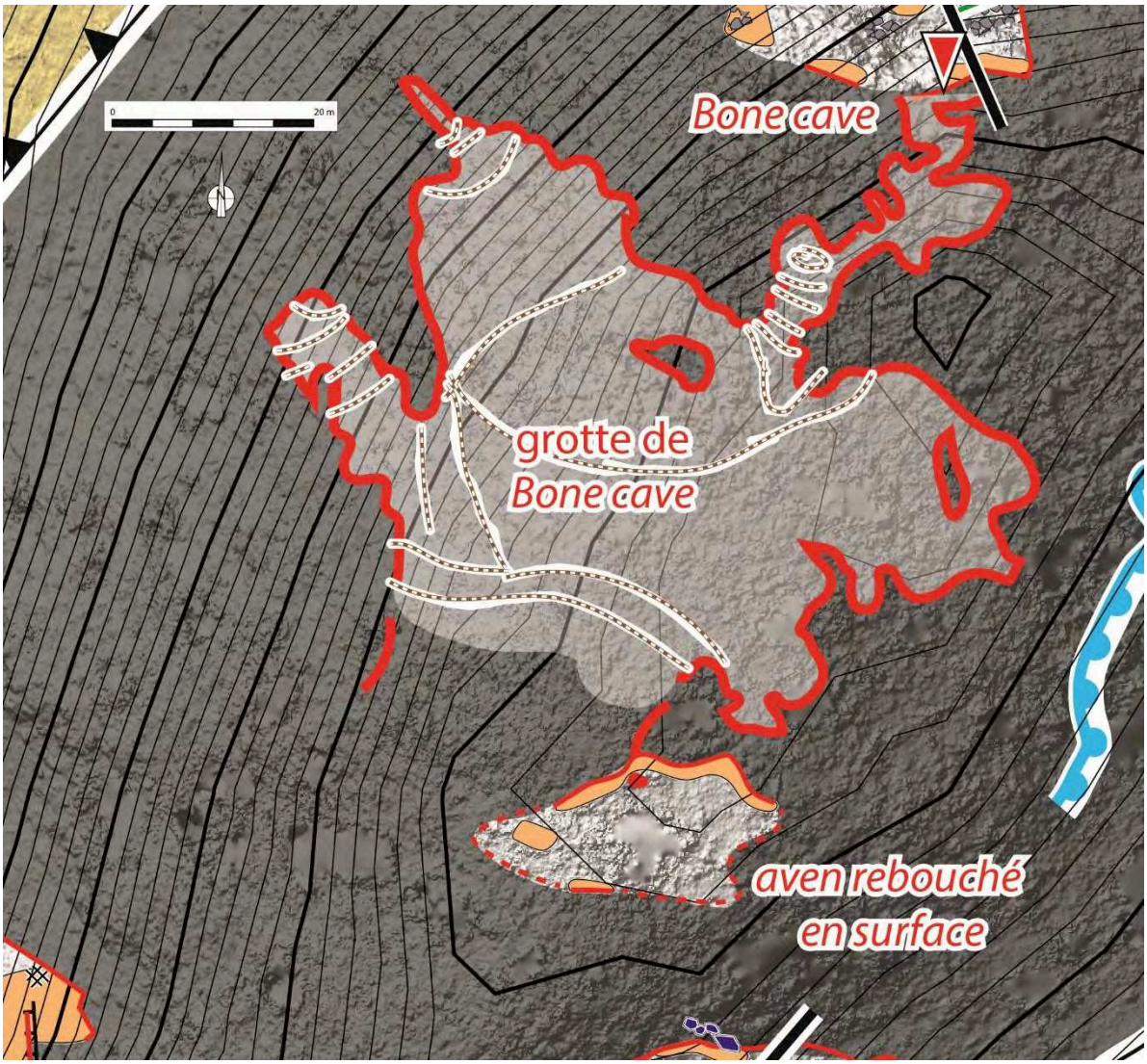


Figure 637 Carte de Bone Cave

7. Acquisitions photogrammétriques de la colline de K2 et des fouilles archéologiques

Nous avons réalisé une modélisation 3D de la colline K2 à Koanaka à l'aide de la photogrammétrie et du logiciel *Agisoft Metashape*. Laurent Bruxelles a réalisé des photographies par drone de la colline (Figure 638) . Elles nous ont servi à calculer un modèle 3D de la colline et d'en extraire un MNS, un modèle ombré, une hypsométrie et une orthophotographie. Cette dernière nous a servi de fond de cartes pour nos tablettes géoréférencées et pour nos futures minutes de terrain et nos cartes (Figure 631). Le MNS nous a permis de comparer les altitudes avec celles des MNT satellitaires et avec le relevé au GPS différentiel de Selfe / GRS Consulting (2005, 2013).

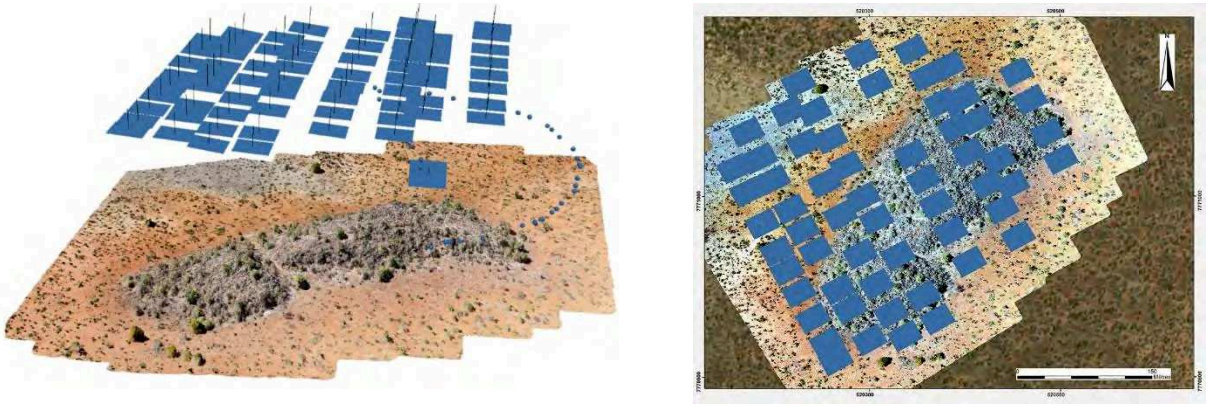


Figure 638 Localisation des photographies par drone de la colline K2.

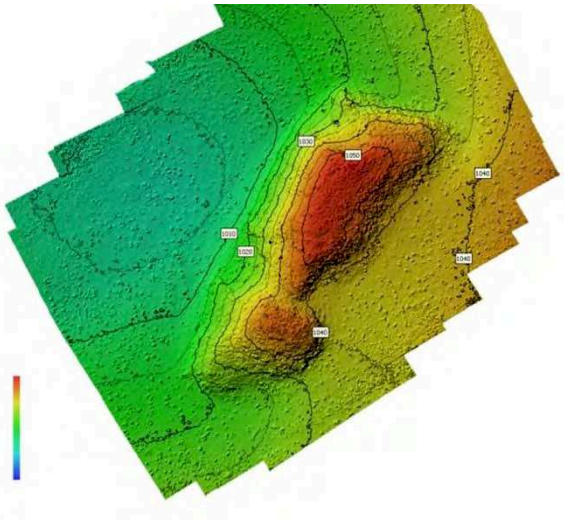


Figure 639 Modèle hypsométrique ombré de la colline K2 par photogrammétrie drone.



Figure 640 Modèle ombré de la colline K2 par photogrammétrie drone.

Nous avons également réalisé des relevés photogrammétriques par drone des fouilles, que nous avons effectuées, afin de pouvoir les cartographier et les recaler sur les orthophotographies des collines à l'aide de logiciels SIG (Figure 641). À défaut de disposer de points géodésiques (*trigonometric beacon*) sur le terrain, comme expliqué au Chapitre n°1 (p.48), nous avons recalé les orthophotographies issues du drone sur les images satellites.

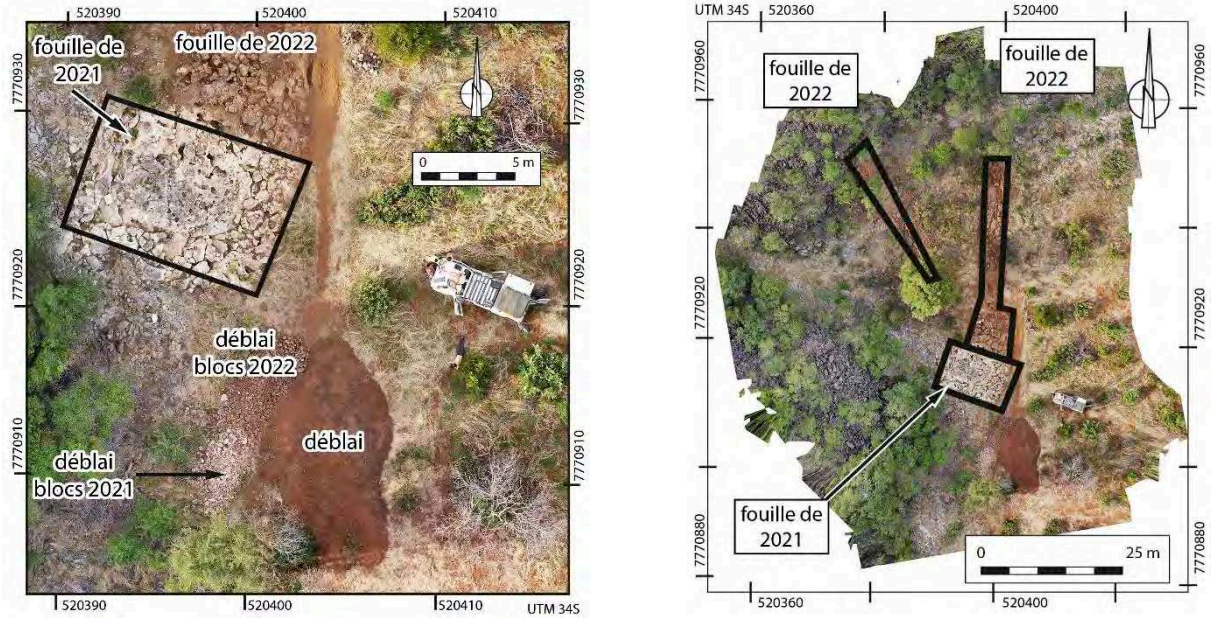


Figure 641 Orthophotographies géoréférencées des fouilles, à la fin de la mission de 2022, sur le versant est de la colline de K2 à Koanaka.

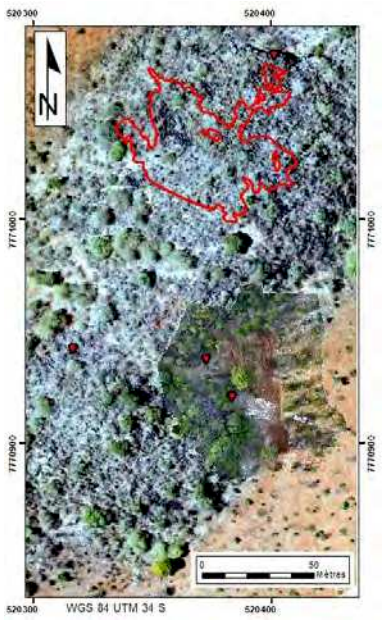


Figure 642 Calage de l'orthophotographie de la fouille sur l'orthophotographie de la colline.



Figure 643 Calculs photogrammétriques directement sur le terrain.

La réalisation du modèle 3D par photogrammétrie de la colline de K2 nous a permis de produire des illustrations (Figure 644), qui mettent en évidence la présence de dépôts karstiques formés à l'intérieur d'une grotte et aujourd'hui exposés à l'air libre.

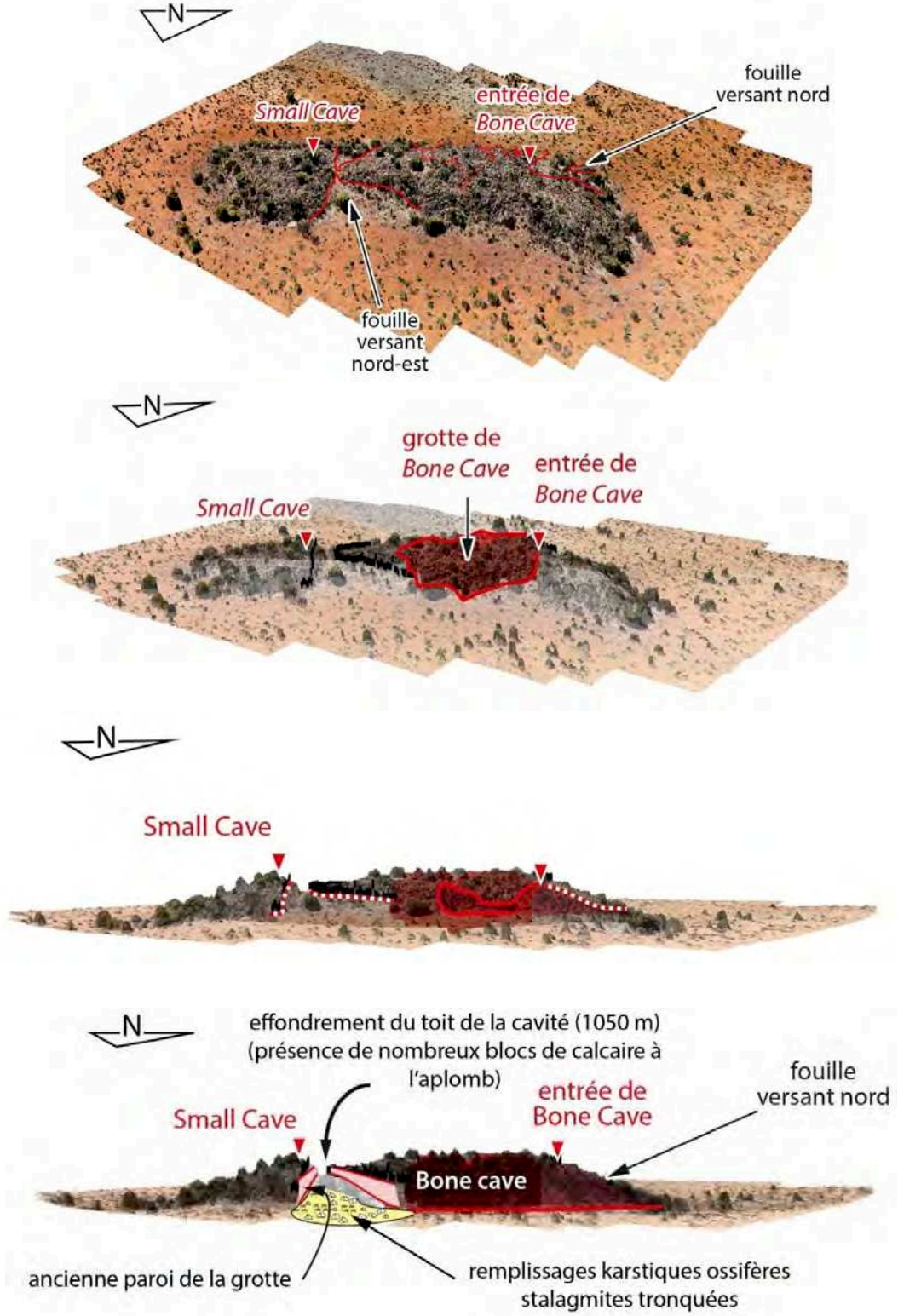


Figure 644 Vue en perspective de la colline K2 où se situe la grotte de Bone Cave et les fouilles correspondant aux parties de la grotte tronquées par la surface topographique.

8. Réalisation du relevé topographique de Bone Cave

Laurent Bruxelles et Grégory Dandurand ont effectué le levé topographique de la grotte de *Bone Cave* en 2021 (Figure 645). Celui-ci montre que le réseau se développe verticalement sur 40 m.

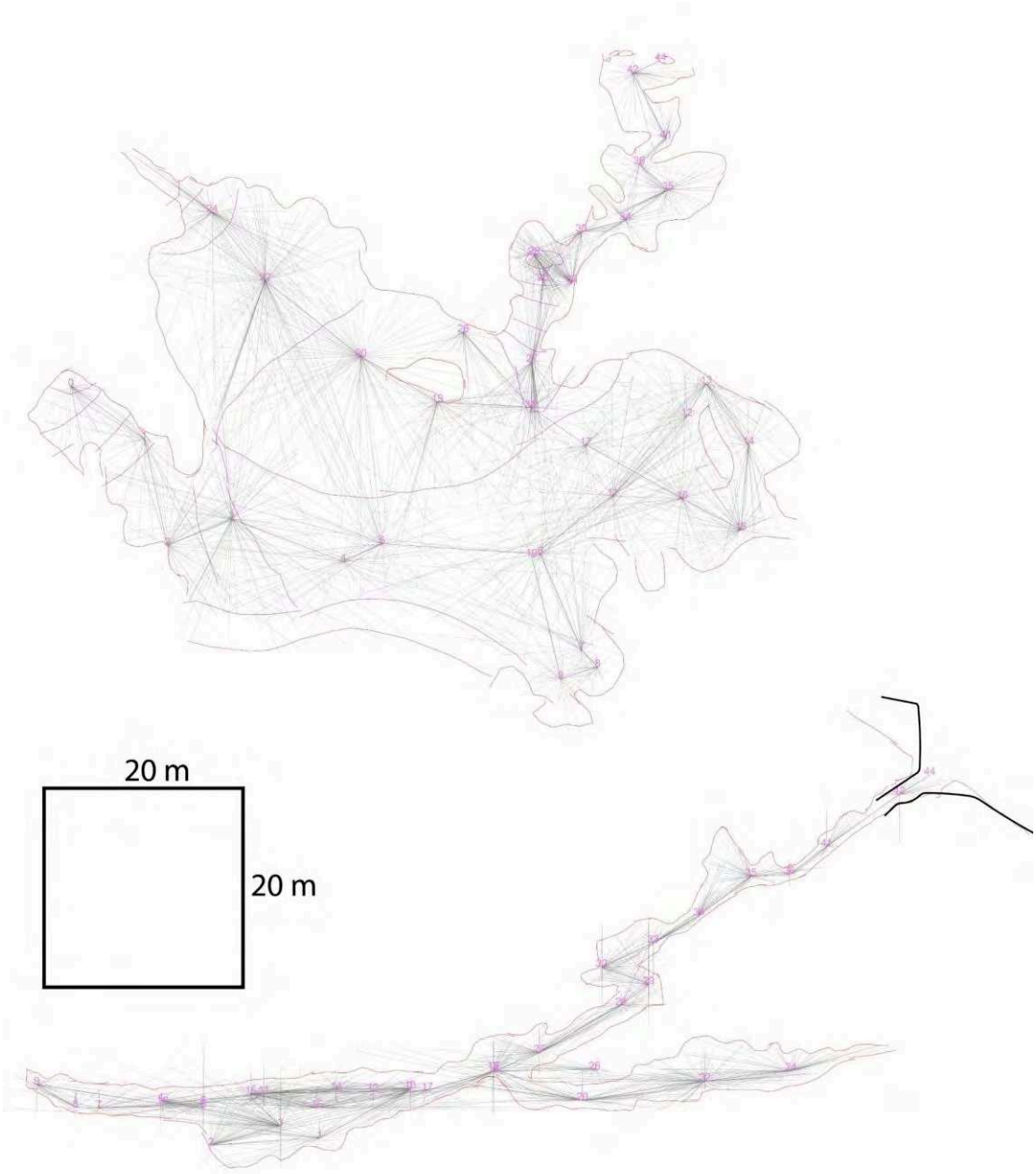


Figure 645 Relevés topographiques brutes en plan (en haut) et en coupe (en bas) (Source : Bruxelles L.).

9. Réalisation du scan 3D de la cavité de Bone Cave et du modèle 3D

Un relevé laser scanner terrestre, réalisé en 2023 par Kim Genuite et Grégory Dandurand (Genuite *et al.*, 2024), confirme que le réseau de *Bone Cave* se développe sur 40 m de dénivelé vertical (Figure 646). Rapporté à l'altitude du sommet de la colline (1068 m, MNT JAXA), les salles inférieures, subhorizontales, se situent ainsi aux environs de 1028 m (MNT JAXA).

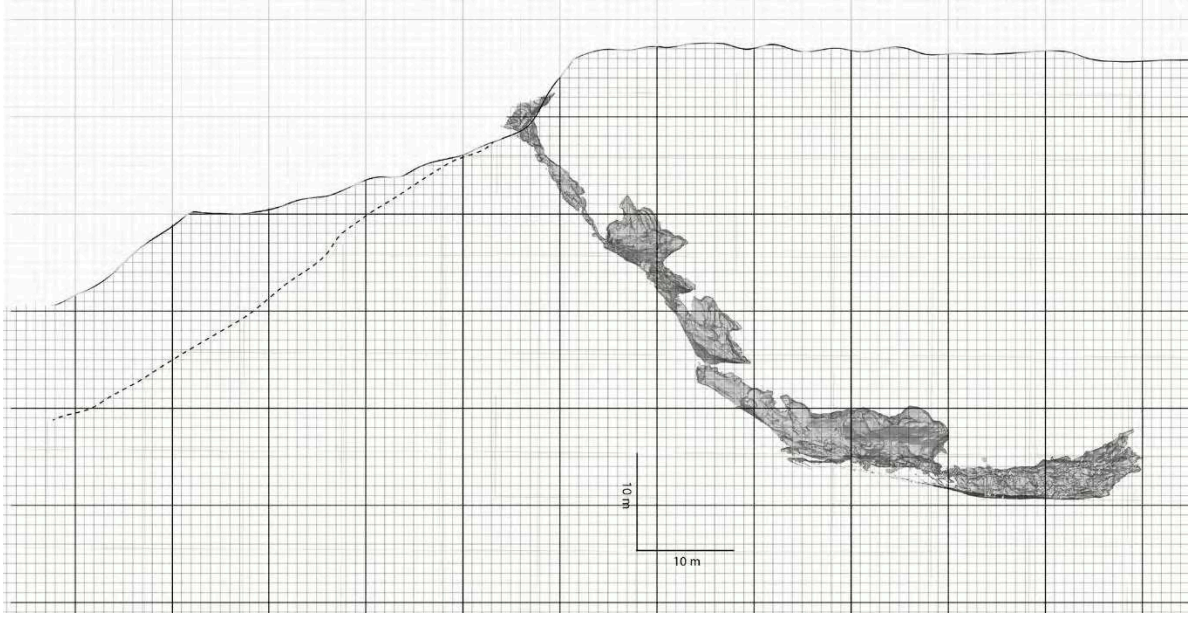


Figure 646 Profil vertical de Bone Cave issue de la modélisation 3D par scan laser terrestre.

Les deux profils verticaux de *Bone Cave* ont été comparés ci-dessous (Figure 647) afin de vérifier la profondeur du réseau et son étagement.

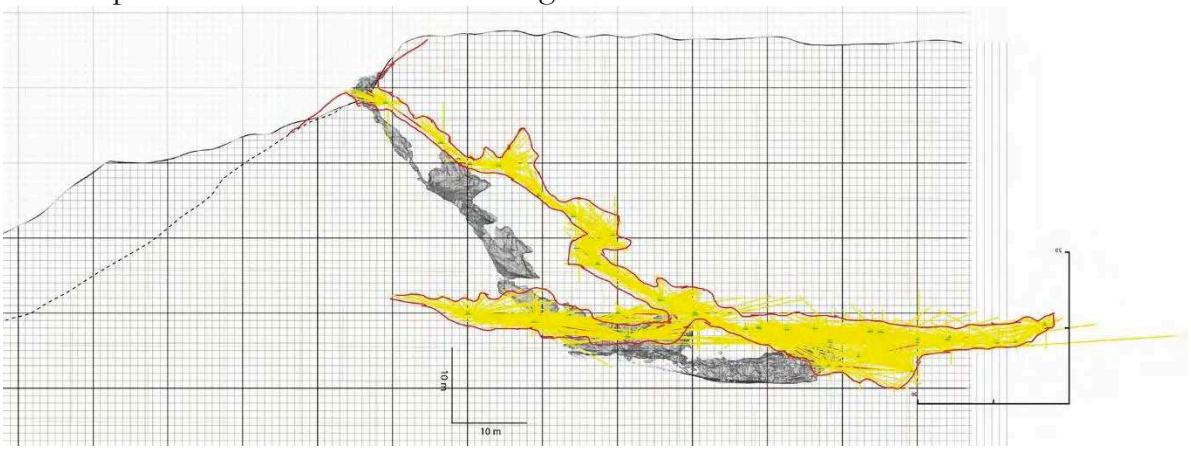


Figure 647 Comparaison des topographies de la grotte de Bone Cave (en jaune la topographie topodroid et en gris la topographie au scanner).

10. Cartographie sur le terrain des parties de cavités aujourd'hui à l'air libre, tronquées par les versants

À *Koanaka Hills*, dans la colline K2 se situe la grotte de *Bone Cave*. La formation du versant est de la colline a tronqué des anciennes parties de cette grotte qui se trouvent aujourd'hui à l'air libre. On trouve en extérieur des stalagmites, des remplissages karstiques fossilifères. Nous avons pu suivre et cartographier ces limites à partir de l'entrée actuelle de la grotte. Ces anciennes parois de grotte ont conservé d'anciens remplissages indurés et de couleur rouge (Figure 649 à Figure 653). Ces anciennes parois sont suivies sur plusieurs centaines de mètre comme le montre notre carte (Figure 631 p.631) et celle de Pickford (1990) (les contours noirs de la Figure 628 p.628).
Nous avons réussi à retrouver les anciennes voûtes de la cavité, ce qui montre que l'entièreté du volume de la grotte de *Bone cave* a été remplie de sédiments. Nous avons aussi identifié la présence des anciennes termitières au sein de ces sédiments karstiques.
Ce travail nous a permis de déterminer l'emprise de la grotte qui est indiquée en rouge sur les plans (Figure 644 et Figure 648, p.639) et sur les coupes stratigraphiques (Figure 655 à Figure 658).

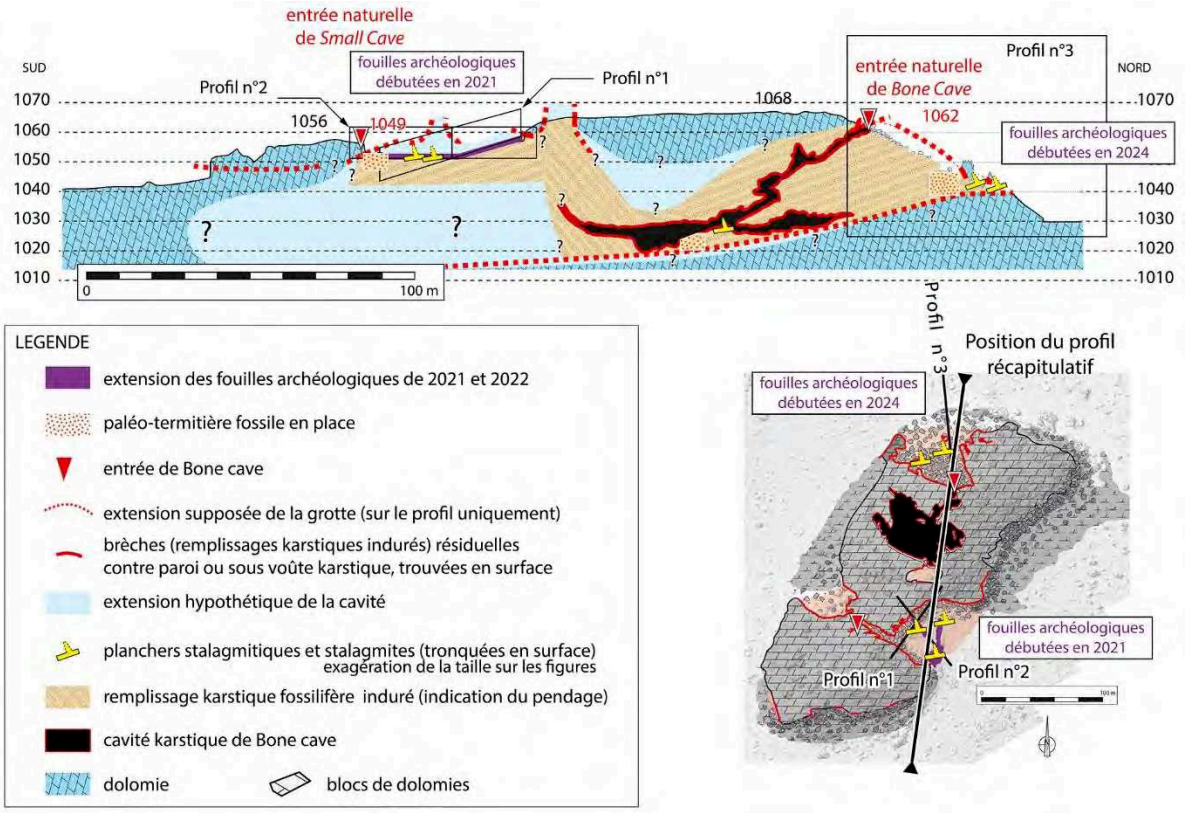


Figure 648 Profil morphokarstique et stratigraphique de la colline de K2 (Koanaka) et de la grotte de Bone Cave.

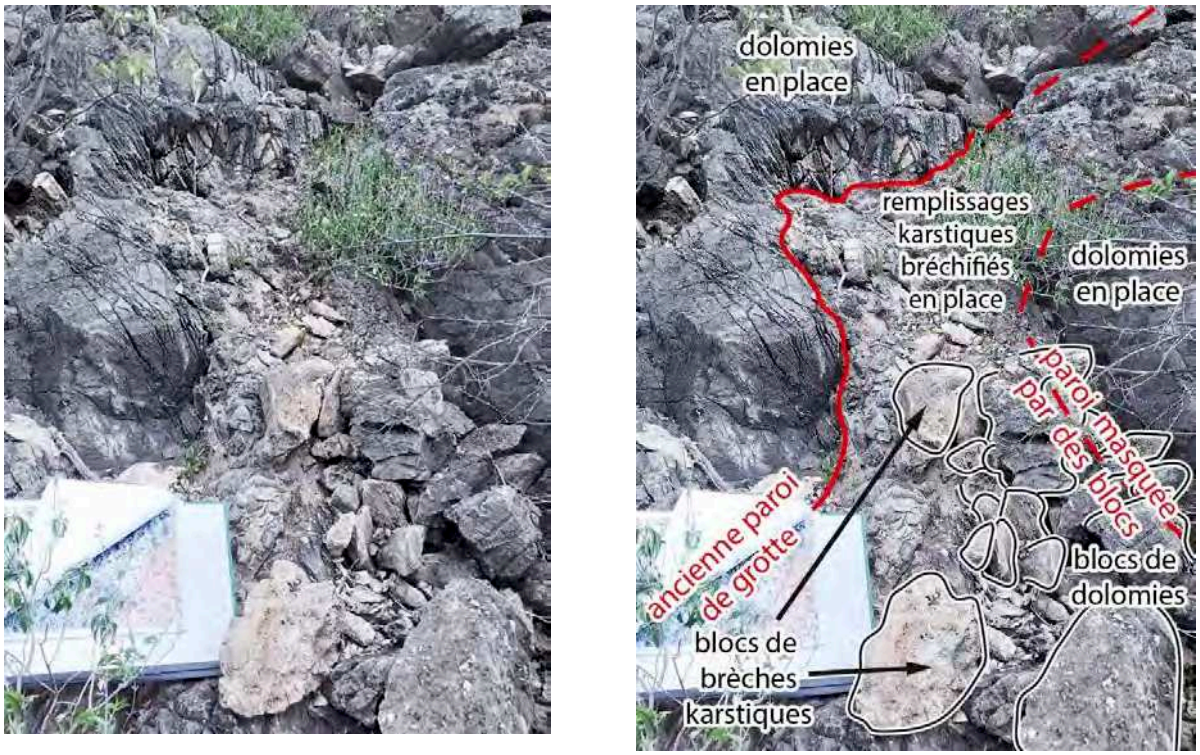


Figure 649 Galerie de grotte tronquée par le versant de la colline. Sur la gauche de la photographie, l'ancienne paroi est délimitée par le contact entre les remplissages karstiques et la paroi de la cavité creusée dans les dolomies. À droite, l'ancienne paroi est masquée par des blocs effondrés provenant de l'effondrement de la voûte de la grotte.

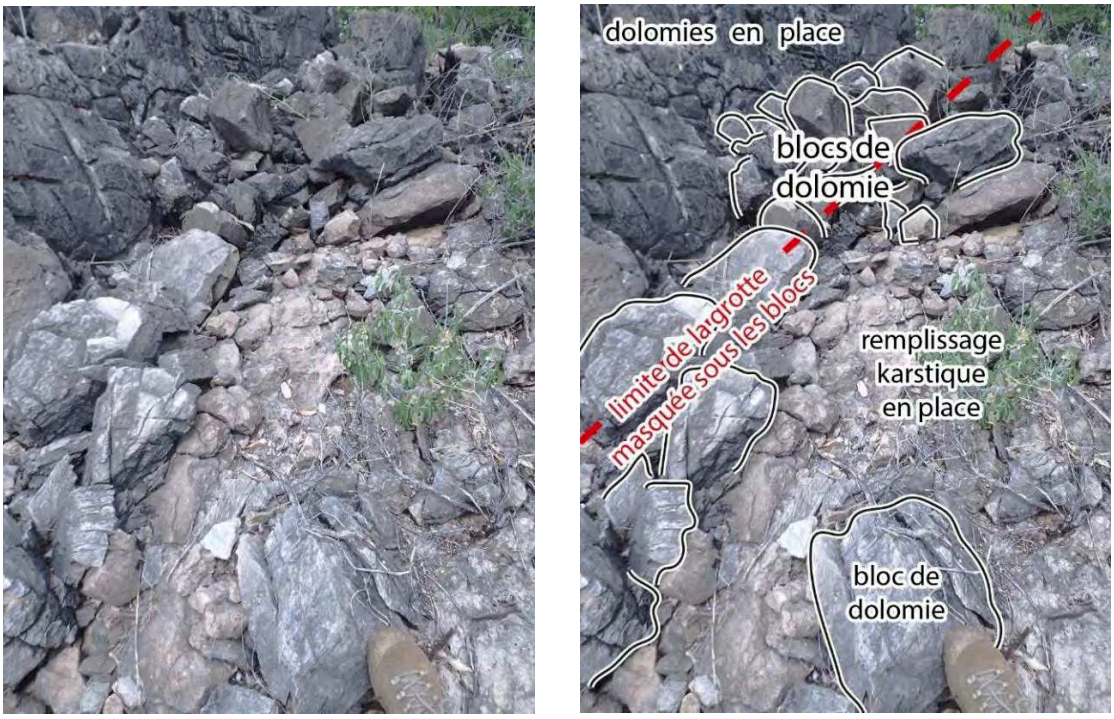


Figure 650 Ancienne paroi délimitée par des remplissages karstiques et la dolomie en place et masquée par des blocs de dolomies effondrées issues de la voûte de la grotte.



Figure 651 Ancienne paroi de grotte délimitée par des dolomies à "peau d'éléphant" et des remplissages karstiques. Entre les deux, on trouve un banc de quartz blanc.



Figure 652 Sur le versant nord de K1, pinacle dolomitique correspondant à la voûte de la grotte de Bone Cave et indiqué sur la Figure 657 (p.647) et sur le plan de Pickford (1990) (p.628).

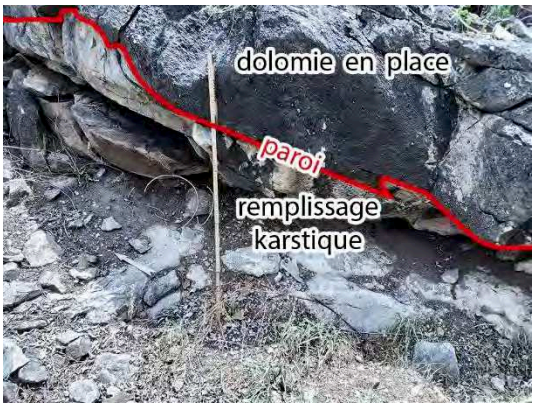


Figure 653 Limite d'une ancienne paroi de grotte indiquée par le contact entre les remplissages karstiques et la dolomie en place.

4.2.4.3.4. La fouille sur le versant sud-est de la colline K2 à Koanaka

Le versant à l'est de la colline K2 de Koanaka a très vite attiré notre attention, dès la première mission de 2021, par la présence de planchers stalagmitiques en place, plus exactement par la présence de stalagmites tronquées par l'érosion et exhumés des sables du Kalahari. Et aussi, par la présence de nombreux blocs de brèches mobiles, sub-en place, contenant des ossements. Nous avons rapidement ouvert une fouille de 10 x 7 m dans ce secteur.

Ce site, nommé « KOA S » n'était connue que pour des éclats de quartzites (Pickford, Mein et Senut, 1994, p.227) (p.595) alors que le versant nord de la colline K2, situé à plus de 200 m de là, était connu pour des dents de « cercopithécidés » pris dans des brèches (Pickford et Main, 1988 et Pickford, 1990 ; Pickford, Mein et Senut, 1994) sans plus de précision sur la localisation précise des brèches. C'est du haut de ce versant que s'ouvre l'entrée naturelle de *Bone Cave* (Pickford, 1990 ; Ritter et Mann, 1995 ; Williams *et al.*, 2012 ; Ellis, 2020 ; Pierce, 2020).

Sur le profil morphokarstique de la colline de K2 (Figure 648) on identifie la cavité de *Bone Cave* en noir (coupe topographique réalisée par Laurent Bruxelles et Grégory Dandurand en 2021 (p.640)) et dont l'entrée actuelle se situe au pied d'une corniche située presqu'au sommet du versant nord. C'est sur ce versant nord qu'ont débuté les nouvelles fouilles de 2024. Tandis que les fouilles débutées en 2021 se sont déroulées sur le versant est à 1050 m d'altitude et sont représentées par le trait violet. L'étude sur le terrain et les fouilles montrent que le versant nord est entièrement formé par des brèches karstiques, ce qui ne correspond pas au profil proposé par Pickford en 1990 (Figure 659 p.647).

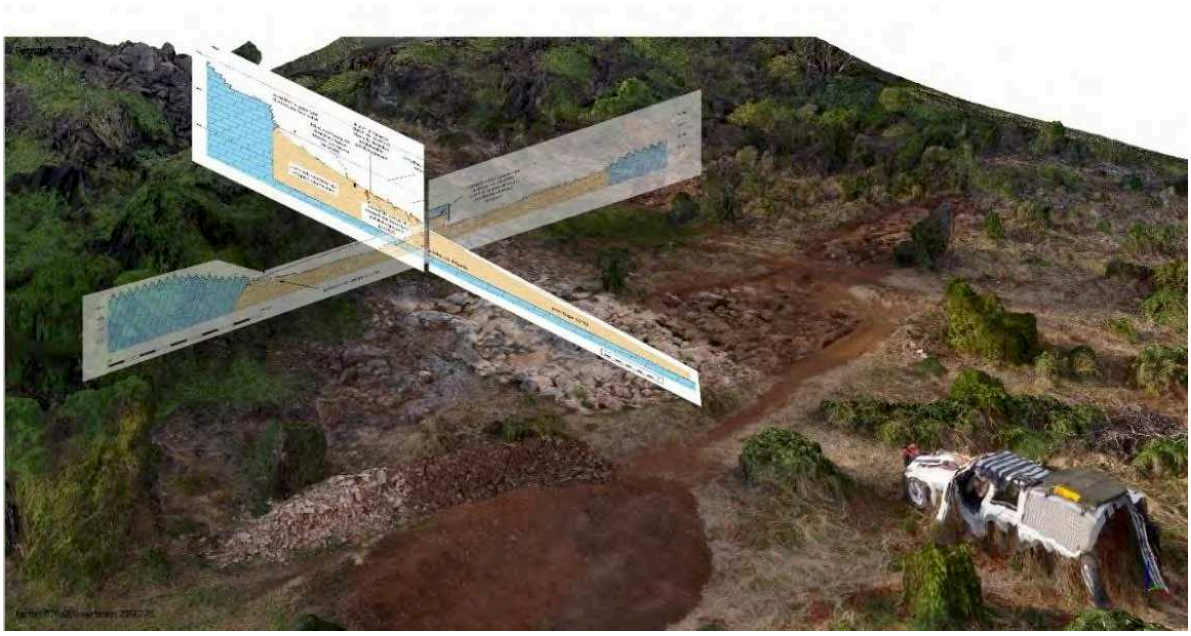


Figure 654 Localisation des profils n°1 et n°2 de la fouille sur versant est de la colline K2 à Koanaka.

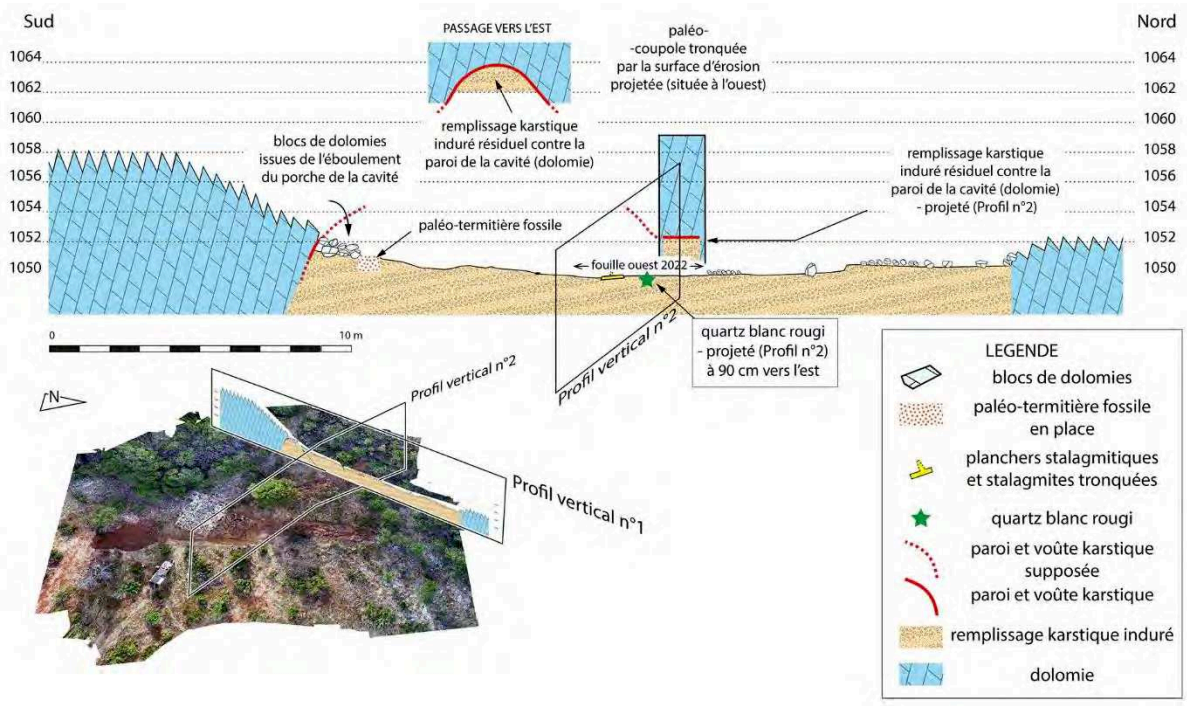


Figure 655 Profil vertical n°1 de la fouille archéologique sur le versant est de la colline K2, à Koanaka, débutée en 2021.

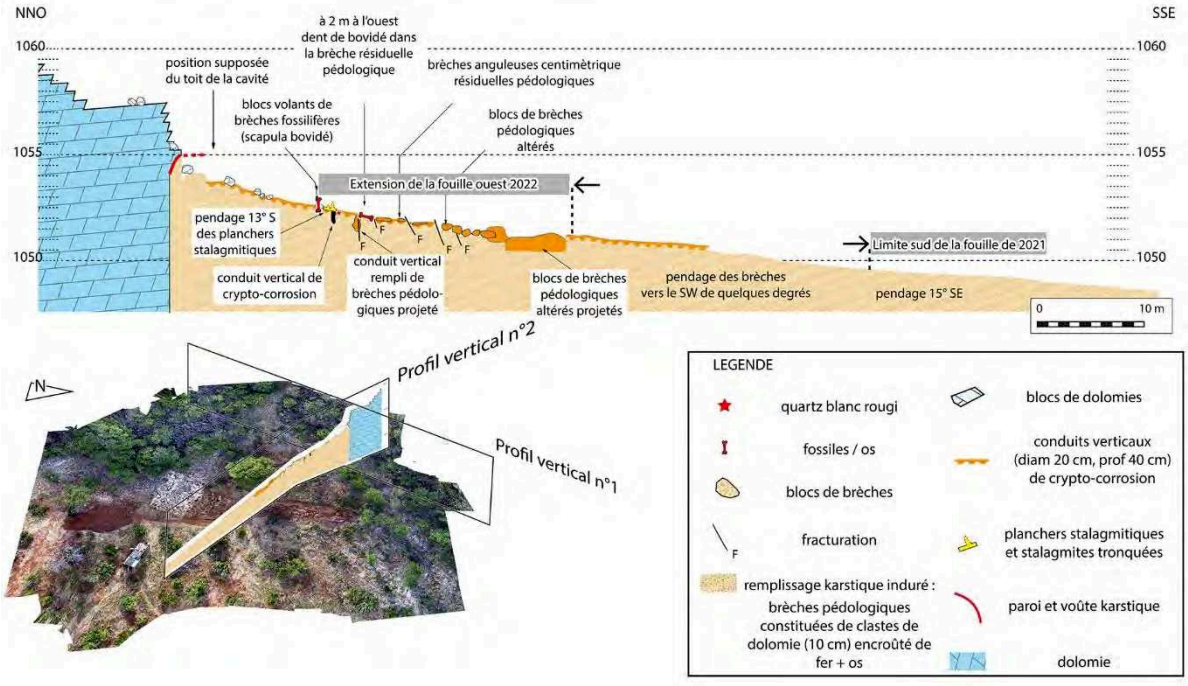


Figure 656 Profil vertical n°2 de la fouille archéologique sur le versant est de la colline K2, à Koanaka, débutée en 2021.

4.2.4.3.5. La fouille sur le versant nord de K2

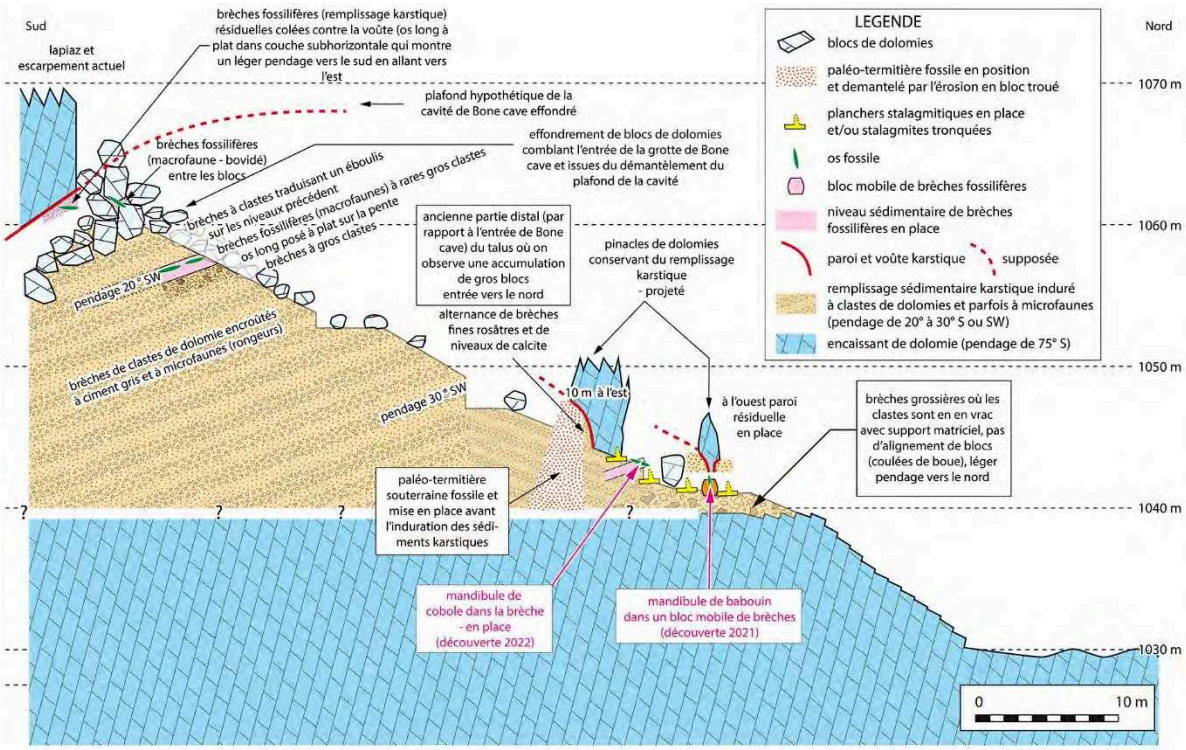


Figure 657 Coupe stratigraphique du versant nord de la colline K2 (Bone Cave) en 2022.

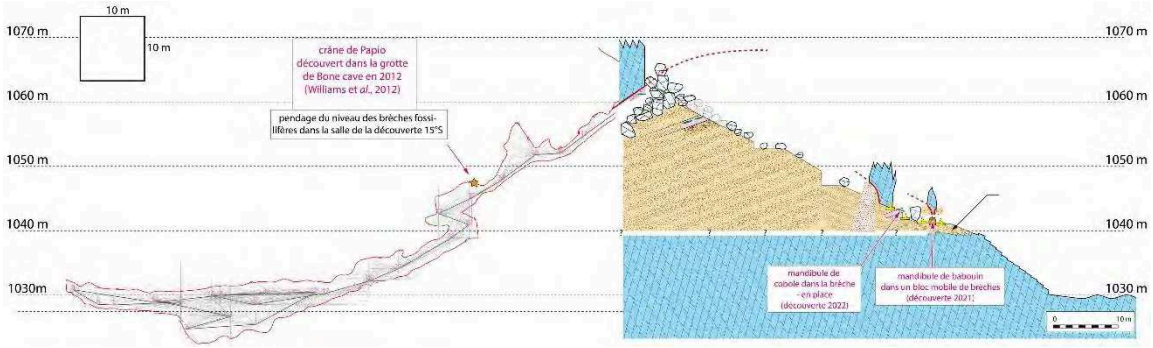


Figure 658 Profil topographique de la cavité de Bone Cave et du versant nord en 2022.

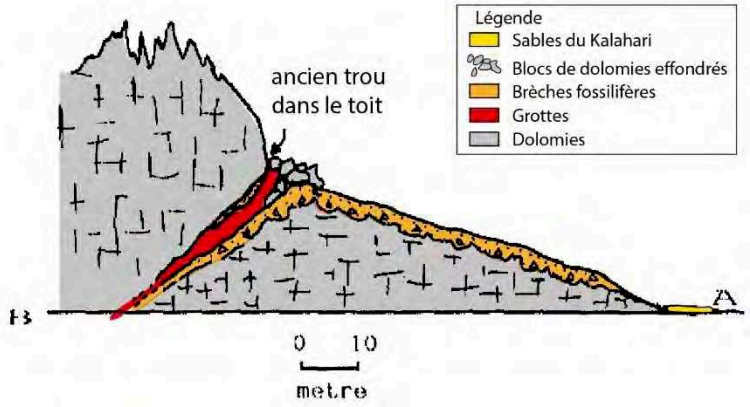


Figure 659 Profil topographique de la cavité de Bone Cave et du versant nord selon Pickford (1990). (Source : Pickford, 1990, fig.7, modifié).

Remarquons que nous ne représentons pas la puissance des dépôts de brèches fossilifères de la même manière que Pickford (1990) (Figure 659).

4.2.4.3.6. La grotte Small cave de Koanaka (K2)

L'entrée de la grotte de *Small Cave* est indiquée par Pickford (1990, Fig.6, p.13) (Figure 629 p.628) et nous a été indiquée par Ledimo Oatse et figure dans l'inventaire des cavités qu'il nous a fourni. Un soir, nous avons attendu le crépuscule pour observer d'éventuelles sorties de chauves-souris, afin de déterminer la taille de la cavité, mais nous n'avons pas vu beaucoup de chauve-souris. Une désobstruction entamée en 2024 a permis de progresser de quelques mètres dans le réseau (FFS, 2025) et devrait se poursuivre.

Latitude SUD	Longitude EST	Altitude (m)	Auteurs
20°09'31,47"	21°11'39,89"	1049 (MNT JAXA)	Ledimo Oatse

Tableau 26 Coordonnées de la grotte de Bone Cave sur K2 (Koanaka).

Nous avons déjà présenté ci-dessus les plans indiquant cette cavité (Figure 629 et Figure 630, p.628).

4.2.4.4. Le pan de K1

Afin de réduire notre consommation d'essence, lors des fouilles de la colline K2, nous bivouaquons parfois au pan de K1 pour y passer la nuit. Plusieurs forages nous permettent de connaitre l'épaisseur des formations dans ce secteur. Nous traiterons des données de forages plus loin (p.710 et p.801).



Figure 660 Paléopan et la colline de K1 à Koanaka (Source : Auriol P.)

4.2.4.5. La colline de K3 (!Ncumxee) et la grotte de Blue Cave

La colline K3 (lien Google Maps) de Koanaka Hills se situe à 12 km (à vol d'oiseau) de K2, elle porte aussi le nom de *!Ncumxee* (Williams *et al.*, 2012). On y trouve la grotte de *Blue cave* qui a été découverte en décembre 1993 par Ron Ritter.

Latitude SUD	Longitude EST	Auteurs
20°9'17,788"	21°4'49,13"	Chadelle Bastien
20°9'18,06"	21°4'49,69"	Ledimo Oatse (*App 6 Coordinates of Features Gcwihaba caves Project*)
~~20°9'17,5"~~	~~21°21'15,3"~~	Ledimo Oatse (*Existing caves coordinates*)

Tableau 27 Evolution de la précision des coordonnées de la grotte de Gcwihaba.

Les coordonnées indiquées par Ledimo sont fausses.



Figure 661 Colline K3 vue par drone (Source : Bruxelles L.).



Figure 662 Colline K3 qui émerge des sables du Kalahari (Source : Bruxelles L.).



Figure 663 Détail (Source : Bruxelles L.).



Figure 664 Vue du sommet de la colline K3 (Source : Crochet P.).



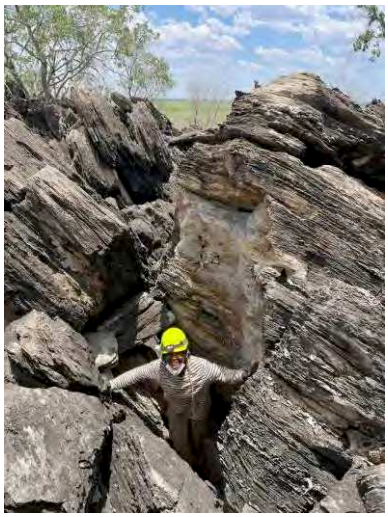


Figure 665 Entrée naturelle de Blue Cave sur K3 en 2024 (Source : Bruxelles L.).



Figure 666 Pendage des dolomies dans la grotte de Blue Cave (Source : Crochet P.).



Figure 667 Les dolomies bleues éponymes de la grotte de Blue Cave (K3 à Koanaka Hills)(Source : Crochet P.).

4.2.4.5.1. Blue Cave sur K3 à Koanaka.

L'entrée se situe à 1068 m d'altitude (MNT JAXA) et la profondeur du réseau est de 40 m. Pour atteindre l'entrée naturelle de *Blue Cave*, nous désescaladons depuis la mi-versant de la colline une faille orientée N60°-155°(S), par *« by-pass galery »*. C'est une grotte sur effondrement, organisée sur de grandes failles verticales, orientées N-S. Avec 1800 m de développement, c'était la grotte la plus grande du Botswana (Ritter, 1995) avant la découverte du réseau sur K1. Dans la grotte, nous n'observons pas d'arrivée de sédiments depuis la surface, il n'y a pas de brèches. On retrouve une fracture verticale, orientée NS, au niveau de la salle nommée *« Blue Room »*. On retrouve des sables rouges, des talus de guano mais pas de brèches. On observe des massifs de concrétions de calcite volumineux. Les blocs effondrés sont aussi recouverts de plusieurs mètres de calcite.

Latitude SUD	Longitude EST	Altitude (en m)	Source
20°09'17,788"	21°4'49,13"	1068 m (MNT JAXA)	Chadelle (GPS Garmin Map 64)

Tableau 28 Coordonnées de la grotte de Blue Cave sur K3 (Koanaka).

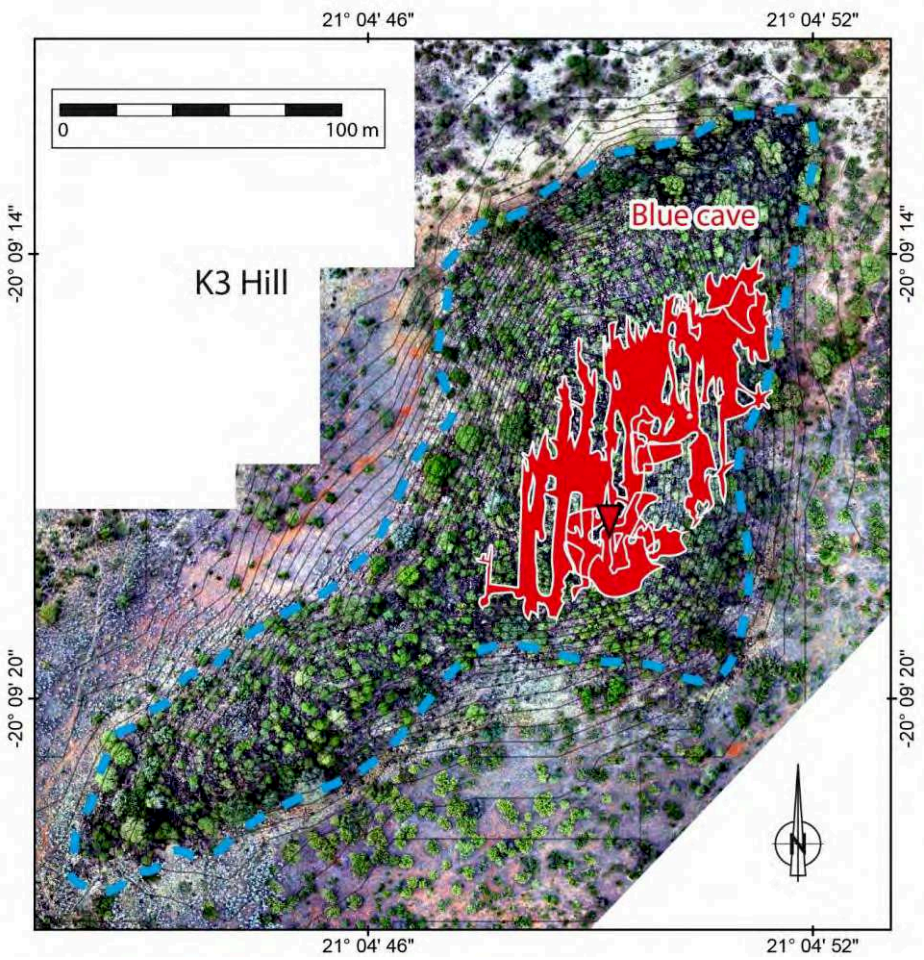


Figure 668 Réseau karstique fantômisé (en rouge) de la grotte de Blue Cave sur K3 (Koanaka).

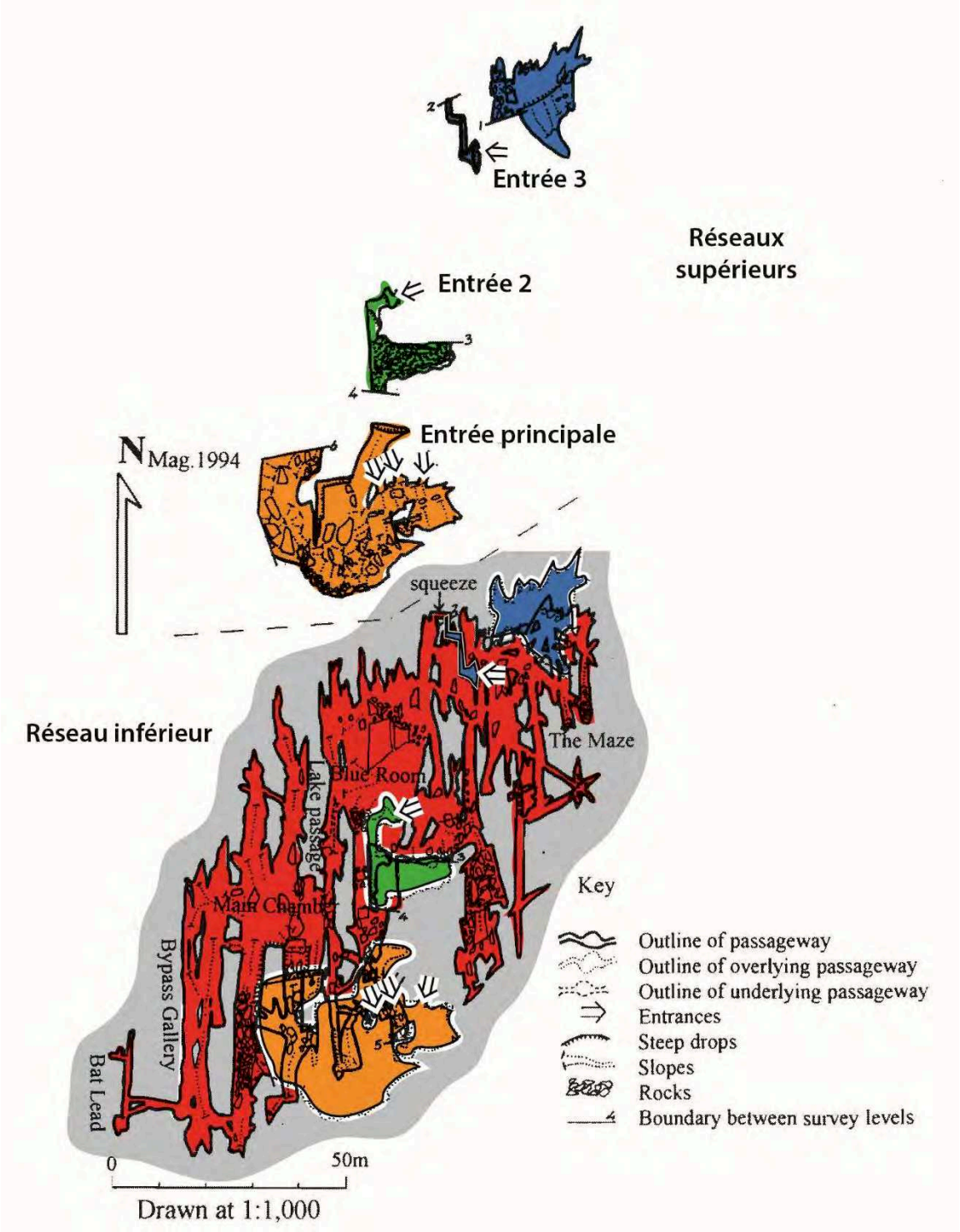


Figure 669 La topographie de Blue Cave montre que la grotte se développe sur plusieurs étages (Ritter et Mann, 1995, modifié).

4.2.4.5.2. Le pan de Seretse

Le forage Z14302 (lien BGI, lien Google Maps) alimentait un pan au sud-est du pan de Seretse, qui est au sud de Koanaka. Aujourd'hui, il n'est plus fonctionnel. Il indique que l'aquifère est présent à 98,4 m de profondeur. La tête du forage est située à 1024 m (MNT JAXA et SRTMV3) donc la nappe aquifère est présente à 925 m d'altitude, comme nous le verrons en annexe (p.708).

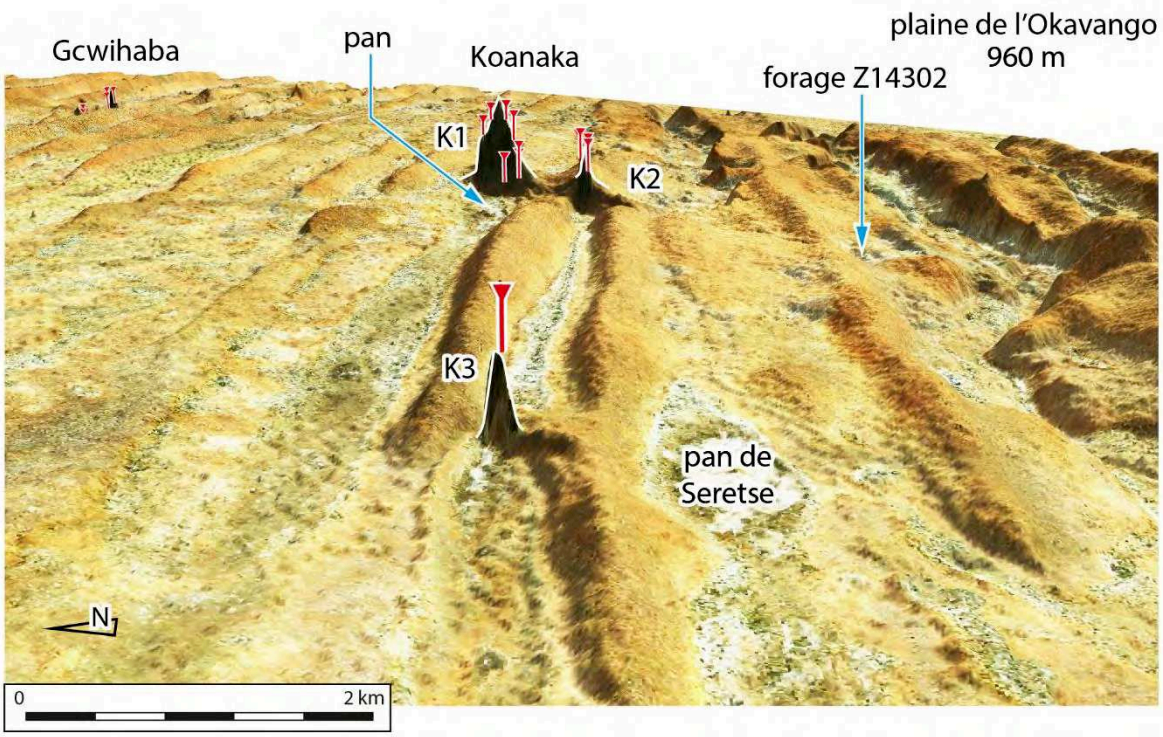


Figure 670 Image satellite des Koanaka Hills, en perspective(2.5D sous SIG) et exagérée 10 fois.

Nous proposons une analyse de ce paysage plus loin (Figure 837, Figure 838 et Figure 839 p.814).

4.2.5. Synthèse de l'étagement (altitude) des réseaux karstiques

Nous avons réalisé un profil morphokarstique montrant l'étagement des réseaux karstiques (en rouge sur la Figure 671) et un tableau récapitulatif des données d'altitudes des cavités (Tableau 29, p.659).

4.2.5.1. Réalisation d'un profil morphokarstique inédit

Après avoir harmonisé les différentes mesures d'altitudes obtenues par diverses techniques (MNTs satellitaires, mesures au GPS différentiels fournies par Selfe / GRS Consulting, mesures GPS sur le terrain) et les avoir synthétisées dans le Tableau 29 (p.659), nous pouvons proposer une synthèse de l'étagement des réseaux karstiques au nord-ouest du Botswana, entre les *Aha Hills*, *Gcwihaba Hills* et *Koanaka Hills*, le long d'un profil morphokarstique (Figure 671).

L'étagement des réseaux karstiques est essentiel pour caractériser les évènements géologiques à l'origine de la formation des grottes et pour reconstituer les paysages passés. Nous avons notamment décrit le rôle déterminant du niveau de base lors de la fantômisation et de la création des premiers cavernements (p.439 et Figure 160 p.218).

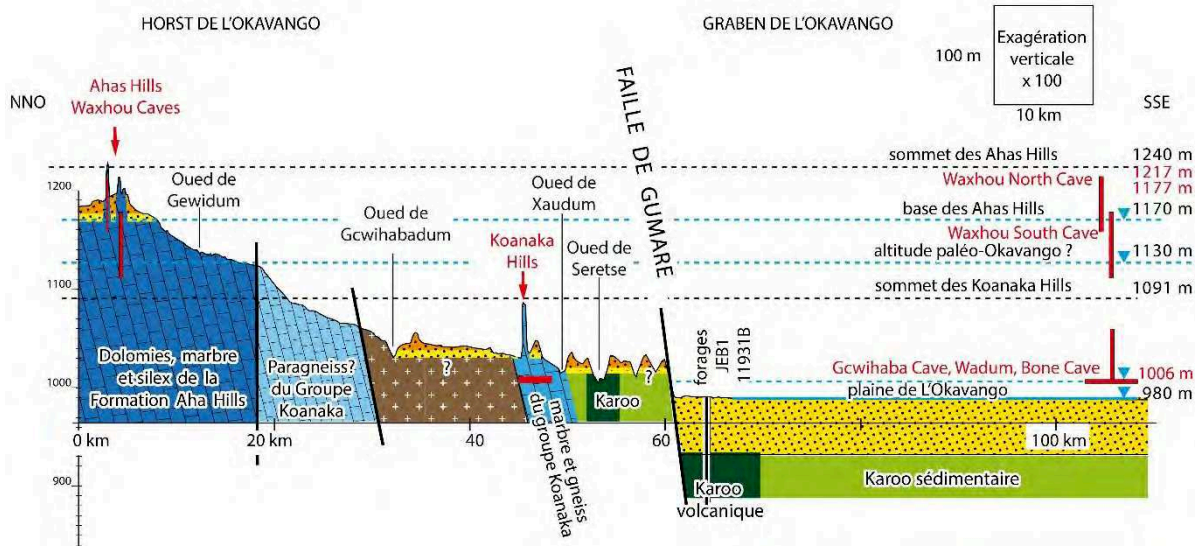


Figure 671 Profil morphokarstique synthétique des karsts du nord-ouest du Botswana (Voir les autres profils dans la synthèse page 877).

Nous reparlerons des profils morphokarstiques à la fin du chapitre (p.881).

4.2.5.1.1. Aha Hills

Dans les *Aha Hills*, les réseaux karstiques sont principalement verticaux, comme décrit plus haut (p.541). *Waxhou North* s'ouvre au milieu des sables, à 1177 m d'altitude (MNT JAXA), et présente un puits de 70 m de profondeur (p.543). *Waxhou South* s'ouvre à mi-versant d'une colline dolomitique, à 1217 m d'altitude (MNT JAXA), et présente un puits de plus de 50 m de profondeur (p.546).

4.2.5.1.2. Gcwihaba Hills

Comme décrit plus haut (p.554), plusieurs réseaux karstiques existent à *Gcwihaba Hills*.

1. En rive gauche de la vallée de Gewidum

À *Gcwihaba Hills* (Figure 672), en rive gauche de la vallée de Gewidum, la grotte de Wadum s'ouvre à 1011 m d'altitude (MNT JAXA) et présente un puits naturel de 9 m de profondeur. Le réseau karstique subhorizontal culmine autour de 1002 m (MNT JAXA), mais Ritter et Garner (1994) et Ritter et Mann (1995) décrivent plusieurs puits, dont *Hell Hole* qui atteint 25 m de profondeur.

La grotte de Motswantsweng, une extension de la grotte de Wadum, a été révélée par les relevés gravimétriques de *Poseidon Geophysics (*p.1363*)* et un forage mais nous ne connaissons pas l'altitude du réseau (Ellis, 2020, p.23).

Sur la colline C, les paléokarsts ossifères se situent vers 1006 m d'altitude (MNT JAXA). Selon ce même MNT JAXA, le sommet de la colline C culmine à 1013 m d'altitude. Les remplissages karstiques fossilifères sont situés entre 1007 et 1010 m d'altitude (MNT JAXA) d'après les courbes de niveaux issues du relevé topographique au GPS différentiel de Selfe / GRS Consulting (2013, Fig. 3, p.8), comme l'illustre notre carte (Figure 577 p.586).
Pickford (1990, p.1) indiquait, à partir de mesures réalisées au niveau à bulles, que ces niveaux correspondaient à la même altitude que les brèches ossifères du versant ouest de la grotte de Gcwihaba, décrites p.566 et indiquées sur la Figure 1289 (p.1331). ce qui ne semble pas être le cas, nous les mesurons autour de 1026 m d'altitude (MNT JAXA), soit 20 m plus haut.
La doline, large de 230 m de diamètre pour une profondeur de 10 m, que nous avons explorée (p.591), à 6 km au nord-est de Gcwihaba, se situe à 1005 m d'altitude (MNT JAXA). Une seconde doline au sud-est et située à 1000 m d'altitude. Ces altitudes correspondent à l'étagement des réseaux du secteur.

2. En rive droite de la vallée de Gewidum

À *Gcwihaba Hills*, en rive droite, les galeries de la grotte de Gcwihaba se situent vers 1006 m'altitude. La profondeur maximale est de 25 m écrit Cooke (1975) et est validé par le modèle 3D réalisé par Kim Genuite (Genuite *et al.,* 2024). L'horizontalité du réseau est biaisée par les tas de guanos et d'insectes (Wayland, 1944) et les remplissages mais elle est horizontale pour Cooke et Baillieul (1974). Cooke (1975) identifie deux anciens niveaux de galerie dans la grotte, un, le plus profond, correspond au fond de vallée actuel et le second 12 mètres au-dessus.

La grotte de Dimapo est située autour de 995 m (MNT JAXA). L'altitude de la tête du forage est de 1030 m (MTNT JAXA), le tube de forage descend jusqu'à 35 m de profondeur (Ellis, 2020, p.12). Nous avons déjà commenté cette carte (Figure 538 p.558).

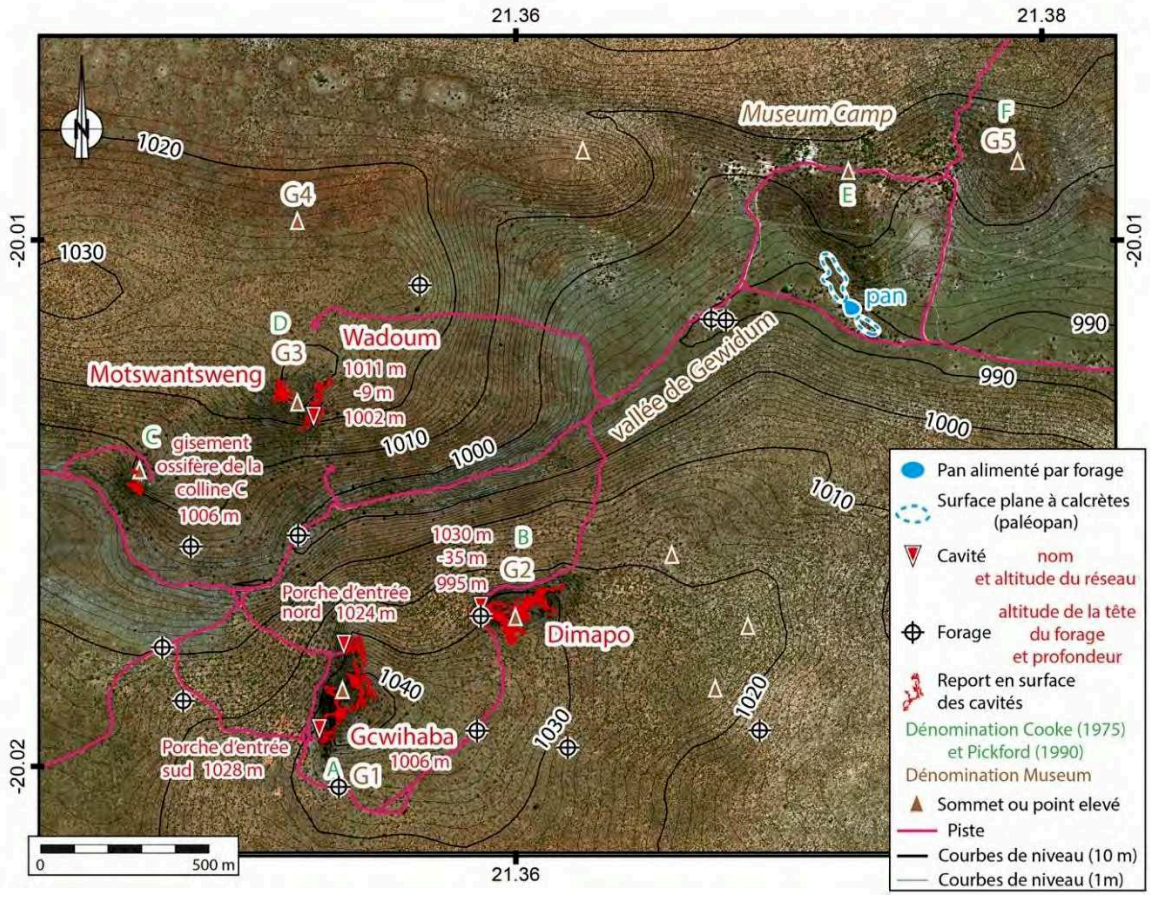


Figure 672 Collines karstifiées de Gcwihaba et image satellite. Nous avons localisé la position du profil topographique de la page 654. (Version géologie p.614).

4.2.5.1.3. Koanaka Hills

Comme décrit plus haut (p.594) il existe plusieurs réseaux karstiques à *Koanaka Hills*.

1. Colline K1

Gecko Chamber, Nqumtshaa Cave* et *Diviner's Cave

Le relevé topographique du réseau karstique de la colline de K1 fournit par Cardoso *et al.* (2021, Fig.4, p.97) montre un étagement autour de 1030 m (MNT JAXA) (en bleu ciel sur la Figure 673).

La tête du forage d'entrée est mesurée à 1070 m d'altitude (MNT JAXA). Ellis (2020, p.18) indique que le forage d'entrée de *Diviner's Cave* mesure 41m de profondeur auquel il faut ajouter 3 m de descente dans le vide avant de toucher le sol, ce qui indique que l'altitude du sol de *Diviner's Cave* est de 1027m.

Mongongo Cave

Le tube mesure 42 m de profondeur (Ellis, 2020) et débouche dans la cavité de Mongongo, dont la hauteur sous plafond atteint au maximum de 7 m (Ellis, 2020, p.21). L'étagement du réseau karstique est situé donc aux environs de 1013 m d'altitude (MNT JAXA).

Fossil Cave

L'altitude de l'entrée du forage étant de 1073 m (mesurée sur le MNT JAXA à l'aide des logiciels SIG. Le forage qui permet de pénétrer la cavité est profond de 42 m et la première salle est environ 2 m d'hauteur en moyenne (Ellis, 2020, p.40). Nous pouvons donc estimer que l'étagement du réseau se situe à 1029 m d'altitude (MNT JAXA).

La fouille archéologique débutée en 2023 et située au sud de la colline K1

L'altitude de la fouille de la grotte recoupée par le versant sud de la colline de K1, est de 1047 m (MNT JAXA) et l'altitude des calcrètes corrodées (ou bien ce qui pourrait être un aven) est de 1037 m (MNT JAXA).

Résumé

Ces données permettent d'envisager l'étagement entre 1027 et 1047 m d'altitude. Nous recherchons alors des ouvertures de grottes autour de ces altitudes autour de la colline. Nous avons pu représenter ces courbes d'altitude grâce au logiciel SIG (Chapitre n°1 p.82).

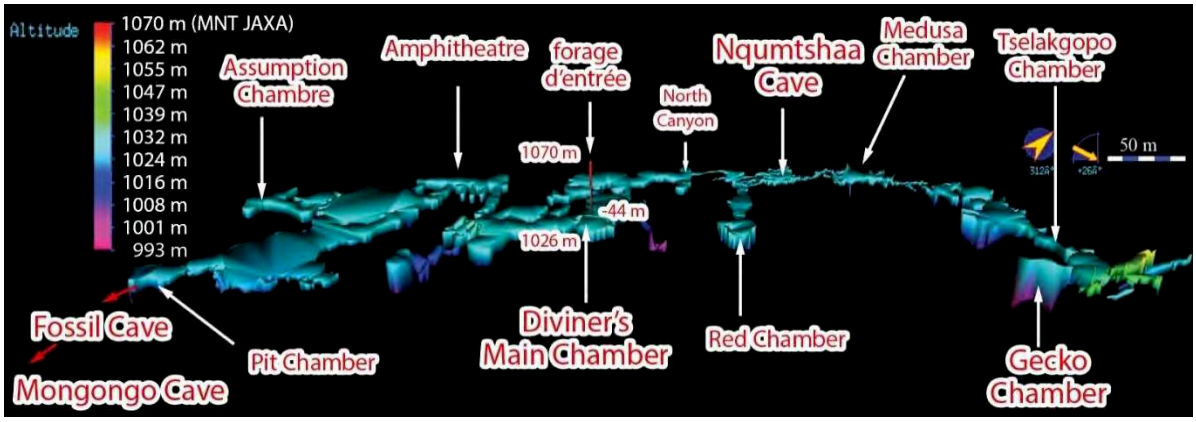


Figure 673 Relevé topographique d'une partie du réseau karstique de K1 (il manque Fossil Cave et Mongongo Cave), avec les altitudes (Source : Cardoso et al., 2021, Fig.4, p.97).

2. Colline K2

Nous avons compilé dans les SIG différents documents topographiques de la colline K2 que ce soit concernant la grotte de *Bone Cave* ou bien les relevés des fouilles archéologiques que nous avons réalisés. Listons ces documents :

- levé topographique des collines de K1 et K2 par Selfe G. / *GRS Consulting* réalisé au GPS différentiel de 2006 (Figure 1305 p.1350) ;
- relevé topographique de la grotte de *Bone Cave* par Bruxelles L. et Dandurand G. sous Topodroid et avec un distancemètre laser, de 2021 (Figure 645 p.640) ;
- modèle 3D de *Bone Cave* réalisé par Genuite K. et dont Dandurand G. a aidé au levé sur le terrain en 2023 (Figure 646 p.641) ;
- le traitement du MNT JAXA par calcul de courbes de niveau, réalisation d'un modèle ombré et de carte de pentes ;
- relevés topographiques des fouilles réalisés en 2022 (Figure 648 à Figure 658, p.642).

Cette synthèse indique que l'étagement des réseaux se situe :

- vers 1020 m altitude (MNT JAXA) pour les salles inférieures de la grotte de *Bone Cave* ;
- vers 1050 m (MNT JAXA) indiqué par la fouille du versant est ;
- le versant nord est constitué principalement de brèches karstiques de 1040 m d'altitude (MNT JAXA) jusqu'à l'entrée de la grotte à 1062 m.

3. Colline K3

Sur la colline de K3, la grotte s'ouvre à la même altitude que celle de *Bone Cave* sur K2 (1068 m MNT JAXA). L'étagement du réseau karstique se situe au-dessus de 1028 m la profondeur estimée du réseau.

4.2.5.2. Tableau de synthèse de l'étagement vertical (altitude) des réseaux karstiques dans le nord-ouest du Botswana

Nom de la grotte	Altitude de l'entrée naturelle ou de la tête du forage (m JAXA)	Altitude d'après le levé par GPS différentiel du GRS Consulting	Hauteur du tube du forage / profondeur (m)	Étagement des galeries (en m JAXA)	Diamètre (cm) du forage	Source
Waxhou North	1177		-70 m	<1107?		(p.543)
Waxhou South	1217		-56 m	<1161?		(p.546)
Wadoum Cave	1014		-9 m (aven non tubé)	1005		
Paléokarst de la colline C	1006			1006		
Gcwihaba Cave (North Entrance)	1024					
Gcwihaba Cave (South Entrance)	1028					
Aven du versant ouest de Gcwihaba	1026					
Dimapo Cave	1030		-35	995	60	Ellis (2020, p.34)
Doline	1005			<1005		(p.591)
Gecko Chamber	1057	1082	-15	1043	60	Ellis (2020, p.38, p.76)
Fossil Cave	1073	1097	-42 + 2m de hauteur de la cavité	1029	60	Ellis (2020, p.40)
Diviner's Cave	1070	1088	-44	1026	100	Ellis (2020, p.18, p.22, p.41)
Mongongo Cave	1067	1084	-42 + 7 m hauteur de la salle	1013	100	Ellis (2020, p.46)
Aven à l'ouest de K1	1037	1052		1037		
Fouille au sud de K1	1042	1060		1042		
Bone Cave	1068			1020		Genuite *et al.*, 2024
Small Cave	1039			1039		
Fouille de l'est K2				1035		
Fouille du nord K2				1025 à 1047		
Blue Cave K3	1068		-40 m	>1028		(p.651)

Tableau 29 de l'étagement des réseaux karstiques (en m JAXA) à partir de l'altitude des entrées de grottes, des forages et de la profondeur des forages.

Comparaison des réseaux karstiques de la colline K1 et de la colline K2

Les différences de dimensions entre les réseaux karstiques de la colline K1 (*Gecko Chamber, Diviner's* Cave, Fossil Cave, Mongongo Cave) et de la colline K2 (*Bone Cave* ainsi que les parties de grottes effondrées et/ou recoupées par les versants topographiques) sont illustrées ci-dessous (Figure 674).

La continuité du réseau karstique de la colline de K1 permet d'envisager la présence d'autres réseaux karstiques sur la colline de K2, notamment au sud.

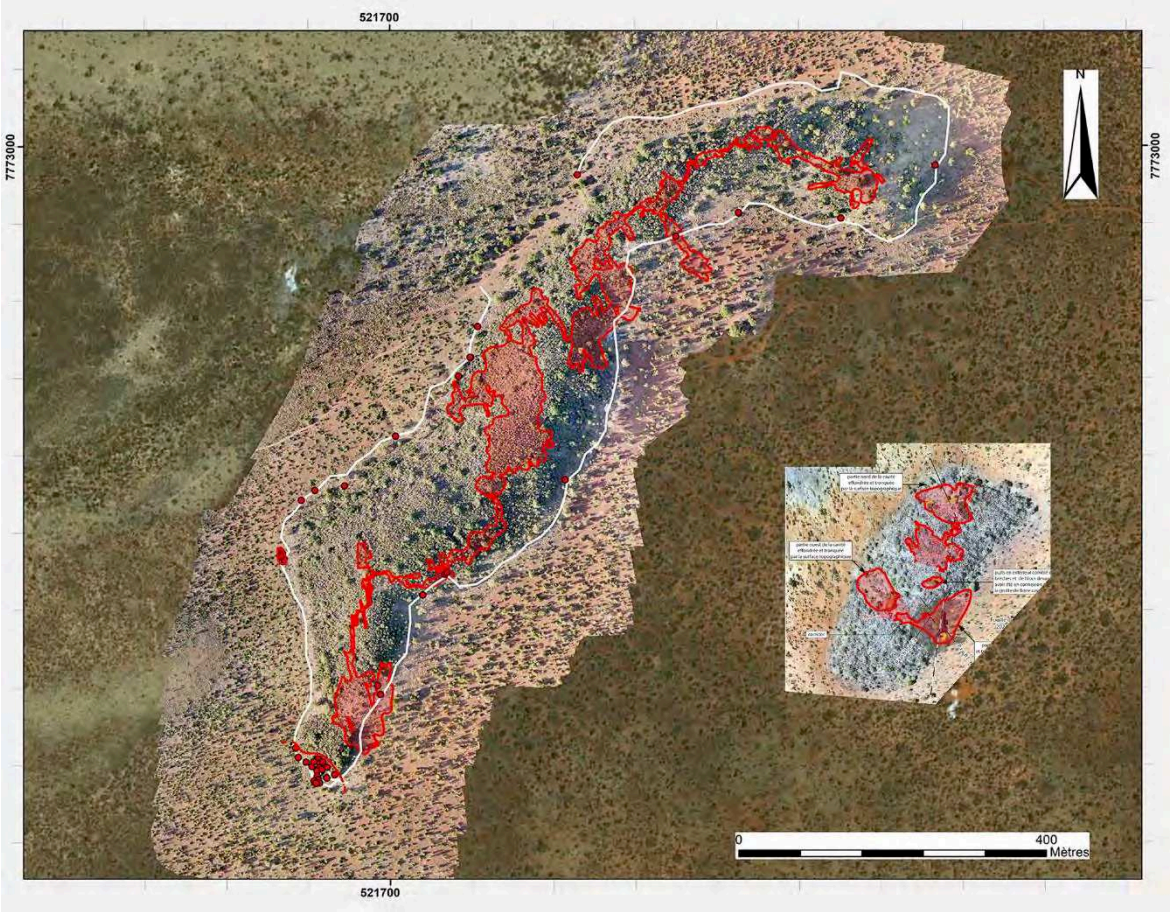


Figure 674 Différence de dimensions des réseaux karstiques de la colline K1 et de la colline K2

4.3. SYNTHESE DES DONNEES GEOLOGIQUES : PROSPECTIONS GEOPHYSIQUES, VALIDEES PAR DES FORAGES

Il existe peu de données géologiques dans cette région du nord-ouest *(Ngamiland)* du Botswana. Il n'y a pas de cartes géologiques détaillées. Les seules disponibles sont des cartes d'interprétation géophysiques dont il existe une synthèse datée de 2022 à l'échelle 1/100 000 (BGI, 2022). Il existe une carte interprétée à partir des levés aéromagnétiques de la région ouest du Ngamiland, à l'échelle 1/ 500 000.

Nous avons pu interroger le portail du Service Géologique du Botswana (BGI) disponible à cette adresse : https://geos.bgi.org.bw/GDP/Search

La présence de la couverture sédimentaire constituée des « Sables du Kalahari » masque les affleurements géologiques. De plus, la prospection dans ce désert est difficile. C'est pourquoi les cartes géologiques de cette région ont été réalisées par avion en effectuant des mesures du magnétisme des roches (Lehmann *et al.*, 2015). Ce sont donc des cartes d'interprétations des mesures aéromagnétiques. Ces analyses sont complétées par des forages *in situ*. Ces forages ont été effectués au niveau des anomalies magnétiques majeures qui pourraient avoir été provoquées par la présence en profondeur de gisements métalliques (platines, nickels) ou à des kimberlites (diamants).

Du fait de la présence de ces métaux précieux, l'industrie minière est très développée au Botswana. C'est ainsi que les géologues sont venus forer au milieu du désert les 25 m du toit de dolomies pour atteindre l'intérieur de la cavité de *Diviner's* sur Koanaka K1 (cf.).

Cette synthèse des données géologiques a été élaborée et consultée au fur et à mesure de nos recherches. Nous la livrons ici telle quelle. Elle complète la partie précédente qui concernait plutôt les données de terrain et elle vient apporter des informations supplémentaires sur les régions étudiées. Enfin, la partie suivante exploitera ces différentes données pour venir étayer les hypothèses concernant les paléoenvironnements lacustres présents dans ces régions.

Cette synthèse géologique regroupe trois types de données :

- des cartes d'anomalies magnétiques mesurées par avion dans le cadre de recherche de kimberlites, complétées par des forages synthétisés entre autres par Mc Donalds (2008). Ces données ont servi de base d'élaboration de la carte géologique disponible, uniquement disponible au 1/1 500 000 ;

- des données de prospections géophysiques, telles que la gravimétrie (anomalie de champ de gravité de Bougher) et l'électro-magnétisme, ont été utilisées pour rechercher et identifier des vides karstiques en profondeur. Ces études ont été réalisées en 2005 et en 2013 par Gavin Selfe du *GRS Consulting* et par *Poseidon Geophysics*. Cette détection des zones karstiques potentielles, masquée par les sables ou bien situées à l'intérieur des collines, repérées par géophysique et valider par des forages, ont permis de découvrir de nouvelles cavités (comme la grotte de Motswantsweng proche de la grotte de Wadoum) et de compléter les connaissances sur les cavités de la région. Les mesures de terrain ont été couplées à des relevés altimétriques au centimètre près effectués au GPS différentiel. Ces mesures de terrain permettent d'affiner les données satellitaires que nous avions traitées, comme expliqué dans le Chapitre n°1 (MNT JAXA et *SRTM*), ainsi que les modèles 3D photogrammétriques (MNS) que nous avons réalisés à l'aide de drone ;

- et enfin, les données de forages, qui permettent de révéler ce qui se trouve sous les formations du Kalahari. Les données de forages sont accessibles sur le site internet du Service Géologique du Botswana, le *BGI*, à cette adresse : https://bh.bgi.org.bw/borehole.

Ces recherches de données, nous ont permis de découvrir l'anomalie magnétique n°11471A située à Gcwihaba (p.752) et qui est importante pour nos études car elle indique l'altitude de la base des collines karstiques et la présence de paléovallées, ce qui est essentiel pour caractériser la karstification du secteur et comprendre l'édification de ce paysage. Nous avons également consulté les rapports géologiques régionaux, comme celui sur Gcwihaba (Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003).

4.3.1. Utilisation de la gravimétrie à Gcwihaba pour détecter des dolomies sous les sables

Les mesures d'anomalies aéromagnétiques sur toute la région (Lehmann, 2015) et les mesures gravimétriques réalisées plus ponctuellement et de façon pédestres (Selfe G. / GRS Consulting et *Poseidon Geophysic*) ont été employées pour identifier des vides karstiques comme dans le secteur de *Gcwihaba Hills*, au niveau de *Wadoum* et de la colline C. La gravimétrie a été effectuée avec un appareil portable gravimètres Scintrex CG3 Autgrav[1] de *Poseidon Geophysics* de Gaborone (Ellis, 2000) et du *GRS Consulting* d'Afrique du Sud (Selfe/*GRS Consulting* 2005a,b, 2013).

Nous avons réalisé des cartes qui synthétisent ces données, comme par exemple les lignes vertes sur la Figure 676 (*Water Surveys Botswana* et *Aqualogic*, 2001, Fig.11). Elles indiquent plusieurs vides potentiels, récapitulés dans le Tableau 31.

[1] https://georeva.eu/fr/produit/microgravimetre-scintrex-cg-5/

Par exemple les lignes de prospection du Bloc n°6 recherchent à repérer la zone karstique rencontrée par forage (n°12389), à la profondeur de 52 à 100 m (Tableau 46 p.766).
Plus à l'est, seule la ligne 7 est complète et a montré la présence d'une cavité en profondeur (*line* 200 de la figure 11 et vers 1500 sur l'*Appendix A24* (*Water Surveys Botswana* et *Aqualogic*, 2001). Les lignes du Bloc 8, 9 et 10 n'ont pas apporté de résultats.
Nous remarquons qu'il existe une seconde anomalie magnétique plus à l'est, l'anomalie n°11741A (Mc Donald, 2008, p.44).

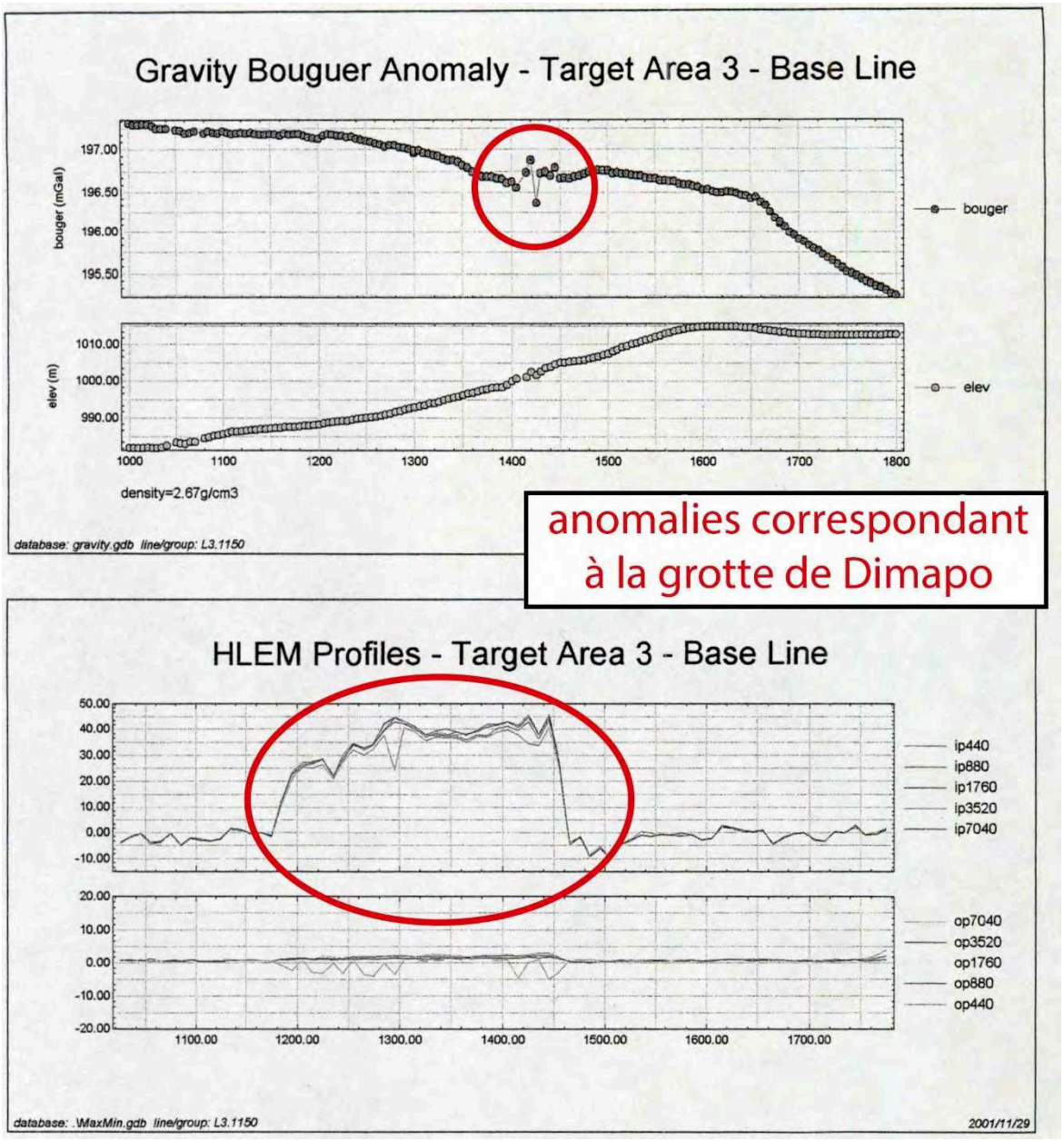


Figure 675 Exemple des mesures de gravimétrie (en haut) et des mesures électro-magnétique en bas permettant la découverte de la grotte de Dimapo sur la colline G2 à Gcwihaba (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2001, Appendix A8).

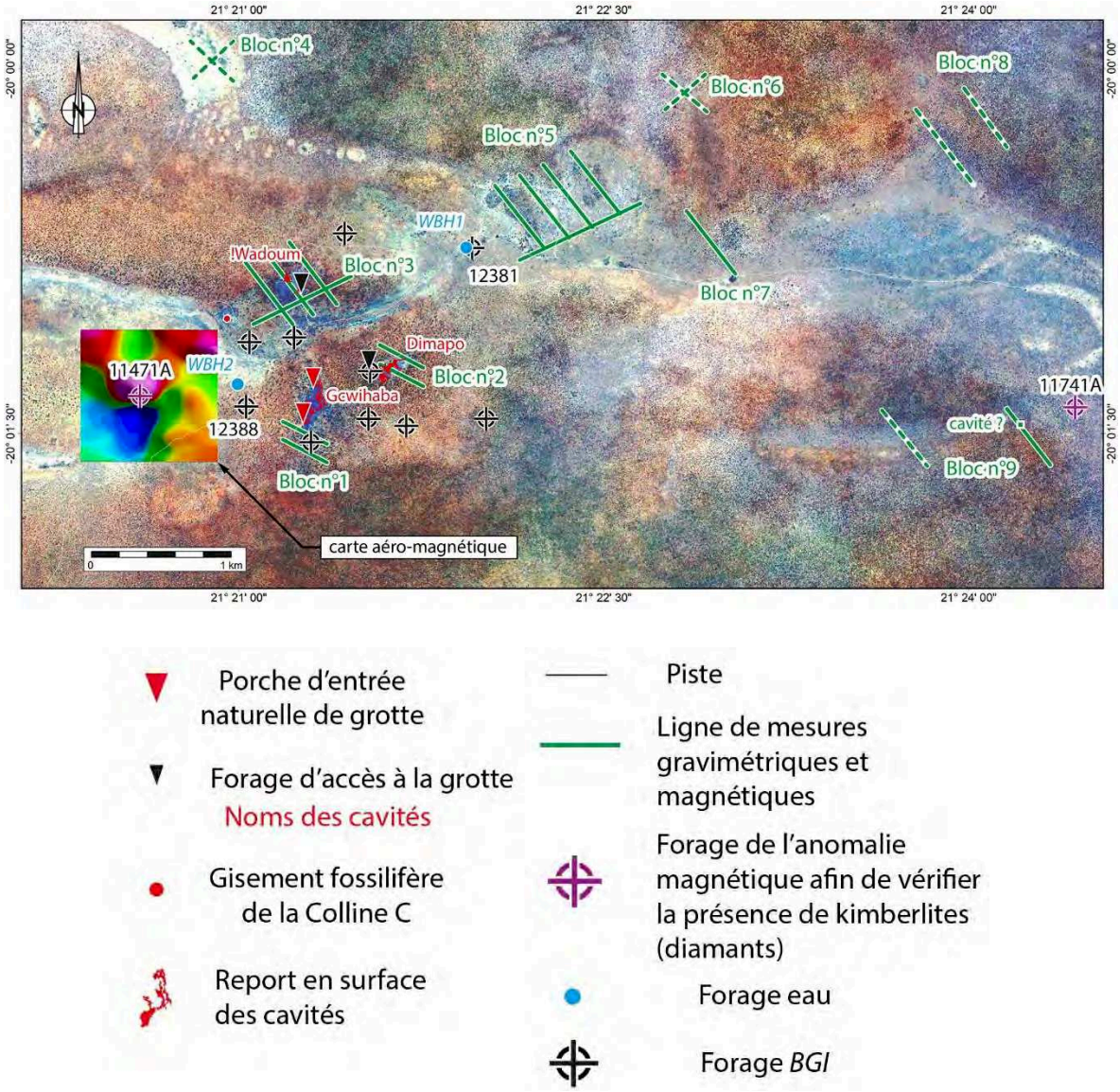


Figure 676 Synthèse des données géologiques de la région de Gcwihaba : carte aéromagnétique (Lehmann, 2015), lignes de mesures gravimétriques et aéromagnétiques (en vert) (d'après Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2001, Fig.11)) reportées sur une image satellite : ESRI World Imagery (Wayback 2016-08-31), disponible à cette adresse : lien.

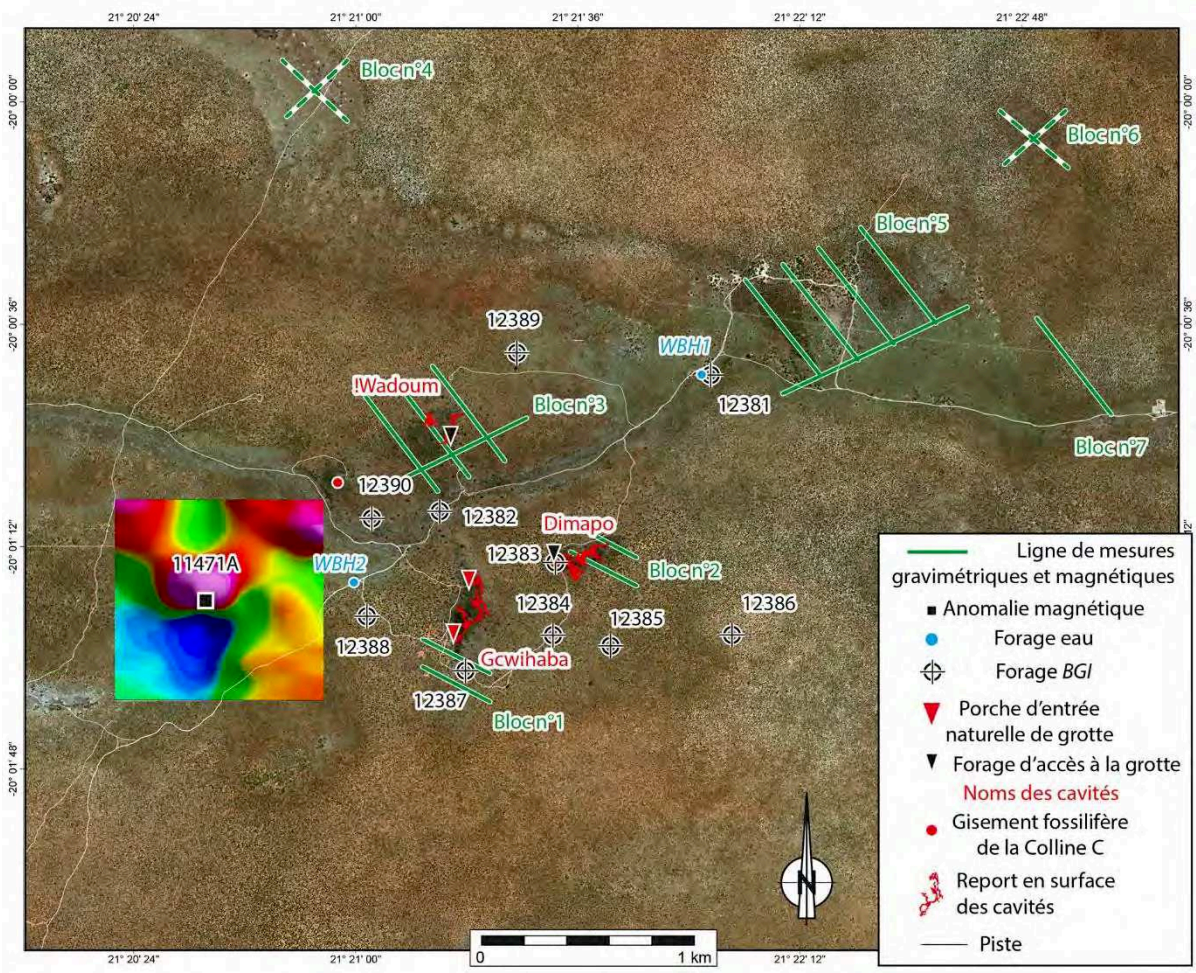


Figure 677 Synthèse des données géologiques de Gcwihaba Hills (forages, lignes géophysiques, anomalie magnétique) à Gcwihaba Hills.

4.3.1.1. Dix zones (blocs) potentielles

Water Surveys Botswana et *Aqualogic* (2001, p.17) ont défini dix zones d'intérêt selon certaines caractéristiques principalement la présence supposée de dolomies et donc de grottes potentielles, voici la traduction de leur texte :

4.3.1.1.1. Zone 1

Ce bloc a étudié le côté sud de la colline où se trouve la grotte de Gcwihaba. Le bloc 1 a été positionné suivant les conseils du professeur Cooke qui croit, avec d'autres, que la grotte de Gcwihaba s'étend vers le sud. Deux lignes parallèles orientées du nord-ouest au sud-est ont été programmées et exécutées, à 200 mètres de distance.

4.3.1.1.2. Zone 2

Il s'agissait d'un petit bloc conçu pour étudier la zone de dolomie peu profonde sur le flanc nord de la colline de dolomie (G2). Il se trouvait dans la zone où le BDF avait tenté de creuser des fissures dans la dolomie exposée immédiatement au sud de la vallée de Gcwihaba. Deux lignes parallèles orientées du nord-ouest au sud-est ont été planifiées et exécutées à 200 mètres de distance.

4.3.1.1.3. Zone 3

Ce dernier était centré exactement sur l'entrée de la grotte !Wadoum. L'étude géophysique dans ce bloc est l'exercice d'étalonnage par lequel toutes les études ultérieures sont d'abord justifiées et ensuite comparées. Quatre lignes ont été planifiées mais seulement deux ont été étudiées par gravité - toutes deux passant directement au-dessus de !Wadoum.

4.3.1.1.4. Zone 4

Deux lignes mutuellement perpendiculaires ont été planifiées et exécutées, elles se croisent au centre d'un paléopan. L'objectif était de déterminer si le pan révèle ou non une cavité sous-jacente.

4.3.1.1.5. Zone 5

Cette grille est constituée de cinq lignes passant au-dessus des collines dolomitiques E et F. La ligne sur la colline F, la plus à l'est du bloc, avait pour but de rechercher une grotte effondrée. Toutes les lignes ont été exécutées.

4.3.1.1.6. Zone 6

Deux lignes perpendiculaires étaient prévues, mais le temps disponible était insuffisant et une seule a été réalisée. Les lignes se croisent au centre d'un sous-affleurement de dolomie peu profond suspecté. L'objectif était de déterminer si ce sous-affleurement contenaient ou non des cavités.

4.3.1.1.7. Zone 7

Une ligne a été planifiée et exécutée. La ligne étudie une large section de la vallée de Gcwihaba, ainsi que la rive nord et un paléo-affluent orienté nord-ouest.

4.3.1.1.8. Zones 8, 9 et 10

Deux lignes parallèles orientées nord-ouest et perpendiculaires à la direction NNE de la grotte sont prévues dans chacun de ces trois blocs. Le temps disponible était insuffisant et une seule ligne a été réalisée. Les blocs ciblent diverses caractéristiques géomorphologiques à l'est de la zone principale des collines de Gcwihaba.

4.3.1.2. Interprétations des levées géophysiques et résultats

Voici la traduction de leur tableau.

Zone d'intérêt	Interprétation
2	Dolomie peu profonde. Caverne, faille ou changement géologique important et profond – semble orientée nord-nord-est. Faible priorité.
2	Dolomie peu profonde. Grande caverne profonde, faille ou changement géologique – semble orientée NNE. Ligne pas assez longue. Faible priorité.
3	Dépôt de couverture modéré sur dolomie. Faille ou changement géologique probable. Peut être en corrélation avec les anomalies de l'est du bloc I. Faible priorité.
3	Couverture sédimentaire mince sur dolomie. Faille ou géologie. Ligne trop courte. Faible priorité.
5	Couverture/débris plus épais sur dolomie peu profonde au nord-est – grotte effondrée ? SVC à 1450. Faille ou changement géologique. Faible priorité.
5	Couverture/débris plus épais au nord-ouest, faille ou changement géologique 1540-1600+. Bordure du bloc de dolomie. SVC à 1470. Priorité faible.
5	Couverture/débris plus épais au nord-ouest, faille ou changement géologique. Bordure du bloc de dolomie. SVC à 1270. Priorité faible
5	Couverture/débris plus épais au nord-ouest, changement de faille. Bordure du bloc de dolomie. SVC à 1270. Priorité faible
5	Couverture sédimentaire conductrice jusqu'à l'affleurement dolomitique au nord-est. Interprété comme le bord de la faille dans les dolomies. Faible priorité.
7	Correspond au remplissage de la vallée de Gcwihaba, possiblement une faille sus-jacente ou une géologie différente/plus légère. Terrasse dolomitique de la rive nord à 1470°, reflétée en EM. Faible priorité.

Tableau 30 Résumé des anomalies gravimétriques et électromagnétiques : Interprétation des changements de faille et/ou de géologie (Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2001, Table 7).

Zone d'intérêt	Interprétation
1	Dolomie peu profonde. **Prolongation possible SSW de l'entrée SW de la grotte de Gcwihaba**. Peut-être effondrée. EM SVC à 2/1135 -1150 apporte un certain intérêt. Priorité modérée.
1	Dolomite peu profonde. **Grande caverne profonde ou faille ou changement géologique - semble orientée NNE, parallèlement et à l'est de la grotte de Gcwihaba**. Priorité modérée.
1	Dolomite peu profonde. **Grande caverne profonde ou faille ou changement géologique - semble orientée NNE, parallèlement et à l'est de la grotte de Gcwihaba**. Priorité modérée.
2	Affleurement de dolomie. **Une grande grotte intacte sous la colline G2 (Dimapo) semble s'étendre vers le NNE sous 2/200. Haute priorité.**
2	Affleurement de dolomie. Max-Min donne une faille à 1125, **un vide à 1190**. Extension NE de 10/1145 ? Faible priorité.
3	Affleurement de dolomie. Il s'agit de la grotte de !Wadoum. Ligne d'étalonnage.
3	Affleurement de dolomie. Petite grotte intacte sous une colline, +/- 150 SE de !Wadoum. **Haute priorité.**
5	Dolomie peu profonde. Petite grotte effondrée ou grotte avec agglomérat. Pas bien définie. Priorité modérée.
5	Grand complexe de grottes remplies de concrétions *(sinter)* sous la colline G4. D'autres explications sont possibles mais comparer avec la ligne 5/200. Rechercher un sous-affleurement de dolomie. Faible priorité.
5	Dolomie peu profonde. Petite grotte effondrée ou grotte avec concrétions *(sinter)*. Rechercher un sous-affleurement de dolomie : si tel est le cas, **priorité absolue.**
5	Dolomie peu profonde. Petite grotte effondrée ou grotte avec agglomérat. Rechercher un sous-affleurement de dolomie : si tel est le cas, **priorité absolue.**

Tableau 31 Résumé des anomalies gravimétriques et électromagnétiques : interprétation possible de la grotte (Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2001, Table 8).

4.3.1.3. Résultats

Zone 1
La cavité de Gcwihaba semble bien s'étendre en profondeur vers le sud.
Zone 2
Une cavité semble présente au niveau de la colline G2.
Zone 3
Une petite grotte semble présente au sud de la grotte de Wadum.
Zone 4
Le profil de gravité n'a pas été réalisé, on n'a donc pas de résultat concernant la présence d'une cavité sous le pan.
Zone 5
Un grand réseau karstique semble présent sous la colline G4.
Zone 6
Le profil de gravité n'a pas été réalisé.
Zone 7
Le profil électromagnétique montre une terrasse de dolomies sous les sables de la vallée.
Zone 8
Le profil de gravité n'a pas été réalisé.
Zone 9
Une possible cavité serait présente au nord de la ligne la plus à l'est (*line* 200 de la figure 11 et vers 1500 sur l'*Appendix A24*).
Zone 10
Le profil de gravité n'a pas été réalisé.

4.3.2. Gravimétrie (anomalie de champ de gravité de Bougher)

Des relevés d'anomalies de champ de gravité de Bougher *(First vertical derivate Bougher gravity)* réalisés par Selfe / GRS Consulting (2013, Fig.1, p.7) permet de « visualiser » le toit des dolomies sous les sables du Kalahari (Figure 678). Celui-ci est indiqué par de fortes valeurs, en rouge, tandis que les zones bleues, de faible valeur, peuvent être interprétées comme des dolines, des effondrements, des vallées et/ou des cavités.

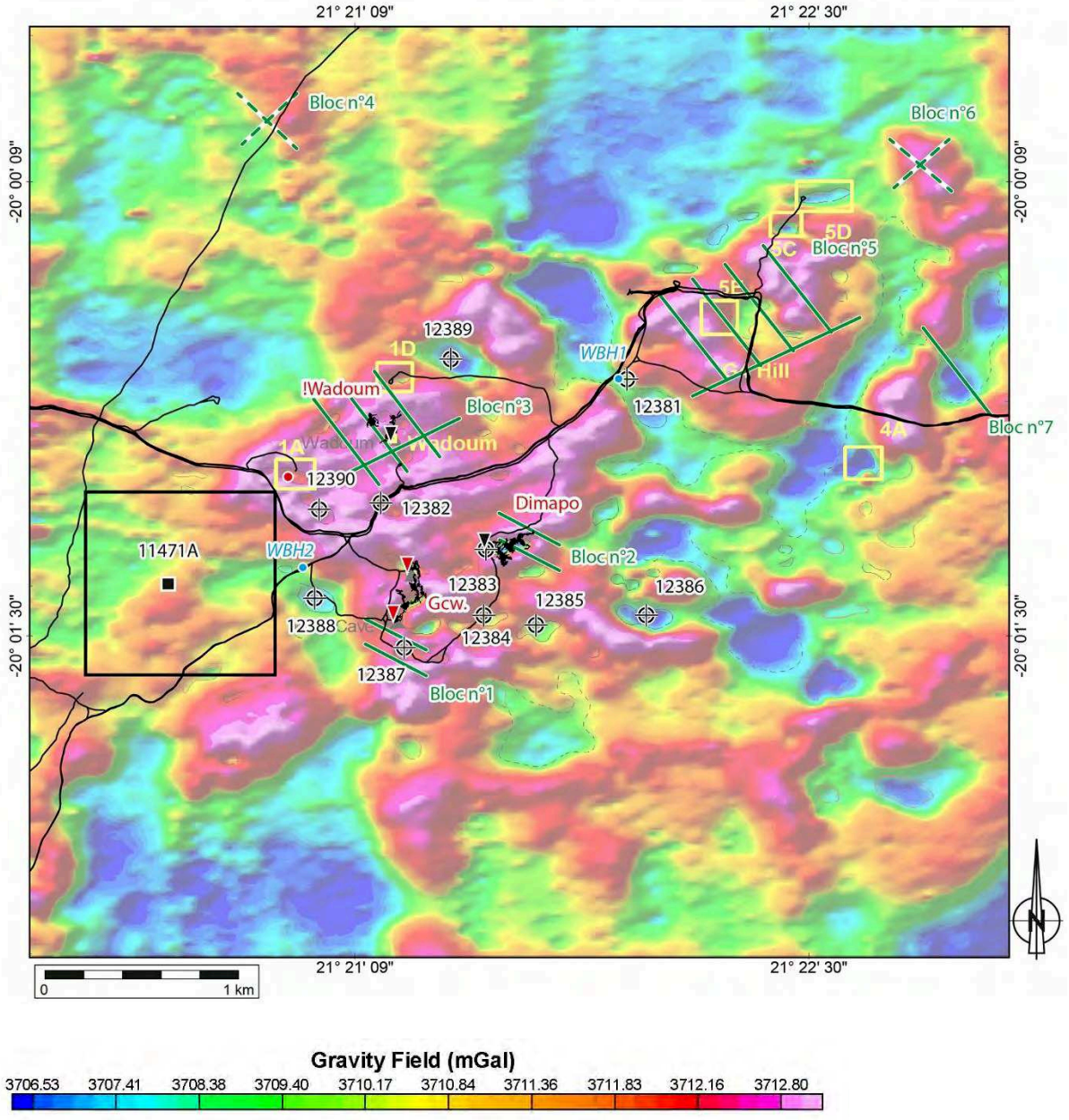


Figure 678 Levé gravimétrique de la région de Gcwihaba (Source : Selfe / GRS Consulting, 2013, Fig.1, p.7). Les valeurs en mGal sont données pour exemple et ne correspondent pas exactement à ce relevé mais à la figure 6. Les cadres en jaune correspondent à des levées gravimétriques plus précis consultables dans le document original (Selfe / GRS Consulting, 2013).

L'ajout des courbes de niveau topographiques sur la carte précédente, des anomalies de champ de gravité de Bougher, mesurées par la même équipe et avec un GPS différentiel montre que les zones correspondant à des dunes de sable ont des valeurs faibles (couleur bleu) (Figure 679).

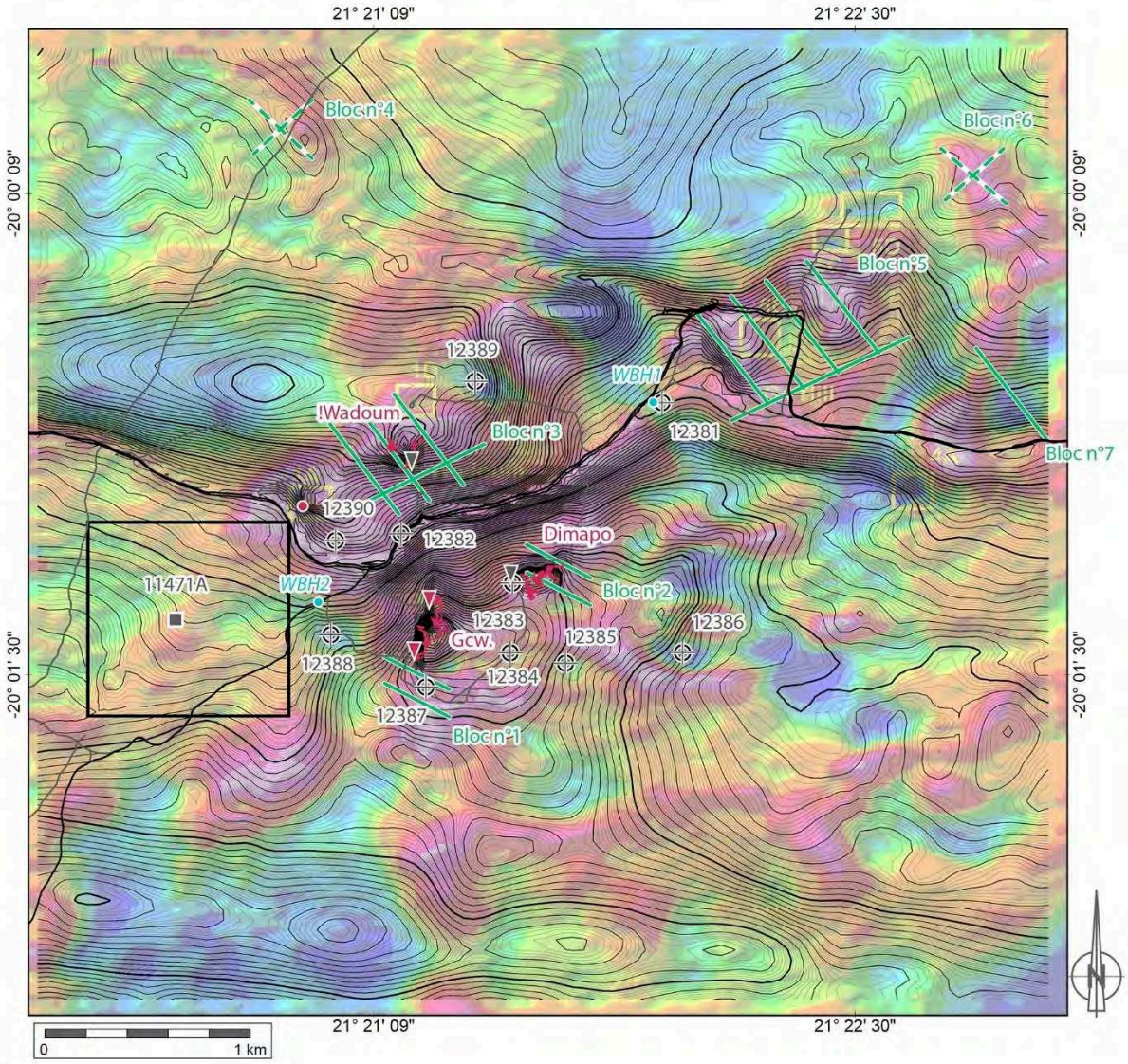


Figure 679 Levé gravimétrique de la région de Gcwihaba avec les courbes de niveau de la topographie mesurées au GPS différentiel.

Utiliser une image satellite comme fond de carte (Figure 680) permet de réfléchir à la localisation des anomalies et de définir les zones de prospection.

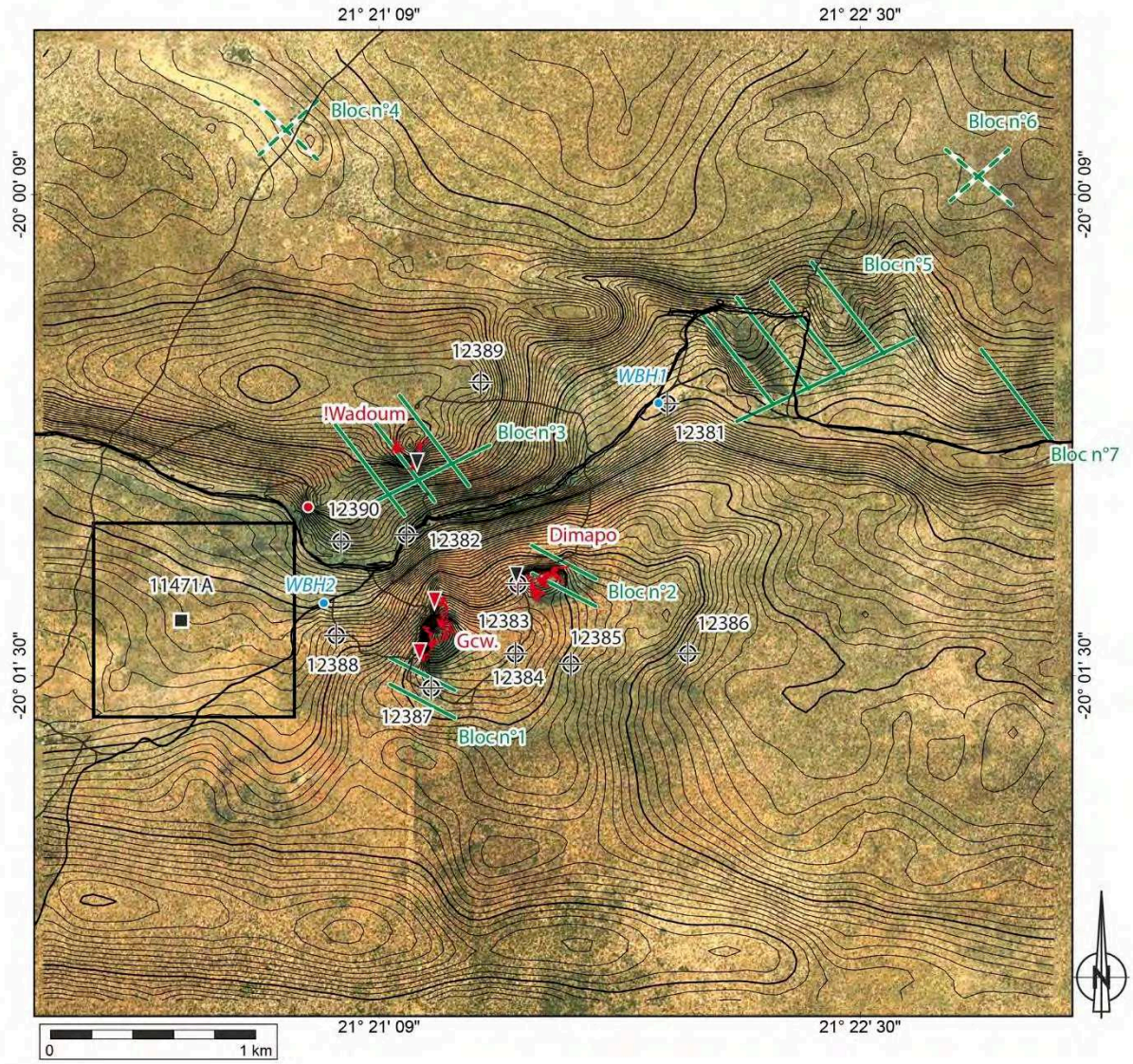


Figure 680 Image satellite de la carte précédente.

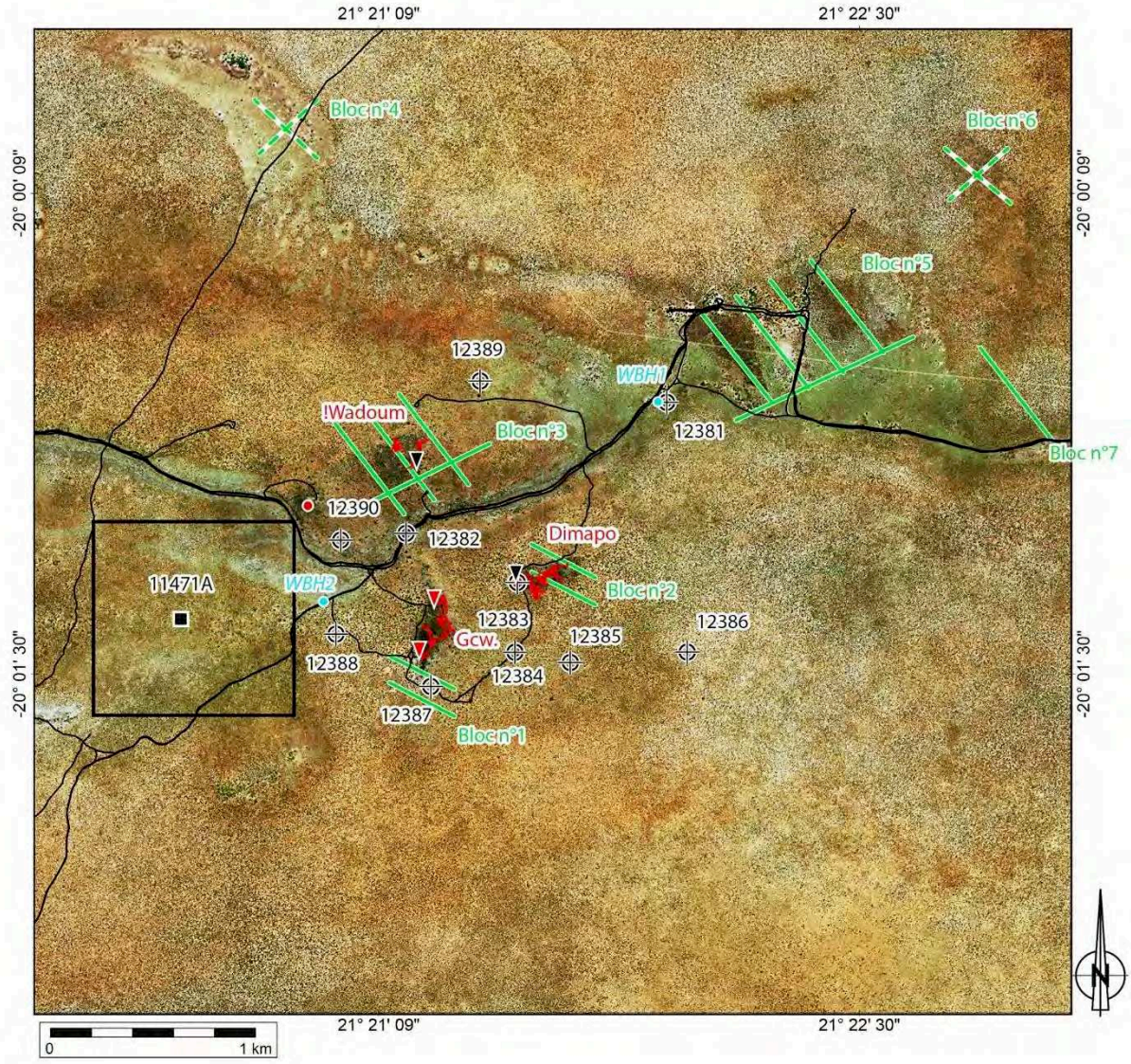


Figure 681 Image satellite sans les courbes de niveau.

4.3.3. Anomalies aéromagnétiques

Les anomalies aéromagnétiques synthétisées dans ce Tableau 32 ci-dessous et identifiées par Mc Donalds (2008, Table 1) ont été majoritairement diagnostiquées par des forages. Ces données de forage nous permettent de connaître la profondeur du toit des dolomies et de reconnaître la présence de calcrètes, dont certaines pourraient être lacustres.

Anomalie magnétique	Latitude	Longitude	Latitude (degré décimaux)	Longitude (degré décimaux)	Altitude (m)
11471A	535900	7786000	-20,02242798	21,34324214	935
11741A	542600	7785900	-20,02319585	21,40730247	
11801A	544100	7783550	-20,04439784	21,42170047	
11881A	546200	7789000	-19,99510045	21,44164349	
11931A	547400	7789500	-19,99055330	21,45310156	
11741B	529700	7803900	-19,86077719	21,28367516	
11801B	544200	7801600	-19,88128710	21,42222244	
11931B	546700	7762800	-20,23183945	21,44709514	
12021B	549700	7803300	-19,86579274	21,47471442	

Tableau 32 Coordonnées des anomalies magnétiques (Mc Donalds, 2008, Table 1).

4.3.4. Forages géologiques

Nous avons indiqué ici les forages mentionnés sur le site internet du Service Géologique du Botswana (*BGI*) et dans certaines publications (*Water Surveys Botswana* et *Aqualogic*, 2003 et Mc Donalds, 2008). Par faute de position géographique précise, nous n'avons pas indiqué les forages près de Wadum (Figure 1316 p.1363) et tout ceux autour de K1, indiqués sur la Figure 1320 (p.1367).

4.3.4.1. Tableau récapitulatif des forages dans la zone d'étude

Forage	Latitude	Longitude	Latitude (degré décimaux)	Longitude (degré décimaux)	Altitude (m MNT JAXA)	Lien BGI	Google Maps
BH8991	18ø59'13"	21ø21'07"	-18.98694	21.3519	1013		
BH8992	18ø59'57"	21ø21'27"	-18.99916	21.3575	1030		
BH8993	18ø58'38"	21ø22'39"	-18.97722	21.3775	1026		
BH8994	18ø57'10"	21ø13'48"	-18.95278	21.2297	1020		
BH9696	18ø15'4"	21ø12'14.1"	-18.25111	21.20392		Lien	Lien
BH9892			-20.00406	21.90281	951	Lien	Lien
BH9893			-19.9447	21.569	991	Lien	Lien
BH9894			-19.95167	21.36889	1018	Lien	Lien
BH9895			-20.01703	21.03269		Lien	Lien
BHZ12391			-20.14098	21.2195		Lien	Lien
BHZ12392			-20.14823	21.21046		Lien	Lien
BHZ12393			-20.14896	21.20218			
BHZ12394	520272	7770984	-20.15833	21.19401		Lien	Lien
BHZ14302			-20.19361	21.10917		Lien	Lien
BHZ14304			-20.22194	21.28111		Lien	Lien
BHZ14305			-20.0375	21.46611		Lien	Lien
BHZ12181			-20.09767	21.53233			

Z12381 (waterbore hole 1)			-20.01229	21.36599		Lien	Lien
BHZ12382			-20.01842	21.35379		Lien	Lien
BHZ12383			-20.02072	21.359		Lien	Lien
BHZ12384			-20.02399	21.35889		Lien	Lien
BHZ12385			-20.02447	21.36148		Lien	Lien
BHZ12386			-20.02398	21.36695		Lien	Lien
BHZ12387			-20.02559	21.35495		Lien	Lien
Z12388 (waterbore hole 2)			-20.02314	21.35051		Lien	Lien
BHZ12389			-20.01129	21.35726		Lien	Lien
BHZ12390			-20.01874	21.35073		Lien	Lien
(OGN) BH9696			-18.25111	21.20392		Lien	Lien
(OGS)		pas d'info					
JEB1	545150	7754000	-20,31139	21,43248	981		
JEB2	545550	7754150	-20,31003	21,43630	981		
JEB3	545400	7754500	-20,30687	21,43486	981		
JB4	573998	7789918	-19,98594	21,70733	955		
BM1	584462	7883433	-19,14049	21,80315			
BM3	567705	7874122	-19,22526	21,64414	993		
2021 B4_1			-20,032906	21,61504		lien	lien
2021 B4_2			-20,032998	21,611943		lien	lien
JB7							
TSODILO1							
NGAMI2							
XHABE			-20,097222	21,5369444			
BHZ21870			-20.148194	21.180278	1031		
BHZ21871			-20.146667	21.176111	1031	lien	lien
BHZ21872			-20,146389	21,180833	1029	lien	lien
BHZ16806			-20,098806	21,365389		lien	lien
BHZ14993			-20,097222	21,532389		lien	lien
BHZ17662			-20,09775	21,532361		lien	lien
BHZ5327			-20,075	21,53861		lien	lien
BHZ16806			-20,098806	21,365389		lien	lien
BH9695			-18,479	21,2425		lien	lien
BH9694			-18,4585	21,5314		lien	lien
BH9699		pas d'info					
BH9702		pas d'info					

BH9700			-18,5792	21,73603		lien	lien
BH9701			-18,53803	21,94982		lien	lien
BH9698			-18,42667	21,51833		lien	lien
BH9865			-18,74308	22,17738		lien	lien
BH9703			-19,09806	21,895		lien	lien
BH9860			-18,74308	21,25694		lien	lien
BH9861			-18,76028	21,24111		lien	lien
BH9866			-19,20167	22,05167		lien	lien
BH9869			-19,461	21,06364		lien	lien
BH9868			-19,49092	21,29489		lien	lien
BH9867			-19,519694	22,939389		lien	lien
BH9864			-21,588333	24,755556		lien	lien
BH9931		pas d'info					
BH9892			-20,00406	21,90281		lien	lien
BH9896			-20,63917	21,12194	1022	lien	lien
BH9864			-21,588333	24,755556	985	lien	lien
BH9863			-21,6725	24,510278	985	lien	lien
BH9862			-20,20638	22,4116	942	lien	lien
BH9932			-20,584444	21,978333	957	lien	lien
JB1 (Mc Donalds, 2008)	574900	7785000	-20,03034846	21,71614838	938		
JB2 (Mc Donalds, 2008)	574899	7786024	-20,02109568	21,71609691	940		
JB3 (Mc Donalds, 2008)	575450	7786491	-20,01685451	21,72134538	954		
2021B41 (Mc Donalds, 2008)	564374	7785059	-20,03019393	21,61550777			
2021B42 (Mc Donalds, 2008)	564050	7785050	-20,03028600	21,61241032			
11801B1 (Mc Donalds, 2008)	543949	7801735	-19,88007283	21,41982159			
11471A	535900	7786000	-20,02242798	21,34324214	935		
11741A1	542600	7785900	-20,02319585	21,40730247			

Tableau 33 Coordonnées des forages en WGS84.

Des coupes stratigraphiques, indiquées sur la carte de la Figure 683, réalisées à partir de forages, sont fournies par le rapport GC 69-41-1W (*Water Surveys Botswana* et *Aqualogic*, 2003) et complètent celles présentées plus loin (p.824).

4.3.4.2. Carte de localisation des forages

De nombreux forages ont été réalisés sur la bordure occidentale du Rift de l'Okavango, alors qu'il y en existe peu dans le delta de l'Okavango (Figure 683, Figure 684). Ces données sont essentielles pour estimer le niveau de base régional actuel et reconstituer l'évolution des paysages en lien avec les paléoniveaux lacustres déterminés sur la bordure occidentale, ainsi qu'avec les paléoniveaux de base ayant permis le creusement des grottes.

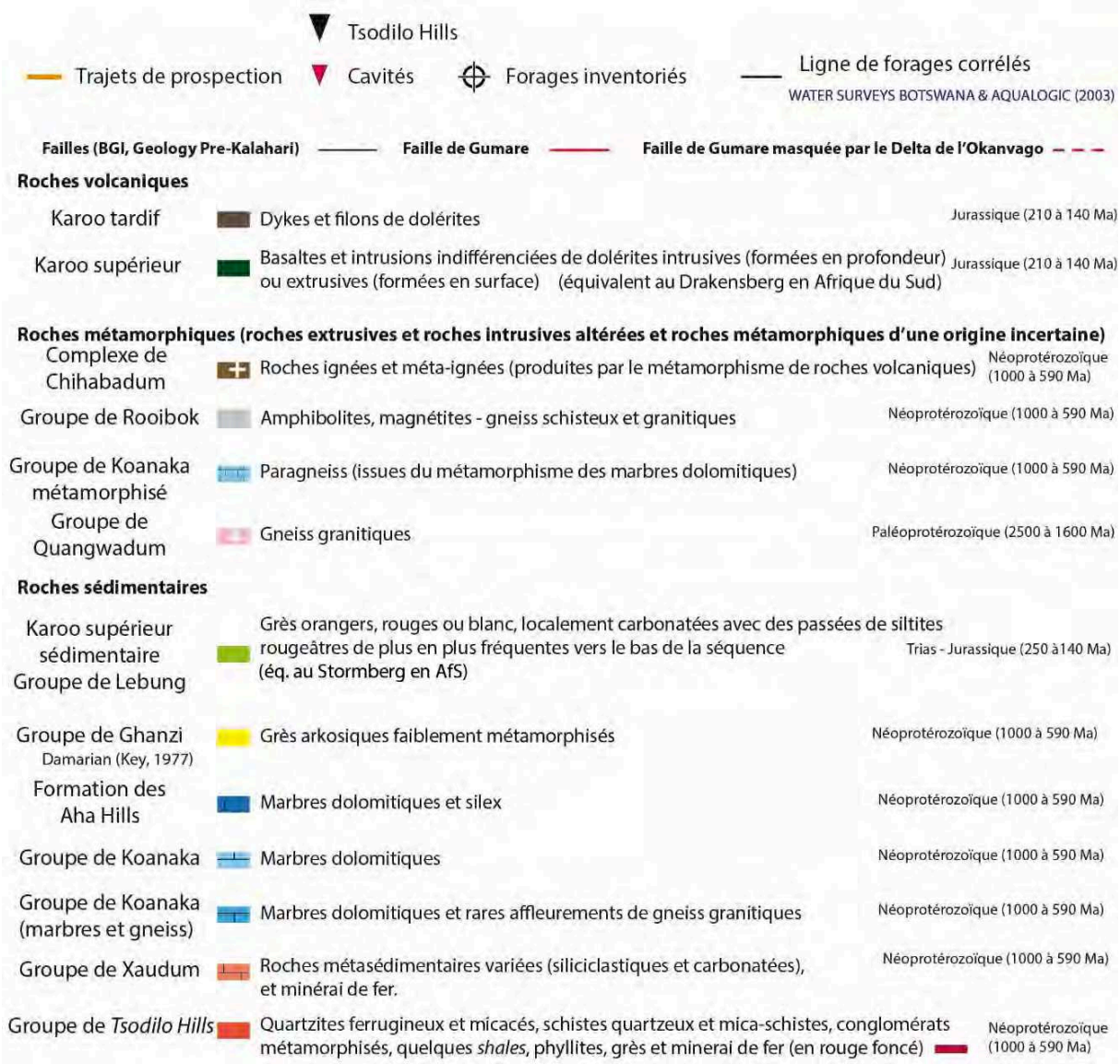


Figure 682 Légende géologique de la carte suivante.

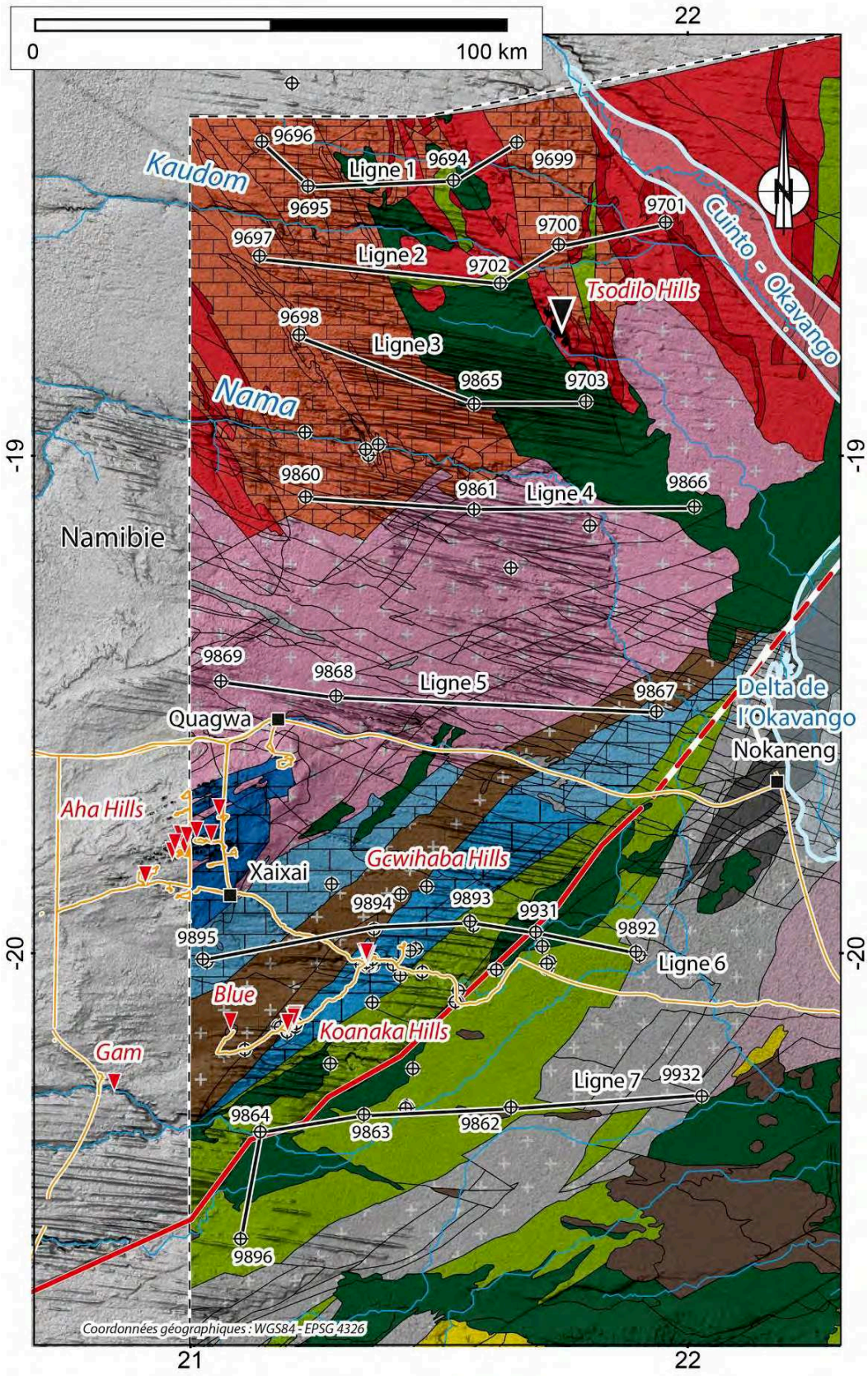


Figure 683 Position des forages et des coupes stratigraphiques d'après Water Surveys Botswana et Aqualogic (2003, Fig.42) sur la carte géologique pré-Kalahari de la bordure ouest du Rift de l'Okavango.

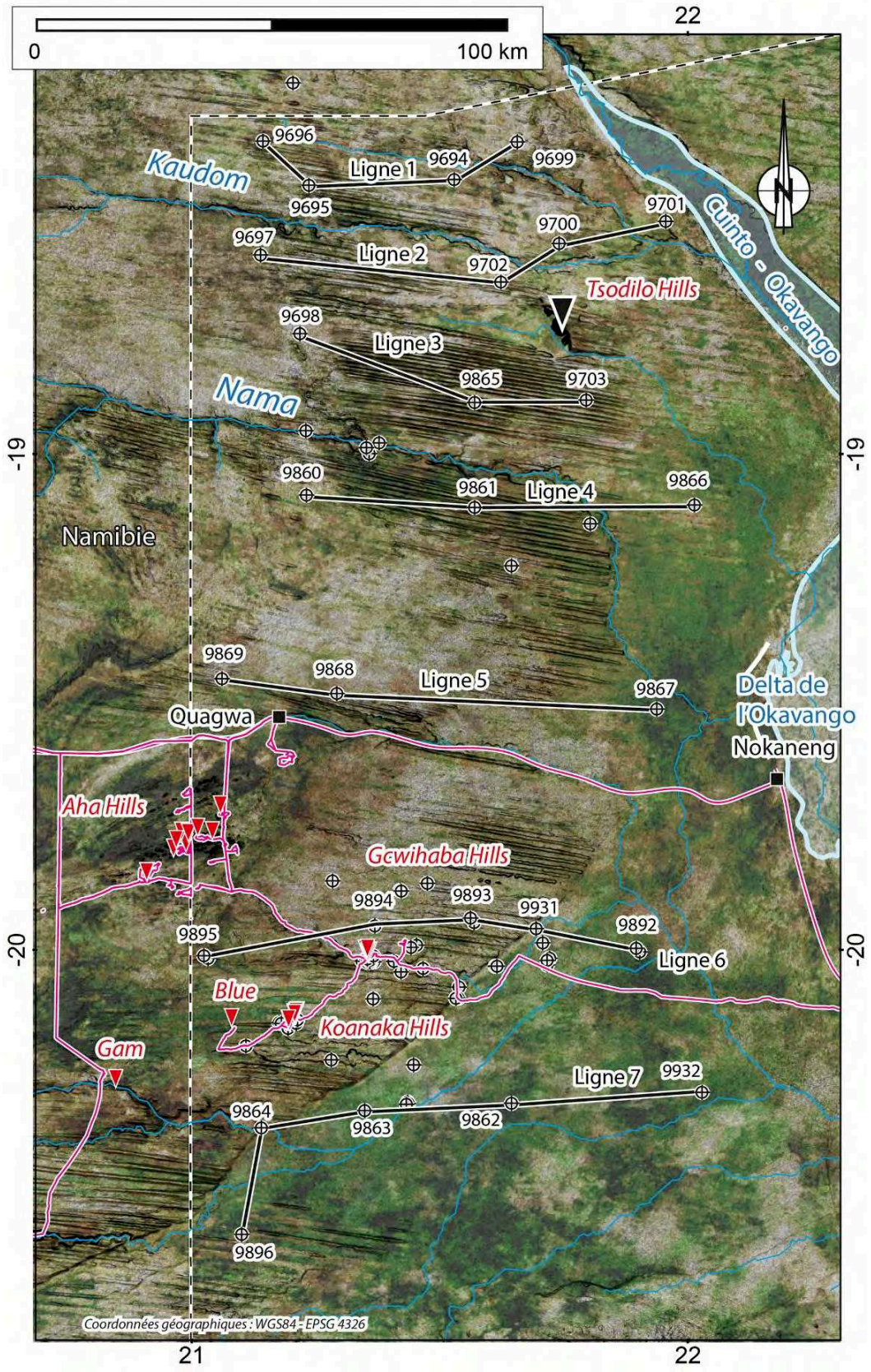


Figure 684 Position des forages et des coupes stratigraphiques sur une image satellite, en relief.

4.3.4.3. Cartes des forages et des lignes de corrélations près des grottes étudiées

Les cartes ci-dessous (Figure 687, Figure 686 et Figure 688) indiquent la position des forages recensés dans la région. Le trajet de prospection indiqué sur ces cartes est à retrouver sur les cartes précédentes (Figure 439, Figure 441, Figure 443 et Figure 444, p.486).

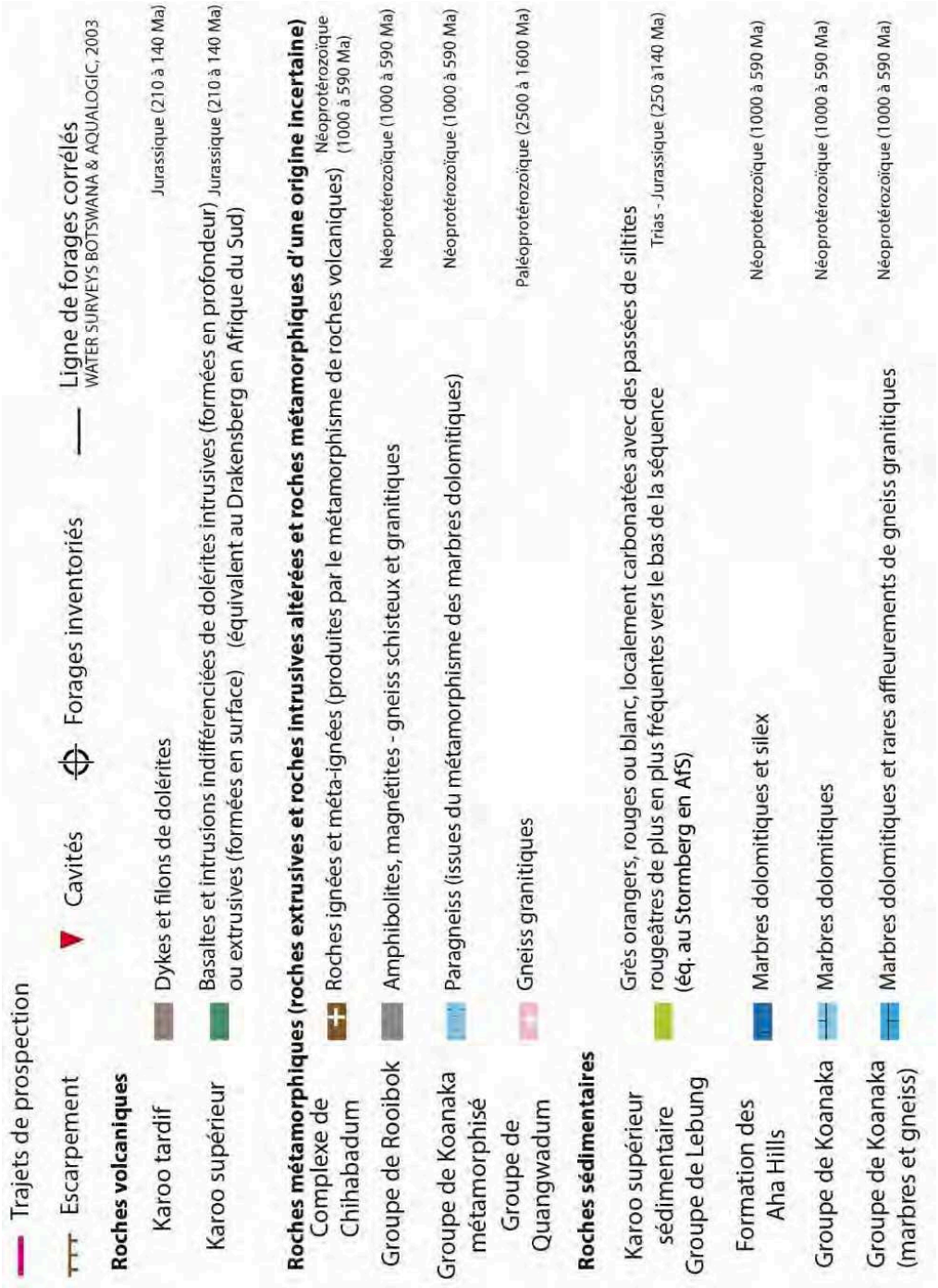


Figure 685 Légende de la carte suivante (Figure 686).

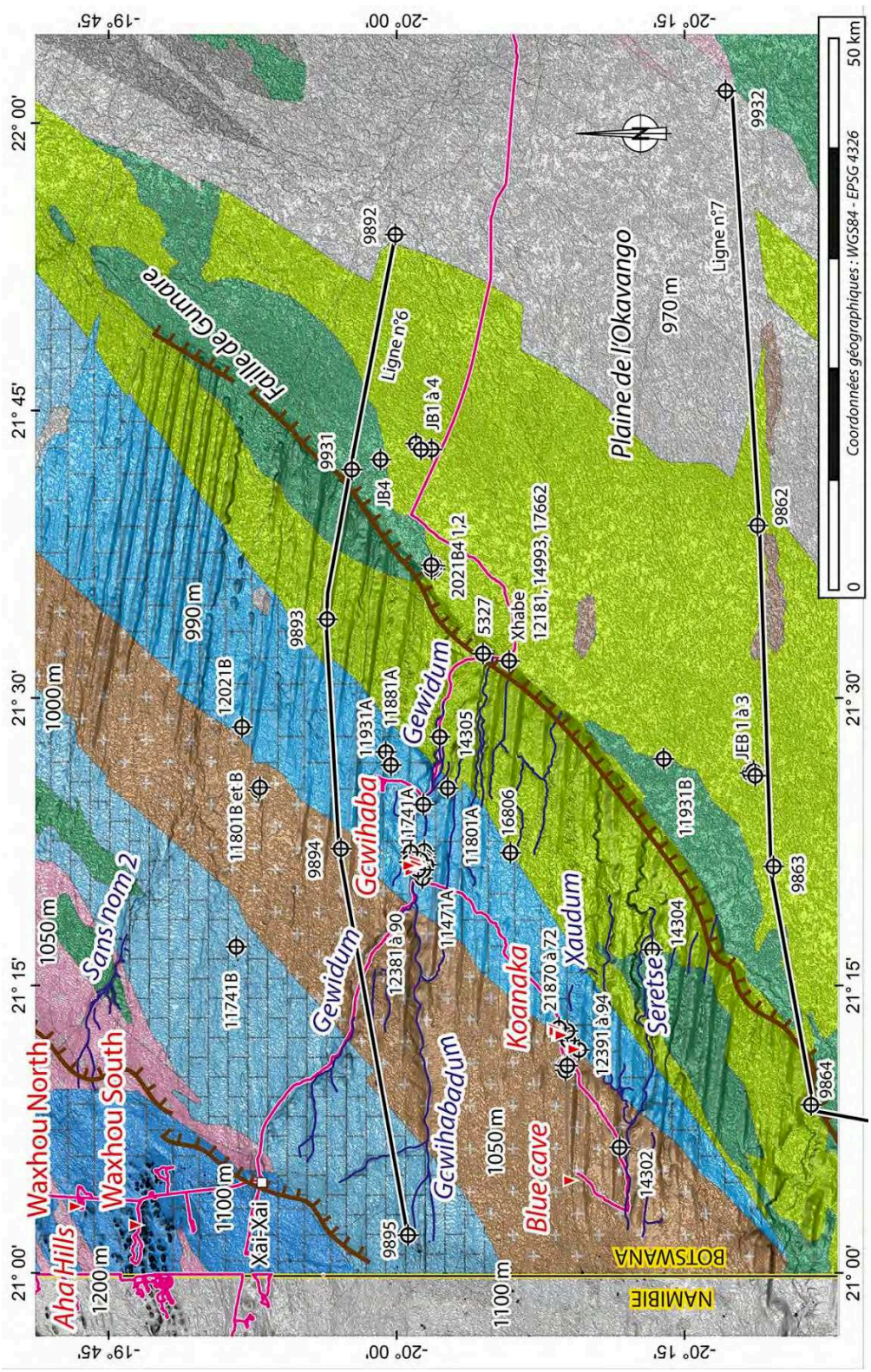


Figure 686 Forages et carte géologique pré-Kalahari de la région étudiée. La légende est située à la page 683.

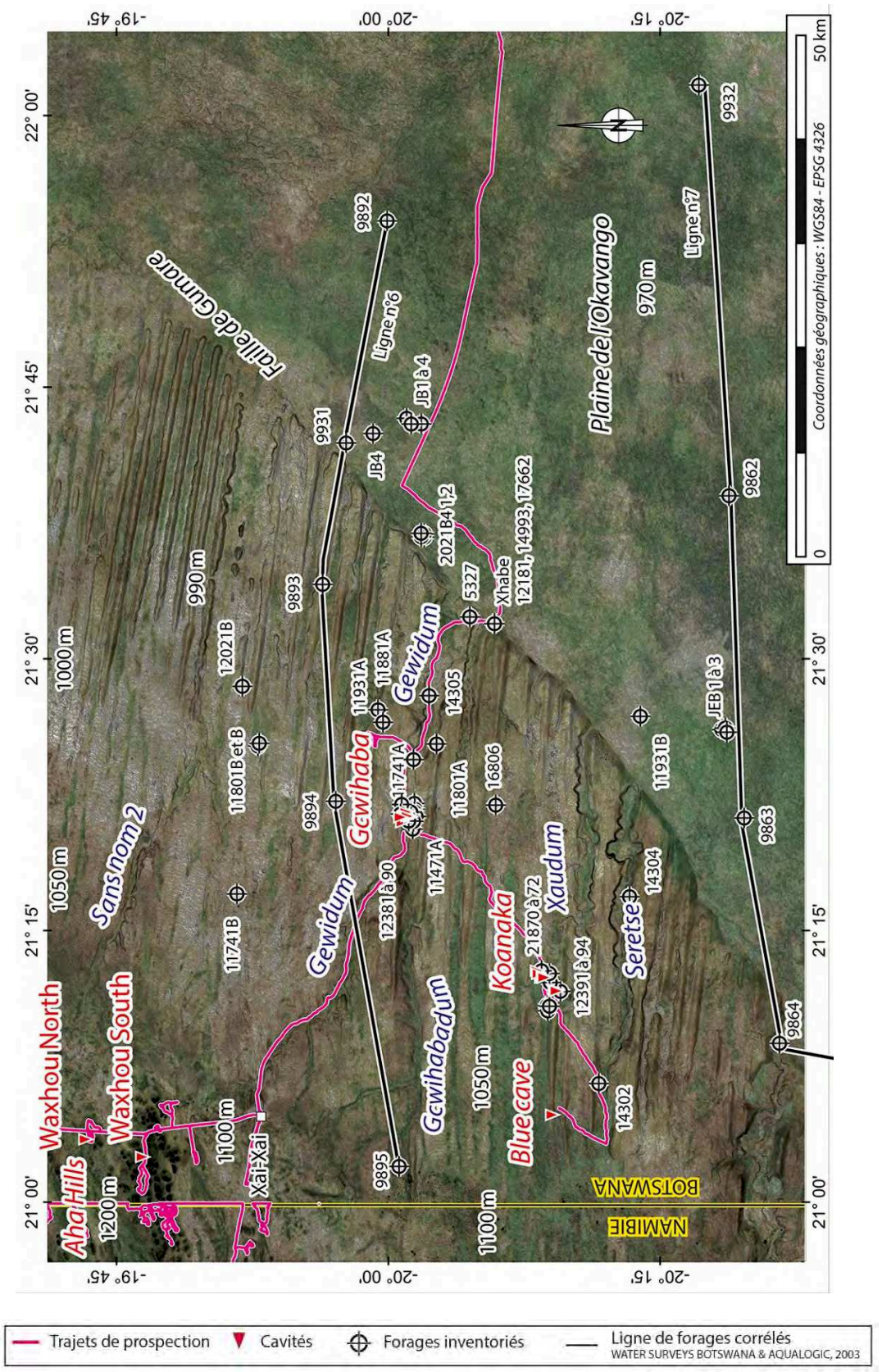


Figure 687 Forages dans la région étudiée et image satellite en relief.

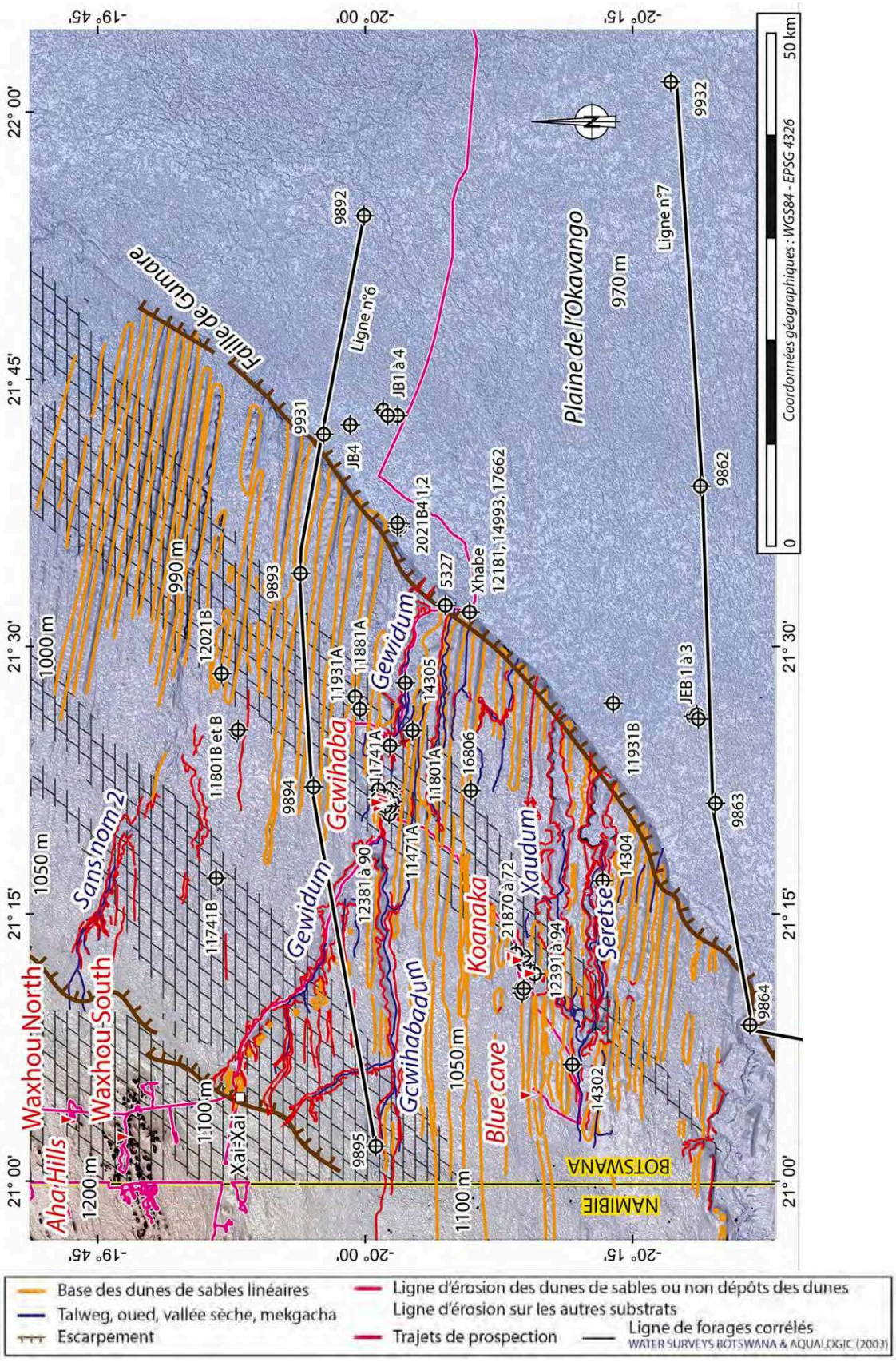


Figure 688 Forages et carte géomorphologique de la région étudiée.

4.3.4.4. Un paléokarst rencontré par le forage BH9697

Il est important de noter la présence d'un paléokarst rencontré lors du forage BH9697. Le forage BH9697 est localisé au nord sur la Figure 683 (p.680).

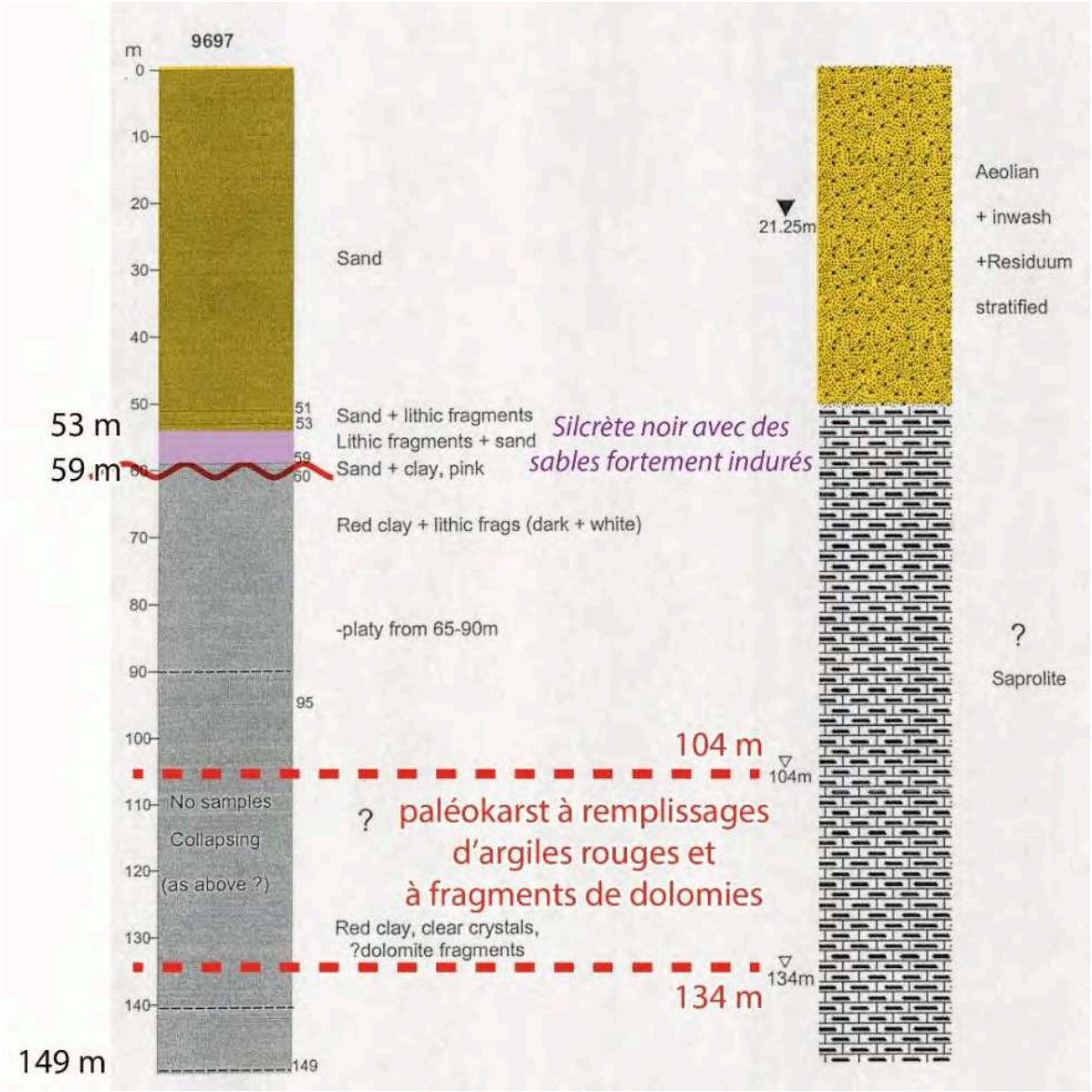


Figure 689 Données du forage BH9697 (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic (2003, Fig.16, modifié).

N°	De (m)	À (m)	De (m MNT JAXA)	À (m MNT JAXA)	Horizon	Horizon
1	0	2			*Fine brown sand*	Sable fin brun
2	2	39			*Fine off white sand*	Sable fin blanc cassé
2	39	41			*Fine brown sand*	Sable fin brun
4	41	45			*Fine off white sand*	Sable fin blanc cassé
5	45	49			*Fine yellow sand*	Sable fin jaune
6	49	53			*Fine reddish orange sand*	Sable fin rouge orangé
7	53	59			*Black silcrete with strongly lithered sand*	Silcrète noir avec des sables fortement indurés
8	59	81			*Fine brick red mudstone*	*Mudstone* fin rouge brique
9	81	149			*Mudstone with pink dolomite*	*Mudstone* avec dolomie rose

Tableau 34 Données du forage BH9895 issue du portail BGI (Lien).

Water Surveys Botswana et *Aqualogic* (2003, p.10) précisent que :

> *« Le forage BH 9697 [...] semble avoir recoupé un paléokarst profond (> 150 m) (trou de dissolution) remplie d'argile rouge. Sur les six horizons observés dans ces forages, deux se trouvaient dans la saprolite et quatre à la base de la saprolite. Dans le cas de du paléokarst du forage BH 9697, deux horizons profonds (104 et 134 m) se trouvaient à la base d'une épaisse masse d'argile saprolitique rouge (voir terra rossa). L'eau présentait un TDS relativement faible (900) et une RWL élevée de 21,25 m. L'épais remplissage d'argile rouge, de 60 m à au moins 144 m (total de 84 m), situé sous les 60 m de sable, empêcherait certainement toute recharge par voie aérienne. Un scénario plus probable est celui d'une recharge locale par les flancs, via une dolomie vraisemblablement plus siliceuse, qui ne s'effondre pas. Le faible TDS suggère que la dolomie a été largement lessivée hors des zones de recharge adjacentes. Les sables relativement épais recouvrant l'argile semblent compatibles avec un approfondissement progressif du paléokarst et un remplissage en surface. BH 9697 est situé dans une zone particulièrement dépourvue de caractéristiques, d'après l'image satellite disponible. Les sillons, les dunes et les éléments de dégradation n'étaient pas visibles, et il n'y avait aucun signe de karstification dolomitique en surface. Sur le terrain, le site a été sélectionné en raison d'une dépression peu profonde (environ 1 m de profondeur) à la limite des arbres, l'une des deux qui semblent avoir une orientation ENE-OSO (Hunt, com. pers.). BH 9702 a été localisé dans une zone généralement sans relief, essentiellement pour explorer la lithologie. À proximité de BH 9700, on observe des caractéristiques de dégradation orientées NO-SE. BH 9701 se trouve dans une zone où la dégradation précoce du système dunaire a été masquée par les inondations quaternaires du Panhandle (probablement coïncidant avec le remplissage du paléolac Makgadikgadi) ».*

Dans le texte original, l'auteur parle de « doline » pour mentionner ce paléokarst.

4.3.4.5. Ligne de corrélation des forages n°6 passant au nord de Gcwihaba

Le forage n°9892 situé sur la ligne n°6 des cartes ci-contre (Figure 686 et Figure 688) (*Water Surveys Botswana* et *Aqualogic*, 2003, Fig.40) montre la présence de dépôts lacustres à 100 m de profondeur dans la plaine de l'Okavango, depuis la surface à **952 m** d'altitude jusqu'à **852 m** (en bleu sur la Figure 690). Nous verrons que des niveaux lacustres ont aussi été rencontrés à des altitudes similaires, entre **949 m et 883 m**, dans le forage **n°11471A** (Figure 754 p.758) près de la grotte de Gcwihaba et de l'autre côté de la faille de Gumare.

D'autres forages indiquent ces niveaux lacustres en profondeur, principalement des calcrètes, comme :

- le forage **JB1**, de **828 à 723 m** d'altitude, indiquée en bleu sur la Figure 697 ;
- le forage **JB2** de **888 à 716 m** d'altitude (Figure 698) ;
- le forage **JB4**, de **844 à 824 m** d'altitude ;
- le forage **JEB1** de **933 à 918 m** d'altitude (Figure 700) ;
- le forage **JEB2**, de **933 à 915 m** d'altitude (Figure 701).
- le forage **JEB3**, de **915 à 908 m** d'altitude (Figure 702).

Plus loin, nous parlerons de la coupe de Bäumle *et al.* (2019, Fig.1) qui montre des niveaux lacustres en profondeur (Figure 902 p.895).

Dans ces derniers forages, les calcrètes recouvrent directement les roches volcaniques qui traduisent l'ouverture du Rift de l'Okavango. Ce qui montre que les conditions lacustres règnent très tôt sur le territoire.

On remarque aussi la présence du Karoo à la base des forages dans le graben : JB3, JB4, JEB1, etc.

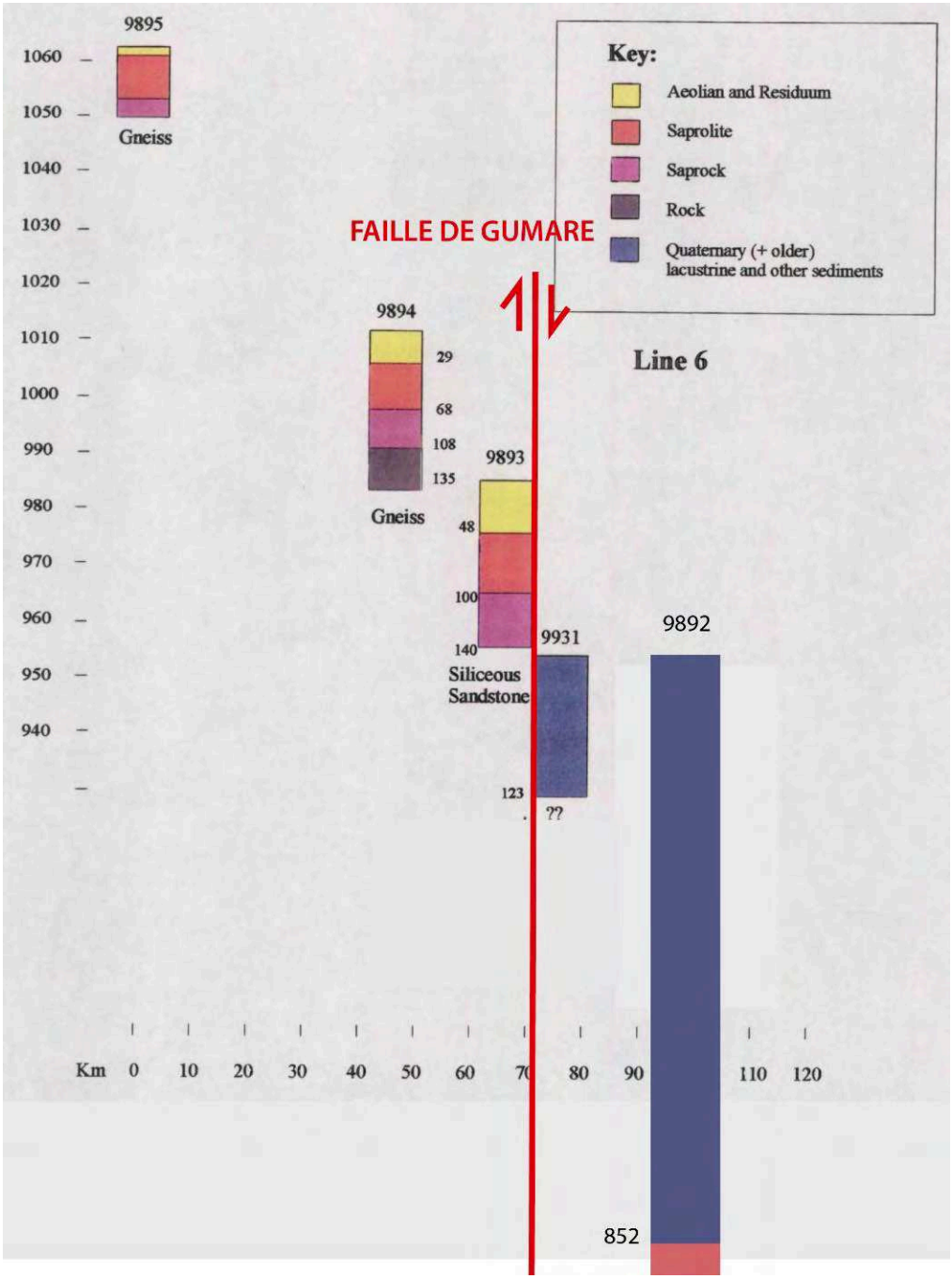


Figure 690 Ligne de corrélation des forages n°6 (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003, Fig.40, modifié).

Remarque :

Une erreur s'est glissée dans la ligne n°6 sur la carte des auteurs (*Water Surveys Botswana* et *Aqualogic*, 2003, Fig.40) : ils ont utilisé le forage n°9867 (Lien) au lieu du forage n°9892. Nous avons corrigé cette erreur (Figure 690).

Water Surveys Botswana et *Aqualogic* (2003, p.12) précisent que :

> *« Les trois premiers des cinq sondages (n°9895, 9894 et 9893) effectués le long de cette ligne ont été forés sur la surface africaine, au-dessus de la faille de Gumare, tandis que les deux derniers (n°9931 et 9892) se trouvent sous la faille, au fond du fossé principal. Dans les trois premiers sondages (n°9895, 9894 et 9893), la profondeur de la surface d'altération basale variait de > 60 m à plus de 140 m. La profondeur du saprolite varie de 48 m à 102 m, augmentant à nouveau en descendant la pente vers l'est. Des deux sondages au fond du fossé, le plus proche de la faille (n°9931) a rencontré un vide au-dessus d'une couche dure impossible à pénétrer. Les 123 m pénétrés étaient des sédiments quaternaires et peut-être plus anciens (lacustres, fluviatiles et équivalents remaniés par l'activité éolienne et littorale). Le forage le plus éloigné de la faille (n°9892) a pénétré 90, voire 112 m, de sédiments similaires. Le doute concernant la profondeur résulte de la « surimpression » de la limite entre sédiments et saprolite par la formation de silcrète. Il semble probable que le matériau dur qui a bloqué le forage dans le forage le plus proche de la faille (n°9931) était ce silcrète. Cela implique que le plancher du fossé est incliné vers le bas, en direction de la ligne de faille. Sous le silcrète du dernier forage de cette ligne, la saprolite continue jusqu'à la base du forage, à 230 m[1]. L'abondance des fragments lithiques résiduelles augmente avec la profondeur, une progression masquée par l'argile saprolitique orange vif qui les recouvre. La saprolite de ce forage a une épaisseur d'au moins 118 m. Des analyses au microscope électronique à balayage et en coupe mince seraient nécessaires pour déterminer correctement la nature de la roche mère, mais à l'état brut, elle apparaît comme un schiste quartzeux. La forte couleur de l'argile saprolitique est compatible avec l'altération d'une roche riche en bases et rappelle fortement la saprolite d'argile rouge de la doline dolomitique de la ligne 2, épaisse d'au moins 84 m et située à l'extrémité ouest de la surface africaine, là où le développement saprolitique est le plus fin. Le site BH 9895 (Lien BGI, Lien Google Maps) a été localisé essentiellement par géophysique, afin d'étudier la lithologie. Il est situé au sommet d'une dune au sud de la rivière Xai-Xai. Il n'y a pas de caractéristiques de dégradation linéaire à proximité. Le site BH 9894, également localisé essentiellement par géophysique, avec l'exploration de la lithologie comme objectif, est situé au sommet d'une large dune plate, également dépourvue de caractéristiques de dégradation linéaire. Le site BH 9893 est situé près du bord de l'escarpement, dans une zone où la morphologie des dunes est mal connue. De petites cuvettes dans des dépressions sont présentes dans toute la zone, qui est fortement boisée. Le BH 9931 est situé sur un terrain plat, généralement sans relief, à environ 2 km à l'est de la ligne de petits bassins qui bordent la base de l'escarpement. Le BH 9892 se situe dans la zone paléodeltaïque, un terrain généralement plat, caractérisé par d'innombrables petits monticules de sable, de très petites dépressions avec bassins et de minuscules cours d'eau. »*

[1] L'indication de cette profondeur du forage à 230 m permet de certifier que l'analyse du forage est bien celle du forage BH9892, alors que sur la figure originale (Figure 690) c'est le forage BH9867 qui est indiqué.

Plusieurs forages ont été réalisés à Gcwihaba et ont été publiés. Ils sont situés sur la surface à 1000 m d'altitude, sur le graben à l'ouest de la faille de Gumare. Le forage n°11471A sera décrit en détail plus loin (p.752).

4.3.4.5.1. Forage n°9895

Ce forage est situé en amont des grottes de Gcwihaba dans la vallée de Gewidum. D'après la carte géologique, il atteint les dolomies de la formation des *Aha Hills*. Le forage atteint à la profondeur de 48 m des gneiss gris clair. Il y a une absence de venue d'eau dans le forage qui descend jusqu'à 57 m de profondeur.

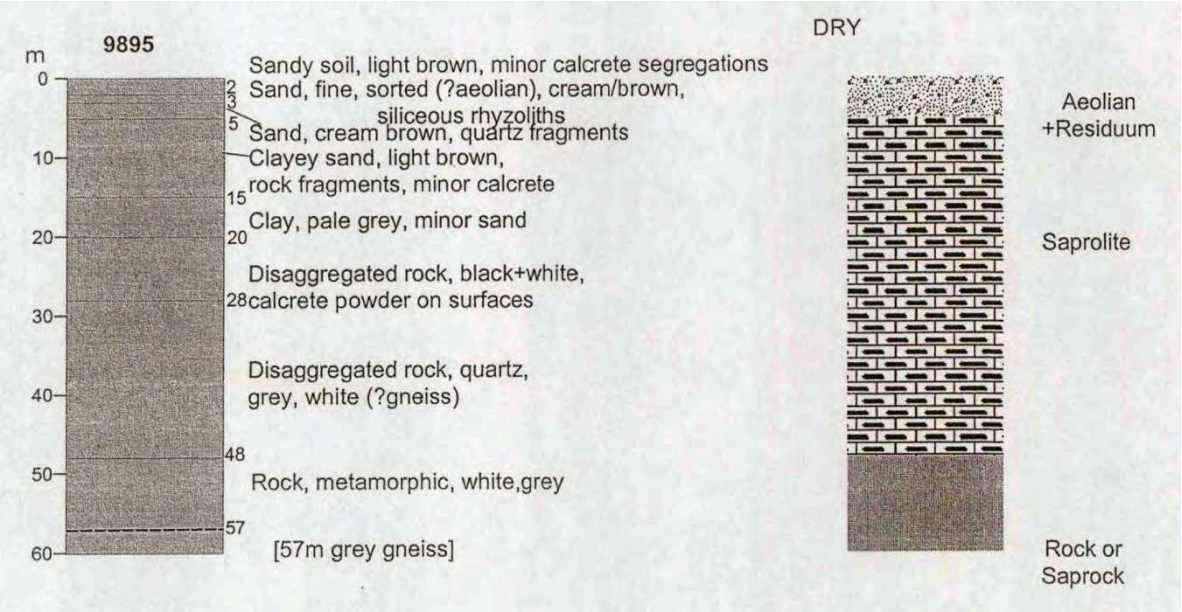


Figure 691 Forage n°9895 (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003, Fig.29)

N°	De (m)	À (m)	De (m MNT JAXA)	À (m MNT JAXA)		Horizon
1	0	2			*Light brown sand*	Sable brun clair
2	2	15			*Light brown fine sand*	Sable fin brun clair
2	15	22			*Light grey fine sand*	Sable fin gris clair
4	22	28			*Creamy weathered sand*	Sable altéré crème
5	28	48			*Light grey quartz*	Quartz gris clair
6	48	52			*Light grey weathered gneiss*	Gneiss altéré gris clair
7	52	57			*Light grey gneiss*	Gneiss gris clair

Tableau 35 Données du forage BH9895 issue du portail BGI (Lien).

4.3.4.5.2. Forage n°9894

Ce forage, localisée sur la Figure 683 (p.680), montre 64 m de sables, divisés en 29 m de sables éoliens puis 35 m de sables altérés. Il atteint la profondeur de 133 m, soit 885 m d'altitude d'après le MNT JAXA, et il n'est pas indiqué la présence d'eau ou elle n'est pas communiquée.

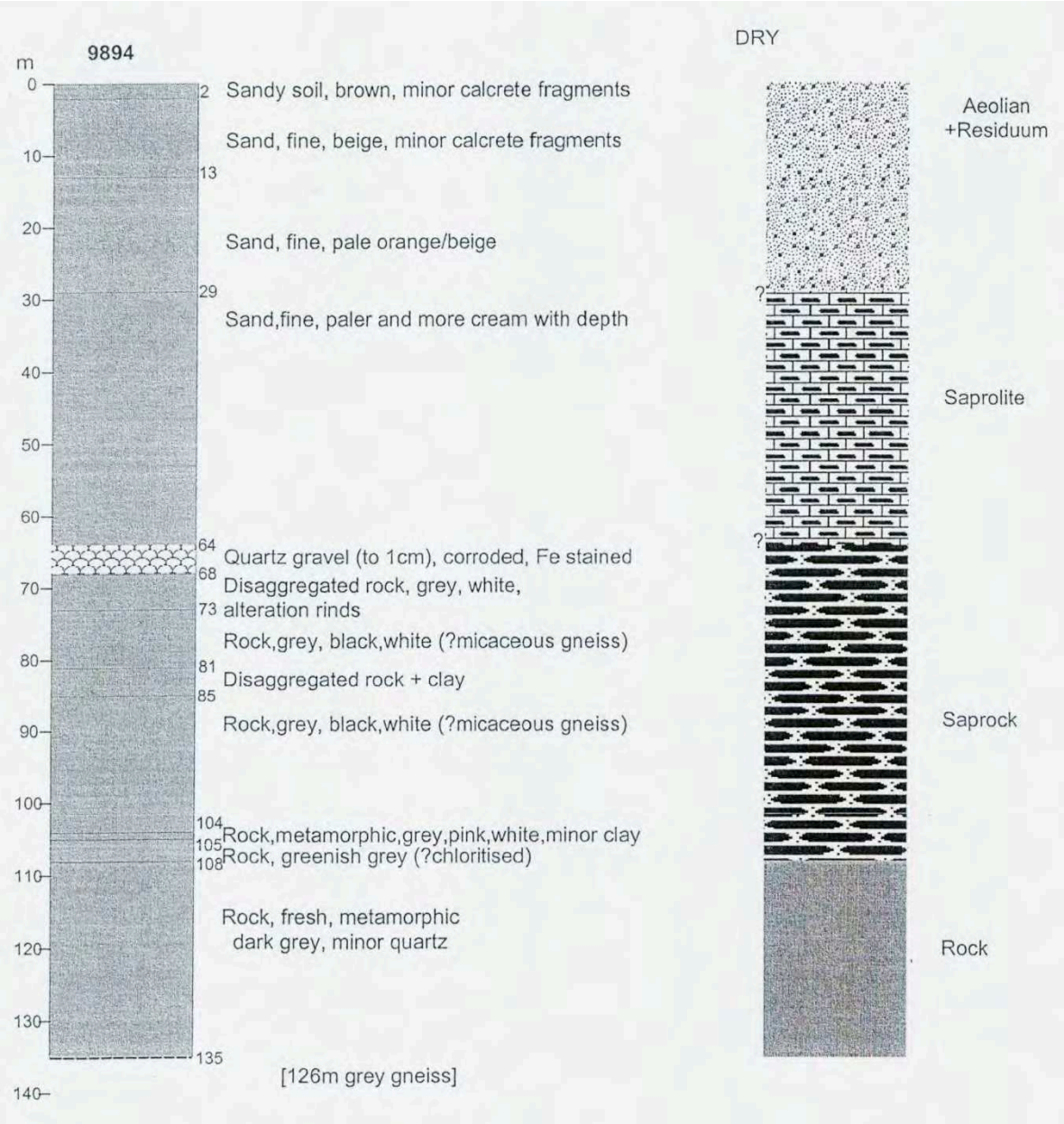


Figure 692 Forage n°9894 (Lien) (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003, Fig.30).

4.3.4.5.3. Forage n°9893

Ce forage montre un remplissage de 100 m de sables avant de rencontrer le substrat composé de quartzites et de calcaires (Tableau 36). Ce forage rencontre une nappe d'eau statique à 103 m de profondeur, soit à 965 m d'altitude (MNT JAXA).

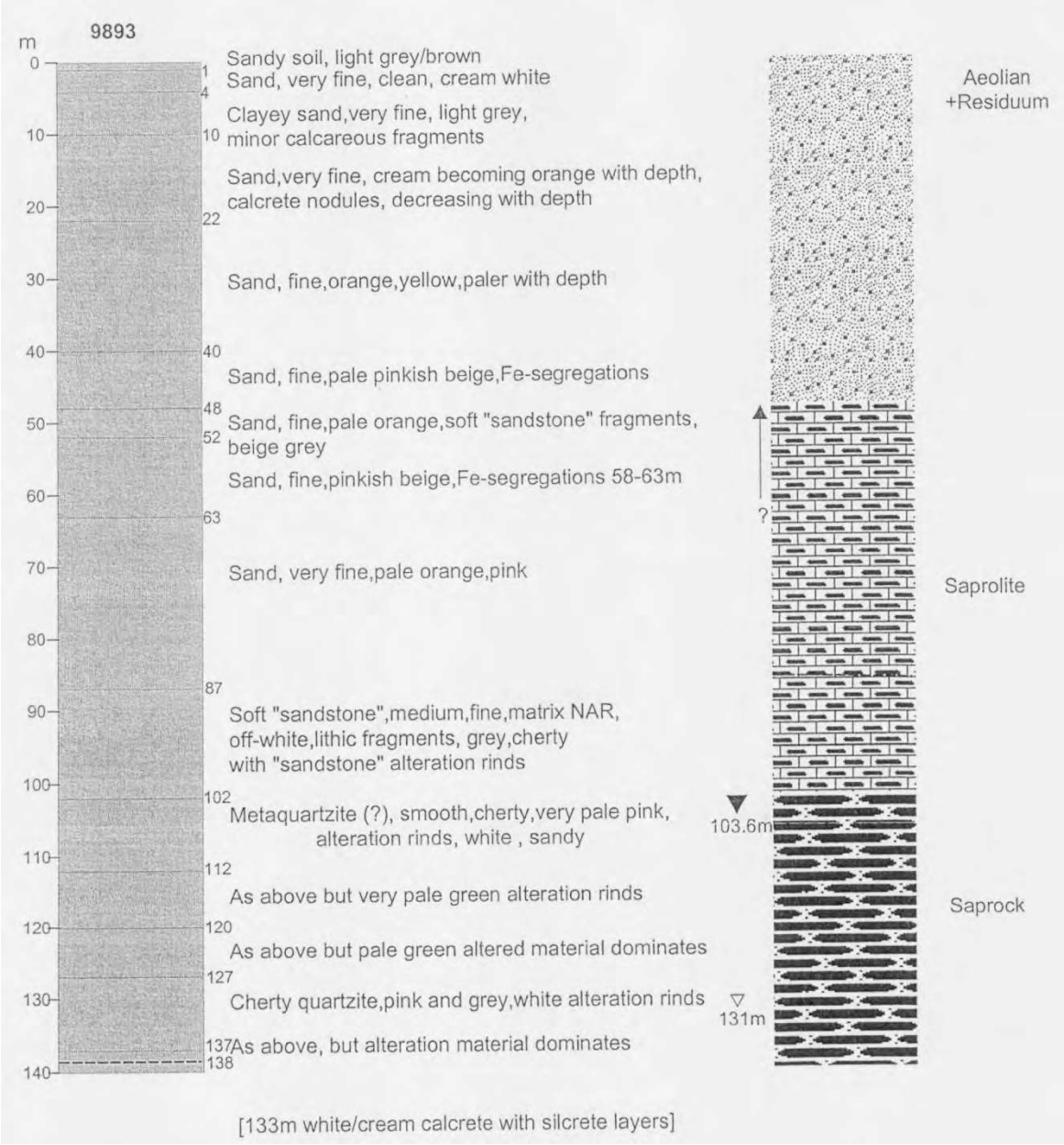


Figure 693 Forage n°9893 (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003, Fig.31).

N°	De (m)	À (m)	De (m MNT JAXA)	À (m MNT JAXA)	Horizon	Horizon
1	0	1			*Brown fine sand*	Sable fin brun
2	1	3			*Creamy fine calcareous sand*	Sable calcaire fin crémeux
2	3	8			*Light brown fine calcareous sand*	Sable calcaire fin brun clair
4	8	17			*Creamy fine calcareous sand*	Sable calcaire fin crémeux
5	17	22			*Ligh brown fine sand*	Sable fin brun clair
6	22	36			*Orange fine sand*	Sable fin orange
7	36	57			*Light orange fine sand*	Sable fin orange clair
8	57	86			*Orange fine sand*	Sable fin orange
9	86	89			*Creamy fine sand*	Sable fin crémeux
10	89	93			*Creamy fine medium*	Sable fin crémeux moyen
11	93	111			*Creamy fine quartzite*	Quartzite fin crémeux
12	111	127			*Creamy to pale green* ***limestone***	**Calcaire** crémeux à vert pâle
13	127	142			*Creamy to pale* ***limestone***	**Calcaire** crémeux à pâle

Tableau 36 Données du forage BH9893 issue du portail BGI (Lien).

4.3.4.5.4. Forage n°9931

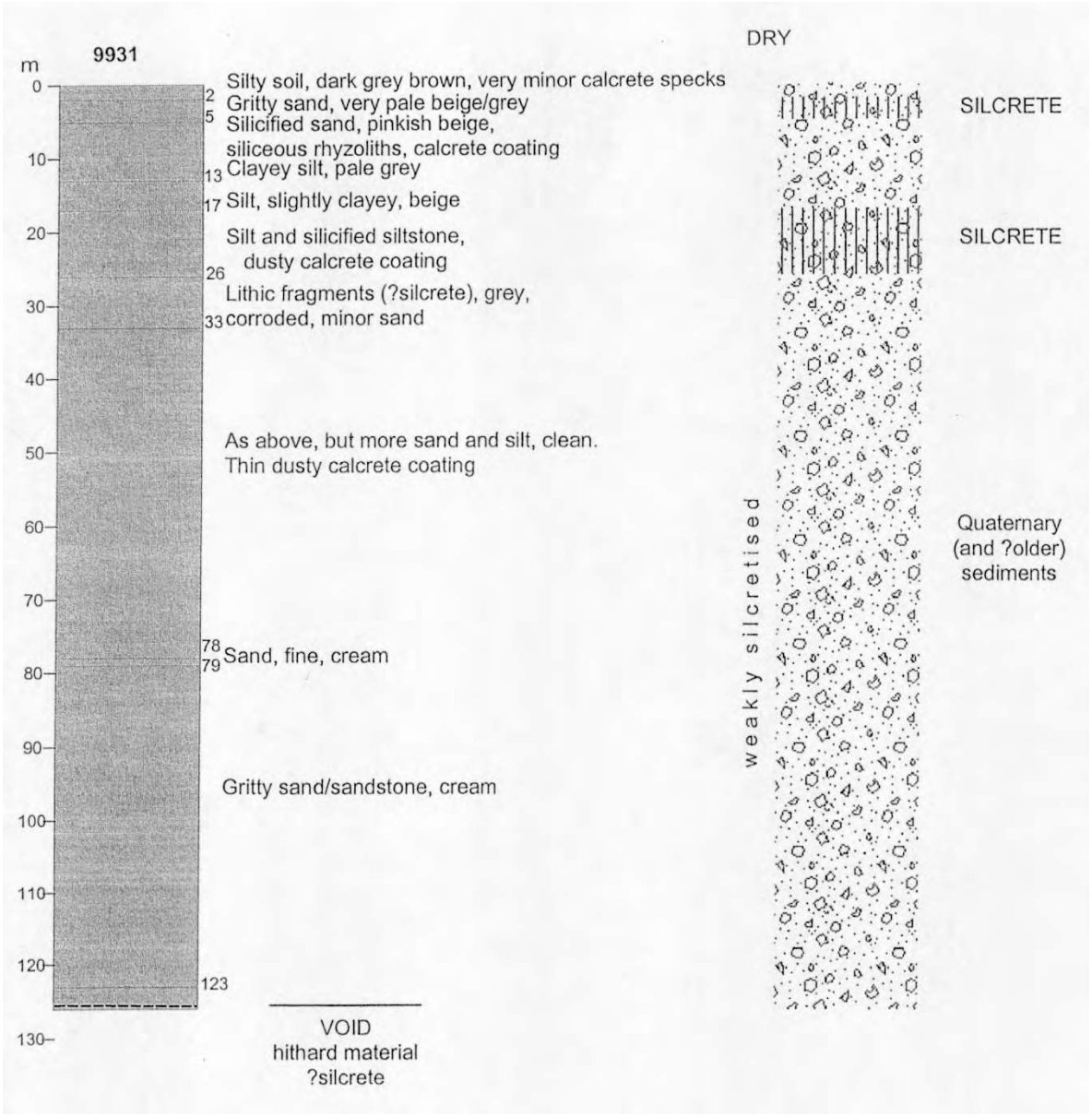


Figure 694 données du forage 9931 (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003, Fig.32).

4.3.4.5.5. Forage n°9892

Ce forage termine la ligne de corrélation n°6. Il a rencontré une nappe d'eau à 147 m de profondeur tandis que la nappe d'eau statique est située à 45.76 m de profondeur (Lien).

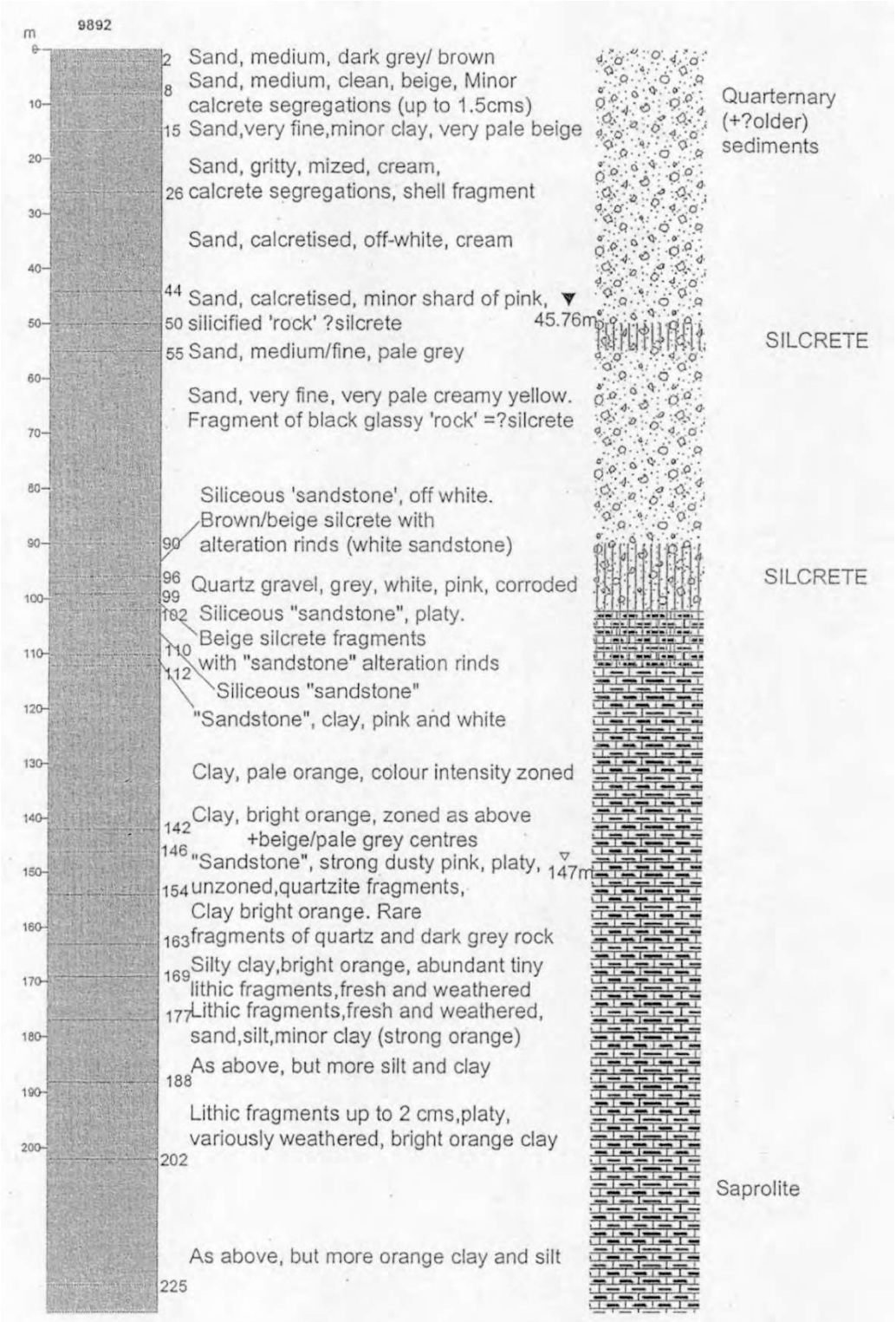


Figure 695 Données du forage BH9892 (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003, Fig. 33).

4.3.4.5.6. Forage n°9867

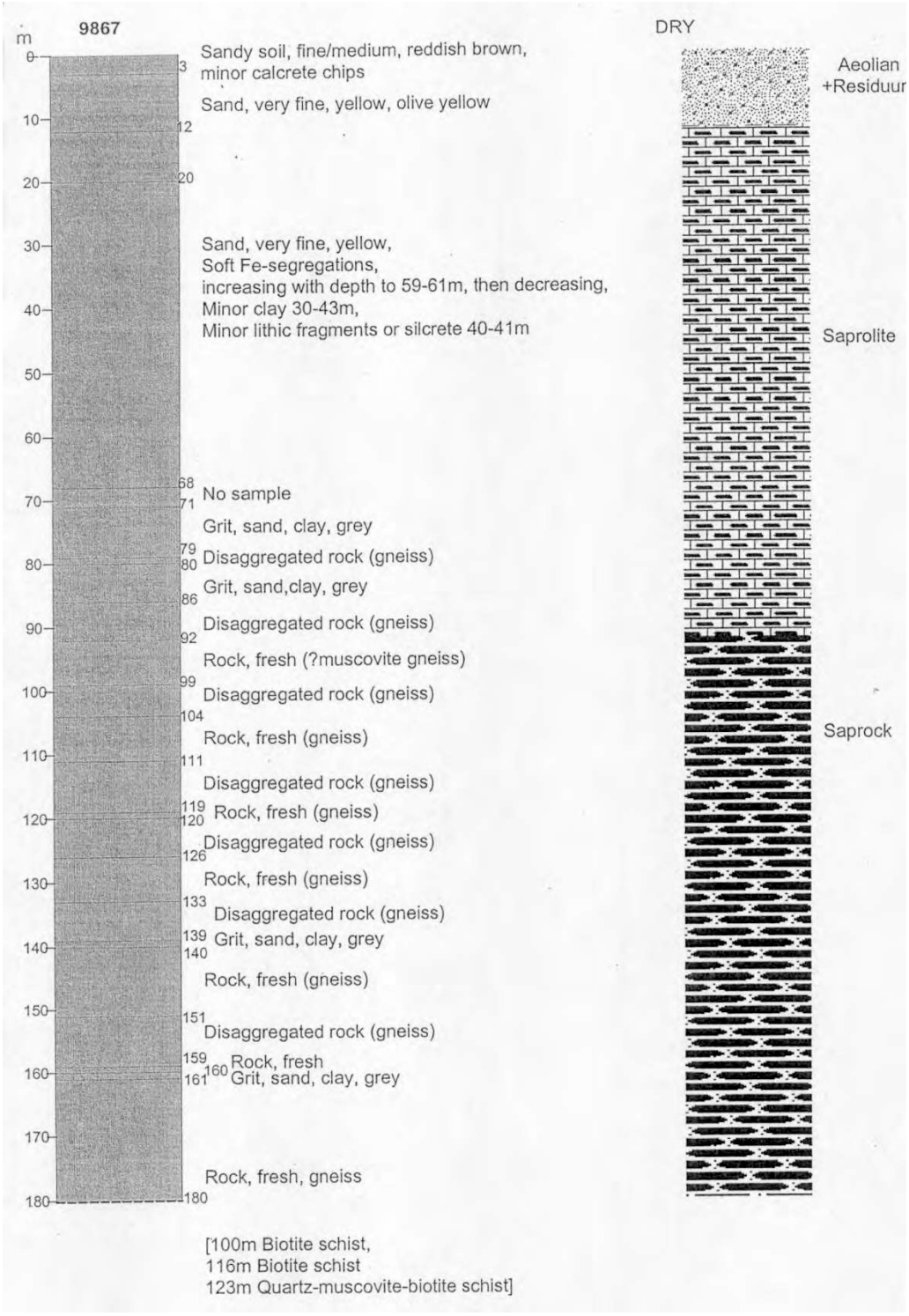


Figure 696 Données du forage 9867 (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003, Fig.28).

4.3.4.5.7. Forage JB1

Le forage **JB1** montre des calcrètes entre **828 et 723 m** d'altitude, indiquées en bleu ci-dessous (Figure 697).

FROM	TO	DESCRIPTION
0		KALAHARI GROUP
0	2	Medium-grained grey sandy soil
2	95	Medium-grained khaki sandy soil
95	110	Fine-grained red aeolin sand
110	117	White soft calcrete/sicrete
117	215	Massive mudstone grading into patchy calcrete/sicrete,
		lamination nearly horizontal. Cross bedding in some places. Lenses of
		fine red-brown sandstone
		E.O.H - Hole abandoned because of short rods!

Figure 697 Forage JB1 (Source : Bruchs, 2008).

4.3.4.5.8. Forage JB2

Le forage JB2 montre presque 200 m d'épaisseur de calcrètes, entre l'altitude de 888 à 716 m, en bleu ci-dessous (Figure 698).

FROM	TO	DESCRIPTION
0		KALAHARI GROUP
0	5	Fine-grained grey sandy soil
5	40	Medium-grained aeolin khaki sand
40	52	Fine-grained red sandy soil, containing minor calcrete.
52	83	Soft white calcrete/silcrete with patches of fine grained red sand
83	115	Soft white calcrete/silcrete , 10 cm thick fine red sandstone lenses
115	224	Massive sandstone, silty lenses towards the top. Interlaminated red mudstones 7 thin green laminae of mudflow.
		Sedimentary structures visible: ripple cross bedding, lamination in some places-horizontal etc.
E.O.H		

Figure 698 Forage JB2 (Source : Bruchs, 2008).

4.3.4.5.9. Forage JB3

Le forage JB3 rencontre des niveaux lacustres entre 90 et 128.8 m, indiqués en bleu dans le Tableau 37 ci-dessous.

FROM	TO	
0	3	Sable quartzeux éolien gris sale
3	14	Sable quartzeux crème, à grains fins
14	17	Comme ci-dessus, mais avec des fragments abondants de calcrète limoniteuse
17	46	Sable quartzeux crème, à grains fins, blanchâtre, légèrement limoniteux
46	65	Sol sableux rouge-brun, à grains fins, quartz ~40 %
65	90	Sable quartzeux fin, brun clair kaki
90	91	Sable calcrètique dolomitique gris, non consolidé, avec silcrète
91	98,1	Calcaire dolomitique massif, dur, blanc terne. Fins niveaux de silcrète.
98,1	128,8	Grès brun millet violet à brun, semi-consolidé, semi-arrondi à arrondi (1–2 mm), quartz 40–60 %, dans une matrice de calcite boueuse. Lentilles occasionnelles de dolomie/silcrète. Valeurs de susceptibilité magnétique très faibles (0,033–0,065 SI). Granoclassé vers le bas : quartzite anguleux (1–10 mm) + dolomie + grès + dolérite mineure dans une matrice de minéraux quartzeux schisteux arrondis. Séquence répétitive. **Environnement de dépôt marin/côtier à haute énergie ?**
128,8	240,6	Mudstones brun rouge, tendres et non consolidés entre 128,8 – 129,7. À la base : quartzite anguleux cassé + grès vert clair + dolomie, galets boueux dans une matrice rouge à grains fins – dépôt en place ?
240,6	243,9	Conglomérat clastique rouge lilas. Galets aplatis de quartzite, minéraux opaques (magnétite, ilménite), dolérite + matériau granitique.
243,9	246,6	Grès argileux rouge brun
246,6	290,8	Conglomérat à matrice sombre. Galets anguleux de quartz + dolérite dans une matrice de quartz sub-arrondi à arrondi, magnétite/ilménite. Cette section alterne avec du grès argileux rouge brun et est cyclique jusqu'au fond du forage.

Tableau 37 Forage JB3 (Source : Bruchs, 2008, modifié).

En bleu, sont indiquées les horizontaux pouvant correspondre à des niveaux de paléolacs.

4.3.4.5.10. Forage JB4

Dans le forage JB4, on trouve des calcrètes entre 844 et 824 m, en bleu (Figure 699).

FROM	TO	DESCRIPTION	SAMPI FROM
0	112.1	KALAHARI GROUP	NO SAMPI
0	1	Dirty, grey quartzose sandy top soil	
1	15	Red buff medium grained aeolian sand	
15	111	Crème, medium grained qurtzose aeolian sand	
111	112	Crème to white calcretic sand	
112	130.5	Hard, light brown calcrete with patches of grey silcrete towards the base.	
130.5	200.8	KAROO SEDIMENTS	
130.5	145.9	Red-brown, pebble supported conglomerate. Qtz (~80%) +dolretie/granite oblate and set in a matrix of millet brown fine rained sand + muddy calcrete. Susceptibilty 0.033-0.082 SI.	
145.9	163.8	Red-brown sandstone. No sedimentary structures visible.	
163.8	174.8	Matrix-supported, red conglomerate.Well-rounded, oblate pebbles of qzt, granitoids + dolomites in a matrix of fine grained shaley sand with <1mm grains of opaque minerals (illminite/magnetite),weathered olivine.	
174.8	187	Millet red micaceous illminite/magnetite bearing sandstone.	
187	200.8	Red-brown medium grained sandstone.	
E.O.H			

Figure 699 Forage JB4 (Source : Bruchs, 2008).

4.3.4.5.11. Forage JEB1

Le forage JEB1 montre des calcrètes entre 933 et 918 m d'altitude, interrompu par des roches volcaniques (d'âges postérieurs ?) (Figure 700).

FROM	TO	DESCRIPTION
0		KALAHARI GROUP
0	2	Fine grained grey sand soil, with humus
2	47.8	Fine grained red sandy soil
47.8	62.8	Massive white soft calcrete/ silcrete; patches of red brown sandstone
		WEATHERED THEOLITIC BASALT
62.8	74	Porphyritic red brown weathered basalt in calcrete spider form. Matix of iron oxides: magnetite, ulvospinel etc.
		Phenocrysyts include green olivine with light green rims probably of pyroxene/ pigionite. Basalt theolitic?
74	176.2	Vesiculated basalt lightweight 'frothy' texture. Rims become more pronounced, but become less towards the base.
		KAROO GROUP
176.2	178.4	Transition zone into the Karoo sandstone. Basal conglomerate, clast supported, well rounded to subangular. Pebbles of quartz , dolomite
178.4	206.8	Red brown sandstone. Sedimentary structures: cross-bedding, ripple marks etc.

Figure 700 Forage JEB1 (Source : Bruchs, 2008).

4.3.4.5.12. Forage JEB2

Le forage JEB2 montre les mêmes niveaux et à la même profondeur, de 933 jusqu'à 915 m (Figure 701).

FROM	TO	DESCRIPTION
0		KALAHARI GROUP
0	2	Dirty grey sandy soil
2	47.8	Fine grained red sandy soil
47.8	65.8	Massive white calcrete/ silcrete, becoming harder with depth
		WEATHERED BASALT
65.8	66	Calcretised weathered red brown basalt
66	80	Evenly grained, granular, fine grained fractured red brown basalt. Groundmass probably containing plagioclase, biotite,
		amphibolite with intestial green alteration assemblage of hornblend, actinolite. White aplitic/ pegmatitic spider veins ~ 4-7cm.
80	119	Green olivine as phenocrysts ~ 2-8 mm with rims of pyroxene/pigionite. Become vesiculated after 89m forming vugs.
119	224.8	Veins become thicker ~ 10cm with red brown iron oxide margins. Extensive alteration along fracture areas. Rock green
		probably due to an assemblage of chlorite-epidote-amphibolite.
E.O.H		

Figure 701 Forage JEB2 (Source : Bruchs, 2008).

4.3.4.5.13. Forage JEB3

Le forage JEB3 montre des calcrètes de 915 à 908 m (Figure 702).

FROM	TO	DESCRIPTION
0		KALAHARI GROUP
0	2	Fine grained grey sandy soil
2	65.8	fine grained red sandy soil
65.8	72.1	White soft calcrete/sicrete
		BASALT
72.1	75	Calcretised red brown basalt
75	122.8	Granular, frctured red brown basalt. Green alteration of olivine to a pyroxene.
122.8	22.8	Alteration become intense with depth. 'Frothy' texture. Iron oxide margins around white pegmatitic veins

Figure 702 Forage JEB3 (Source : Bruchs, 2008).

4.3.4.6. Ligne de corrélation des forages n°7 passant au sud des grottes

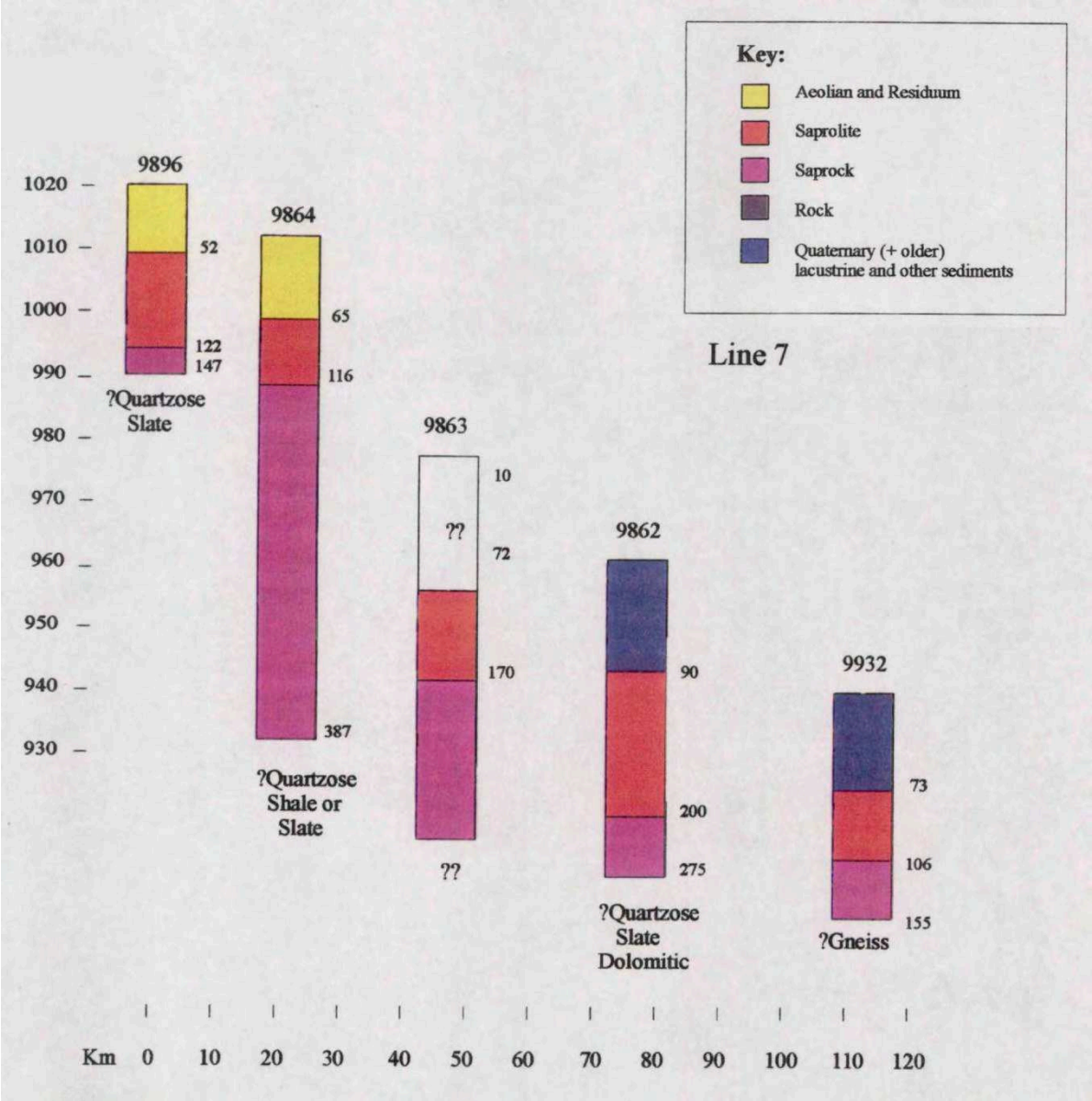


Figure 703 Corrélation altitudinale des forages de la ligne 7 (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003).

Water Surveys Botswana et *Aqualogic* (2003, p.12-13) précisent que :

« Cette série de cinq forages se situe entièrement dans le fossé.
Les échantillons de BH 9863 ont été perdus. Seuls les quatre autres sont décrits ici. La profondeur de la surface d'altération basale est inconnue. D'ouest en est, comme précédemment, elle est supérieure à 147 m dans BH 9896, supérieure à 387 m dans BH 9864, supérieure à 280 m dans BH 9862 et supérieure à 160 m dans BH 9932. Le sommet de la saprolite se situe entre 106 et 204 m sous la surface.
Dans les quatre forages, le sommet de la saprolite est silcrétisé, ce qui rend difficile la détermination de la limite entre la saprolite et les matériaux sus-jacents. Si l'on considère le milieu du silcrète comme limite, les matériaux sus-jacents ont une épaisseur d'environ 50 m dans BH 9896, 65 m dans BH 9864, 80 m dans BH 9892 et 75 m dans BH 9932. Les épaisseurs de saprolite sont donc d'environ 75, 50, 115 et 30 pouces. Il ne fait aucun doute qu'il s'agit de profils d'altération, comme le montrent les progressions typiques. De plus, il est très peu probable que les profils d'altération au nord de la faille disparaissent lorsqu'ils sont abaissés.
La question est : l'altération de quoi ? Karoo ou roches du socle ?
Il faut préciser que l'auteur de cet article ne partage pas les conclusions des autres membres de l'équipe sur cette question. Dans le cas du forage le plus à l'ouest, BH 9896, qui présente l'altération la moins profonde, un échantillon à 149 m a été identifié comme étant du schiste à biotite. Ceci est cohérent avec la nature des fragments lithiques présents dans la saprolite argileuse orange et rose poudré, c'est-à-dire une roche cristalline, finement grenue, siliceuse, grise et blanche. Ces fragments lithiques survivants sont lamellaires, tout comme la saprolite. La fréquence des fragments lithiques augmentant le long du profil de la saprolite, il semblerait qu'il n'y ait aucune raison de supposer que des sédiments du Karoo recouvrent le schiste à biotite.
Dans BH 9864, la saprolite est relativement mince et sableuse. Des fragments lamellaires de « grès » subsistent, interprétés comme de la roche cristalline fortement altérée dans certains cas, mais la silcrétisation de la saprolite rend cette déduction incertaine sans travaux supplémentaires. La très faible quantité d'argile confère à la saprolite des couleurs chaudes – brun rosâtre et brun. En dessous de 116 m, des couches lamellaires de roche cristalline quartzeuse commencent à apparaître, ainsi que de l'argile orange pâle et brun rouille pâle. En dessous, et jusqu'à une profondeur de 387 m, on observe une progression continue, caractérisée par une diminution des produits d'altération sableux et argileux et une augmentation des roches cristallines moins altérées (lamellaires, grises et blanches). Typique des sédiments ou métasédiments comportant des couches de composition différente et dont la réaction à l'altération varie, le degré d'altération est variable. À 145-148 m, par exemple, on observe une couche d'argile rose rouille terne, prise en sandwich entre des roches cristallines quartzeuses altérées. La fracturation est une autre caractéristique du profil qui affecte le degré d'altération. Par exemple, une fracture à 227-230 m est nettement plus altérée immédiatement en dessous. Il en va de même à 366-367 m. L'examen manuel seul révèle que ce profil présente tous les aspects d'un profil d'altération développé à partir d'un métasédiment quartzeux.

Dans le BH 9862, la saprolite est beaucoup plus profonde. L'argile saprolitique commence à 88 m et prend progressivement une couleur rouge orangé plus intense avec la profondeur. De discrets fragments d'argile blanche (kaolinite) subsistent intacts dans les échantillons argileux fortement perturbés. De très petits fragments lithiques gris foncé apparaissent à 113 m et augmentent en abondance avec la profondeur, tous fortement recouverts d'argile de couleur chaude. En dessous d'environ 200 m, la roche saprolitique, dont les fragments lithiques sont plus abondants que l'argile, est cristalline, lamellaire, avec des minéraux de couleur rose, blanc et gris.

Bien que ce matériau ait l'aspect d'un socle rocheux, la question se pose : « Les 112 m d'argile rouge lamellaire sus-jacents sont-ils du Karoo altéré ?» L'argile rouge est trompeuse car elle recouvre tout avec ténacité et doit être lavée pour éliminer les particules rocheuses restantes. Dans le cas de l'échantillon à 113 m (près du sommet de l'argile saprolitique rouge), le résidu était constitué de fragments fortement corrodés de roche cristalline grise, ainsi que de minéraux noirs fortement corrodés atteignant 0,5 mm de diamètre. Des fragments intacts, atteignant 0,5 cm, d'argile saprolitique rouge et blanche ont également survécu. On ne trouve pas encore de traces d'une roche mère saprolitique différente du matériau cristallin altéré de la saprolite.

BH 9932 présente une altération beaucoup plus superficielle. La saprolite quartzeuse, aux cristaux corrodés, anguleux et colonnaires, est mélangée à une argile de couleur beige ou beige verdâtre. À environ 106 m, la saprolite (où les fragments lithiques sont plus nombreux que le sable et l'argile saprolitique) commence. L'abondance de roche plus fraîche augmente avec la profondeur et est clairement cristalline sur un échantillon à main levée, avec des cristaux gris, roses et blancs (gneiss ?). Ces forages n'ont révélé aucune preuve de la présence de roches du Karoo dans le fossé, contrairement à la vision de l'équipe. Il semblerait que La rougeur de la saprolite argileuse et ses structures lamellaires ont conduit à l'hypothèse alternative selon laquelle des roches du Karoo existent. »

4.3.5. Niveau de l'aquifère actuel révélé par les forages

L'aquifère serait continu entre Gcwihaba et Koanaka, selon Ellis (2020), qui précise qu'il s'agit d'une eau fossile et que le bassin versant s'étend depuis les *Aha Hills* jusqu'à l'Okavango. En revanche, l'eau des pans provient directement des précipitations, à l'exception de ceux alimentés par des forages, comme le pan au sud de la colline E de Gcwihaba (p.730) et le pan de Seretse, dont le forage est aujourd'hui hors d'usage. Plusieurs forages révèlent la présence d'une nappe d'eau statique en profondeur. Le tableau 2 proposé par *Water Surveys Botswana* et *Aqualogic* (2003) récapitule les niveaux d'eau dans les forages.

4.3.5.1. Les deux forages pour l'eau potable à Gcwihaba

DeWet Drilling, basé à Gaborone, a réalisé certains des forages de Gcwihaba (Ellis, 2020).Les coordonnées des deux forages productifs en eau nous ont été fournies par Ledimo O. et sont indiquées en annexe (p.1242). Ces deux forages, appelés *Waterbore hole 1* et *Waterbore hole 2*, sont représentés en bleu sur la carte suivante (Figure 704). Les forages indiqués par Ledimo O. et répertoriés en annexe (p.1242) peuvent être mis en correspondance avec les forages répertoriés par le *BGI*. Le *Waterbore hole 1* correspond au forage Z12381 répertorié par le *BGI*. Il atteint 36 m de profondeur (Tableau 33 p.677) tandis que le *Waterbore hole 2* correspond au forage Z12388 répertorié par le *BGI*. Il atteint 77 m de profondeur (Tableau 33 p.677). Nous avons aussi indiqué l'anomalie magnétique identifiée par avion et qui a été forée par le forage n°11471A dont nous parlerons plus en détail plus tard (p.752). Nous avons indiqué la localisation des lignes de gravimétries et d'électro-magnétismes réalisées à Gcwihaba et que nous avons décrit plus haut (Figure 676, p.664). Les lignes en pointillé sont celles n'étant pas complètes et pour lesquelles soit il manque les données électro-magnétiques ou bien les données de micro-gravimétrie.

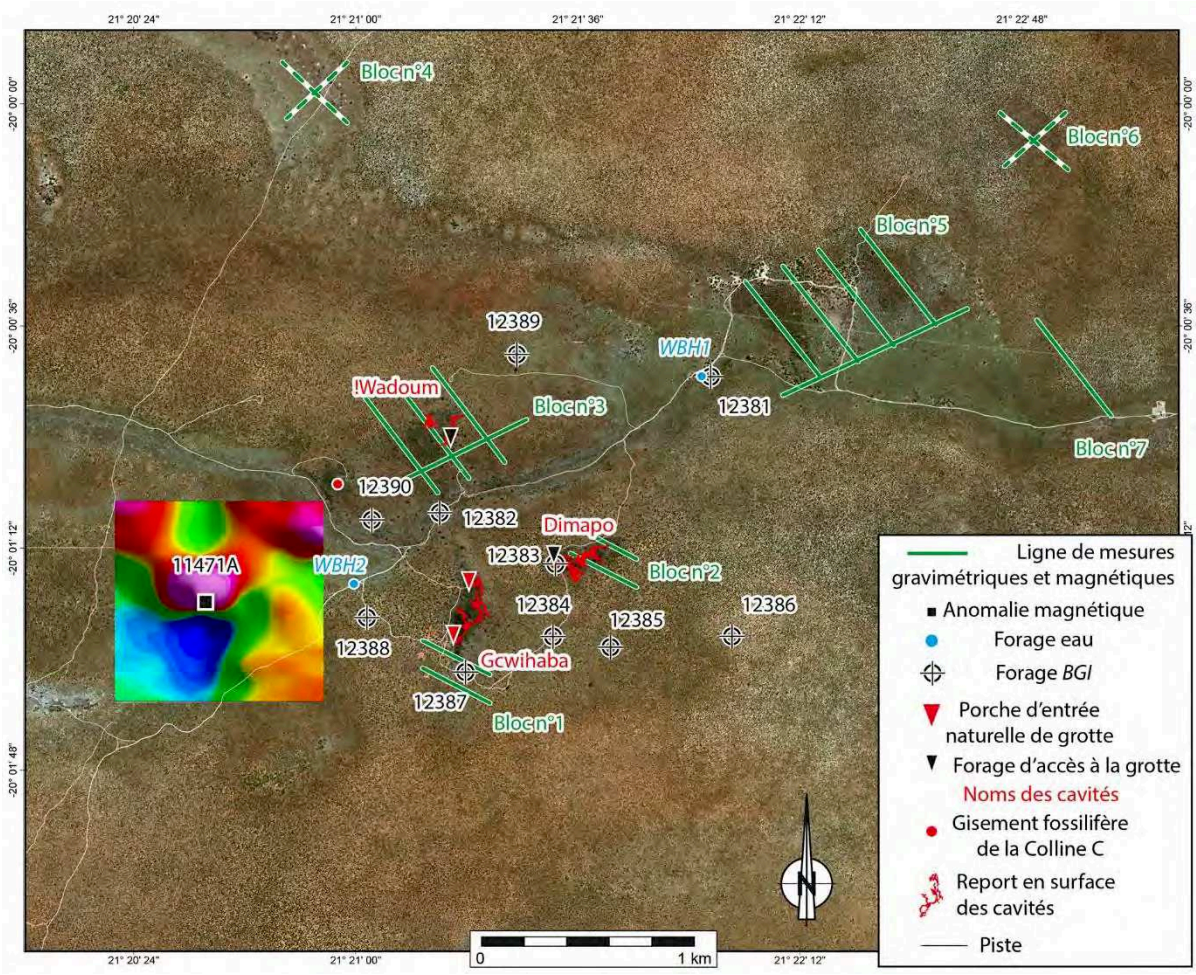


Figure 704 Synthèse des données géologiques (forages, lignes géophysiques, anomalie magnétique) à Gcwihaba Hills.

Nom donné par Ledimo Oatse.	Nom *BGI*	X degrés	Y degrés	X décimaux	Y décimaux	Altitude (m)
Water borehole 1	Z12381	20°0'44.15"S	21°21'56.06"E	-20,01226389	21,36557222	985 m (MNT SRTM3V2) 986 m (JAXA)
Water borehole 2	Z12388	20°1'17.81"S	21°20'59.70"E	-20,02161389	21,34991667	1005 m (MNT SRTM3V2) 1004 m (MNT JAXA)

Tableau 38 Coordonnées des forages en eau (fournis par Ledimo Oatse, géologue du Muséum de Gaborone et indiquées en annexe (p.1242)). Les altitudes sont calculées à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT JAXA).

4.3.5.1.1. Forage Waterbore hole 1

Le géologue du Muséum nous indique que le forage *Waterbore hole 2*, situé à 1005 m. d'altitude, atteint l'eau à 105 m de profondeur (communication orale de O. Ledimo,), c'est-à-dire que le niveau de base actuel est situé à l'altitude de 900 m. Mais si le forage *Water borehole 1* correspond au forage Z12381 répertorié par le *BGI*, il est indiqué qu'il atteint seulement une profondeur de 36 m (Tableau 33 p.677).

4.3.5.1.2. Forage Waterbore hole 2

Le forage *Water borehole 2* correspond au forage Z12388 répertorié par le *BGI*. Il atteint 77 m de profondeur (Tableau 33 p.677).

4.3.5.2. Les forages cités dans Water Surveys Botswana et Aqualogic (2003)

Le tableau 2 proposée par *Water Surveys Botswana et Aqualogic* (2003) récapitule les niveaux d'eau dans les forages.

4.3.5.2.1. Forage BH9893

D'après *Water Surveys Botswana et Aqualogic* (2003, *Table* 2), l'eau est située à -131 m de profondeur, soit à 860 m d'altitude (MNT JAXA).

4.3.5.2.2. Forage BH 9892

D'après *Water Surveys Botswana et Aqualogic* (2003, *Table* 2), l'eau est située à -147 m de profondeur, soit à 804 m d'altitude (MNT JAXA).

4.3.5.2.3. Forage BH 9896

D'après *Water Surveys Botswana et Aqualogic* (2003, *Table* 2), l'eau est située à -123 m de profondeur, soit à 899 m d'altitude (MNT JAXA).

4.3.5.2.4. Forage BH 9864

D'après *Water Surveys Botswana et Aqualogic* (2003, *Table* 2), l'eau est située à -132 m de profondeur, soit à 853 m d'altitude (MNT JAXA).

4.3.5.2.5. Forage BH 9863

D'après *Water Surveys Botswana et Aqualogic* (2003, *Table* 2), l'eau est située à -161 m, -180 et -191 m de profondeur, soit à 805 m d'altitude (MNT JAXA).

4.3.5.2.6. Forage BH 9862

D'après *Water Surveys Botswana et Aqualogic* (2003, *Table* 2), l'eau est située à -72 et -88 m de profondeur dans les silcrètes et les calcrètes. , soit entre 870 m et à 854 m d'altitude (MNT JAXA).

4.3.5.2.7. Forage BH 9932

D'après *Water Surveys Botswana et Aqualogic* (2003, *Table* 2), l'eau est située à -23, -57, -68 et -142 m de profondeur dans les silcrètes et les calcrètes, soit à 934 m, 900 m, 889 m et 815 m d'altitude (MNT JAXA).

4.3.5.3. Les forages de Koanaka Hills

À *Koanaka Hills*, plusieurs forages ont été réalisés au niveau de la colline de K1, permettant la découverte des grottes de *Gecko* et *Diviner's*, du pan de K1 ainsi que du pan de Seretse, situé au sud de K3. Les forages indiqués par Ledimo O. et répertoriés en annexe (p.1242) peuvent être mis en correspondance avec les forages répertoriés par le *BGI*.

Nom donné par Ledimo Oatse	Nom *BGI*	X degrés	Y degrés	X décimaux	Y décimaux
Pines water borehole(no pmu)	Près des forages du pan de K1 : Z21871 et Z21772	20°8'43.35"S	21°10'58.70"E	-20,14537500	21,18297222
Pond with water borehole pump	BHZ14302 le pan de Seretse près de K3	20°11'38.51"S	21°6' 31.91"E	-20,19403056	21,10886389

4.3.5.4. Les autres forages interrogés.

4.3.5.4.1. Forage Z14305

À l'est de Gcwihaba, le forage Z14305 (lien BGI, lien Google Maps) montre 130 m de dépôts sableux et un aquifère à 80 m de profondeur. La tête du forage est située à 977 m d'altitude (MNT JAXA) ce qui fait une nappe d'eau à 897 m.

4.3.5.4.2. Forage du pan de K1 à Koanaka Hills

Le forage BHZ21870 (lien BGI, lien Google Maps) indique la présence d'une nappe d'eau statique à 153 m de profondeur. L'altitude de la tête du forage étant mesurée à 1031 m (MNT JAXA), la nappe d'eau est située vers 878 m d'altitude.

4.3.5.4.3. Forage du pan de Seretse vers K3 à Koanaka Hills

Le forage BHZ14302 (lien BGI, lien Google Maps) au pan de Seretse au sud de la colline K3 à Koanaka indique que l'aquifère est présent à 98,4 m de profondeur. La tête du forage est située à 1024 m (MNT JAXA et SRTMV3) soit à 925 m d'altitude.

4.3.5.4.4. Forage BH9893

Une nappe d'eau statique est présente dans le forage BH9893 (p.694) à la profondeur de 103,7 m, soit à 964,3 m d'altitude (MNT JAXA) (Lien).

4.3.5.4.5. Forage à Xhabe

À environ 25 km à l'est de Gcwihaba, à Xhabe, un forage d'une profondeur de 100 m atteindrait l'aquifère, selon Ritter et Garner (1994b, p.61). Cependant, la présence d'eau dans ce forage n'est pas clairement indiquée sur le site du BGI, pas plus que dans les forages voisins (BHZ12181, BHZ14993 et BHZ17662) profonds aussi de 100 mètres. *Xhaba borehole* est situé à 20°05'50"S et 21°32'13"E (-20, 0972222 ; 21,53694448), d'après la carte de White (2001).

4.3.5.5. Niveau de base à Xai-Xai

Cependant, l'eau souterraine est très proche (< 10 m) de la surface à Xai Xai (Figure 704), à environ 30 km à l'ouest (Ritter et Garner, 1994b, p.61). L'altitude de Xai Xai est de 1110 m (SRTM3v2) donc le niveau de base serait à 1100 m. Le forage BH8993 indique la présence de l'eau à 41,85 m de profondeur, soit à 984 m MNT JAXA. Le forage BH8994 indique 32 m de profondeur, soit à 988 m. Le tableau 2 proposée par *Water Surveys Botswana* et *Aqualogic* (2003) récapitule les niveaux d'eau dans les forages. Il est indiqué que les dolomies affleurent à Xai-Xai, comme sur la carte de *Water Surveys Botswana* et *Aqualogic* (2001, Fig.6) et sur nos cartes (p.1390).

4.3.6. Cartes synthétiques

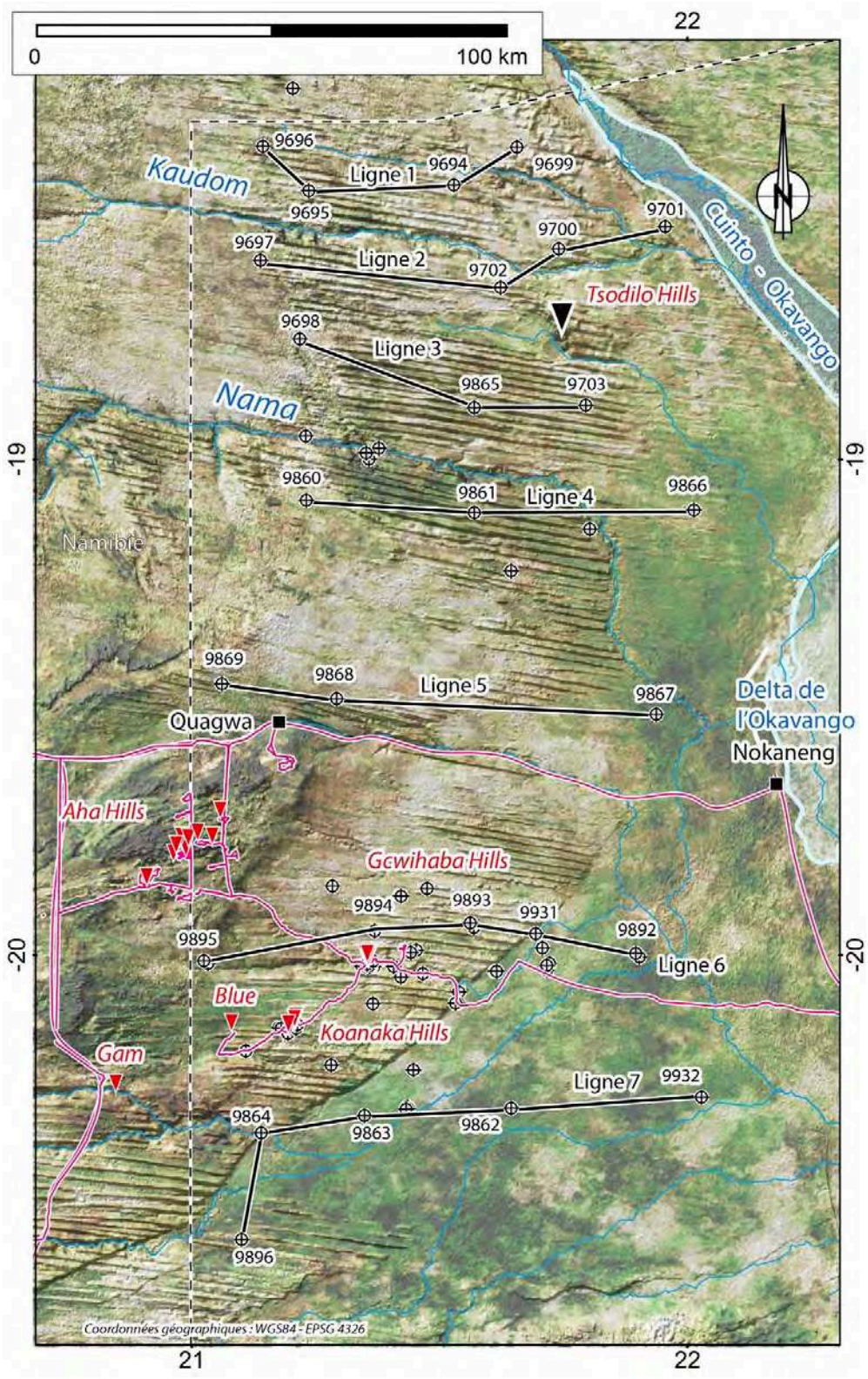


Tableau 39 Altitude de la nappe. Mettre les altitudes et regarder le tableau 2 Water Surveys Botswana et Aqualogic (2003).

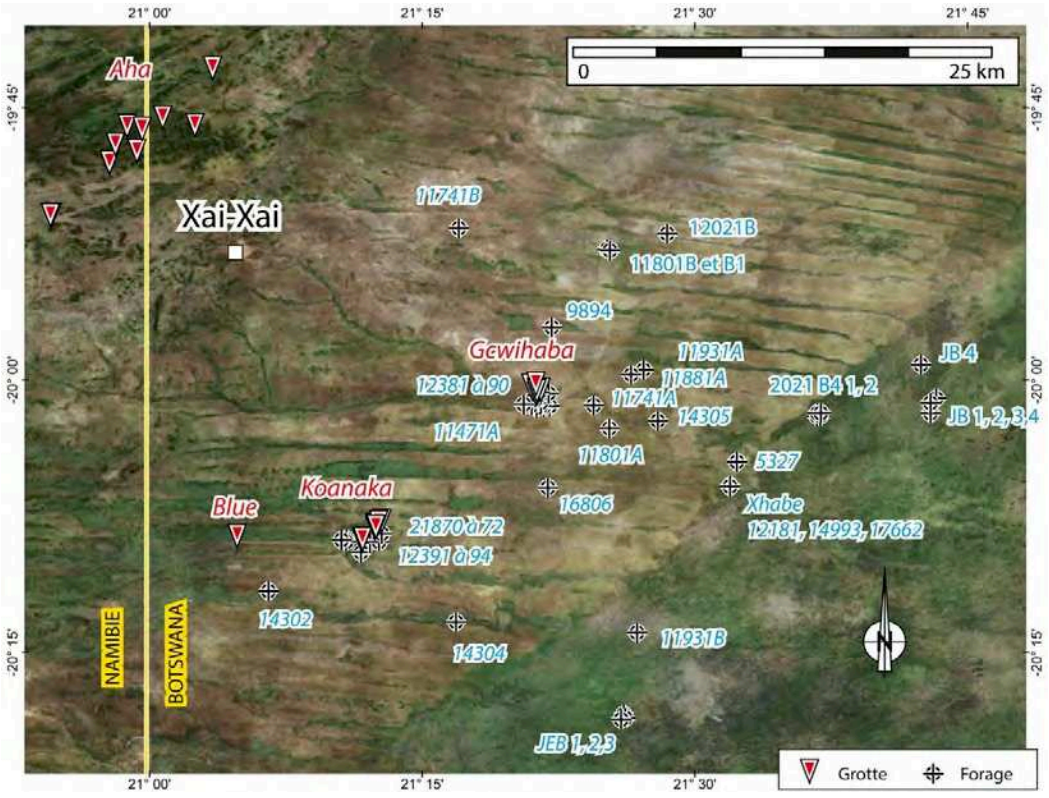


Figure 705 Nom des forages.

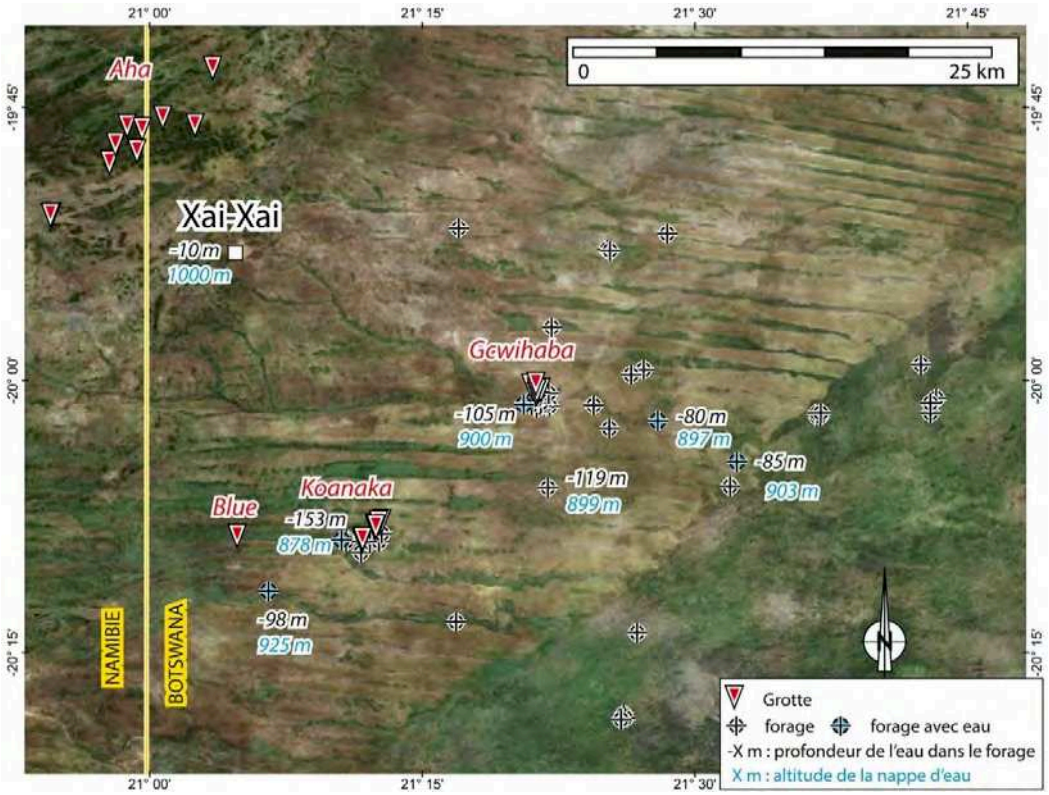


Figure 706 Altitude de la nappe aquifère.

4.4. MISE EN EVIDENCE DE PALEOENVIRONNEMENTS LACUSTRES

Dans cette partie, nous présenterons les arguments en faveur de la présence de paléoenvironnements lacustres et aquatiques à *Gcwihaba Hills* et à *Koanaka Hills*. Nous aborderons ensuite les secteurs de ces régions où de tels paléoenvironnements ont été démontrés : à *Tsodilo Hills* et au lac de Ngami.

Les géologues et paléontologues qui ont étudié cette région (Cooke et Baillieul, 1974 ; Cooke, 1975 ; Pickford et Mein, 1988 ; Pickford, 1990 ; Robbins et al, 1996) ont défini que les cinq niveaux de calcrètes de la vallée de Gewidum, à Gcwihaba, étaient liés à une rivière qui circulaient d'ouest en est. Nous montrerons que ces dépôts seraient plutôt liés à de grandes arrivées d'eau lacustres, transgressifs d'est en ouest, issues de l'inondation du graben du Rift de l'Okavango, lors d'épisodes climatiques humides, en direction de la bordure occidentale (~horst) dolomitique, où se situe les grottes étudiées. C'est le paléolac *Deception*, situé à 995 m d'altitude, et daté entre -2.5 à 1.8 Ma (Cotterill, 2006 ; Mc Farlane et Eckardt, 2008 ; Fierens, 2019, Moore *et al.* 2012, 2022 ; Royer 2020). Cette hypothèse avait été proposée par Ritter et Garner (1994, p.55) :*« La vallée [de Gewidum] était une extension possible d'un plus grand marais du paléo-Okavango »*.

Ensuite, plus tard, lors de la régression ces dépôts lacustres ont été érodés par la rivière qui a creusée la vallée actuelle de Gewidum, longue de 2 km et large de 70 m (p.717). Cette régression à l'origine de la rétraction du paléolac *Deception* au paléolac Makgadikgadi, situé à 945 m, et daté entre -1.8 à 0.8 Ma (Moore et Larkin, 2001 ; Huntsman-Mapila, 2006 ; Burrough *et al.*, 2009) pourraient être à l'origine du débourrage des fantômes de roches dans les dolomies (comme dans le *Cradle of Humankind* en Afrique du Sud (*cf.* Chapitre n°3 p.439) et donc être à l'origine des grottes de ces régions du nord-ouest du Botswana. Nous montrerons que ces cycles de transgressions, régressions liées au climat ont impacté aussi les paysages en surface.

Nous parlerons ensuite d'une régression plus ancienne pourraient être à l'origine de la vallée incisée de Gcwihaba repérée par le forage n°11471A (Mc Donald, 2008) à 125 m de profondeur et qui est comblée de 125 m de puissance de calcrètes (dépôts lacustres ?) et de sables. Nous en discuterons plus loin (p.752).

Nous reconstituons ces paléoenvironnements à partir d'indices géologiques (Cooke et Baillieul, 1975 ; Cooke, 1975 ; Ritter et Garner, 1994 ; Mann et Ritter, 1995 ; Robbins *et al.*, 1996) et géomorphologiques (surfaces planes conservées dans les paysages actuels) et paléontologiques par l'étude des fossiles trouvés dans les brèches ou dans les remplissages des grottes comme à *Bone Cave* ou bien en surface au niveau d'anciennes grottes trépanées par l'enfoncement de la surface topographique, comme la Colline C de Gcwihaba où ces brèches sont datées entre -3.2 à -2.6 Ma (Pickford et Mein, 1988, p.1682). Nous discuterons de ces âges et présenterons les résultats de nos fouilles archéologiques récentes (Fourvel *et al.*, 2024 ; Fourvel *et al.*, sous presse).

Les arguments, que nous présentons, sont de plusieurs types :

-des **morphologies du paysage** (formes) mises en évidence par les analyses géomorphologiques réalisées à l'aide des outils SIG et à partir des données satellites, tels que les **anciens rivages** du paléolac Makgadikgadi, signalés à 945 m d'altitude par Mc Farlane et Eckardt (2008) (Figure 843 p.818) ou encore les **vastes surfaces d'érosion** (paléopans) laissées par l'eau circulant entre les collines (par exemple à Gcwihaba, où la vallée de Gewidum a entaillé sur 7 m des calcrètes sub-horizontales correspondant à un paléolac) et entre certaines dunes de sables linéaires déjà établies. En effet, certaines portions de ces dunes apparaissent érodées ou interrompues dans leur linéarité par la présence d'eau qui en a empêché le dépôt. Ces formes correspondent à des surfaces de ravinement transgressif ou tidal, et peut-être à un sapement de la base des collines par l'action conjointe du vent et des vagues, ce qui reste encore à démontrer clairement sur le terrain mais dont les indices sont la dissymétrie des collines, la présence de trottoirs sur les versants ;

-des **formations sédimentaires** lacustres, ou liées à la présence de vastes étendues d'eau, rencontrées sur le terrain et traversées par forages. Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975) ont identifié et cartographié des calcrètes coquilliers à Gcwihaba. Elles ont été réétudiées par Robbins et al. (1996) qui y ont déterminé la présence de foraminifères benthiques révélant la présence d'eaux profondes (lacs). Nous avons découvert la présence d'autres calcrètes coquilliers au pied de la colline de K1 et d'autres encore au pied de celle de K2 à Koanaka. Nash (1992, p.184) mentionne quant à lui des pans lacustres et la « présence de diatomées fixatrices de silice (Passarge, 1904 ; Du Toit, 1954) ainsi que de matériaux coquilliers susceptibles de constituer une source potentielle de croûte dure » ;

-des fossiles trouvés dans les **remplissages des grottes** que nous fouillons. Certains de ces gisements paléontologiques se situent aujourd'hui à l'air libre du fait de l'érosion des grottes par la surface topographique ;

-de très grands volumes de **concrétionnements** (spéléothèmes) observés dans les grottes, comme dans la grotte de Gcwihaba et dans la grotte de *Bone Cave* à Koanaka. Ils indiquent un environnement plus humide que désertique.

4.4.1. Mise en évidence d'un paléoenvironnement lacustre à Gcwihaba à 995 m d'altitude

Plusieurs arguments vont en faveur de la présence de lacs, ou du moins, de vastes étendues d'eau, au pied des collines de Gcwihaba, très probablement liées à des conditions climatiques pluviales passées qui ont provoquées l'inondation du graben du Rift de l'Okavango et des transgressions sur la bordure occidentale (~horst) où se trouve Gcwihaba.

Ce sont :

- des **morphologies du paysage** (**formes)** particulières, ce sont de vastes surfaces planes, appelées paléopans, « straats » ou encore « vleys » qui sont situées en amont et en aval de la vallée de Gewidum à Gcwihaba et visibles en violet sur la Figure 742 (p.740) et Figure 767 (p.771) ;

- des **formations sédimentaires** spécifiques comme des calcaires coquilliers (planorbes) et des calcaires contenant des diatomées benthiques (Robbins et al. (1996)) que l'on retrouve au niveau des paléopans décrits précédemment ;

- la présence de l'**étagement des galeries** de cavités autour de 1006 m d'altitude et le **fort concrétionnement** dans la grotte de Gcwihaba. Nous décrirons notamment l'organisation des réseaux karstiques et nous ferons le lien avec la vidange des fantômes de dolomies *per descensum* (*cf.* Chapitre 3) pendant les phases régressives des paléoniveaux de base de l'Okavango.

4.4.1.1. Par les formations

Les dépôts sédimentaires et les lithologies rencontrés sur le terrain mettent en évidence un paléoenvironnement lacustre au pied des collines de Gcwihaba. Notamment, un niveau de calcrète riche en diatomées, d'après Robbins *et al.* (1996), et daté du Pléistocène (11 430 ± 60 ans BP (^{14}C)) (**Gasse (1986) et Patrick et Reimer (1966, 1975)** *in* Robbins *et al.*, 1996) (Figure 714). Ce qui correspondrait à l'*OCH* (Optimum Climatique Holocène) vers 9000 à 6000 ans BP (Leroux, 1996, p.223). Nous verrons que ces datations sont controversées par Moore *et al.* (2012) et que ces dépôts pourraient être bien plus anciens.

4.4.1.1.1. La vallée de Gewidum à Gcwihaba est creusée dans des calcrètes subhorizontales

Depuis le secteur de Gcwihaba, on remonte le talweg de Gewidum pour rejoindre le village de Xai-Xai. Cooke (1975) décrit *« une vallée étroite, alignée ouest-est, et ressemblant à une gorge là où elle traverse les collines de Gcwihaba. Elle présente une nette augmentation de pente contrastant avec le reste de la vallée qui est large et ouverte avec une pente très faible »*. Le passage étroit entre les collines est long de 2 km et large de 70 m. Le fond du talweg culmine à 990 m d'altitude (MNT JAXA). Le talweg incise 4 niveaux de calcrètes sur une hauteur de 7 mètres (Cooke, 1975) (Figure 707 à Figure 741) comme l'indique la carte géologique levée par Baillieul (Cooke et Baillieul, 1974; Cooke, 1975) (Figure 741 p.739) et fournie en annexe (p.1302). Les niveaux les plus anciens, les calcrètes 1 et 2 correspondent à des formations à brèches (forte énergie), tandis que les calcrètes 3 sont des calcrètes massives et subhorizontales et enfin les calcrètes 4 contiennent de nombreuses coquilles (faible énergie), comme le synthétise la Figure 739 (p.736).

Remarques :

Gewidum est parfois écrit Kihabedum par Wayland (1944) ou *Xihabedum* et *Xihabe dum* par Bent (1954) ou Gcwihabedum. Mann et Ritter (1984b, 1995) évoque *Gcwihaba fossil river*. Cooke et Baillieul (1974) parle de la rivière Kwihabe qui a incisé les dolomies.

PLANCHE PHOTOGRAPHIQUE DES VERSANTS EN CALCRÈTES DE GEWIDUM À GCWIHABA

Nom	X degrés	Y degrés	X décimaux	Y déc.	Altitude
Calcrètes 3 et 4	20° 1'2.40700"S	21°21'28.673999"E	-20,0173353	21,357777	994 m (JAXA)

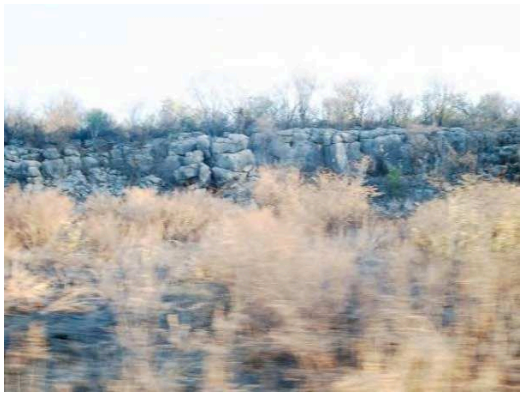


Figure 707 Versant de la vallée de Gewidum constitué de calcrètes subhorizontales karstifiées.



Figure 708 Détail des calcrètes sub-horizontales entaillées de diaclases concrétionnées et occupées par les porcs-épics.



Figure 709 Analyse du talweg de Gewidum à Gcwihaba (Source : Auriol P.).

Les grottes de Gam, situées plus à l'ouest, en Namibie sont creusées dans des roches similaires et présentent un contexte identique (comm. orale Laurent Bruxelles). Marais (1990) indique qu'à Gam qu'il y a bien de petites cavités dans les calcrètes et des grottes plus grandes dans les dolomies du sous-groupe de Tsumeb au niveau d'Omuranda.

1. Carte géologique de Baillieul de 1974 et 1975

La piste qui traverse le fond de la vallée de Gewidum entre les collines karstiques permet d'observer les versants du talweg, de sept mètres de hauteur, creusés dans quatre niveaux de calcrètes décrits et cartographiés par Baillieul (Cooke et Baillieul, 1974, Fig.3 ; Cooke, 1975, Fig.3), (Figure 741 p.739 et en annexe p.1302). Nous avons ajouté à cette carte (Figure 710) les forages et les réseaux karstiques.

Les plus anciens niveaux (calcrètes 1 et 2) contiennent des brèches. On trouve ensuite des niveaux subhorizontaux, les calcrètes 3 et enfin les calcrètes 4 qui contiennent de nombreuses coquilles (calcrètes 4). Enfin le sommet est constitué de silcrètes (calcrètes silicifiées). Nous allons maintenant décrire ces niveaux en détail.

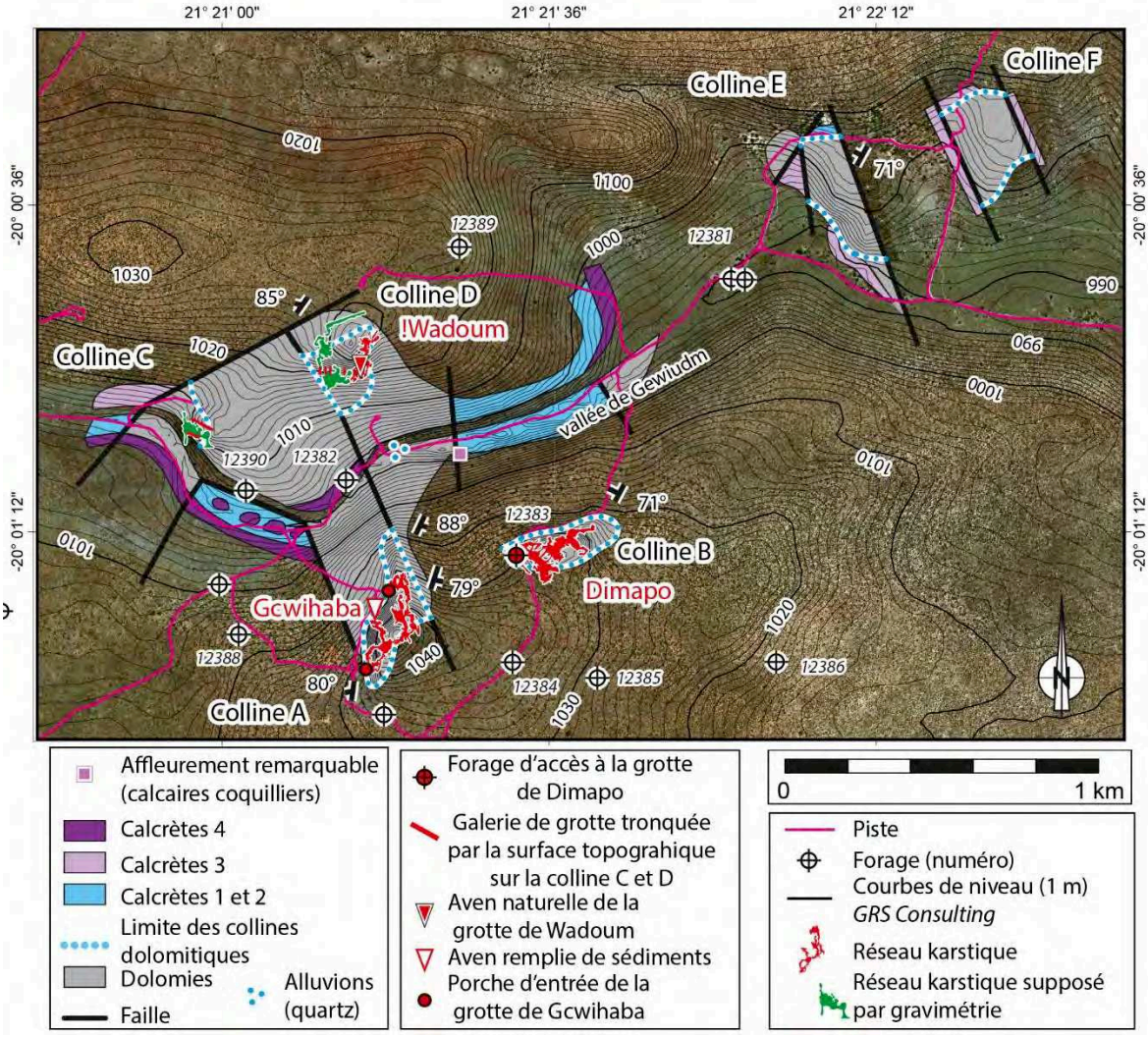


Figure 710 Carte géologique (vectorisée et géoréférencée) de Gcwihaba d'après Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975).

Les versions originales de 1974 et 1975 sont fournies en annexe (p.1302). Une version de cette carte est disponible à une échelle plus grande (p.739).

2. Les calcrètes 1 et 2

Les articles de Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975) puis l'article de Robbins *et al.* (1996) décrivent longuement ces niveaux de calcrètes.

Descriptions des calcrètes 1 et 2

Cooke et Baillieul (1974) décrivent que les deux premiers niveaux de calcrètes, les calcrètes 1 et 2 sont de couleur *« jaune chamois clair »* et que ce sont des niveaux *« identiques et très similaires »*. Ce sont des *« bancs massifs séparés par une fine couche de gravats. Cette couche de gravats est de même composition que les unités massives* (donc des calcrètes) *et indique une période d'érosion entre la formation des calcrètes 1 et 2 »*.

À la base du versant de Gewidum, à Gcwihaba, nous avons retrouvé ces brèches (Figure 711 à Figure 712) qui appartiennent aux calcrètes 1 et 2 définies par Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975).

Les clastes sont minéralisés (les parties sombres de la photographie Figure 712) et altérés en surface (parties rougeâtres Figure 712) tandis que le ciment est clair. Ce sont des brèches non karstiques, mises en place dans un environnement de haute-énergie (transgression lacustre ?).

« La portée de ces vents dans le bassin lors d'événements de haute hauteur du lac aurait été d'environ 150 km, ce qui aurait été suffisant pour générer une quantité importante d'énergie houlomotrice (Cooke et Verstappen, 1984 *in* Burrought *et al.*, 2009, p.1394). »

Cooke et Baillieul (1974) précisent que *« ces calcrètes ont été silicifiées, on trouve la présence de silice sous forme de veines et de plaques, probablement survenue lors d'une période très aride. Les calcrètes 1 et 2 recouvrent directement les dolomies, bien que le contact n'ait jamais été observé. »*.

Cooke (1975) précise *« qu'elles se présentent en lits massifs formant une falaise de 7 m de haut le long du versant sud de la gorge et, de façon moins visible, également le long de son versant nord. Elles sont séparées par une bande de gravats, probablement le résultat d'une période d'érosion après le dépôt des calcrètes 1 et avant le dépôt des calcrètes 2. Les grains de sable extraits de ces calcrètes par dissolution dans l'acide chlorhydrique étaient généralement arrondis à subangulaires. Ces unités semblent être des remplissages de vallée calcifiés, ces derniers présentant des caractéristiques de sable éolien, tout comme les matériaux de fond de vallée meubles actuels. La présence de calcédoine se formant le long des fractures et dispersée en bandes et en plaques dans les unités indique une silicification du calcrète postérieure à sa formation. Sur la surface exposée du calcrète, des structures karstiques mineures se sont développées »*.

Nous pensons en avoir aussi des calcrètes 1 et 2 sur la colline de K2 à Koanaka, à la base de la séquence que nous fouillons (Figure 817 p.799).

PLANCHE PHOTOGRAPHIQUE DES CALCRÈTES 1 ET 2 DES VERSANTS DE GEWIDUM À GCWIHABA

Nom	X degrés	Y degrés	X décimaux	Y décimaux	Altitude
Calcrètes 1 et 2	20° 1'3.54399"S	21°21'25.974" E	-20,0176511	21,35694444	994 m (MNT JAXA)



Figure 711 Calcrètes 1 et 2, définies par Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975), et retrouvées au niveau du versant de Gewidum à Gcwihaba le 01/12/2024.









Figure 712 Même échantillon observé après cassure. Les clastes sont minéralisés (parties sombres) et altérés en surface (parties rougeâtres).

3. Discussion sur l'origine des brèches des calcrètes 1 et 2

Deux origines des brèches sont envisagées : (1) une origine tectonique ou (2) une origine liée à des transgressions lacustres.

L'hypothèse tectonique

Cooke et Baillieul (1974) privilégient l'hypothèse tectonique *: « les calcrètes sont affectées par des failles orientées NE-SO, qui pourraient être associées à la faille du Rift de l'Okavango »*. Selon eux, *« la faille reliant les collines de la grotte de Gcwihaba et la colline de la grotte de Wadum est à l'origine du soulèvement des collines du secteur »*. Ils précisent que *« des failles ont tronqué les calcrètes, poussant localement la dolomie vers le haut »*. Ces failles postérieures tronquent les calcrètes 1 et 2 et *« ont fait affleurer des blocs de dolomies à la surface. Les collines E et F se sont probablement formées à cette époque. Ces blocs faillés sont caractérisés par la présence de zones de brèches de trois à six mètres de large, contenant des fragments de dolomie et de calcrètes 1 et 2, cimentés par la calcrète 3. La phase tectonique la plus récente tronque la calcrète 3 et a également soulevé des blocs de dolomie. La colline C et le bloc au nord-ouest de la colline E se sont formés pendant cette phase. Les failles orientées NE-SO pourraient être associées à la faille du Rift de l'Okavango. Le talweg (pour les auteurs, la rivière Gcwihaba) suit l'une de ces failles à l'ouest de la colline A. De nombreuses fissures donnent un aspect fracturé aux collines. La direction dominante de ces fissures est est-ouest. La calcrète 3 a cimenté les fissures affectant les collines et les pentes les plus basses, mais pas celles situées aux altitudes plus élevées »*.

L'hypothèse de la transgression

L'origine des brèches pourrait être liée à une transgression lacustre. Nous considérons que le graben du Rift de l'Okavango est occupé par un lac profond d'une quarantaine de mètres (de 1000 m d'altitude à l'altitude actuelle de la plaine de l'Okavango, 970 m, en contrebas de la faille de Gumare). La transgression commence par une phase d'érosion et d'aplanissement identifiée comme les vastes paléopans ou *« straats »* sur nos cartes (Figure 500 p.531 ; Figure 598 p.602 ; en violet sur la Figure 838 p.814 et la Figure 739 p.736 et la Figure 740 p.738 ; Figure 742 p.740 ; Figure 771 p.775 et Figure 774 p.778, etc.), puis par le dépôt de brèches sur cette surface, ici ce sont les calcrètes bréchifiées dont les clastes sont des calcrètes encore plus anciennes, que nous venons justement de décrire : les calcrètes 1 et 2 de Cooke (1975), « *séparés par une fine couche de gravats. Cette couche de gravats est de même composition que les unités massives* (donc des calcrètes) *et indique une période d'érosion entre la formation des calcrètes 1 et 2 »*. C'est la surface de ravinement que nous venons de décrire. Ces deux éléments, la surface et les brèches, traduisent un phénomène géologique appelé **ravinement transgressif** (Homewood, Mauriaud et Lafont, 2000), ***wavecut surface***, ***tidal surface*** ou **surface de ravinement** (Catuneanu et Eriksson, 2002 au sujet de la formation Rooihoogte, décrite dans le Chapitre n°2 p.259). Ce sont des surfaces d'érosion mécanique subhorizontales laissées sur les roches dures par la dynamique des transgressions. Nous verrons que cette seconde hypothèse nous paraît la plus probable du fait que nous savons que la **spéléogenèse des réseaux karstiques** de Gcwihaba et de Koanaka **est liée à la fantômisation** et non à la tectonique comme indiquée par Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975). De plus, la spéléogenèse par fantômisation est liée à la chute du niveau de base comme nous l'avons décrit dans le Chapitre 3 (p.421) et au niveau des schémas (p.439).

4. Les calcrètes 3

Cooke et Baillieul (1974) décrivent que : *« les calcrètes 3 sont associées à l'écoulement des eaux de la rivière Gcwihaba, aujourd'hui asséchée. **Des fragments** de ce calcrète montrent d'anciens graviers fluviaux enchâssés dans une matrice calcaire. Les zones de fractures et les couches de gravats réparties sur les collines sont cimentées par un matériau calcaire corrélé au calcrète 3 ». « Le calcrète 3 se trouve sur les basses terrasses des flancs de la vallée et est composé de galets polis de dolomite, de **quartz** (comme ceux que l'on a trouvé Figure 713) et de roches métamorphiques enchâssés dans une matrice calcaire gris clair »* (Cooke, 1975). En fait, c'est complexe car Cooke et Baillieul (1974) indiquent que : *« les blocs faillés à Gcwihaba sont caractérisés par la présence de zones de brèches de trois à six mètres de large, contenant des fragments de dolomie et de calcrètes 1 et 2, cimentés par la calcrète 3*.

Les alluvions dans la vallée de Gewidum

En 2022, nous avons trouvé des alluvions allochtones de quartz blanc dans la vallée de Gewidum à l'altitude de 988 m (MNT JAXA). D'où proviennent ces quartz qui ne sont pas connu dans le bassin versant actuel de l'Okavango, délimitée sur la Figure 433 (p.479) ? Nous avons indiqué ces alluvions par des cercles bleus sur les coupes géologiques (Figure 739 p.736 et Figure 754 p.758) et sur la carte géologique de la Figure 741 (p.739). Cette découverte permet d'affirmer que la vallée de Gewidum est un canyon karstique creusé par une rivière et notamment que cette rivière a creusé des dépôts lacustres antérieurs : les calcrètes et les calcaires coquilliers. Ces matériaux allochtones pourraient appartenir aux calcrètes 3 de Cooke et Baillieul (1994) et Cooke (1975).

Nom	X degrés	Y degrés	X décimaux	Y décimaux	Altitude MNT JAXA
Alluvions	20°1'4.02"S	21°21'16.69"E	-20,0177833	21,3546361112	1017 m

Tableau 40 Coordonnées des alluvions de la vallée de Gewidum.





Figure 713 Alluvions allochtones de quartz blanc. Celui en haut, qui est poli a été trouvé près de notre campement.

Les blocs allochtones appartenant aux calcrètes 3 de Cooke

Plusieurs blocs allochtones découverts sur le terrain, sont constitués d'une accumulation de petites structures ovoïdes centimétriques qui sont allongées ou bien déformées.
Cette roche pourrait être d'origine :

- purement mécaniques, des petites couches sédimentent par la dynamique du courant et entourent un nucléus : oolithes ou ooïdes dans les calcaires ;
- d'origine biologique et serait des encroûtements algaux autour d'un nucléus : on parle d'oncoïde ;
- des résidus de la fantômisation, pour Laurent Bruxelles (comm. orale).

Une étude approfondie ultérieure permettra de déterminer l'origine de ces blocs.

Gcwihaba oued (sortie est)	07/12/2024	
20,014509°S	21,361713°E	993 m
Calcrètes 3		



Figure 714 Détail sur les structures.



Figure 715 Observation à la cassure.



Figure 716 Un autre bloc de calcrète 3.



Figure 717 Autre face.

5. Les calcrètes 4

Cooke et Baillieul (1974, p.148) décrivent que : *« les calcrètes 4 sont présentes sporadiquement sur toutes les autres unités rocheuses de la région des collines de Gcwihaba et est associé à l'action récente des cours d'eau. D'une couleur gris foncé uniforme, il contient de nombreuses coquilles d'escargots d'eau douce.*

Nous avons trouvé deux types de roches qui pourraient correspondre aux calcrètes 4, le premier est décrit ci-dessous (Figure 718 p.726) tandis que l'autre sera décrit au niveau de la colline K2 où il est trouvé à plusieurs endroits (Figure 784 p.787). Des études complémentaires devront être menées sur le terrain pour déterminer à quel type de calcrètes définies par Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975) ils appartiennent. Nous n'avons pas pu faire ces études faute d'autorisation pour ramener ces roches au laboratoire et nous avons dû nous contenter d'une étude macroscopique. D'autres études devront diagnostiquer à quelles espèces ces fossiles appartiennent.

6. Calcaires coquilliers de la vallée de Gewidum (calcrètes 4 de Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975) ?)

Nous les avons trouvées dans la vallée de Gewidum, comme mentionné dans FFS (2025, p.93). Nous les avons retrouvés en place (Figure 718 à Figure 721) au niveau du versant nord de la vallée de Gewidum, ils sont constitués de calcrètes claires composées de coquilles non jointives dont l'intérieur des coquilles est cristallisé. Ce pourraient être les calcrètes IV décrites et cartographiées par Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975) :

> *« Le calcrète IV, de couleur gris plus foncé, se rencontre également le long des flancs des vallées, parfois là où de petits affluents se sont introduits dans le passé. Il repose souvent sur les calcaires plus anciens et contient parfois des coquilles de mollusques d'eau douce. » (Cooke, 1975, p.433).*



Figure 718 Calcrètes à coquille du talweg de Gewidum.

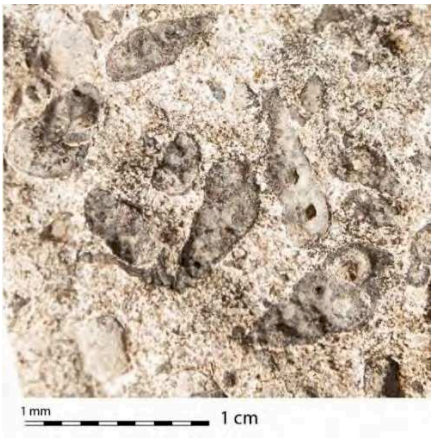


Figure 719 Détails des coquilles recristallisées.



Figure 720 Gastéropode de l'échantillon de calcrètes de Gewidum.



Figure 721 Gastéropode en relief.

7. Silicification des calcrètes : les silcrètes

Nous avons défini précédemment ce qui était une silcrète (p.519). Les sommets des formations de calcrètes de la vallée de Gewidum sont silicifiées. On observe des silcrètes, elles montrent des vacuoles de dissolution et quelques cristallisations peu épaisses en frange (Figure 722 à Figure 724).

Vallon de Gewidum à Gcwihaba		01/12/2024
20,017614°S	21,357282°E	1000 m
SILCRÈTES		



Figure 722 Vue de la face exposée de la silcrète.



Figure 723 Cavités dans les silcrètes, à la cassure. Des cristallisations sont visibles.



Figure 724 Vacuoles allongées dans les silcrètes, à la cassure.

8. Paléoenvironnement et âge des calcrètes

Robbins *et al.* (1996) écrit :

> *« En 1991, nous avons recueilli un échantillon de calcrète au fond de la vallée de Gcwihaba, à environ deux kilomètres en amont de la vallée de la grotte de Drotsky. Le calcrète a été daté au radiocarbone à 11 430 60 (Uga 6591) en supposant qu'il contenait 15 % de carbone mort et ancien au moment de la formation* ***(Cooke et Verhagen, 1977)****. Le calcaire contenait 8,1 millions de valves de diatomées par gramme, ce qui fournit des informations importantes sur les conditions du Pléistocène terminal dans la vallée de Gcwihaba. La conservation des diatomées était bonne et il y avait peu d'autres microfossiles dans l'échantillon. L'identification et l'interprétation des diatomées étaient basées sur* ***Gasse (1986)*** *et* ***Patrick et Reimer (1966, 1975)****. Six espèces ont été identifiées :*
> *78 % des 456 diatomées recensées (Cymbella muelleri 25 % ; Rhopalodia gibberula 24 % ; Gomphonema gracile 9 % ; Cyclotella meneghiniana 8 % ; Navicula species 6 % ; Nitzschia cf. fonticola 6 %).*
> ***Cymbella muelleri est typiquement benthique****, mais a été trouvée dans le plancton en nombre significatif.* ***Gasse (1986)*** *considère qu'elle est globalement tolérante aux alcalinités, au pH et à la teneur en minéraux. Rhopalodia gibberula est également tolérante aux conditions de l'eau, mais l'étude de Gasse (1986) sur les sédiments des lacs africains l'a amenée à suggérer qu'elle préfère les eaux fortement alcalines et* ***qu'elle prolifère mieux dans les lacs*** *hyperalcalins à conductivité, alcalinité et pH élevés.*
> *Gomphonema gracile (variété intricatiformis) est tolérant au pH bien que* ***Gasse (1986)*** *ait constaté qu'il était plus commun dans les eaux à pH 7·0–8·7, peut-être à faible teneur en nutriments.*

Cyclotella meneghiniana est ***littorale*** *ou planctonique et semble préférer les eaux plus salées* ***(Gasse, 1986)*** *» Robbins et al. (1996, p.20).*

Calcretes: Gcwihabe Valley (from Cooke and Verhagen, 1977; Cooke, 1984)

Lab. no.	^{14}C date	Sample
Wit 313	>45 000	Hard calcrete CII
Wit 385	34 700 ± 2000	Hard calcrete CI
Wit 315	22 700 ± 500	Repeat
Wit 314	11 000 ± 100	Soft calcrete CIV
Wit 376	10 800 ± 100	Repeat
Wit 307	10 000 ± 200	Soft calcrete CIII/CIV
Wit 375	9 800 ± 200	Repeat

Figure 725 Tableau récapitulatif des âges radiocarbones publié par Thomas et Shaw (1991, Appendix 1B, p.246).

Citons d'autres passages de (Robbins *et al.*, 1996) :

> *« Cooke (1975) signale quatre calcrètes d'âge différent le long de la vallée de Gcwihaba près de la grotte de Drotsky. Les âges au radiocarbone indiquent que les deux dépôts les plus anciens sont au-delà de la portée de la méthode (c'est-à-dire qu'ils sont plus vieux que 45 000 ans), tandis que les deux dépôts les plus récents ont été déposés entre 11 000 et 10 000 ans* ***Cooke et Verhagen, 1977 ; Cooke, 1984****).*

Des diatomées des gorges de Boteti (Schmidt *et al.*, 2017) dataient du MIS 5 (vers 100 000 ans).

Les sédiments du lac Ngami, à 4,40 m de profondeur, ont été daté de 40 499 ans (± 3187) d'après une datation (TL) et des datations au ^{14} C. (Huntssman-Mapila *et al.*, 2006 et Gamrod, 2008 *in* Ringrose, 2022, Table 3 p.32). Des diatomées permettent de caractériser le type d'environnement : lac peu profond, Ph basique assez alcalin.

Des forages au niveau du lac d'Etosha en Namibie, à 500 km de l'Okavango (Figure 1358 p.1399), ont aussi révélé la présence de foraminifères et de diatomées (Dill *et al.,* 2012).

Watts (1980) écrit que :

> *« Quatre épisodes majeurs de formation de calcrètes se sont produits au cours de (1) l'époque du Pliocène et comprend le « calcaire du Kalahari » du Pliocène moyen ; (2) Acheuléen ou Pléistocène moyen ; (3) Pléistocène supérieur (ou Fauresmithien). L'âge précis de ces épisodes n'est cependant pas bien connu. Certains des calcrètes peuvent correspondre aux formes les plus anciennes de Cooke (1975), tandis que le 4e épisode de Netterberg (Pléistocène supérieur récent) semble équivalent aux deux calcrètes plus jeunes de Cooke ».*

4.4.1.1.2. Les calcrètes du pan de la Colline E à Gcwihaba

À Gcwihaba, la prospection autour de la colline E et du pan actif nous a permis de confirmer que la vaste surface plane correspond à un paléopan, dont subsistent aujourd'hui, en bordure, des calcrètes résiduelles (à 1013 m d'après le GPS de ma tablette) et un trottoir ayant entaillé les dolomies, de 5 m de hauteur.

Le pan actif, délimité en violet et par des hachures bleues sur la Figure 726, est situé au pied du versant sud-ouest de la colline E (Affleurement A1). Il est alimenté par le forage BHZ 12381 (Tableau 44 p.763) (Marenga J., comm. orale), visible sur la Figure 726. Ce pan est mis en évidence par des différences de végétation et de couleur sur l'image satellite, et sur le terrain par la présence d'argiles meubles et de nombreuses empreintes animales récentes.

La carte géologique de Baillieul (Cooke et Baillieul, 1974 ; Cooke, 1975) indique plusieurs affleurements de calcrètes autour de cette colline (carte originale en annexe, p.1302), de bas en haut on trouve :

- des calcrètes 1 et 2 au nord de la colline E, au niveau du campement, que nous n'avons pas pu identifier clairement en raison de la présence de l'anthropisation du campement (Affleurement A3) ;

- des calcrètes 3 sur les versants ouest et nord de la colline F, que nous n'avons pas prospectées ;

- des calcrètes 4 que nous avons retrouvées, indiquées par l'affleurement A2 sur la Figure 726, et photographiées (Figure 736 et Figure 736).

Les deux premiers niveaux sont partiellement silicifiés (Cooke,1974, Fig.3). Les calcrètes sont des carbonates liés à l'évaporation de l'eau sous un climat aride. Elles sont appelées « croûtes de type caliche » par Salomon (2006, p.161). Elles sont azoïques et seraient purement d'origine chimique. Les pans situés en contrebas des collines sont généralement liés à la présence de cavités dans les collines et à d'anciens systèmes de décharges hydrauliques (Ellis, 2000), et ne sont donc pas forcément associés à des paléolacs. Les calcrètes trouvées au pied du versant sud-ouest de la colline E (Affleurement A2) confirment la présence d'un vaste paléopan dont le trottoir correspond à l'escarpement que l'on trouve au pied de la colline, indiqué par des barbules noires sur la Figure 726 (Affleurement A4 et photographies de la Figure 731 à Figure 729). Nous avons observé des ravines et des rigoles, profondes de moins d'un mètre, creusées dans les dolomies par l'eau, représentées en bleu sur la Figure 726 (Affleurement A5). Nous avons également identifié des sables blancs qui contrastent fortement avec les sables orangés présents en grande quantité dans le secteur. Ils sont localisés en bordure des paléopans et pourraient provenir du démantèlement de calcrètes calcaires (Affleurement A6). Aucune cavité n'a encore été mise à jour sur ce relief. Cependant, la flèche jaune sur la Figure 726 signale la présence de grands arbres, susceptibles d'avoir leurs racines dans une cavité. Cette zone devra faire l'objet d'une prospection ultérieure. Enfin, le versant dolomitique entaillé par le trottoir serait intéressant à prospecter à la recherche de paléokarst.

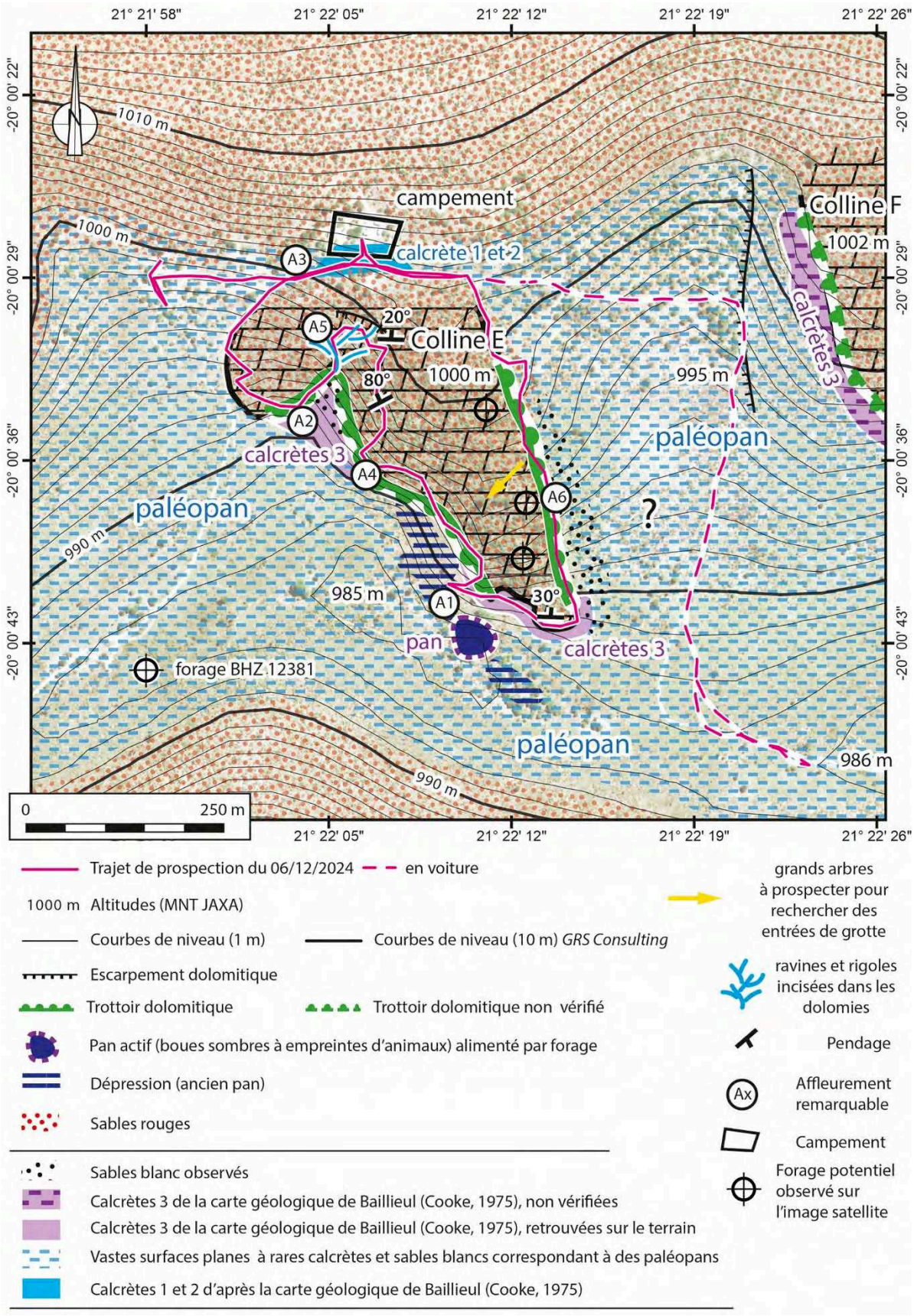


Figure 726 Analyse morphokarstique et prospection de la colline E de Gcwihaba.

Lien vers l'image satellite de Google Maps : lien.

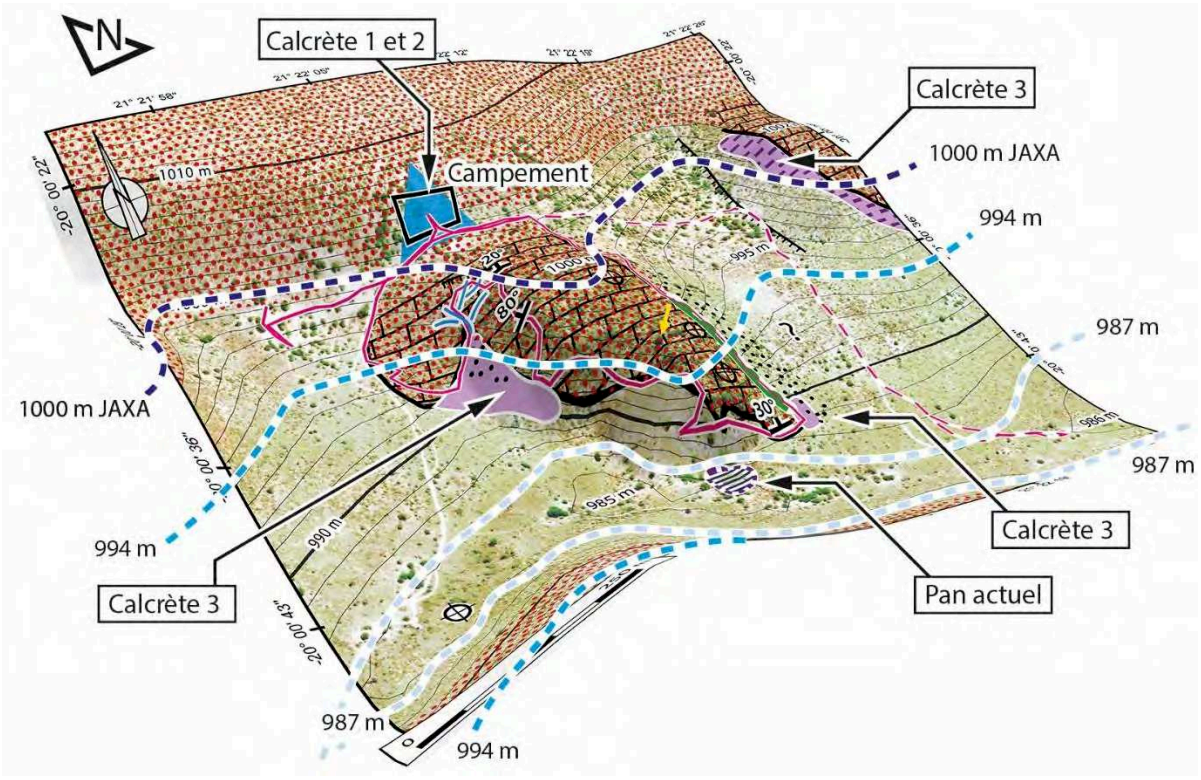


Figure 727 Bloc 2,5D de la colline E.

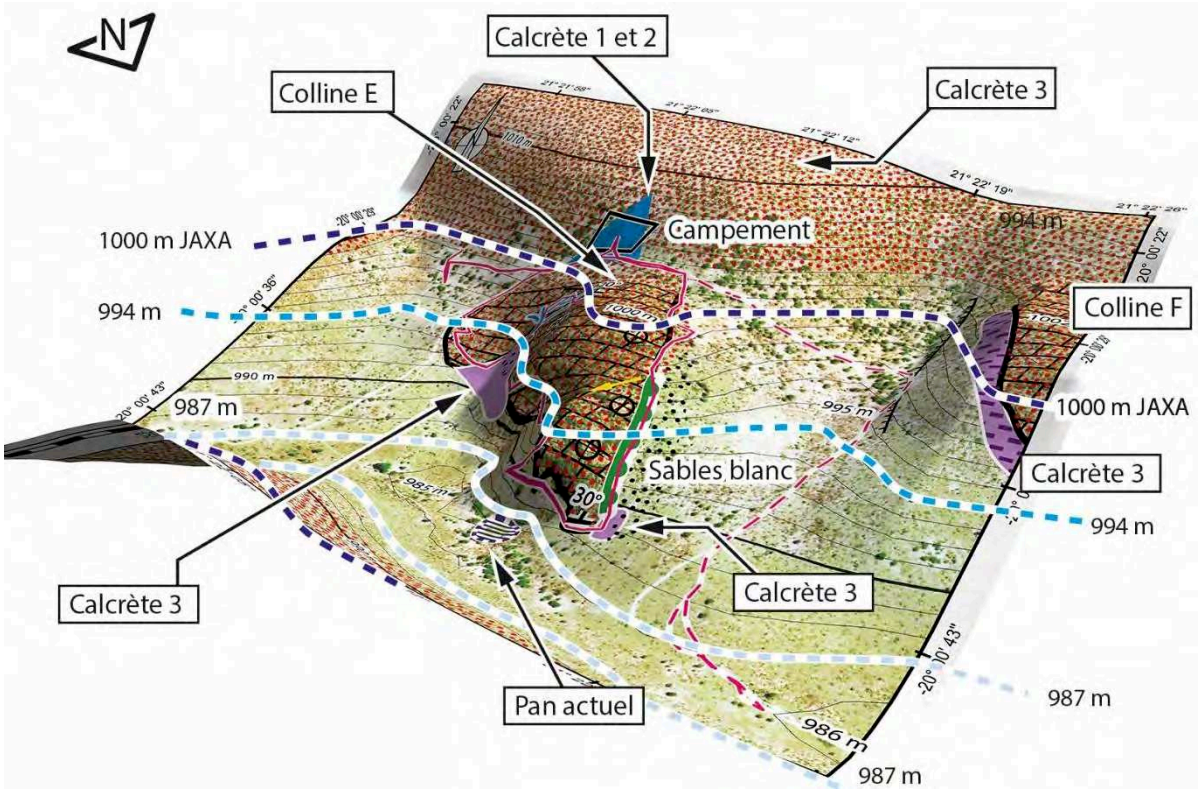


Figure 728 Idem.

1. Les calcrètes, les sables blancs et les trottoirs dolomitiques autour de la colline E

La colline E, de Gcwihaba, est constituée de dolomies à fort pendage (Figure 729). Son versant sud-ouest (Affleurement A4 de la Figure 726) présente un long escarpement (Figure 731), de plusieurs centaines de mètres de long et de plusieurs mètres de hauteur (Figure 730), correspondant au trottoir d'un vaste paléopan. Comme pour un poljé, ce paléopan a érodé le bord de la colline E par corrosion basale lors des inondations (Figure 303 p.349).



Figure 729 Trottoir vue de profil montrant le fort pendage des dolomies.



Figure 730 Trottoir vue de face. La personne indique la hauteur du trottoir.

Des arbres poussent sur les dolomies, tandis que la surface plane située autour de la colline E, représentée en pointillés bleu clair sur la Figure 726, est caractérisée par des calcrètes, visibles uniquement en bordure, là où elles ont été exhumées des couvertures sableuses qui les recouvrent généralement. Ces calcrètes, cartographiées par Baillieul (Cooke et Baillieul, 1974 et Cooke, 1975) (carte originale en annexe, p.1302), correspondent au plancher d'un vaste paléopan et appartiennent au calcrète 3.



Figure 731 Le versant sud-ouest de la colline E (Affleurement A4) conserve le trottoir creusé dans les dolomies par le paléopan (vue de face).



Figure 732 Calcrète de la colline E.



Figure 733 Calcrète de la colline E.

PLANCHE PHOTOGRAPHIQUE DES CALCRÈTES LIÉES A LA PRÉSENCE D'UN PALÉOPAN AU PIED DE LA COLLINE E À GCWIHABA



Figure 734 Panorama du paléopan au niveau de l'affleurement A2 (Figure 726).



Figure 735 Affleurement (A2 sur la Figure 726) de calcrètes 3 en place formant le plancher du paléopan exhumé de sa couverture sableuse. La personne entourée donne l'échelle.

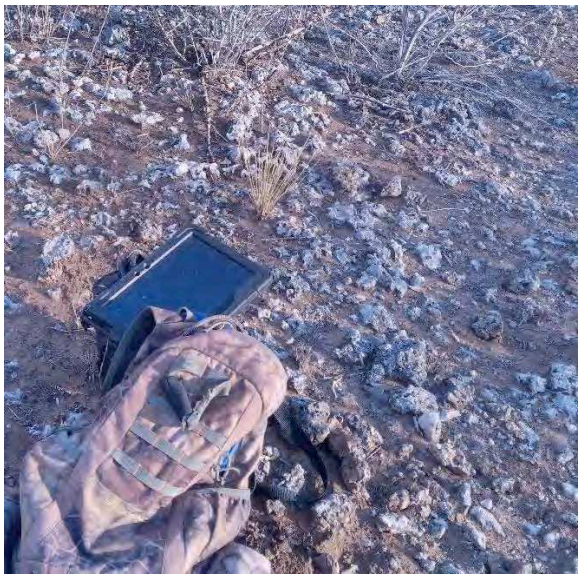


Figure 736 Détail des calcrètes 3.



Figure 737 Détail des calcrètes 3 montrant des vacuoles de dissolution.

2. Prospection future de la Colline F à Gcwihaba

Aucune cavité ou paléokarst n'a encore été découvert sur la colline F, localisée sur la Figure 538 (p.558). Nous n'avons pas encore prospecté cette colline qui est circonscrite par un vaste paléopan dont nous n'avons prospecté qu'une petite partie. Nous indiquons ici une image satellite de ce secteur (Figure 738).

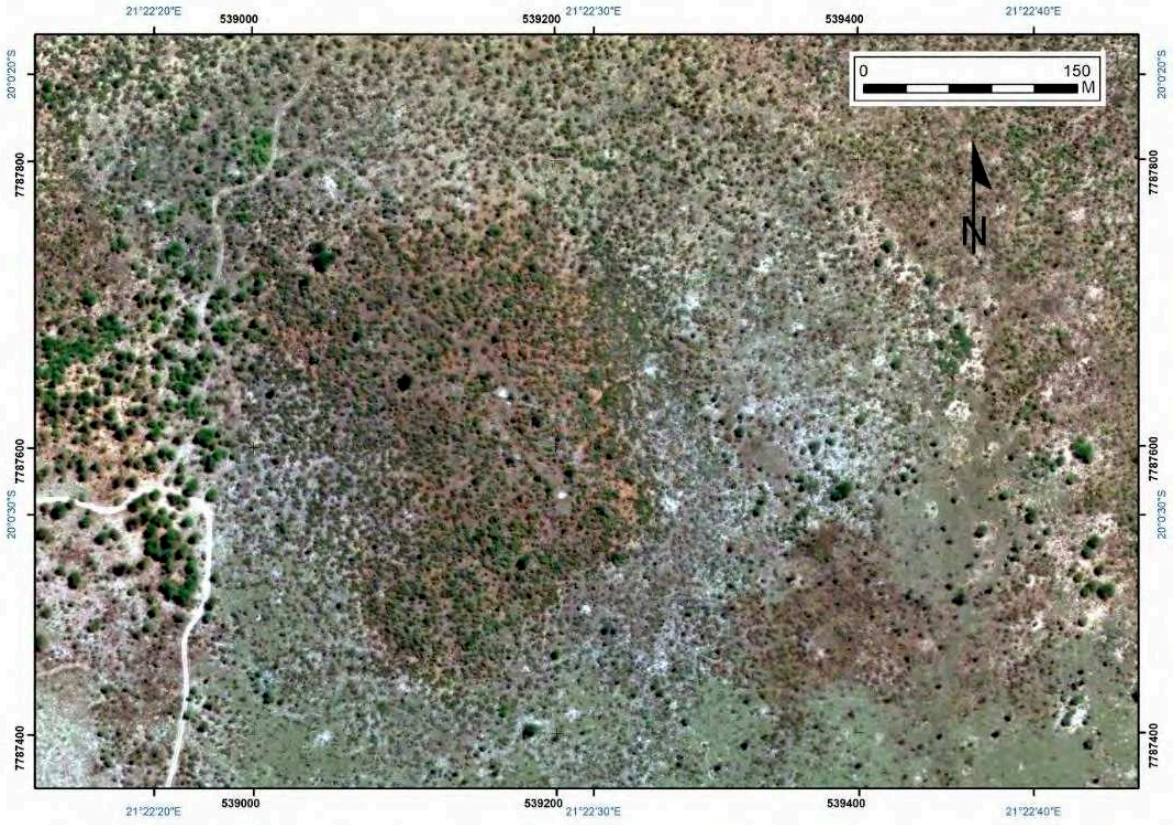


Figure 738 Image satellite de la colline F de Gcwihaba.

4.4.1.1.3. Synthèse des données de terrain sur une coupe géologique schématique du canyon de Gewidum et de la colline de Gcwihaba et la colline C.

La coupe géologique ci-dessous (Figure 739) montre la vallée de Gewidum et la localisation des grottes, en rouge, située plus haut en altitude. Cette coupe met en évidence que le lapiaz dolomitique affleure parfois au niveau du fond de la vallée, notamment au niveau de la route qui monte pour aller à la grotte de Gcwihaba et la route qui amène à Xai-Xai. Cette coupe sera complétée par la suite avec un forage (Figure 754 p.758). Nous verrons que cette vallée relie deux grandes surfaces morphologiquement planes (Figure 742 p.740), correspondant à des anciens pans, voire à des anciens lacs. « *Cette vallée était une extension possible d'un plus grand marais du paléo-Okavango* » (Ritter et Garner, 1994, p.55).

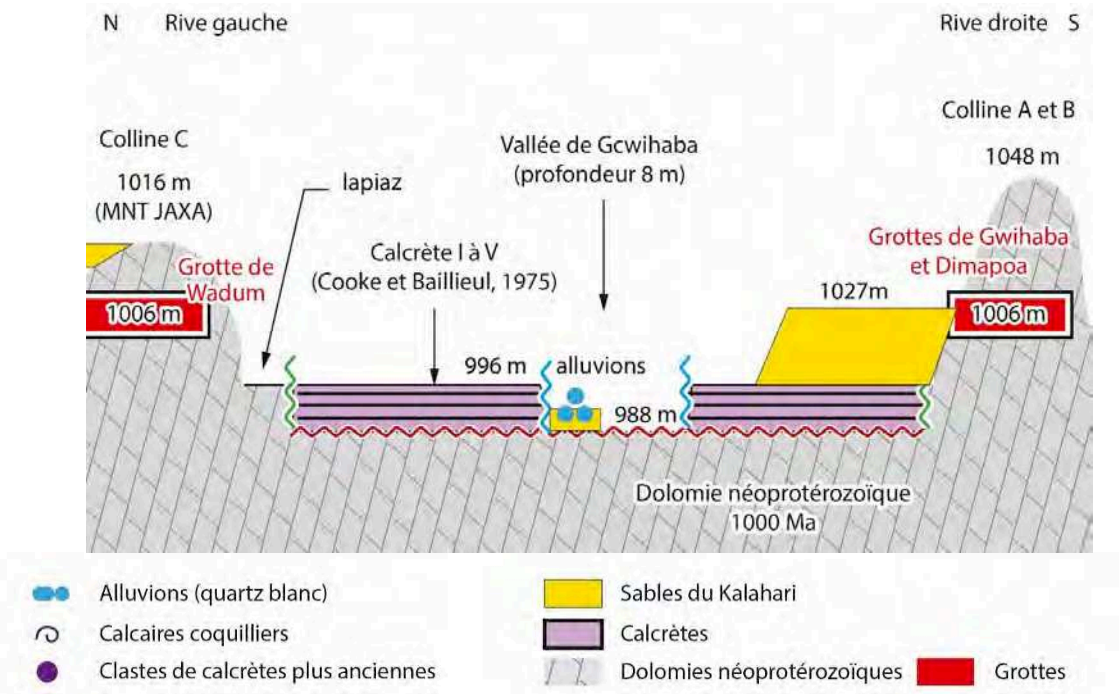


Figure 739 Coupe géologique schématique de la vallée de Gewidum creusée dans les calcrètes (en mauve) et les dolomies (en gris). (Sans échelle). Voir le profil à l'échelle (Figure 755, p.759).

Nous décrirons ces calcrètes plus loin (p.717) mais ce qu'il faut retenir, c'est que ces calcrètes (en violet sur la Figure 739) seraient récentes d'après les datations (^{14}C) et auraient seulement 11 430 ± 60 ans BP (**Gasse (1986) et Patrick et Reimer (1966, 1975)** in Robbins *et al.*, 1996). Nous rediscuterons de ces datations plus loin (p.846) car elles sont critiquées. D'autre part, les alluvions de quartz blanc, photographiées Figure 713 (p.723) et localisées sur la Figure 741 (p.739), soit confirment que cette vallée a été creusée par une rivière, soit elles appartiennent aux calcrètes, comme l'indiquent Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975) ce qui confirmerait l'idée que la dynamique qui a mis en place ces niveaux de calcrètes est liée à de grandes transgressions lacustres car aucun quartzite n'est identifié dans la région.

> *« **Cooke (1984)** interprète les divers sables et graviers calcrétisés de la vallée de Gcwihaba comme la preuve d'un écoulement fluvial éphémère dans un climat subhumide à semi-aride » (Robbins et al., 1996).*

4.4.1.2. Par les formes

Les analyses des reliefs, à partir de profils topographiques, de vues en relief (2.5 D) et de coupes géologiques, mettent en évidence la présence d'un paléoenvironnement lacustre. Les missions de prospection ont permis d'apporter des connaissances sur l'établissement des paysages et notamment l'origine des vastes surfaces planes, appelées « *straats* » (décrites précédemment (Figure 463, p.509) qui sont situées entre les dunes de sables.

Les trois profils topographiques suivants (Figure 740), réalisées à Gcwihaba, par le *Water Surveys Botswana et Aqualogic* (2001, Fig.9), montrent que les collines (Dimapo, C et F) sont séparées par des replats morphologiques qui sont appelés « *straats* », représentés en vert sur les profils de la Figure 740.

Lorsque ces replats sont situés au-dessus des dolomies, mais recouverts de plusieurs mètres de calcrètes, de silcrètes et de sables, ils pourraient correspondre des anciens **poljés**, qui étaient inondés lors des mises en charge du réservoir dolomitique pendant les phases climatiques pluviales du Passé.

Effectivement, on les retrouve presque systématiquement situés au pied des collines comme c'est le cas à la colline 3 de Gcwihaba (Figure 726 p.731). Récemment, au printemps, des écoulements d'eau ont été observés au niveau d'un de ces replats au pied de la colline de Dimapo (*Water Surveys Botswana et Aqualogic*, 2001, p.18) montrant que ce phénomène peut encore être actif, cependant dans une moindre mesure. Ces paléo-poljés devaient être inondés principalement par mise en charge *per ascensum* du réservoir dolomitique dans le bassin versant devait être les *Aha Hills* et certainement au-delà. On reconnait au-dessus de ces replats des bordures de corrosion creusées dans les dolomies et comblés de calcrètes (en violet comme l'indiquent les profils topographiques de la Figure 740). Les inondations qui ont été capables de corroder basalements les dolomies devaient être très puissantes. Notons que les premiers niveaux de calcrètes conservées sur ces surfaces plates sont constitués de clastes de calcrètes plus anciens cimentés indiquant la forte dynamique sédimentaire lors du dépôt.

Ces replats pourraient aussi correspondre à d'anciens fonds de lacs, qui ont été creusés, eux et leurs bordures, par les **surfaces de ravinement transgressif**, de type *wave-cut surfaces*.
Ce sont des surfaces d'ennoiement pendant les transgressions ou les régressions. L'eau de ces paléolacs proviendrait en majorité de la plaine de l'Okavango qui aurait été inondée et qui aurait transgressé vers l'ouest. Ces épisodes lacustres correspondraient aux périodes climatiques pluviales du passé. Effectivement, les longues dunes de sable rectilignes sur quarante kilomètres montrent par endroit qu'elles ont été érodées. Il se peut aussi qu'à l'endroit où des étendues d'eau sont présentes, les dunes de sable ne puissent pas s'édifier.

Pour essayer de comprendre ces grandes surfaces morphologiques plates qui se situent entre les dunes de sable du Kalahari et que l'on retrouve au pied des collines dolomitiques dont elles sapent les bases, nous avons cartographié en détail ces reliefs.
Les profils topographiques de Gcwihaba sont localisés sur le plan suivant (Figure 741).

4.4.1.2.1. Profils topographiques et analyses cartographiques

Ces profils topographiques (Figure 740) sont proposés par *Water Surveys Botswana* et *Aqualogic* (2001, Fig.9) et nous les avons analysés en détail. Ces profils topographiques sont exagérés verticalement pour une meilleure lisibilité.

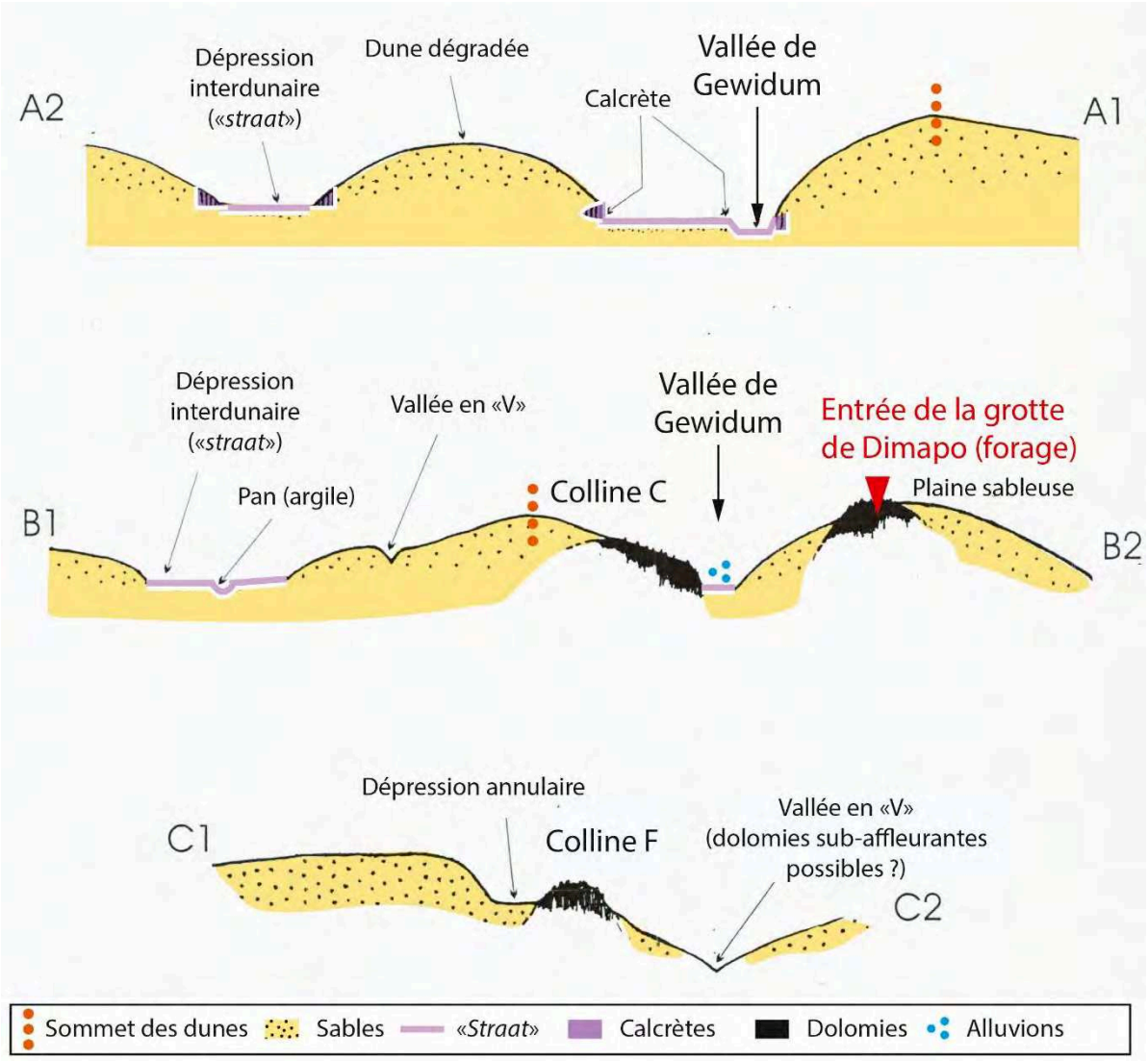


Figure 740 Analyse morphokarstique des profils topographiques de Gcwihaba (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2001, Fig.9; modifié).

Cette carte géologique permet de localiser les différents profils topographiques. La carte géologique détaillée est disponible plus haut (Figure 710 p.719).

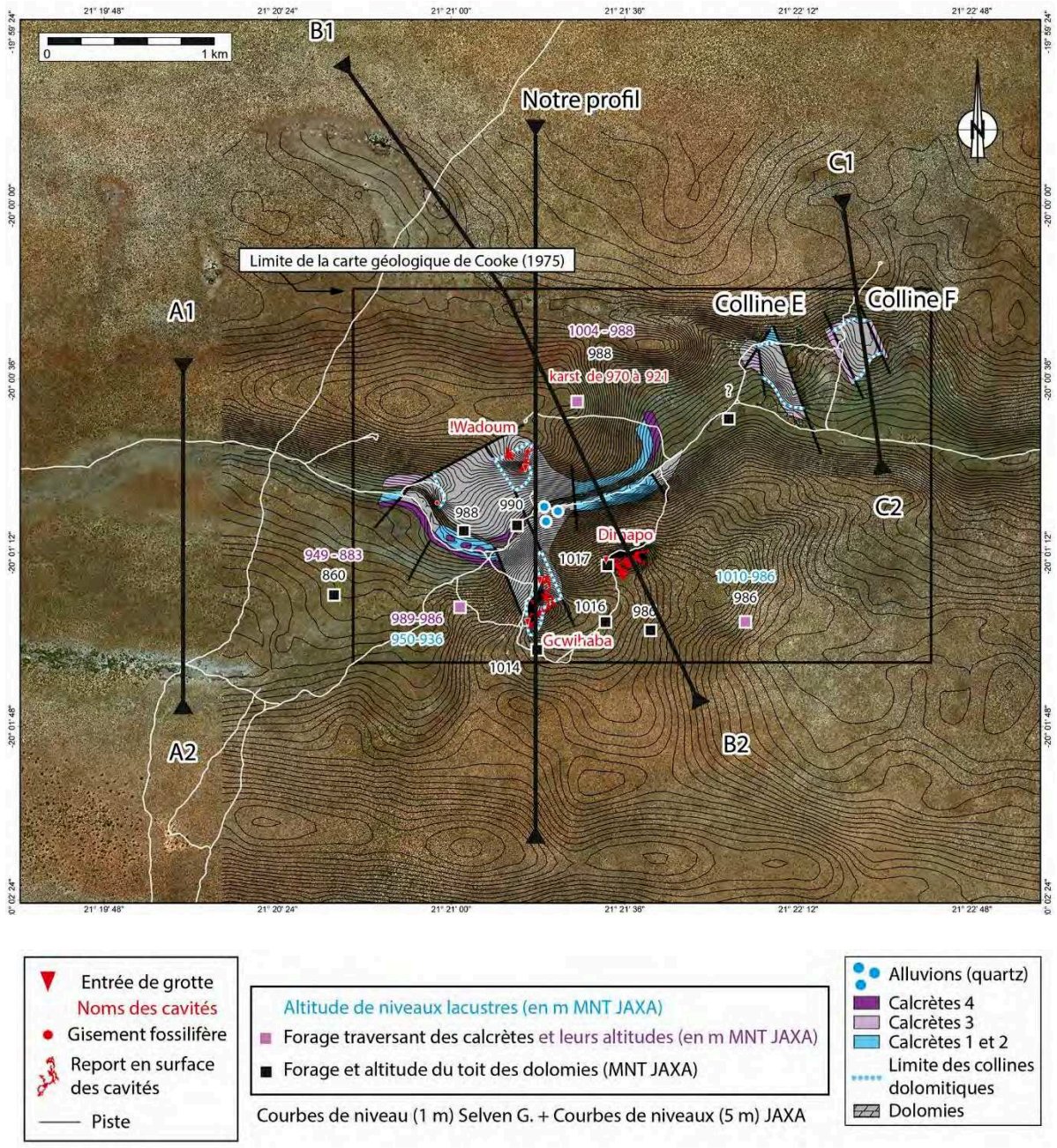


Figure 741 Report de la carte géologique levée par Baillieul (Cooke et Baillieul, 1974 ; Cooke, 1975) et localisation des profils topographiques de la page précédente : A, B et C et du profil topographique que nous avons réalisé (Figure 755, p.759).

Cooke (1975) écrit que *« tout autour des collines dolomitiques s'étend le système de dunes d'alab, et le sable s'étend jusqu'aux collines, autour et entre-elles ».*

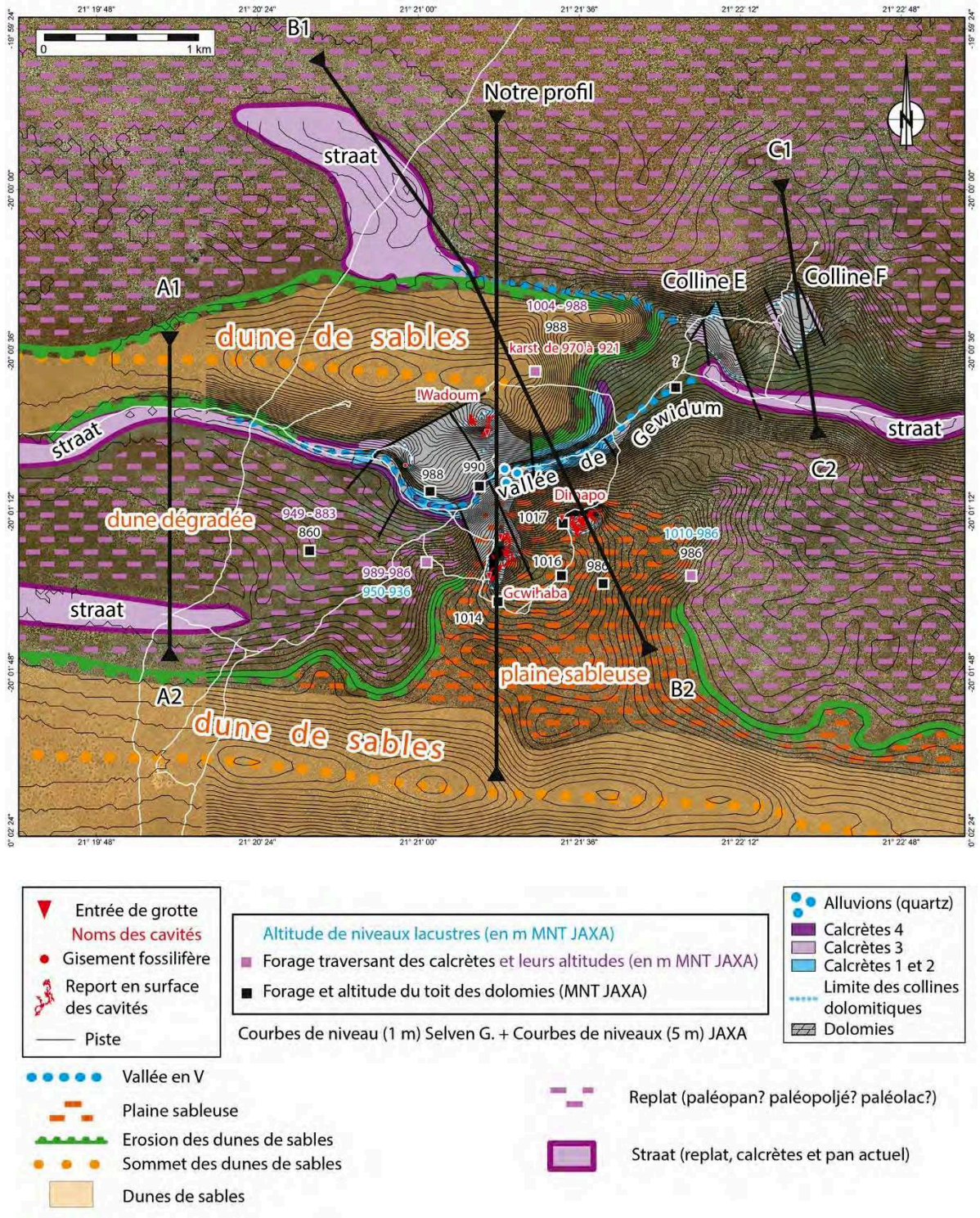


Figure 742 Analyse morphologique du secteur de Gcwihaba.

Remarque :
Par rapport à la carte précédente, nous avons complété les courbes de niveau avec celles du MNT JAXA (5 m) car les courbes de niveau à un mètre de résolution de Selven G. *(GRS Consulting)* ne couvraient pas toute la zone.

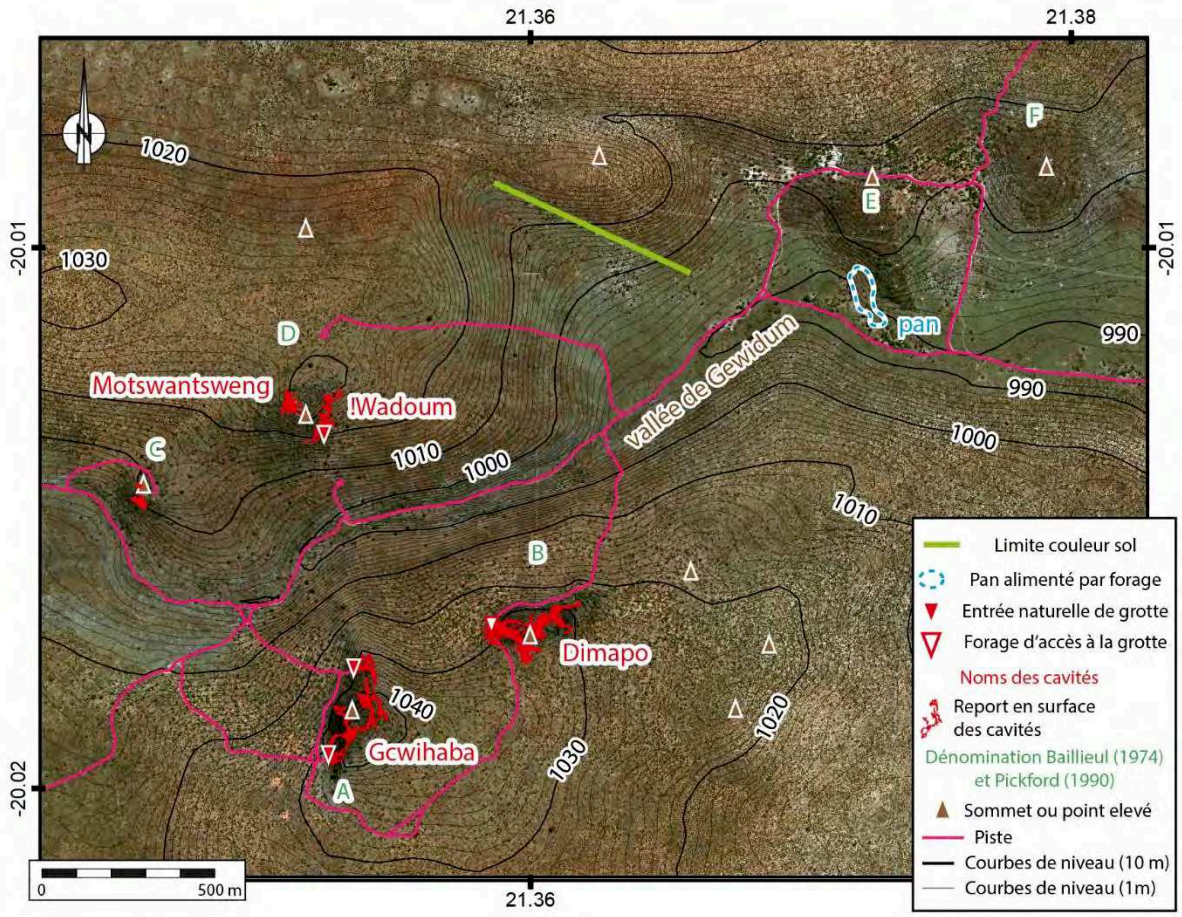


Figure 743 Une différence de couleur des sols est indiquée sur cette image satellite en vert (et sur la Figure 538 (p.558)) et pourrait correspondre à l'érosion de la dune sable.

4.4.1.2.2. Caractérisation des reliefs de Gcwihaba : pans, paléopans, « straats », dunes discontinues et vallées sèches

Pour apporter des éléments supplémentaires à la description des formes et formations rencontrées dans le nord-ouest du Botswana, du début du chapitre (p.499) et des pages précédentes, nous caractériserons ici plus en détail les dunes de sable et les interdunes (« *straats* ») observés à Gcwihaba, car ils apportent des arguments en faveur de la présence de paléoenvironnements lacustres et aquatiques.

1. Les pans

Définition d'un *pan* :

"Il est de tradition en Afrique australe, sans qu'il soit possible d'en fixer l'origine, de désigner par le vocable anglais de pan (poêle, casserole) ces cuvettes de forme arrondie dont le diamètre est très variable de quelques décamètres à plusieurs kilomètres » explique Lageat (1989, p.352).

« C'est une dépression boueuse qui peut être à sec lors des périodes sèches, une sorte de cuvette de sel » (Carroué, 2018).

Pickford et Mein (1981) parlent de *"chotts saisonniers"* pour parler des pans, ils précisent que ce sont *« surfaces marécageuses entourées d'arbres situées au pied des collines de Gcwihaba et Koanaka »*. Effectivement la dénomination de **chott** est utilisée en Afrique du Nord pour parler des lacs salés des régions semi-arides. On parle de « *vley* » en Afrique australe (Maudit, 1962, p.164).

En fait un pan peut se remplir d'eau après un fort épisode de pluie, si le sol est imperméable. Le pan n'est donc pas lié au niveau de base d'un aquifère. Il est cependant vrai que celui-ci peut être installé sur des formations carbonatées karstiques en lien avec un vaste bassin versant. Si le réservoir se met en charge, le pan peut alors être inondé par mise en charge *per ascensum*. C'est ce qui ferait de lui un **poljé *** (voir définition p.242). Actuellement, cette situation n'existe pas du fait du climat semi-aride, mais peut-être que cette situation s'est produite dans le passé. C'est ce que nous verrons.

Ici, il faudra bien faire la distinction entre :

- les pans actuels, qui sont de très modestes superficies et qui sont souvent alimentés par des forages sinon ils seraient à secs. Ils sont constitués principalement de boues carbonatées. On y trouve des gastéropodes, des ostracodes, des végétaux. Ils sont souvent installés sur des surfaces planes beaucoup plus vastes, constituées de formations imperméables, comme des calcrètes et des silcrètes.

- des vastes surfaces de calcrètes et silcrètes situées entre les dunes de sables, qui sont appelés ici des « ***straats*** », qui pourraient correspondre, nous allons le voir, à des paléolacs, qui se sont s'installés entre les dunes de sables et qui en s'asséchant ont formé les « ***straats »***. Nous verrons que si ces lacs étaient situés sur les

dolomies, et qu'ils étaient en connexion avec les aquifères sous-jacents cela en ferait des **poljés.** Nous verrons que ces structures ont pu être à l'origine du dépôt de la formation de calcrètes de Nxau-Nxau (Linol, 2013) décrite précédemment et rencontrée en forage à plusieurs endroits dans le Rift de l'Okavango et notamment à Gcwihaba (p.893) ;

- des cuvettes, de petites dimensions, au pied des collines karstiques. Celles-ci portent souvent le nom de pans voire de *palaeo discharge pan*. Il se peut que le développement des lacs ou poljés, ait atteint les collines et formé ces cuvettes. On observe notamment le sapement de la base des collines, provoqué soit par des *wave-cut surface* ou bien par les bordures de corrosion des **poljés**.

On retrouve tous ces objets morphologiques à Gcwihaba et Koanaka au Botswana, nous allons maintenant les décrire (p.818).

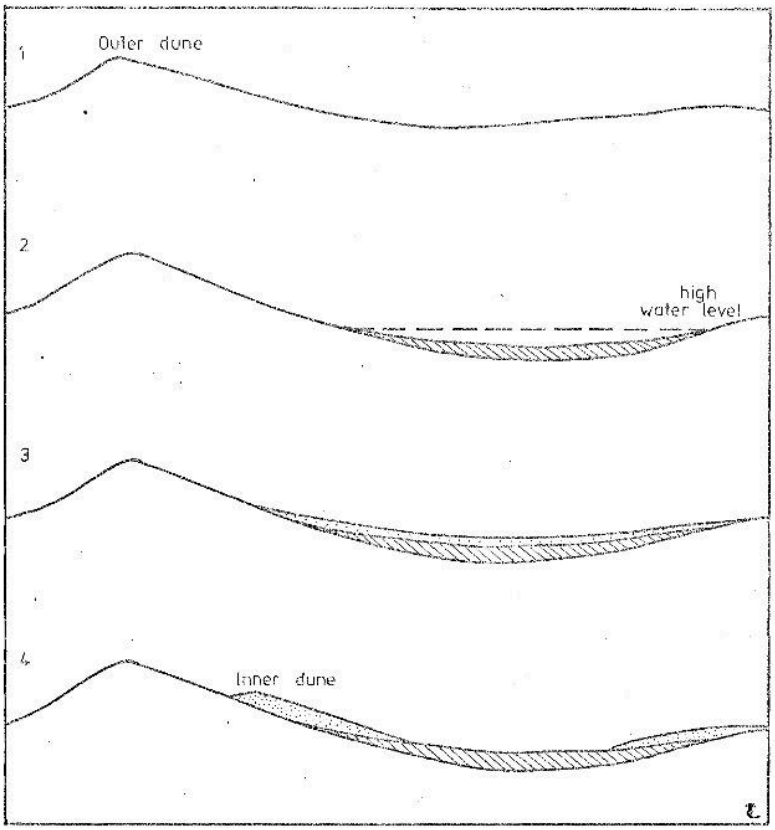


Fig. 7.1. Development of the southern Kalahari pans. (not to scale).

1. Deflation to form outer dune.
2. Deposition of clayey phase of pan deposits.
3. Deposition of sandy phase of pan deposits.
4. Deflation of sandy phase deposits to form inner dune.

Figure 744 Schéma de formations des pans par déflation selon Lancaster (1976, Fig.7.1, p.179).

Dans ces environnements très arides qui sont recouverts par des champs de dunes de sable, on pourrait aussi penser que ces dépressions, notamment celles situées entre les dunes de sables, aient une origine éolienne, par déflation (Figure 744), alors on trouve parfois le terme de **cuvette hydroéolienne** (Wellington, 1943). Ce sera le cas des pans que l'on trouve près du *Cradle of Humankind*, indiqués en orange sur la figure ci-dessous (Figure 745), au niveau de la couverture du Karoo, en violet. Nous pourrions aussi les interpréter comme des mégadolines et des soutirages au sein des dolomies fantômisées sous-jacentes.

1. Remarque sur les pans sud-africains, près du *Cradle of Humankind*

Les pans en Afrique du Sud qui sont situés sur les formations géologiques du Karoo (Ecca) comme la *Pan Belt* de Chrissiesmeer (Wellington, 1943; Lageat, 1989, fig.101, p.352-360).

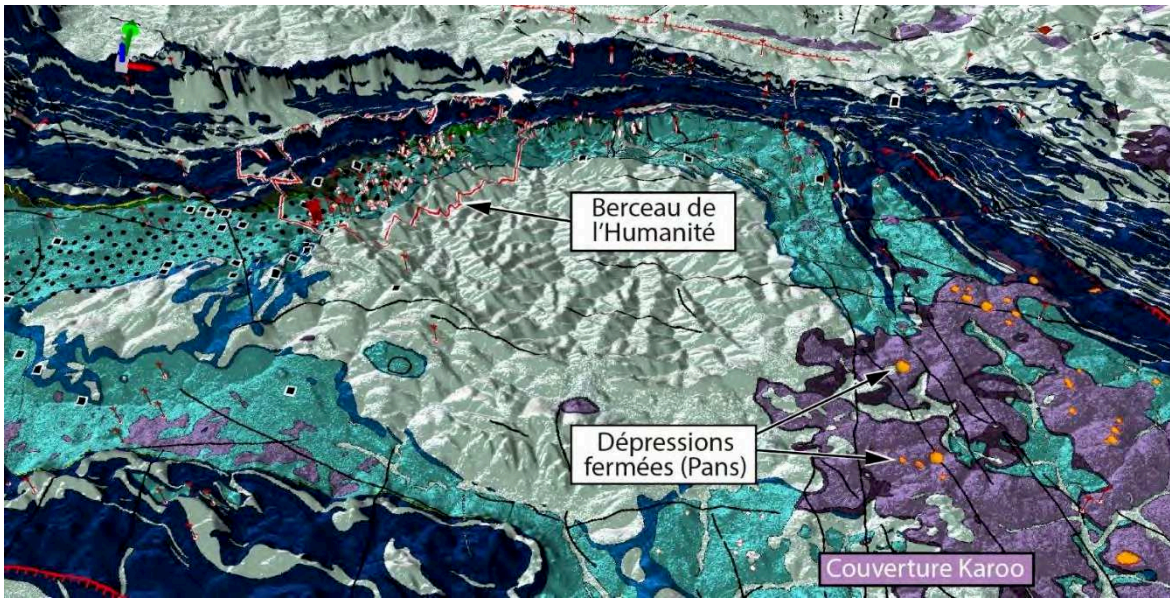


Figure 745 Vue 2.5 D de la formation Ecca en place, à l'est du granite archéen de Johannesburg et près du CoH. On repère de nombreuses dépressions fermées sur la formation Ecca, en orange. Elles forment la Pan Belt de Chrissiesmeer. Ce seraient des pans, mis en place par déflation éolienne (Wellington, 1929, 1943) et ne se trouveraient que sur les grès feldspathiques de l'Ecca moyen (Lageat, 1989, fig.101, p.352-360).

2. Les dépressions interdunaires : « straats »

Définition des *straats* :

« L'abaissement substantiel des crêtes [des dunes de sable] est clairement démontré par le rétrécissement et l'obstruction des espaces interdunaires par du sable qui ne peut provenir que des crêtes des dunes. Cette migration latérale du sable vers les contreforts a, de manière variable, « réduit » les espaces interdunaires. Bien que, dans certaines zones, ces formations subsistent sous forme de plateaux allongés entre les dunes, les mouvements de sable descendants depuis les flancs adjacents ont généralement fusionné pour laisser les straats se transformer en une série de dépressions isolées et fermées, souvent dotées de petites cuvettes centrales, s'étendant le long des planchers autrefois continus et linéaires » (Mc Farlane et al., 2005).

4.4.1.2.3. Problématique de l'âge des dunes discontinues

Ces champs de dunes sont importants car nous verrons que certaines dunes ont parfois été érodées (Grove, 1969 ; Mc Farlane *et al.*, 2005), comme nous le verrons à Gcwihaba et Koanaka. Certaines dunes semblent avoir été érodées par des cours d'eau comme le montre le « g » de la Figure 465 de Gaumare (2024). Nous rediscuterons de cette possible érosion des dunes par des cours d'eau (p.746). Nous monterons que si les interdunes et certains secteurs sont comblés par des lacs, les dunes de sable ne pourront pas s'édifier sur l'eau.
La dégradation des dunes se manifeste également par la destruction de la morphologie linéaire d'origine par inondation ou engorgement, comme l'a noté Grove (1969) Mc Farlane *et al.*, 2005. C'est durant les périodes arides que les champs de dunes ont été édifiés (Thomas et al., 2000). Nous verrons que pendant les phases humides on aura des étendues d'eau entre les interdunes en lien ou pas avec les substrats carbonatés et le niveau de base dans les réservoirs carbonatés. Des chronologies indépendantes à partir des sédiments des grottes fournissent des preuves que des épisodes humides se sont produits dans la région à l'intérieur de la plage datée de la construction des dunes (Thomas et al., 2000).

1. Hypothèses concernant l'âge des dunes

Les dunes de sable sont un objet complexe. Il existe plusieurs méthodes pour les dater comme l'OSL, le TCN (Nucléides Cosmogéniques Terrestres) $^{26}Al/^{10}Be$ qui permet de calculer des âges d'enfouissement des sédiments, avec le problème du remaniement des dunes comme par la bioturbation par exemple ou bien le vent. Vainer *et al.* (2021) évoquent même des pollens datés du Miocène (ou plus jeunes) par Moore *et al.* (2012, Fig.1b) dans les séquences lacustres du Makgadikgadi.

Hypothèse d'un âge ancien

Pour certains auteurs (Partridge, 1993 ; 225 Miller, 2014 ; Vainer et al., 2021 *in* Garzanti *et al.*, 2022), les dunes du Kalahari ont commencé à s'accumuler au Pléistocène inférieur potentiellement entre 2.2 et 1.5 Ma, voire 5.2 à 4.2 Ma.

> *« Les champs de dunes du Kalahari pourraient avoir commencé à s'accumuler au Pléistocène inférieur. Dans le Kalahari occidental, les dunes superposées sur un mégacône sont présumées plus jeunes que les fossiles de vertébrés, principalement vieux de 4 Ma, qui se trouvent sous le sable (Miller, 2008 ; Miller, Pickford and Senut, 2010), tandis que les dunes de l'est se trouvent sous des artefacts du Middle Stone Age, limitant l'âge le plus jeune possible pour le dépôt de sable à > 200 000 (McFarlane et Segadika, 2001). Dans le Kalahari méridional, Vainer et al. (2018b) ont simulé une gamme de scénarios d'exposition et d'enfouissement de sable basés sur des nucléides cosmogéniques et des contraintes de luminescence et ont suggéré qu'il pourrait y avoir eu des cycles de renversement depuis que le sable était disponible pour la distribution éolienne, à 1,5 - 2,2 Ma et/ou 4,2 - 5,2 Ma (en accord avec Miller, 2014) » (Garzanti et al., 2022, p.12).*

Alors que c'est la formation de ces sables qui remonteraient à environ -2,2 à -1,1 Ma (Vainer e al., 2023)

> *« Les seuls âges numériques pour le dépôt le plus ancien dans la MOZB (Makgadikgadi-Okavango-Zambezi Basin) sont dérivés de la datation par enfouissement basée sur des nucléides cosmogéniques - âges TCN (Nucléides cosmogéniques terrestres) 26Al/10Be -*

de deux profils de profondeur dans l'ouest du bassin de l'Okavango. Les âges sont de 3,06 +4,4/ -0,46 Ma à la base du bloc soulevé et de 3,35 +0,39/ 0,26 Ma dans le bloc abaissé, où les strates basales n'étaient pas datables. Les sédiments consolidés les plus supérieurs de ces sites soulevés et abaissés ont été enfouis à 1,12 +0,13/ 0,12 et 1,34 +0,16/ 0,14 Ma, respectivement. » (Vainer et al., 2024, p.6).

Ces âges de recouvrement ont été suggérés comme représentant le début de la dominance éolienne pour le transport et le dépôt de sable *(Vainer et al., 2021)* » *(Vainer et al., 2024, p.6)*.

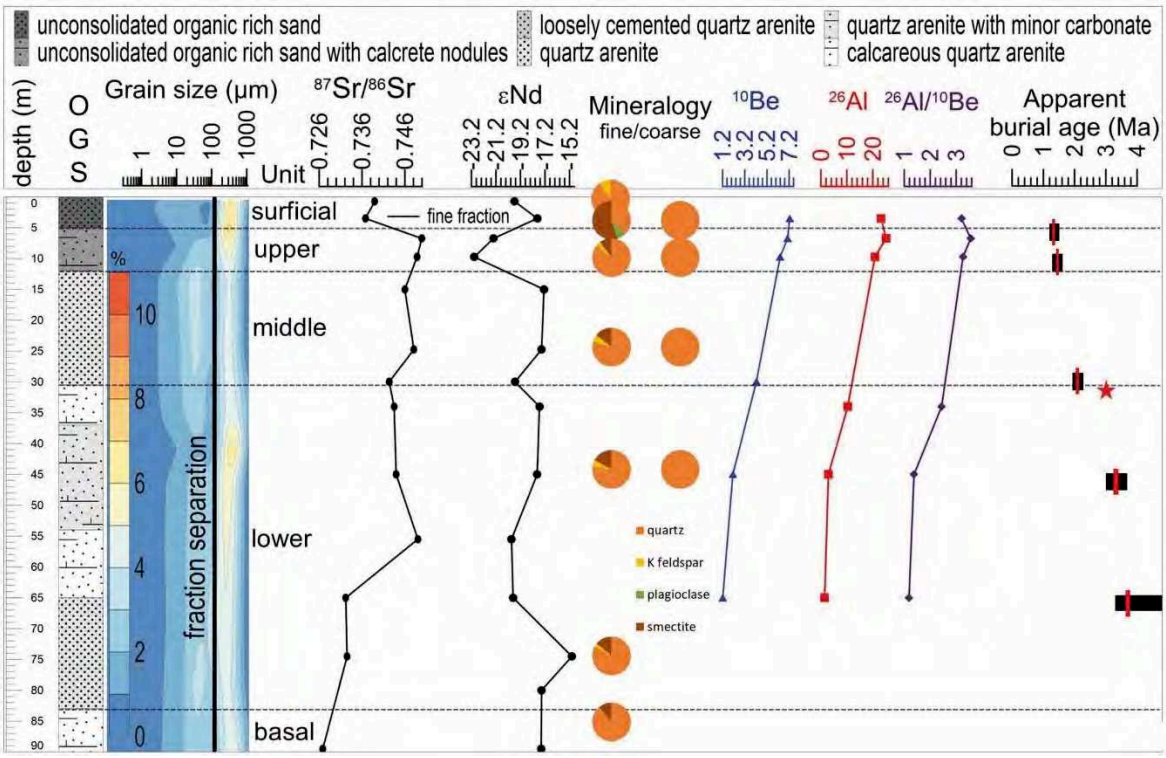


Figure 746 La base de la dune OGS est datée de 4 millions d'années à 65 m de profondeur (Source : Vainer et al., 2021).

Hypothèse d'un âge récent

Des phases ultérieures de remaniement et d'accumulation des sables peuvent avoir eu lieu tout au long du Quaternaire et donner des âges plus récents pour les dunes.

Plus précisément, des datations jusqu'à 14 m de profondeur sur les dunes montrent qu'elles ont été édifiées lors de trois épisodes entre (1) 48 000 à 41 000 ans, (2) 36 000 et 29 000 ans et (3) 23 000 à 21 000 ans (Thomas *et al.*, 2000).

Ces périodes d'édification des dunes sont les mêmes que celles calculées pour les dunes dans l'ouest de la Zambie (O'Connor et Thomas, 1999 in Thomas *et al.*, 2000) et pour celles de Zimbabwe (Stokes *et al.*, 1997 ; Bateman et Catt, 1996 ; Singhvi et Wintle, 1999 in Thomas *et al.*, 2000) mais pour les dunes de Zambie et du Zimbabwe, il a été démontré une première phase d'édification plus ancienne entre 115 000 et 95 000 ans.

On trouve aussi des datations autour de 100 000 ans (Thomas et Burrough, 2013) et 186 000 ans (Goudie et Viles, 2015, p.141).

À plus de 500 km au sud, dans la région de Mariental-Stampriet, des dunes de sable ont été datées vers 186 000 ± 16 000 ans (OSL) elles ont enregistrées les trois cycles glaciaires – interglaciaires avec deux dates du début du MIS 6 (Stone et Thomas, 2008, Table 1, p.1671). Voir aussi dans cette même région les études de Telfer et Thomas (2007).

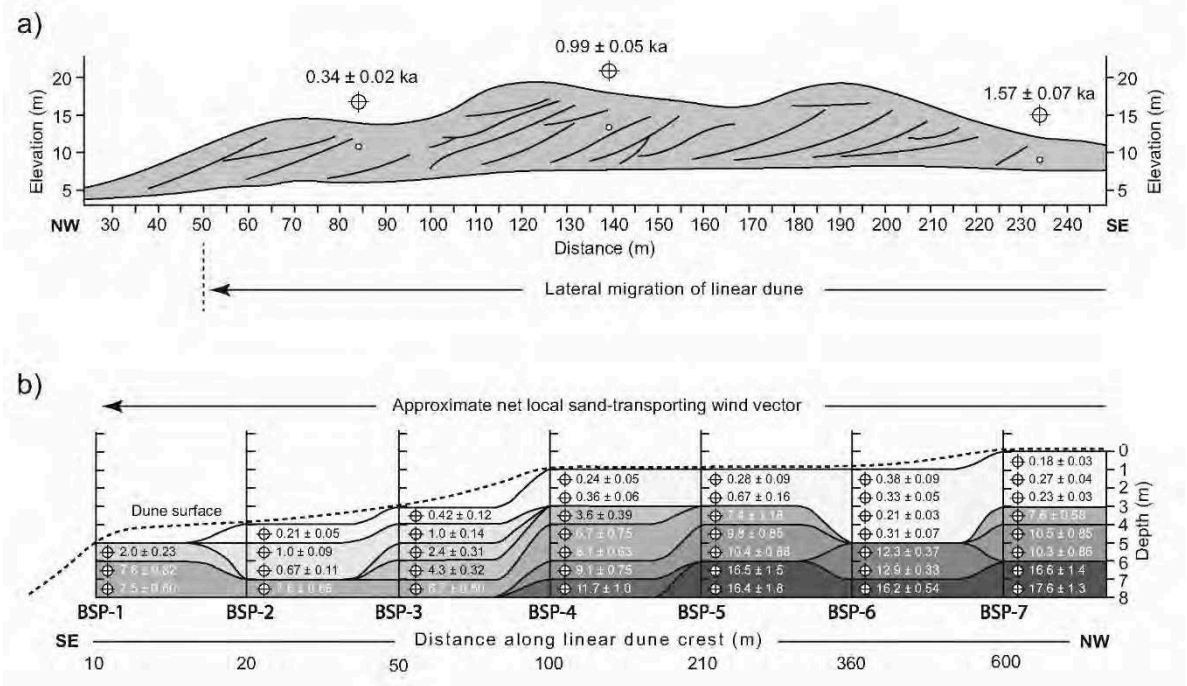


Figure 747 Calculs des âges à différentes profondeurs dans les dunes permettent de comprendre leurs édifications (Source : Thomas et al., 2000, fig.4, p.9)

2. Les vallées sèches (mekgacha)

Ces vallées sèches sont décrites par plusieurs auteurs (Thomas et Shaw, 1991, Fig. 5.9, p.137; Nash, 1992, 2022).

Nash écrivait déjà en 1992 :
« Les études paléoenvironnementales menées dans le Kalahari ont, jusqu'à récemment, donné davantage de crédibilité au développement de mekgacha (vallées sèches) au cours d'anciennes périodes plus humides. Ces études ont eu tendance à dépendre de données géomorphologiques, principalement en raison d'un manque de sites adaptés à la préservation du matériel faunique et palynologique **(Thomas, 1987b ; Deacon et Lancaster, 1988)**. Des études sur de grands systèmes de dunes végétalisées **(par exemple Lancaster, 1981 ; Thomas, 1984a)** ont indiqué des extensions passées de la zone et. Des périodes de plus en plus humides et plus fluctuantes sont déduites des sédiments et des caractéristiques des grottes **(p. ex. Cooke et Baillieul, 1974 ; Cooke, 1979c, 1980, 1984 ; Brook et al., 1990)** et des cuvettes **(p. ex. Lancaster, 1978a ; Goudie et Thomas, 1985, 1986)**, les rivages des anciens systèmes lacustres **(p. ex. Cooke, 1980 ; Shaw, 1985a)** étant utilisés pour déduire les anciens climats plus humides. Alors que les études de grottes dans le Kalahari fournissent des preuves sans équivoque de climats passés plus humides, des travaux récents ont jeté le doute sur les simples changements d'humidité et de température envisagés par d'autres études de relief. Cela est dû principalement à une prise de conscience accrue de la diversité des facteurs qui peuvent influencer les processus de formation du paysage. En particulier, l'importance de la végétation et des dunes a été remise en question à la lumière d'études récentes sur le rôle de la végétation dans le développement des dunes **(Thomas, 1988c, 1992 ; Thomas et Tsoar, 1990, Thomas et Shaw, 1991b)**. Les données indiquant des niveaux d'eau plus élevés dans les lacs paléolacs du Kalahari moyen ne peuvent désormais pas être considérées uniquement comme une preuve d'augmentation des précipitations, mais doivent être interprétées en tenant compte de l'activité néotectonique et des changements complexes dans les schémas de drainage régionaux **(Shaw et Cooke, 1986 ; Shaw et Thomas, 1988, 1992)**. De plus, l'identification du rôle des eaux souterraines, par opposition aux simples processus de déflation, dans la formation des cuvettes du Kalahari suggère la nécessité d'une interprétation hydrologique détaillée des preuves provenant des sites de cuvettes **(Lancaster, 1986b ; Thomas et al., 1993)**. L'image globale du changement environnemental émergeant des reliefs du Kalahari est celle de changements beaucoup plus subtils dans les paramètres climatiques, par opposition aux simples changements dans les quantités de précipitations envisagés auparavant **(Klein et al., 1991 ; Thomas et Shaw, 1992 ; Nash et al., 1993)** » (Nash, 1992, p.2-3).

4.4.1.3. Par les forages

Plusieurs forages ont été réalisés dans la région et sont disponibles sur le site internet du Service Géologique du Botswana *(BGI)* (Figure 748), à l'adresse suivante : https://bh.bgi.org.bw/borehole.

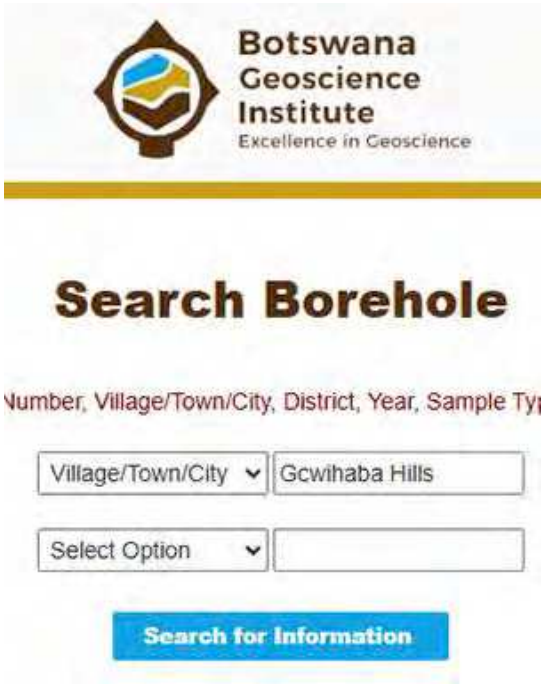


Figure 748 Portail du BGI.

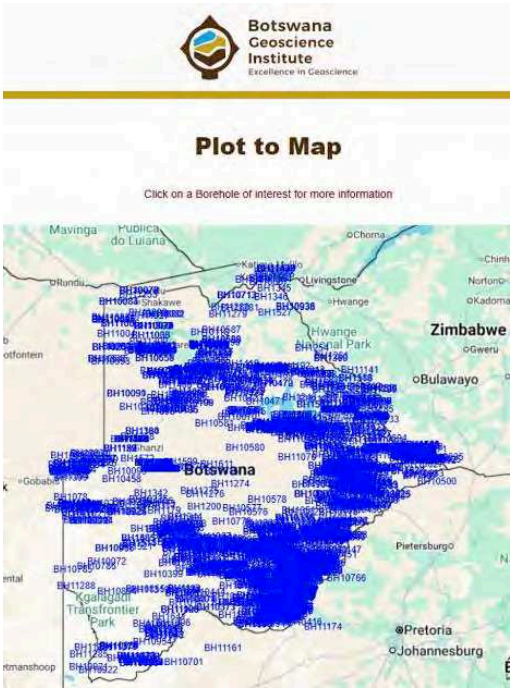


Figure 749 Forages du Botswana.

D'autres ne sont mentionnés que dans des rapports, comme celui de Mc Donald (2008) ou de Bruchs (2008). Par ces données, nous trouvons les forages suivants à *Gcwihaba Hills* : n°11471A, BZH12386, BZH 12388, BZH 123889 (Figure 750) qui ont rencontré en profondeur des calcrètes (p.763). D'autres forages ont été identifiés sur le terrain par Oatse Ledimo, comme le *water borehole* (WBH2, en bleu ci-dessous).

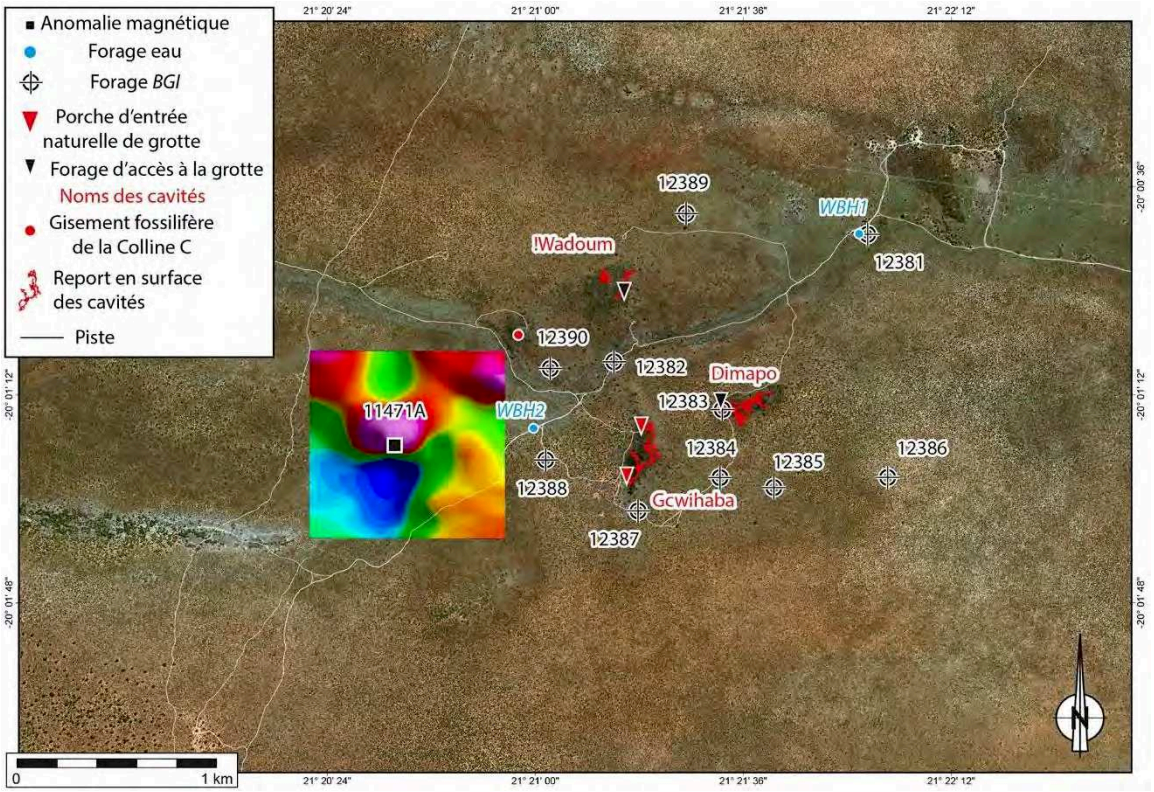


Figure 750 Synthèse des forages recensés à Gcwihaba Hills.

4.4.1.3.1. Le forage n°11471A indique à Gcwihaba l'altitude de la base des collines karstiques de Gcwihaba et présence de calcrètes en profondeur

Le forage n°11471A, localisé à Gcwihaba, d'après les données de forage et la carte des anomalies de Mc Donald (2008, p.46), traverse plusieurs lithologies décrites par Mc Donald (2008, p.54) (Figure 752). Il permet de compléter la coupe géologique de la vallée de Gewidum précédemment établie (Figure 739, p.736), par une coupe plus détaillée (Figure 754).

Nom du forage	Nom *BGI*	X WGS84 UTM34S	Y WGS84 UTM34S	X décimaux	Y décimaux	Altitude
11471A (Mc Donalds, 2008)		535900	7786000	-20,01226389	21,36557222	985 m sur le document originaux (et corrigé à 1009 m MNT JAXA)

Tableau 41 Coordonnées du forage et de l'anomalie.

Vérification de la position du forage avec le géoréférencement de la carte de l'anomalie

Sur le document original décrivant le forage n°11471A (Figure 753) (Mc Donald, 2008, p.54), l'altitude indique 935 m (Figure 752) (Mc Donald, 2008, p.54), ce qui ne correspond pas à l'altitude régionale de Gcwihaba, qui est d'environ 1000 m (selon les MNTs JAXA et SRTM). Nous avons déjà évoqué les incertitudes de mesure d'altitude des GPS.

Un autre document original, également de Mc Donald (2008, p.46) comprenant une carte de l'anomalie (Figure 751), nous a permis de vérifier la localisation correcte de ce forage autour de Gcwihaba d'après les coordonnées géographiques indiquées sur les bords de la carte. Nous avons ainsi pu géoréférencer la carte d'anomalie comme ci-dessus (Figure 750). Nous indiquons dans la Fiche Méthodologique (p.1137) la méthode de géoréférencement utilisée. De cette manière, nous avons pu en déduire l'altitude exacte du forage à 1009 m (MNT JAXA et MNT SRTM3).

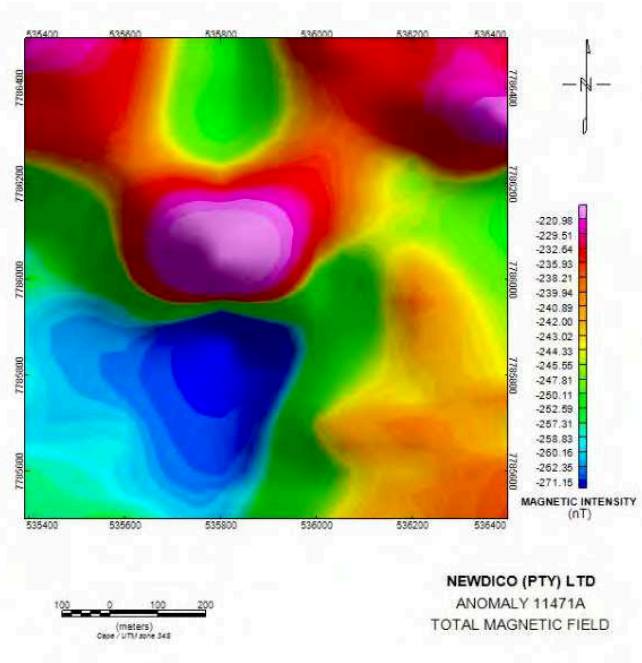


Figure 751 Document original concernant l'anomalie magnétique n°11471A (Mc Donald, 2008, p.46).

Les données de forage (Mc Donald, 2008, p.54) (Tableau 42) (Figure 752) indiquent de haut en bas :

- 59,8 m de sables éoliens ;
- 66 m de calcrète (de 59,8 à 125,8) dont les vingt derniers mètres indiquent une zone de transition avec les schistes sous-jacents ;
- 23 m de schistes (105 à 144) ;
- avant d'atteindre des gneiss quartzitiques à 148,6 m de profondeur.

FROM	TO	DESCRIPTION	
0		KALAHARI GROUP	
0	2	Dark grey dirty sand	
2	31	Fine grained khaki aeolian sand	
31	59.8	Medium grained red aeolian sand	
59.8	105	Soft white calcrete - replacement of silcrete by calcrete nearly 100%. Some patches of reddish brown sandstone &	calcrètes
		mudstone grading into patches of calcrete.	
105	125.8	Transition zone into sheared biotitic schist. Patches of biotite in calcrete/silcrete	
125.8	144	Reddish brown sheared & weathered schist, foliation, soapy on surface ~60 -70% to axis - sign of serpentinisation?	
144	148.6	Basaltic gneiss, minor sulphidization ~2-5 %	
148.6		Defined contact into a quartzitic gneiss	

Figure 752 Données géologiques originales du forage n°11471A (Source : Mc Donald, 2008, p.54, modifié).

Nous pouvons considérer que les gneiss quartzitiques identifiés par ce forage correspondent aux dolomies des collines. Premièrement, le diagnostic repose sur des échantillons broyés (« *cuttings* ») remontés au niveau de la tête de forage, et la distinction est difficile à établir pour des roches aussi anciennes (néoprotérozoïques) et métamorphisées, dépendant en grande partie de l'interprétation du foreur. Deuxièmement, ces gneiss quartzitiques appartiennent également au groupe géologique de Koanaka, comme les dolomies, tel que défini par Machacha (1997) et décrit p. 502. Mc Donald (2008, p.8) les considère également comme faisant partie du groupe de Damara.

L'altitude de la tête du forage est de 1009 m (MNT JAXA), ce qui indique que la base des collines dolomitiques se situerait à 860 m d'altitude. La base des collines qui émergent aujourd'hui à Gcwihaba seraient alors de grandes buttes karstiques hautes de 188 m, si l'on considère l'altitude de la colline de Gcwihaba et celle de Dimapo mesurées à 1048 m (MNT JAXA).

Ce forage met donc en évidence, au-dessus du groupe de Koanaka, un remplissage constitué de 125,8 m de formations du groupe du Kalahari, comprenant 59,8 m de sables éoliens, suivis de 66 m de calcrètes. Cet ensemble pourrait correspondre aux remplissages d'une paléovallée : une vallée incisée allant dans le sens de l'existence de grandes phases de régression passées, corrélées à une baisse du niveau de base régional ayant permis la création des premiers vides karstiques par fantômisation (lire définition p.214).

Ce forage met également en évidence la présence de 66 m de calcrètes, dont le mur se situe à 125,8 m de profondeur, soit à une altitude de 883,2 m (MNT JAXA). Ces calcrètes, situés entre 883,2 m et 949,2 m d'altitude (MNT JAXA) pourraient correspondre aux dépôts du lac Makgadikgadi datées de 900 000 ans, comme nous allons le voir plus loin (p.714). Nous avons remarqué que Linol (2013, p.305) se trompe lorsqu'il redessine le forage 11471A, à moins qu'il dessine le forage 11471B (et non A) car nous ne trouvons les mêmes données de forage que lui, comme la cote à -198,8 m qu'il indique sur son dessin.

3. Des calcrètes en profondeur

L'altitude du forage est mesurée à **1009 m d'altitude (MNT JAXA)**. Les calcrètes sont rencontrées de - 59.8 à -125.8 m de profondeur, soit de 949,2 à 883.2 m d'altitude (MNT JAXA), soit 66 m d'épaisseur. Ensuite, Mc Donald (2008, p.6) indique le forage rencontre des schistes amphibolitiques.

Profondeur (m)		Altitude en m (MNT JAXA)		Description	Epaisseur (m)
0	2	1009	1007	Sable « sale » gris foncé	2
2	31	1007	978	Sable éolien kaki à grains fins	29
31	59,8	978	949,2	Sable éolien rouge à grains moyens	28,8
59,8	105	**949,2**	904	**Calcrète** blanc tendre – remplacement presqu'à 100 % du silcrète par du calcrète. Quelques zones de grès et de boue carbonatée brune rougeâtre se transformant progressivement en **calcrète.**	**45,2**
105	**125,8**	904	**883,2**	Patchs de biotite dans des **calcrètes/silcrètes**. Zone de transition vers un schiste biotitique cisaillé.	**20.8**
125,8	144	**883,2**	865	Schiste brun rougeâtre cisaillé et altéré, foliation, gras en surface ~60 - 70% de l'axe. Signe de serpentinisation ?	18,2
144	148,6	865	860,4	Gneiss basaltique, traces mineures de sulfures ~2-5%	4.6
148,6		860,4		Contact avec les gneiss quartzitiques	

Tableau 42 Données géologiques du forage n°11471A (Source : Mc Donald, 2008, p.54, modifié).

Cependant, le document fourni par Mc Donald (2008, p.54) et représenté ci-dessous (Figure 752) indique que les schistes sont présents à partir de 105 m de profondeur.

4. Erreur d'interprétation des niveaux rencontrés par le forage n°11471A

Le tableau ci-dessous montre que les niveaux rencontrés dans le forage ont été classés selon qu'ils appartiennent au groupe du Kalahari *(KALAHARI GROUP)*, aux schistes à biotite *(BIOTITIC SCHIST)* ou aux basaltes *(BASALT)*. Comme dans la partie précédente, nous ne sommes pas d'accord avec ce classement et nous allons l'expliquer.

TSODILO RESOURCES LIMITED : DRILL LOG SHEET

ANOMALY No				START DATE	23/11/06	
11471A						
HOLE No.				END DATE	25/11/06	
HOLE INCLINATION FROM HORIZONTAL: -90 DEGREES AZIMUTH:						
X - CO-ORD.				LOGGED BY	MCDONALD	
535900	UTM CAPE GRID		CASING FROM 0m TO m		SIZE	
Y - CO-ORD.		CASING FROM:	TO: m	SIZE		
7786000		CASING FROM:	TO: m	SIZE		
Z - CO-ORD.				ROTARY TRICONE	0	
935m				CASING SHOE DRILLING		
				DIAMOND CORE		

FROM	TO	DESCRIPTION	SAMPLING FROM	SAMPLING TO
0		KALAHARI GROUP		
0	2	Dark grey dirty sand		
2	31	Fine grained khaki aeolian sand		
31	59.8	Medium grained red aeolian sand		
59.8	105	Soft white calcrete - replacement of silcrete by calcrete nearly 100%. Some patches of reddish brown sandstone &		
		mudstone grading into patches of calcrete.		
		BIOTITIC SCHIST		
105	125.8	Transition zone into sheared biotitic schist. Patches of biotite in calcrete/silcrete		
125.8	144	Reddish brown sheared & weathered schist, foliation, soapy on surface ~ 60 -70% to axis - sign of serpentinisation?		
		BASALT		
144	148.6	Basaltic gneiss, minor sulphidization ~ 2-5 %		
148.6		Defined contact into a quartzitic gneiss		

Figure 753 Document original concernant le forage n°11471A (Source : Mc Donald, 2008, p.54).

Dans cet extrait, Mc Donald (2008, p.6) indique que les niveaux sous les calcrètes n'appartiennent pas au groupe de Koanaka mais plutôt au socle métamorphique. Dans tous les cas, la présence des calcrètes est avérée, et ce sont ces formations qui nous intéressent. Dans cet extrait, il indique bien aussi que les schistes sont situés à 125 m de profondeur.

> *"Forée en 2006, cette anomalie a recoupé un schiste amphibolitique serpentinisé à 125 m, représentant la ceinture de roches vertes ou croûte océanique du craton subducté d'Angola-Congo. L'amphibolite présente une fabrique subtile définie par un alignement parallèle de feldspaths et de fines disséminations (~1 %) de pyrrhotite, de pendtlandite et de chalcopyrite. Ceci a été interprété comme étant à l'origine de la signature magnétique. Aucun échantillonnage de limons n'a été effectué sur cette cible" (Mc Donald, 2008, p.6).*

Dans l'extrait suivant, Mc Donald (2008, p.8) indique que c'est à 105 m de profondeur que les calcrètes sont rencontrées alors que c'est plus haut (59.8 m). Il indique aussi que les gneiss appartiennent au groupe de Damara mais que sous ces gneiss, il y a des roches amphibolitiques qui elles appartiennent au socle. Ces dernières n'apparaissant pas dans la description du forage. Le forage se terminant sur les gneiss.

"Un seul forage de 149 m de profondeur a été réalisé pour explorer cette anomalie magnétique. Ce forage a pénétré la couverture et le calcrète du groupe du Kalahari à 105 m, puis a recoupé des gneiss à quartz-feldspath-biotite fortement métamorphisés, interprétés comme faisant partie du groupe de Damara. Ces gneiss reposent sur des roches amphibolitiques, probablement représentatives de la ceinture de roches vertes ou de la croûte océanique du craton subducté Angola-Congo. L'amphibolite présente une fabrique subtile définie par un alignement parallèle de feldspaths à 132 m et de fins sulfures disséminés. Concernant le potentiel kimberlitique, aucun autre travail n'est justifié" (Mc Donald, 2008, p.8).

Le forage n°11471A a traversé les formations du groupe de Koanaka à 148 m de profondeur (860 m MNT JAXA) et il a traversé des calcrètes entre 59.8 et 125.8 m de profondeur, soit de 949,2 à 878.2 m MNT JAXA. Ces informations sont reportées sur la Figure 763.

Altitude du forage (MNT JAXA)	1009 (Mc Donald, 2008)	1004 (*Waterbore hole 2*)
59.8 m de sables éoliens	Altitude du toit des calcrètes et de la base des sables 949.2 m MNT JAXA	Altitude du toit des calcrètes et de la base des sables 944.2 m MNT JAXA
66 m de calcrètes	Altitude de la base des calcrètes et du toit des schistes 883.2 m MNT JAXA	Altitude du toit des schistes 878.2 m MNT JAXA
18.2 m de schistes	Altitude du toit des basaltes 981 m MNT JAXA	Altitude du toit des basaltes 976 m MNT JAXA
4.6 m de basaltes	Altitude du toit des gneiss du groupe de Koanaka 860.4 m MNT JAXA	Altitude du toit des gneiss du groupe de Koanaka 855.4 m MNT JAXA
148 m de gneiss quartzitiques appartenant au *Groupe de Koanaka*		

Tableau 43 Adaptation des profondeurs si le forage Waterbore hole 2 correspondant au forage n°11471A.

Remarque :

Il existerait 2 forages (notés BIII ou BHII et BHIV) de 92 et 90 m de profondeur à l'extérieur de la grotte de Gcwihaba dans la vallée de Gewidum (Cooke, 1975) mais nous n'avons pas réussi à les retrouver. Nous n'avons pas plus d'information.

4.4.1.3.2. Coupe géologique de Gcwihaba tenant compte du forage n°11471A

Après vérification des données du forage n°11471A, nous pouvons proposer les coupes géologiques suivantes (Figure 754 à Figure 760). Deux ensembles de calcrètes sont trouvés à Gcwihaba. Les 4 niveaux définis et cartographiés par Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975). Puis, ceux trouvés en profondeur dans les forages (Mc Donald, 2008). Nous verrons que d'autres forages indiquent d'autres niveaux de calcrètes en profondeur à Gcwihaba (p.763). Ces calcrètes pourraient correspondre aux dépôts lacustres du paléolac *Deception* datait entre - 2.2 Ma et - 1.8 Ma (Cotterill, 2006 ; Mc Farlane et Eckardt, 2008 ; Cotterill et De Wit 2011 ; Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, Table 1, p.388 ; Moore *et al.*, 2009 *in* Fierens, 2019 ; Royer, 2020 ; Gaudare, 2024). Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Table 2). Les calcrètes sont situées entre 883,2 m et 949,2 m d'altitude (MNT JAXA) et pourraient correspondre aux dépôts du lac Makgadikgadi, soit vers 900 000 ans (Cotterill, 2006 ; Mc Farlane et Eckardt, 2008 ; Cotterill et De Wit 2011 ; Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, Table 1, p.388 ; Moore *et al.*, 2009 *in* Fierens, 2019 ; Royer, 2020 ; Gaudare, 2024). Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Table 2).

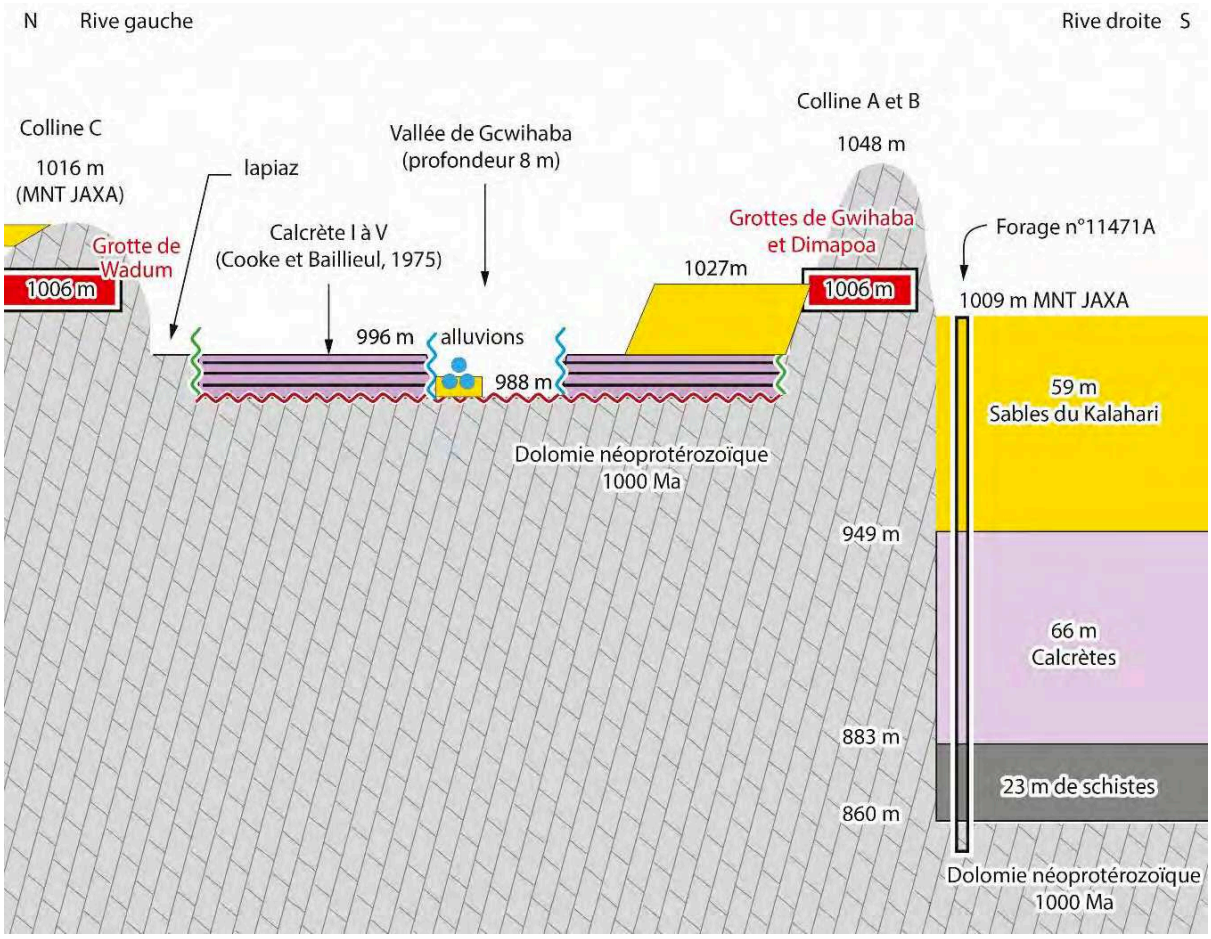


Figure 754 Coupe géologique schématique de la vallée de Gewidum complétée par le forage n°11471A (Mc Donald, 2008). (Voir aussi Figure 895 p.885).

Sur ce profil topographique (Figure 755), exagéré verticalement dix fois, on observe l'altitude des grottes de Wadum, de Gcwihaba et de Dimapo et les collines A et C. Nous avons indiqué les couches rencontrées par le forage n°11471A. L'emplacement du profil topographique est indiqué sur la Figure 741 (p.739).

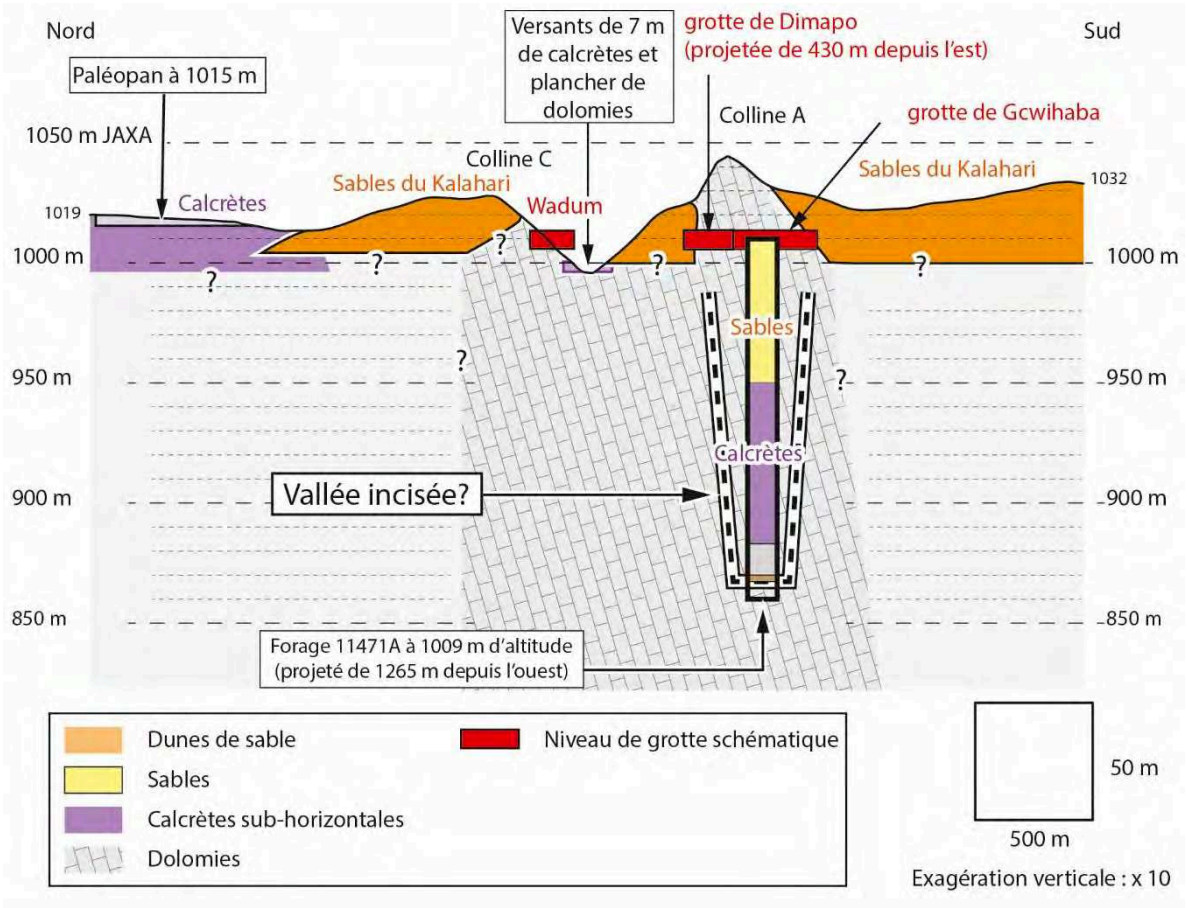


Figure 755 Interprétation d'une vallée incisée à Gcwihaba.

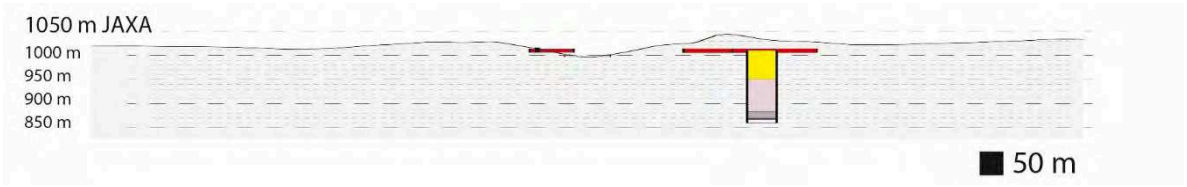


Figure 756 Profil topographique à l'échelle, sans exagération verticale.

Les données du forage et leurs interprétations posent plusieurs questions. À quel environnement de dépôts correspondent les calcrètes du fond du forage, sont-ils les mêmes que ceux-qui affleurent en surface ? Est-ce que ce sont des calcrètes formées en surface, avec des traces de racines par exemple ou bien ce sont des calcrètes lacustres, formées sous une certaine profondeur d'eau ? Nous avons le même questionnement concernant les 50 mètres de puissance de sables indiqués par le forage. Est-ce que ce sont des sables formés en surface? Une question générale se pose sur la contemporanéité des sables, des calcrètes et des dunes de sables.

Est-ce que ce forage indique une vallée incisée ou bien un paléopan dont son plancher atteindrait la cote de 880 m d'altitude (JAXA) ? Les forages du pan de K1 et ceux du pan Seretse (K3) semblent indiquer la présence de plancher de paléopan en profondeur (Figure 888 à Figure 895, p.881). Tandis que des forages décrits par Nash (1992) plus au nord semblent indiquer la présence de graben (Figure 761 p.762).

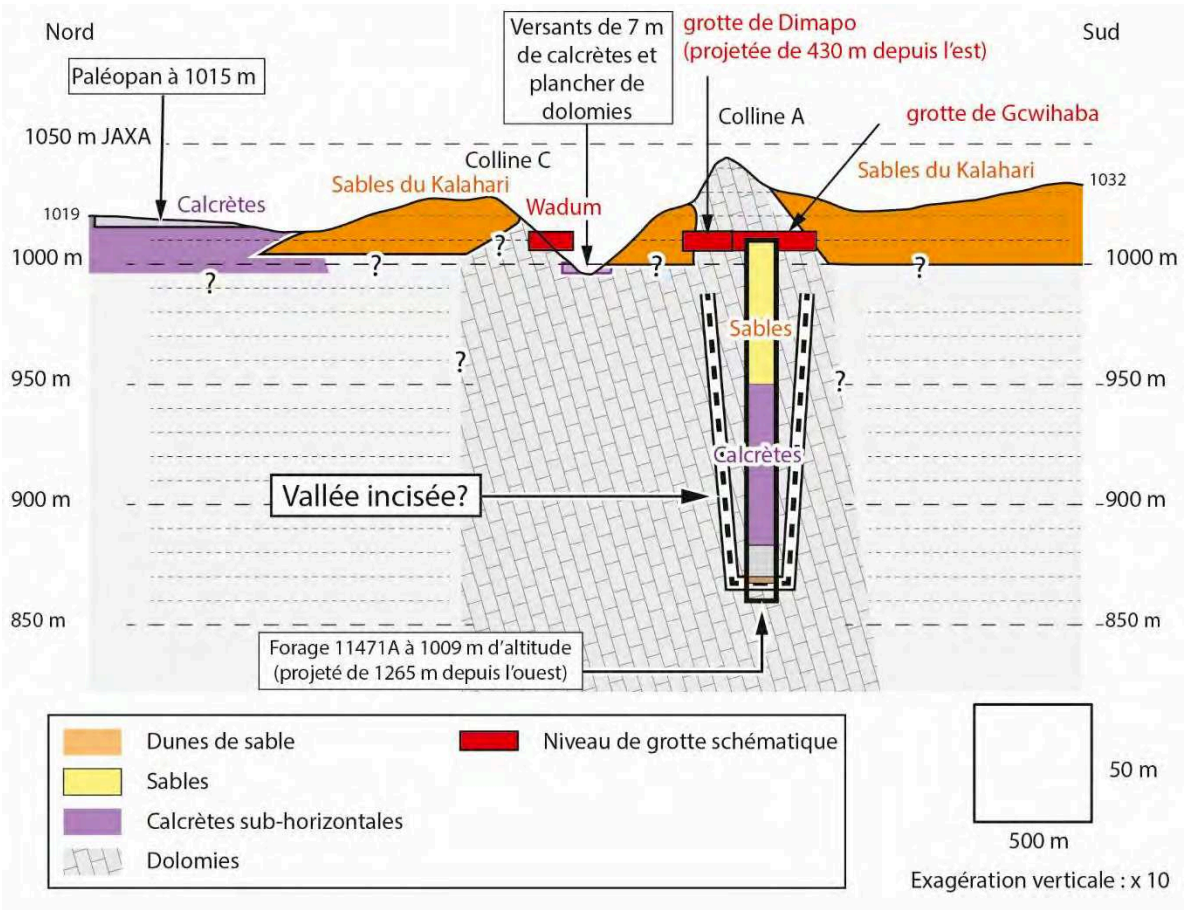


Figure 757 758 Interprétation du forage n°11471A de Gcwihaba comme une vallée incisée.

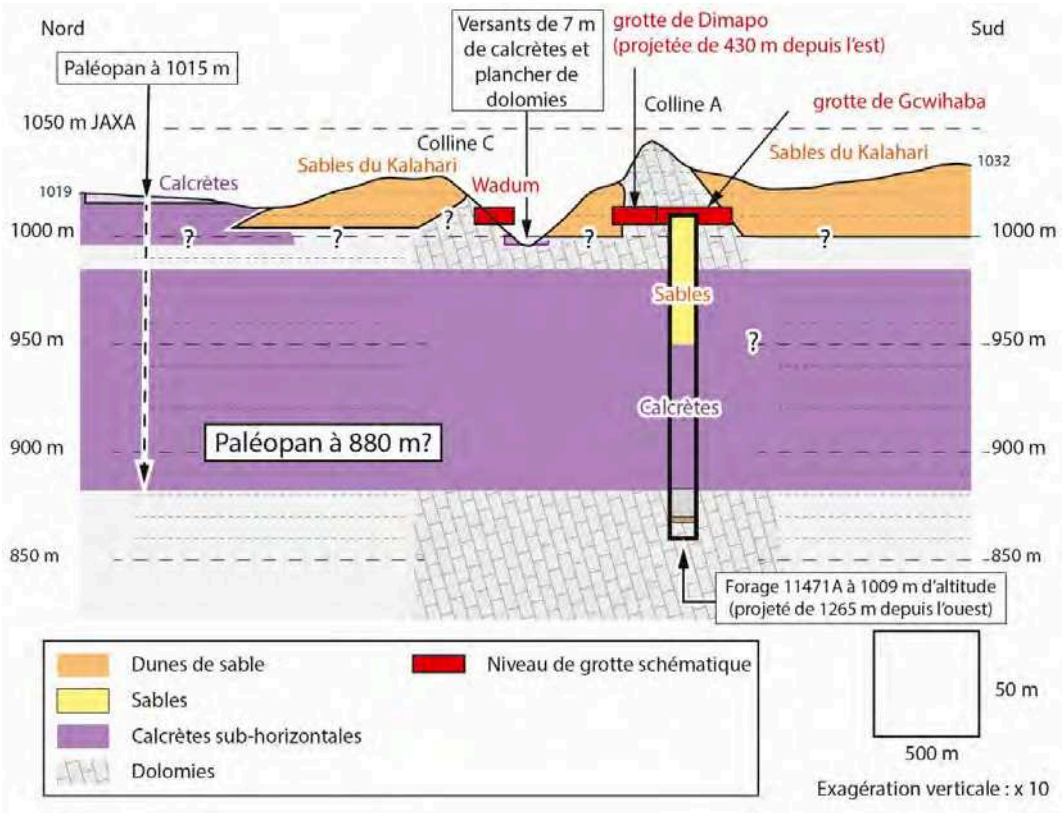


Figure 759 Interprétation du forage n°11471A de Gcwihaba comme un vaste paléopan profond.

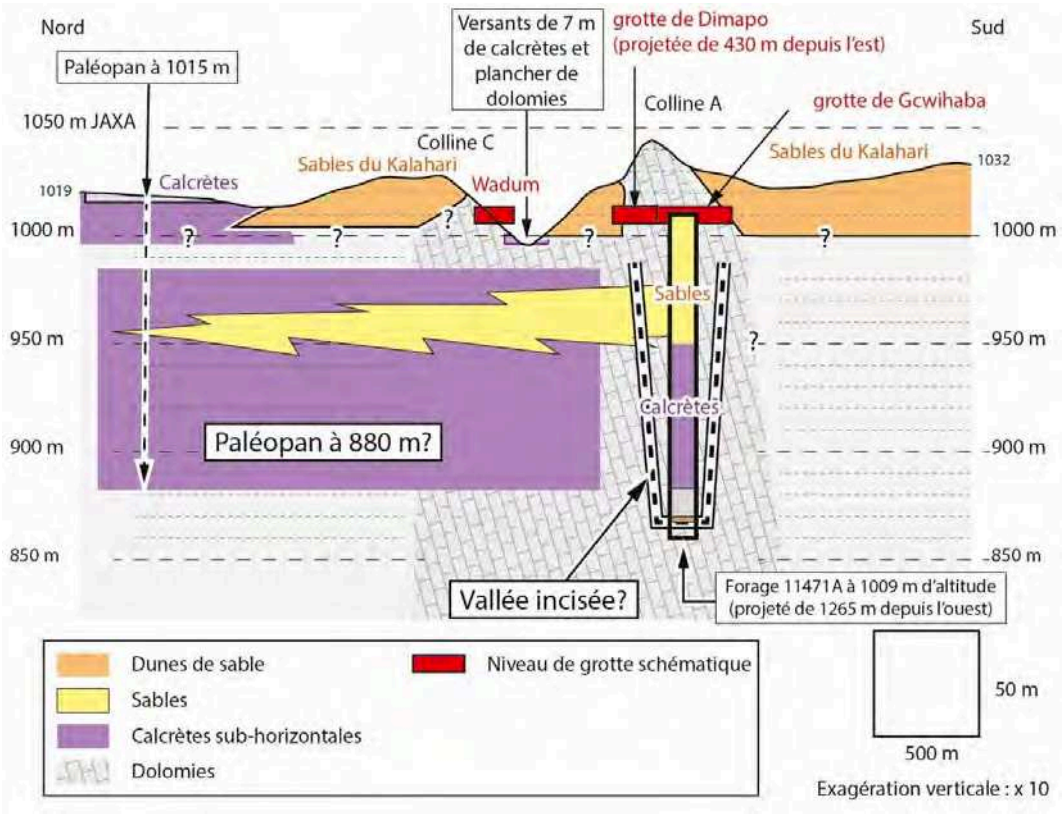


Figure 760 Les deux interprétations du forage n°11471A de Gcwihaba.

5. Vallée incisée ou jeu de failles ?

Cette vallée incisée pourrait être contemporaine de la phase de vidange du fantôme *per descensum* et pourrait correspondre à une importante phase d'incision régionale corrélée avec la phase régressive qui assèche le paléolac Deception, à 1000 m d'altitude et crée le paléolac Makgadikgadi, à 950 m d'altitude entre - 2.5 et - 1.7 Ma (Moore et Larkin, 2001 ; Cotterill, 2006 ; Huntsman-Mapila, 2006 ; Mc Farlane et Eckardt, 2008 ; Burrough *et al.*, 2009 ; Fierens, 2019, Moore *et al.* 2012, 2022) et qui se serait produite entre -2.5 à -1.5 Ma (Royer 2020) ou entre 1.5 et 400 000 ans (selon la profondeur du paléolac). Les niveaux d'anciens lacs découverts en profondeur dans les forages de Gcwihaba (Mc Donald, 2008, p.46) (p.752) peuvent être interprétés comme une vallée incisée dans les dolomies (résultant d'une baisse du niveau de base), soit comme un graben formé par l'extension tectonique lors du rifting. Il y a aussi une interrogation concernant la roche que rencontre le forage au fond, est-ce des dolomies ?

Plus au nord, Nash (1992) interprète des forages et identifie un graben, illustré ci-dessous (Figure 762).

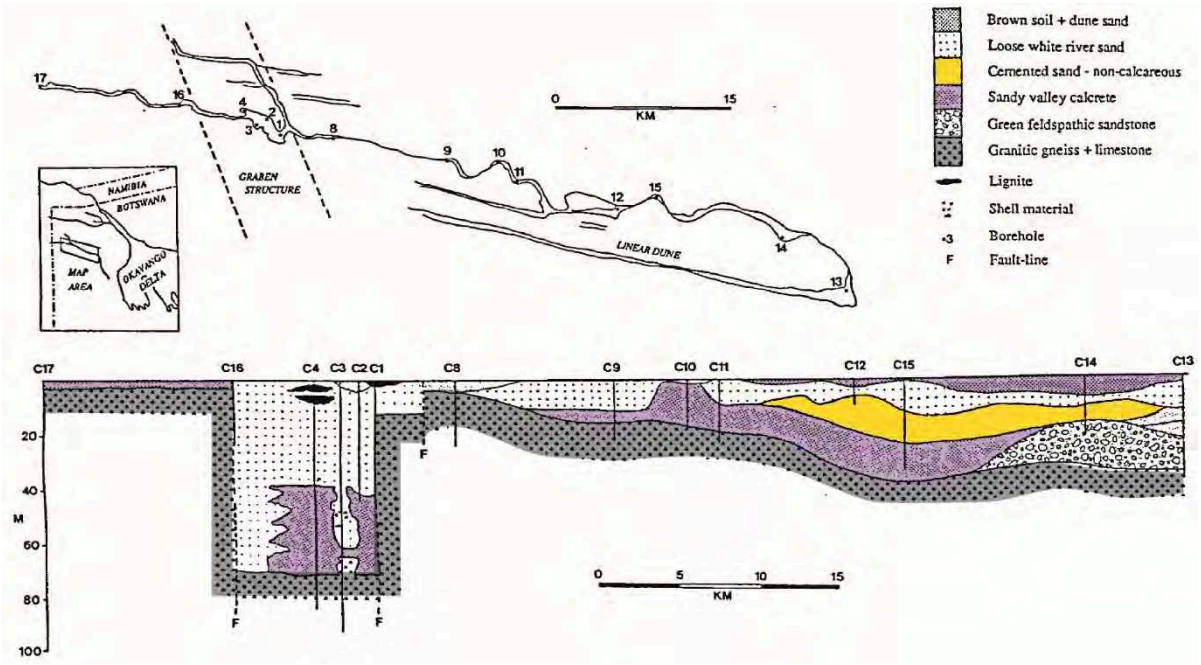


Figure 761 Identification d'un graben vers Tsodilo Hills par Nash (1992).

4.4.1.3.3. Tableau des autres forages près des grottes de Gcwihaba

Nous avons compilé, dans le Tableau 44 ci-dessous, les données issues des autres forages de Gcwihaba, dont certains (BHZ12386, BHZ12388 et BHZ12389) ont traversé les formations du groupe du Kalahari (calcrètes, sables du Kalahari, etc.) et qui indique la profondeur du toit des dolomies. Ces informations sont reportées sur la carte de Gcwihaba (Figure 763, p.764).

Numéro	Latitude	Longitude	Altitude MNT SRTM 3V2	Altitude MNT JAXA	BGI	Google-maps	Profondeur (m) /altitude du toit des dolomies (MNT Jaxa)	Information	Présence de calcrètes
BHZ12381	-20.01229	21.36599	985	986	lien BGI	lien	Données manquantes		
BHZ12382	-20.01842	21.35379	996	993	lien BGI	lien	-3m / 990		
BHZ12383	-20.02072	21.359	1030	1025	lien BGI	lien	-8m /1017	Cavité Dimapo de 9 à 26	
BHZ12384	-20.02399	21.35889	1031	1031	lien BGI	lien	-15m /1016	Doline ? de 35 à 41	
BHZ12385	-20.02447	21.36148	1026	1024	lien BGI	lien	-38m /986		
BHZ12386	-20.02398	21.36695	1015	1013	lien BGI	lien	-24m /989		Oui
BHZ12387	-20.02559	21.35495	1030	1029	lien BGI	lien	-15m /1014		Cavité à -47 m (932 m d'altitude)
BHZ12388	-20.02314	21.35051	1015	1013	lien BGI	lien	-73m /940		Oui 17 à 27 63 à 73
BHZ12389	-20.01129	21.35726	1017	1022	lien BGI	lien	-34m /988		Oui 18 à 34
BHZ12390	-20.01874	21.35073	997	1002	lien BGI	lien	-7m /988		Oui

Tableau 44 Données concernant les forages à Gcwihaba selon le portail géologique du BGI.

4.4.1.3.4. Synthèses cartographiques des calcrètes de Gcwihaba

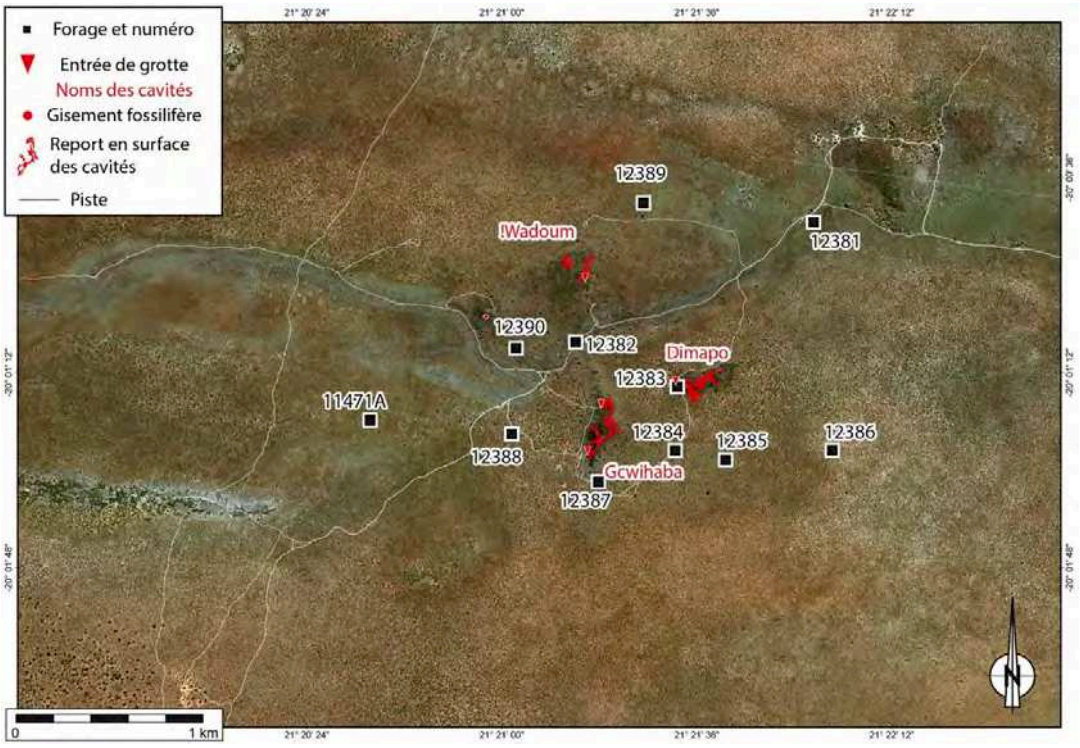


Figure 762 Forages, et leurs numéros, à Gcwihaba.

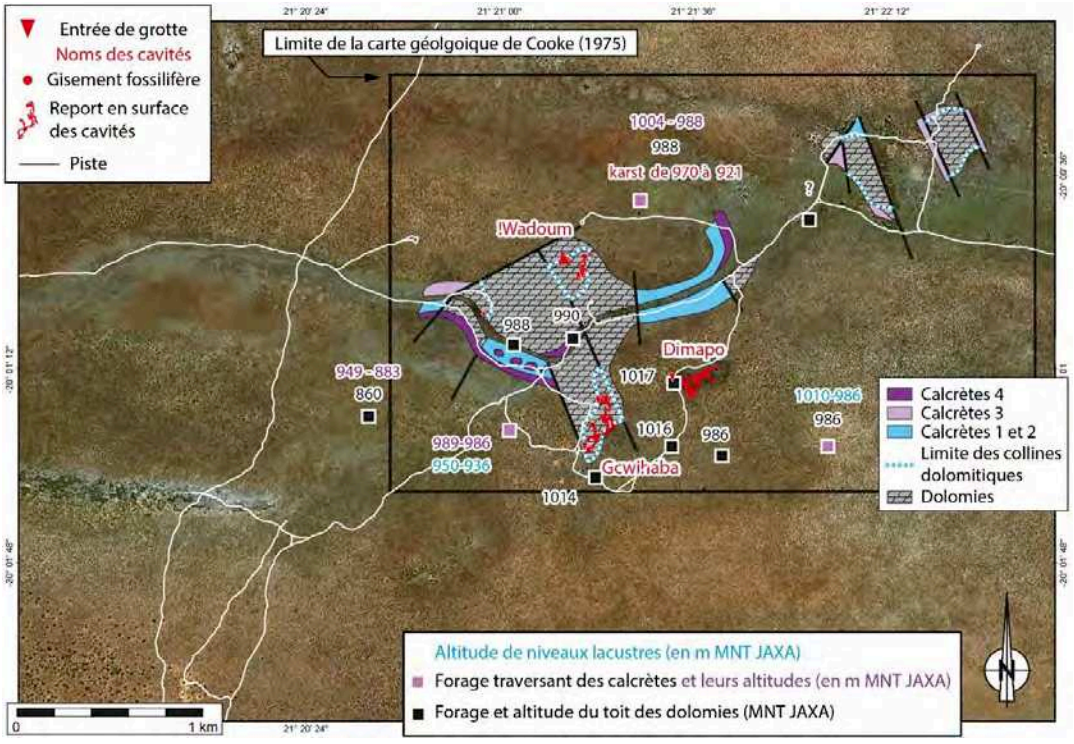


Figure 763 Calcrètes à l'affleurement d'après la carte géologique de Cooke (1975) (Figure 710 p.719) et forages BGI traversant des calcrètes et des calcaires lacustres à Gcwihaba.

4.4.1.3.5. Descriptions des forages apportant des informations sur la présence de calcrètes, de calcaires lacustres et de zone karstifiée en profondeur à Gcwihaba

Le forage n°12386, ci-dessous (Tableau 45), n'atteint pas les dolomies et montre 83 m de sédiments du groupe du Kalahari (sables rouges, calcrètes et blocs de dolomie) dont des calcrètes de 3 à 24 m de profondeur, soit à 1010 et 986 m MNT JAXA. Rappelons que les certaines calcrètes sont constituées de clastes de dolomies et de calcrètes (Calcrètes 4 de Cooke et Baillieul, 1975), éléments que l'on retrouve dans ce forage. Ces informations sont reportées sur la Figure 763 (p.764).

Couche du Forage n°12386	Profondeur du toit (m) par rapport à la tête de forage	Profondeur de la base (m)	Description	Épaisseur (m)	Analyse
1	0 (1013 m MNT JAXA)	3	Sables fins rouges meubles	3	
2	3	24	Grès feuilletés avec **calcrètes** et bioturbations (racines ?)	21	Humide
3	24	27	Dolomies avec grès polis	3	
4	27	47	Dolomies fraîches et fumées	20	
5	47	50	Blocs de dolomies et blocs de sables quartzeux et sables meubles	3	
6	50	64	Blocs de dolomies et remplissages sableux	14	
7	64	66	Sables polis meubles	2	
8	66	79	Sables et blocs de dolomies	7	
9	79	83	Sables rouges	4	

Tableau 45 Description du forage n°12386.

Le forage n°12389 (Tableau 46) ci-dessous, traverse un peu plus de 10 m de calcrètes, entre 18 et 34 m de profondeur, soit entre 1004 et 988 m MNT JAXA puis atteint les dolomies à 34 m de profondeur, soit à 988 m MNT JAXA et les traversent pendant 18 m avant d'atteindre du karst remplie de graviers, de -52 à -101 m de profondeur, soit à 970 et 921 m MNT JAXA. Ces informations sont reportées sur la Figure 763 (p.764).

Couche du Forage n°12389	Profondeur du toit (m) par rapport à la tête de forage	Profondeur de la base (m)	Description	Épaisseur (m)	Analyse
1	0 (1022 m MNT JAXA)	18	Sables rouges meubles	18	
2	18	28	**Sables semi-consolidés + calcrètes**	10	Humide
3	28	34	**Blocs de dolomies et calcrètes**	6	Humide
4	34	52	**Marbres dolomitiques blanc**	18	
5	52	65	**Blocs de dolomies et graviers**	13	Karst
6	65	101	**Graviers meubles s'affinant vers le bas avec la profondeur**	36	Karst

Tableau 46 Description du forage n°12389.

Le forage 12388 (Tableau 47) ci-dessous, traverse des calcrètes, de 24 à 27 m de profondeur, soit de 989 à 986 m MNT JAXA, et des calcaires à boues carbonatées sombres avec des calcrètes de 63 à 77 m de profondeur, soit de 950 à 936 m MNT JAXA et dont la base n'a pas été atteinte par le forage. Le forage n'a pas atteint le groupe de Koanaka, les dolomies.

Couche du Forage n°12388	Profondeur du toit (m) par rapport à la tête de forage	Profondeur de la base (m)	Description	Épaisseur (m)	Analyse
1	0 (1013 m MNT JAXA)	17	Sables fins rouges meubles	17	
2	17	24	Sables et lentilles de calcrètes	7	
3	24	27	**Calcrètes**	3	Humide
4	27	43	Sables semi-consolidés polies	16	
5	43	63	Sables polis avec des grains de micas	20	
6	63	73	**Calcaires à boues carbonatées sombres avec des calcrètes**	10	Lacustre ?
7	73	77	**Calcaires à boues carbonatées sombres avec des fragments de gneiss**	4	

Tableau 47 Description du forage n°12388.

Remarque :
À l'est de Gcwihaba, le forage Z14305 (lien BGI, lien Google Maps) montre 130 m de dépôts de sableux et un aquifère à 80 m de profondeur.

4.4.1.4. Synthèse cartographique et analyse géomorphologique des paysages de Gcwihaba

Les données présentées précédemment mettent en évidence la présence de paléolacs. Elles vont maintenant être synthétisées sous forme cartographique et valider ses hypothèses. La Figure 764 regroupe cinq ensembles de visualisation 2,5D des paysages de Gcwihaba, que nous décrirons en détail. Chaque ensemble conserve le même angle de vue, tandis que les fonds cartographiques varient (image satellitaire, hypsométrie, géologie) permettant une analyse géomorphologique des paysages.

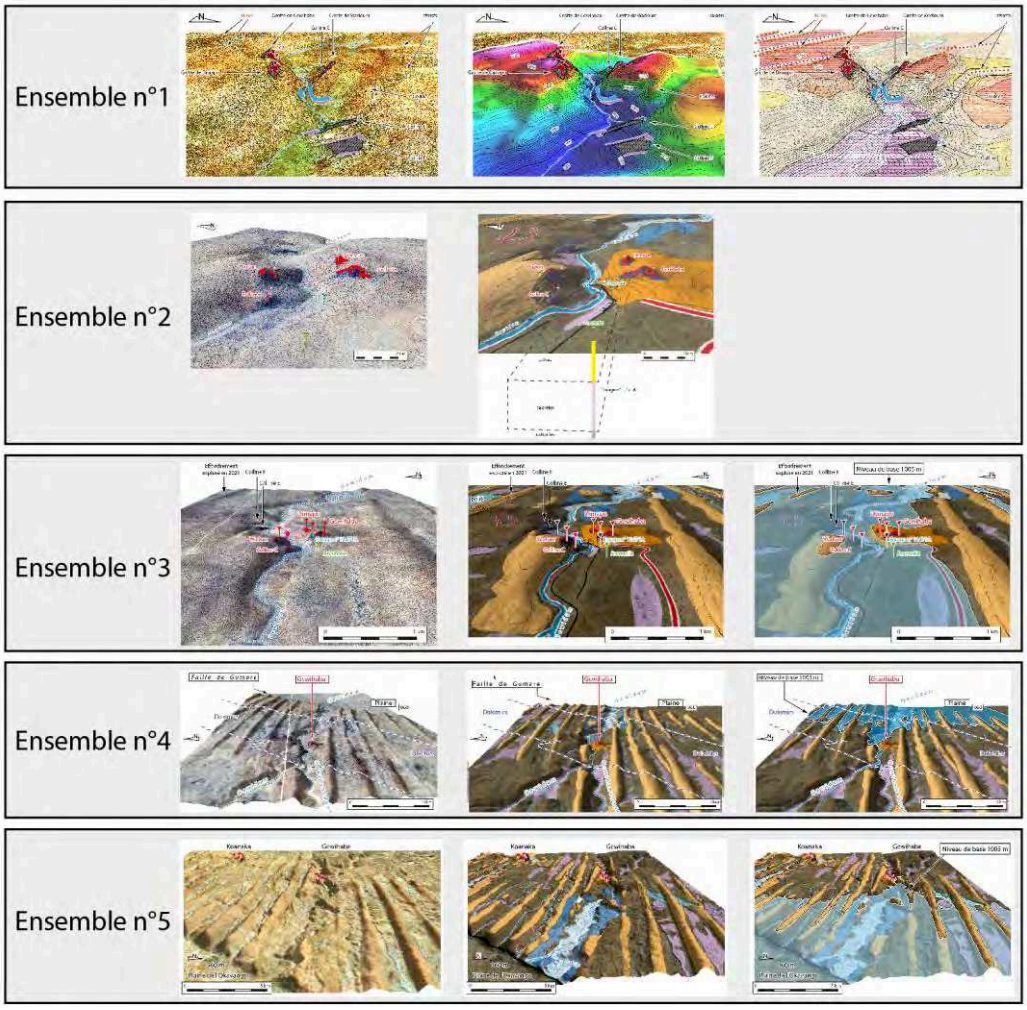


Figure 764 Synthèse cartographique de la région de Gcwihaba.

Ces ensembles permettent de prendre progressivement du recul, depuis la vallée de Gcwihaba jusqu'à la bordure du Rift de l'Okavango, matérialisée par la limite orientale des dunes de sable.

Le triptyque de l'ensemble n°1 présente une vue rapprochée de la vallée de Gcwihaba (Figure 765 à Figure 767), suivi de l'ensemble n°2 qui propose un zoom sur les grottes (Gcwihaba, Dimapo, Wadum) (Figure 768 et Figure 769). Les ensembles suivants montrent des vues progressivement plus éloignées : le triptyque de l'ensemble n°3 (Figure 770 à Figure 772), puis le triptyque de l'ensemble n°4, orienté vers l'ouest (Figure 773 à Figure 775). Enfin, le triptyque de l'ensemble n°5, orienté vers l'est vient conclure cette synthèse (Figure 776 à Figure 778).

L'ensemble n°1 (Figure 768 et Figure 769) localise les réseaux karstiques en rouge, organisés autour de 1006 m (MNT JAXA) d'altitude en moyenne. Ils sont situés au-dessus du fond de la vallée actuelle de Gewidum qui culmine à 988 m. Cette vallée mesure 50 à 80 m de large et se resserre en amont. Si on se réfère au sommet des dolomies de la colline A, point le plus élevé à 1048 m (MNT JAXA), on peut considèrer que cette vallée présente environ 60 m de profondeur, tandis qu'au niveau de la piste qui circule dans le fond de vallée, on observe seulement 7 mètres d'incision dans des calcrètes subhorizontales (Cooke, 1975). En amont le plancher de la vallée est constitué par les dolomies affleurantes.

Le forage n°11471A, situé à 1,2 kilomètres en amont (p.752) indique que les dolomies se trouvent cette fois-ci à 860 m d'altitude, soit 128 m plus bas indiquant qu'en-dessous de la vallée actuelle se trouve une vallée incisée plus ancienne ou bien directement un compartiment tectonique affaissé par le jeu des failles, comme indiqué (p.758).

Ceci impliquant une baisse du niveau de base importante pour expliquer les incisions, la karstification par fantômisation (notamment la vidange des fantômes de roche) et la présence de la rivière dont nous trouvons les alluvions allochtones, de quartz blanc (photographies p.723) dans le talweg de Gewidum. Nous pourrions aussi intercaler une transgression antérieure si les calcrètes sont lacustres et pas simplement liées à la rivière.

Nous avons cartographié les dunes de sable de la formation éolienne du Kalahari en orange, et les espaces entre les dunes (interdunaires ou *« straats »*) en violet. Nous avons délimité les dolomies subaffleurantes par des traits pointillés bleu. Un paléo-poljé est justement identifié sur les dolomies (Figure 770, Figure 771 et Figure 774,).

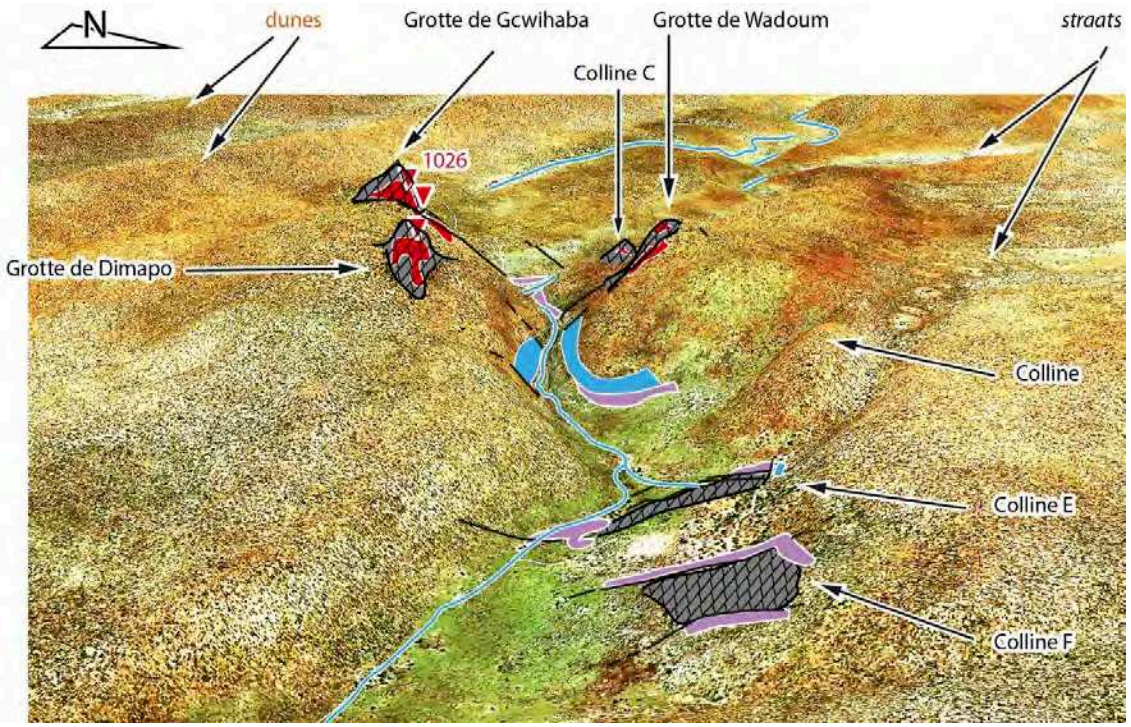


Figure 765 Visualisation 2,5D de la vallée de Gewidum, vue depuis l'est, montrant les calcrètes (en violet) et les dolomies (en trames grises) sur une image satellite. Vue exagérée verticalement 10 fois.

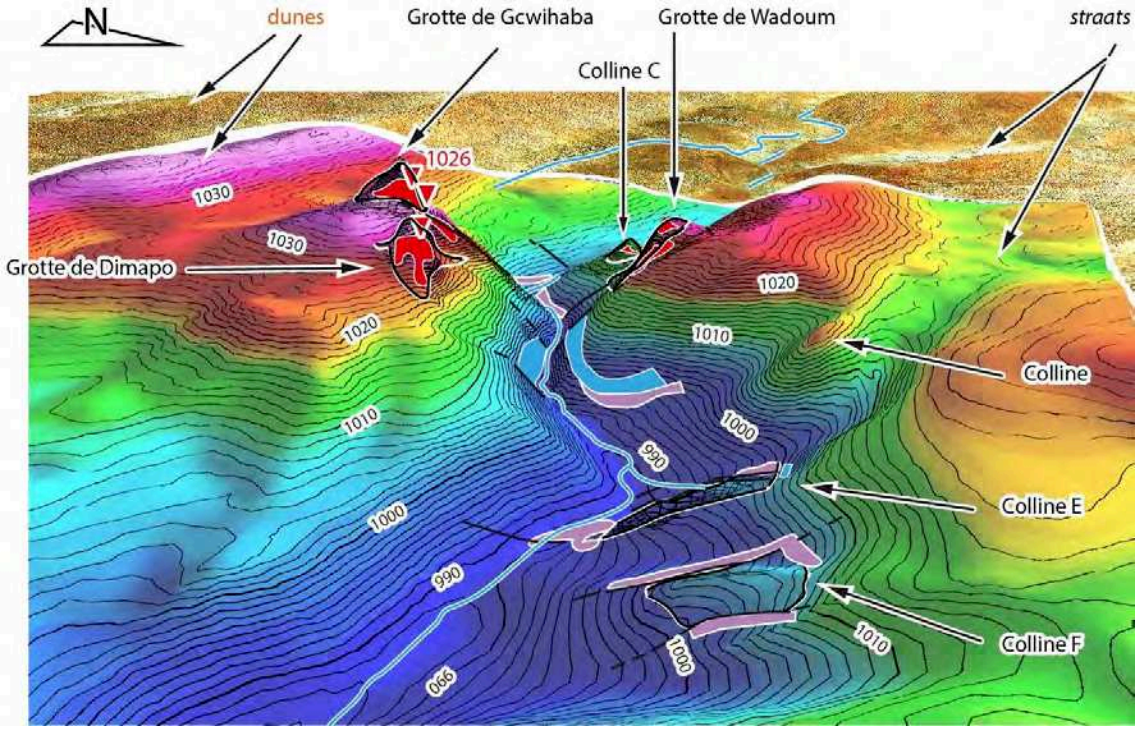
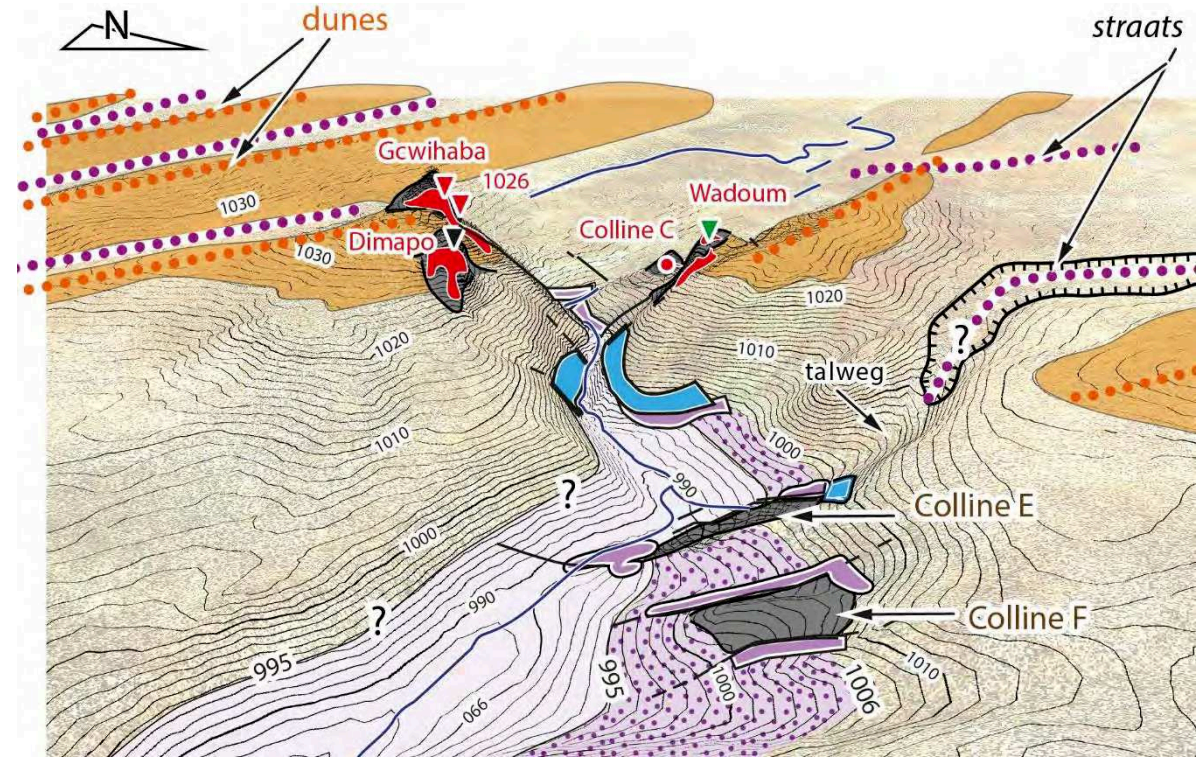


Figure 766 Idem avec une analyse hypsométrique des reliefs.



▼ Porche d'entrée de grotte ▼ Aven naturel ▼ Entrée tubée (forage)

● Paléokarst ossifère recoupé par le versant de la Colline C

CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES DUNES DE SABLE

Sommet des dunes de sable, à 1040 m d'altitude (JAXA)

Dune de sable ou dune résiduelle

CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES PALÉOPANS ET DE LA VALLÉE ACTUELLE

Replat ou espace interdunaire «*straats*» caractérisés par des calcrètes et des sables blanc

Petit vallon

Dépôts résiduels de calcrètes 4, entre 995 et 1005 m

Dépôts résiduels de calcrètes 3, entre 995 et 1005 m

Dépôts résiduels de calcrètes 1 et 2, entre 995 et 1005 m

Surface entre 995 et 1005 m caractérisée par des sables blanc,

Vallée actuelle entre 988 et 995 m

CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES DOLOMIES

Collines dolomitiques de plusieurs dizaines de mètres de hauteur (Gcwihaba, Dimapo, Wadum) et petites collines arasées (Colline C, Colline E et Colline F)

Figure 767 Visualisation 2,5D de l'analyse morphologique de la vallée de Gewidum. Exagérée verticalement 10 fois.

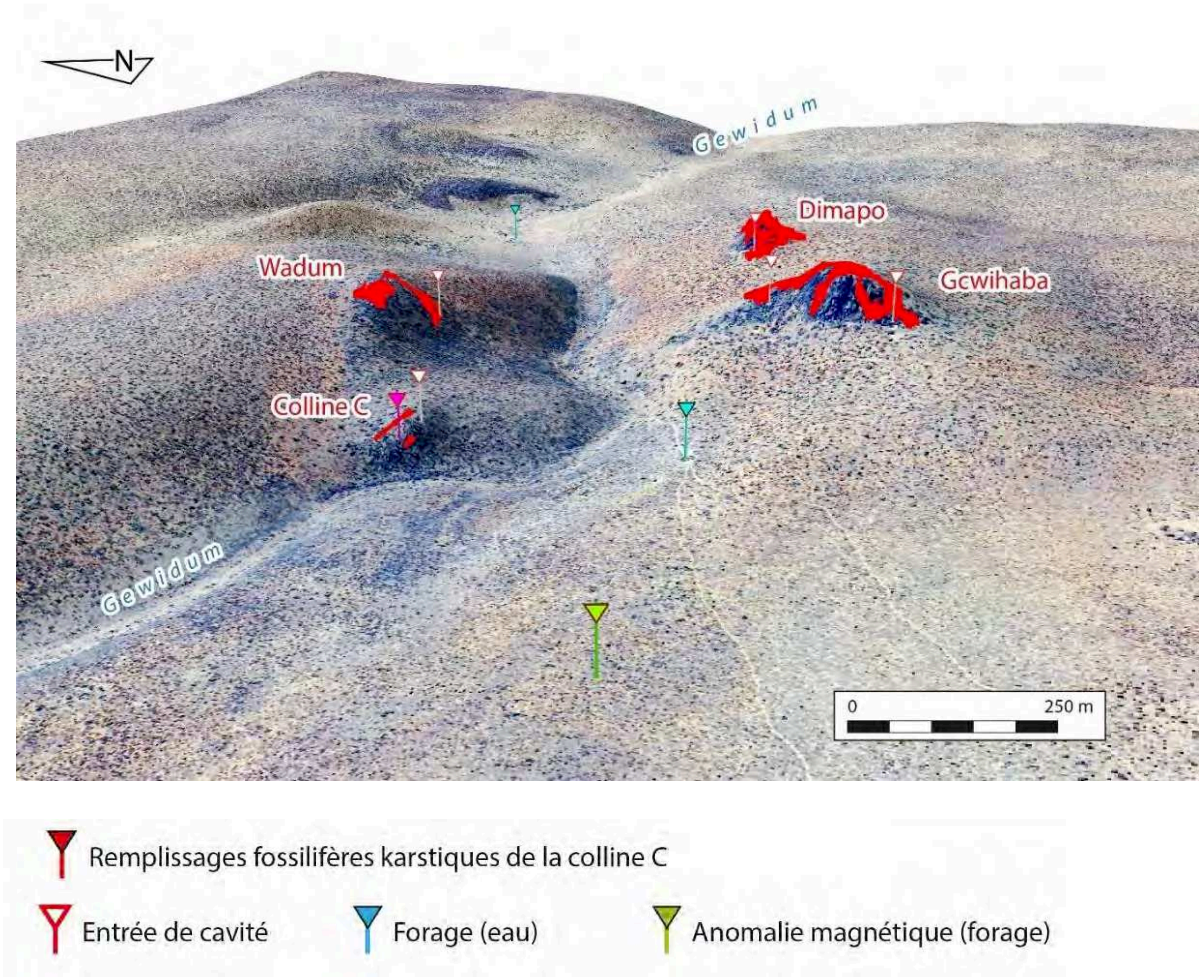


Figure 768 Zoom sur la vallée de Gewidum et les collines karstifiées de Gcwihaba. Exagérée verticalement 10 fois.

La vallée de Gewidum (Figure 768) conserve des calcrètes, comme indiquées sur la carte géologique de Baillieul (Cooke et Baillieul, 1974; Cooke, 1975) (Figure 741 p.739 et en annexe p.1302). et indiquées en mauve sur la Figure 769. Le forage n°11471A (Mc Donalds, 2008) (p.752) qui traverse 60 m de calcrètes pourrait indiquer la présence d'une vallée incisée.

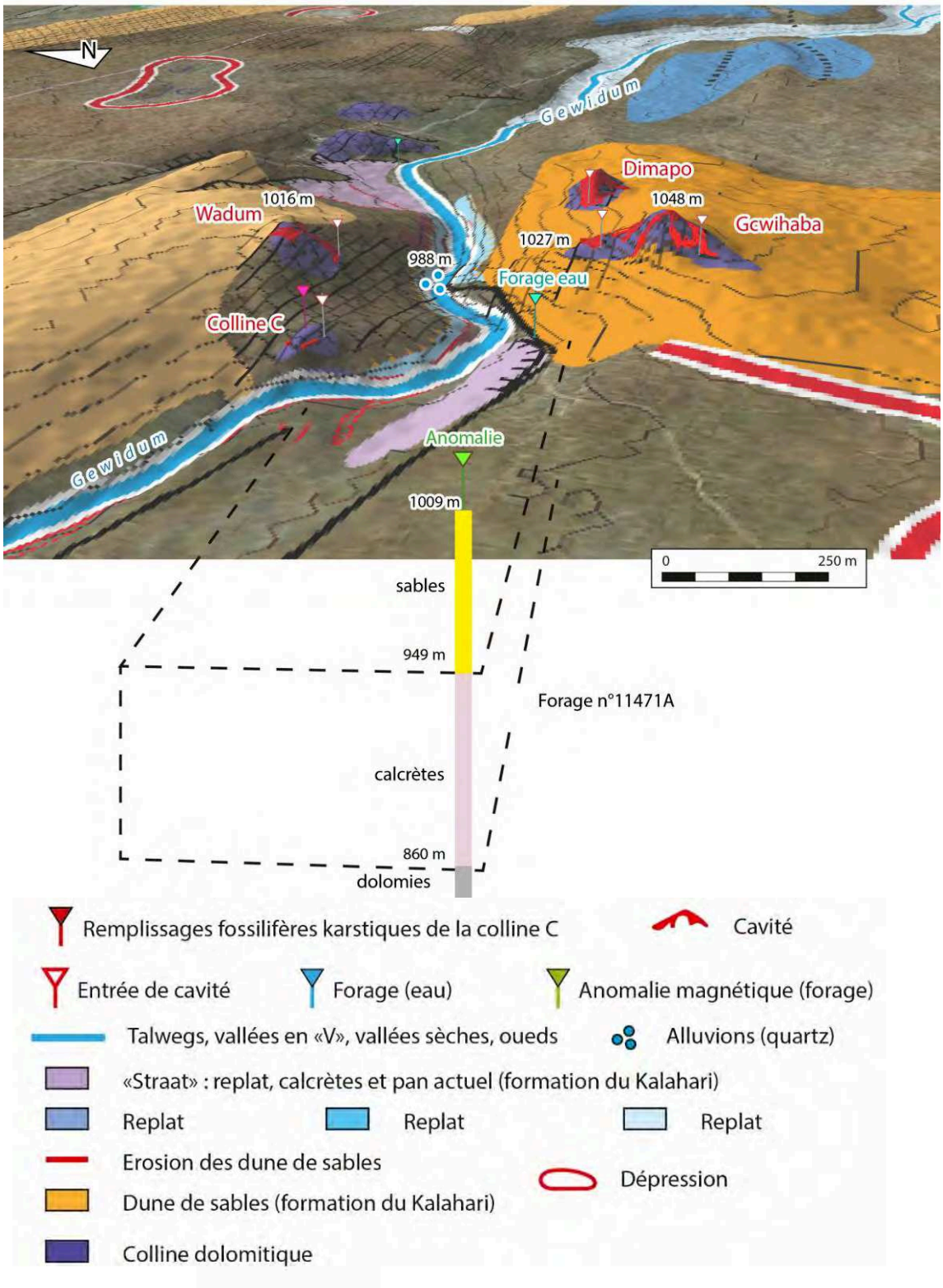


Figure 769 Analyse morphokarstique et hypothèse concernant la vallée incisée indiquée par le forage n°11471A. Exagérée verticalement 10 fois.

Les figures suivantes (Figure 770 et Figure 771) montrent une vue éloignée de la vallée de Gewidum permettant de distinguer la géométrie des dunes de sables (en orange).

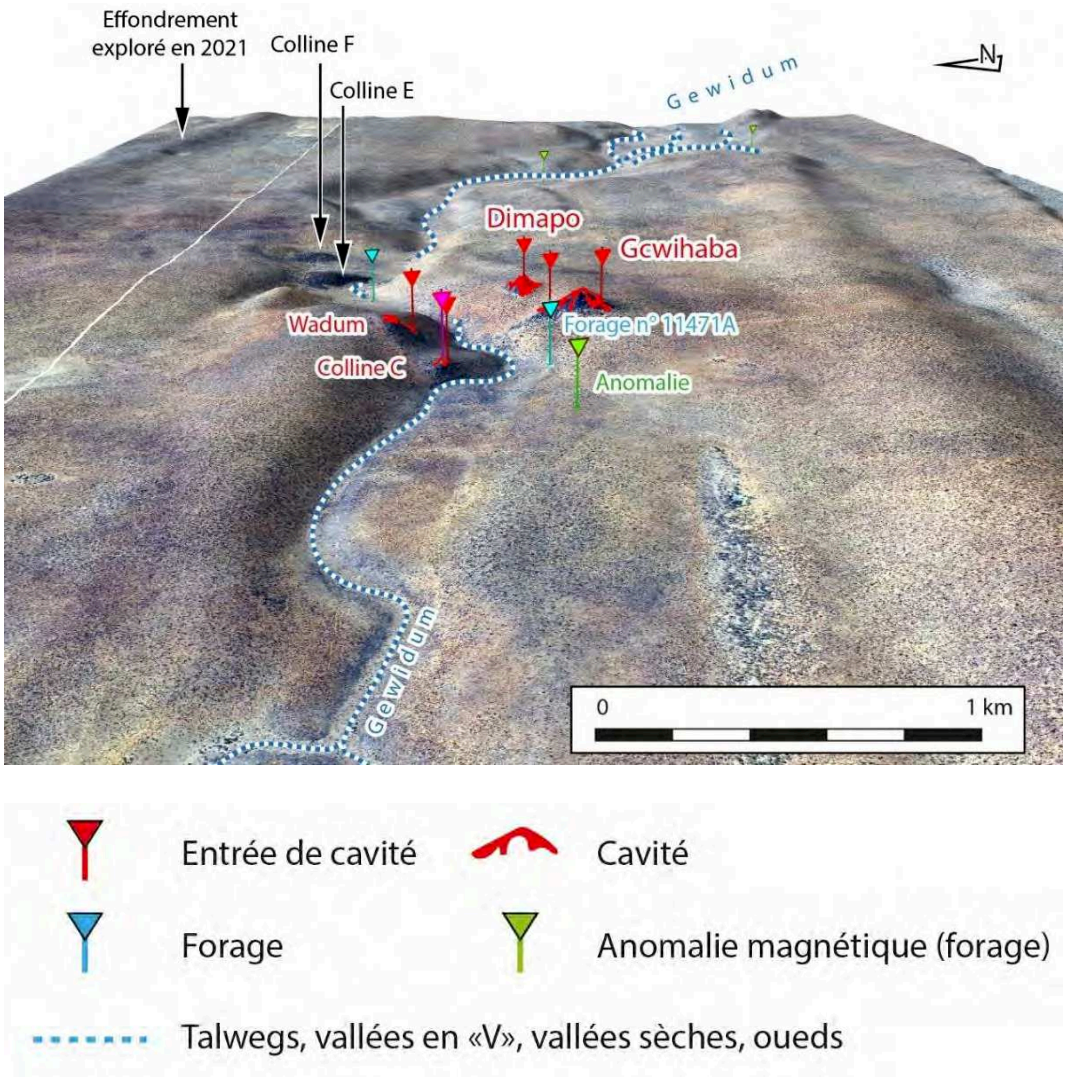


Figure 770 Visualisation 2,5D plus large de la vallée de Gcwihaba. Exagérée verticalement 10 fois.

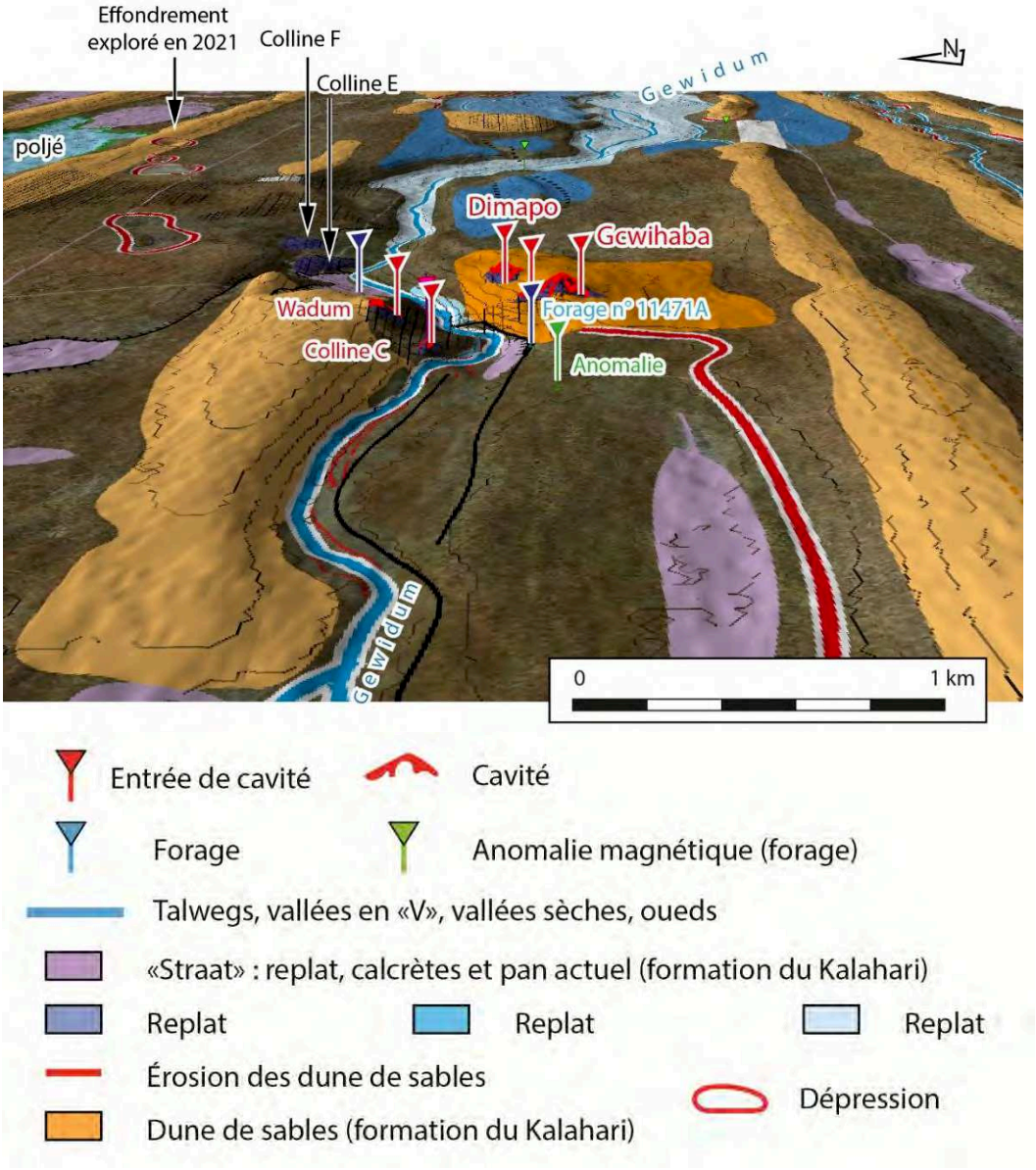
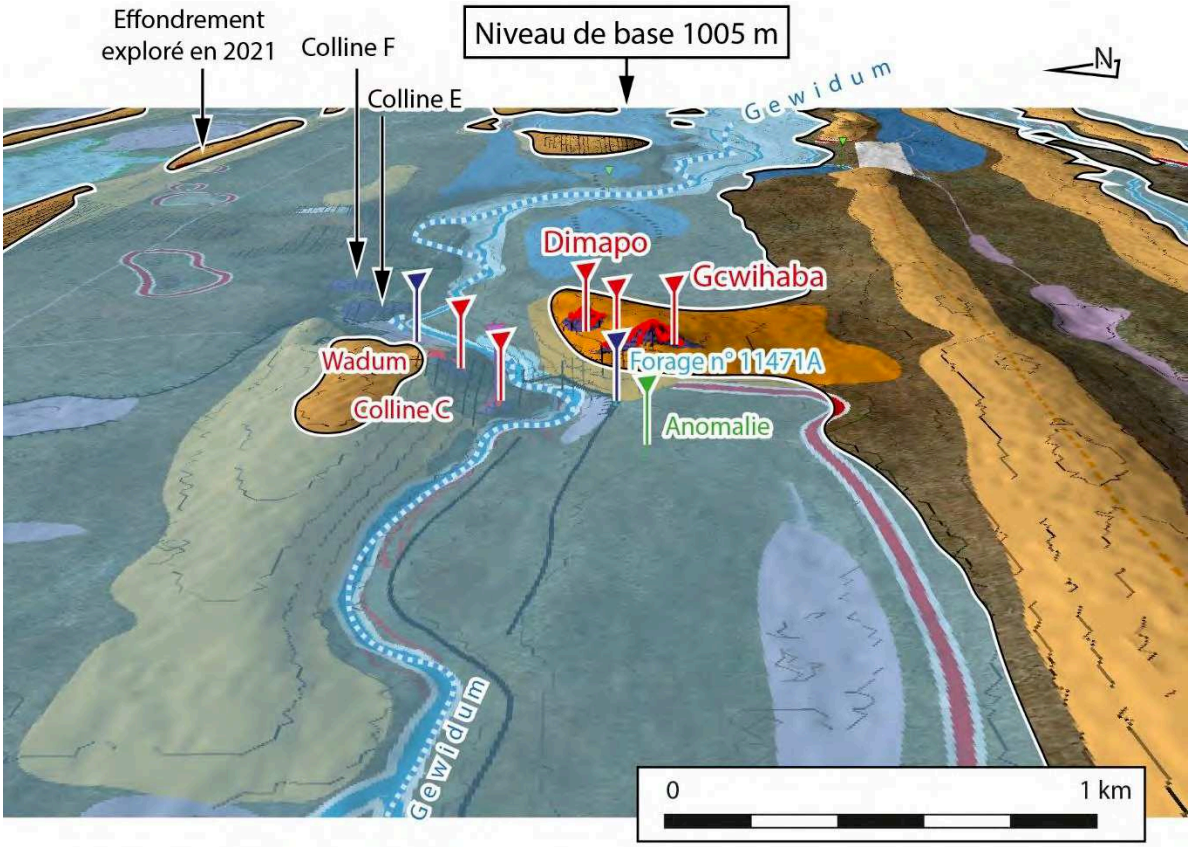


Figure 771 Analyse morphokarstique de la figure précédente. Le forage indiquant les calcrètes en profondeur est indiqué en vert. Exagérée verticalement 10 fois.



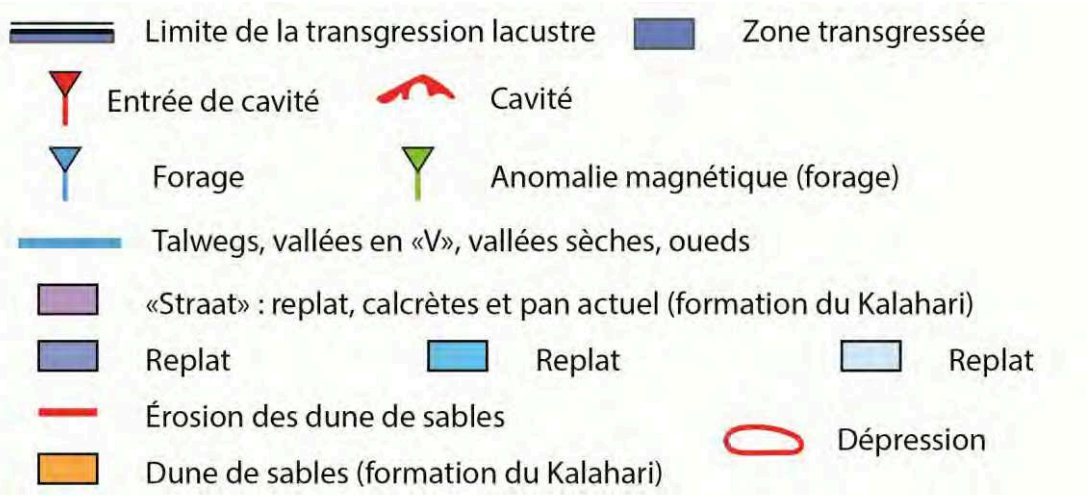


Figure 772 Modélisation d'une transgression jusqu'à l'altitude de 1005 m sur la figure précédente. Exagérée verticalement 10 fois.

TRIPTYQUE DEPUIS L'ENNOIEMENT DE LA VALLÉE DE GEWIDUM ET DES GCWIHABA HILLS

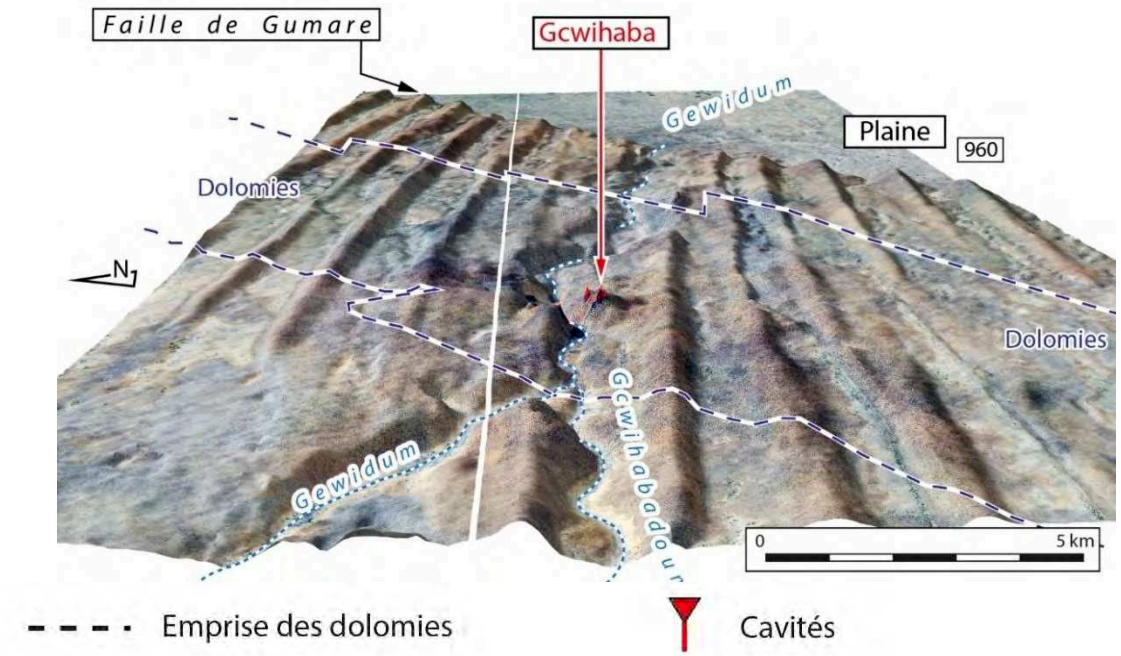


Figure 773 Visualisation 2.5 D encore plus large de la vallée de Gewidum à Gcwihaba et de la plaine de l'Okavango en arrière-plan. Exagérée verticalement 10 fois

La vallée de Gewidum s'élargit vers la plaine de l'Okavango, les dunes de sables sont plus érodées et on identifie des surfaces subhorizontales emboîtées (en bleu) qui pourraient correspondre à d'anciens niveaux d'eau.

On distingue ce qui pourrait être un paléo-poljé dans le coin en haut à gauche de la Figure 775.

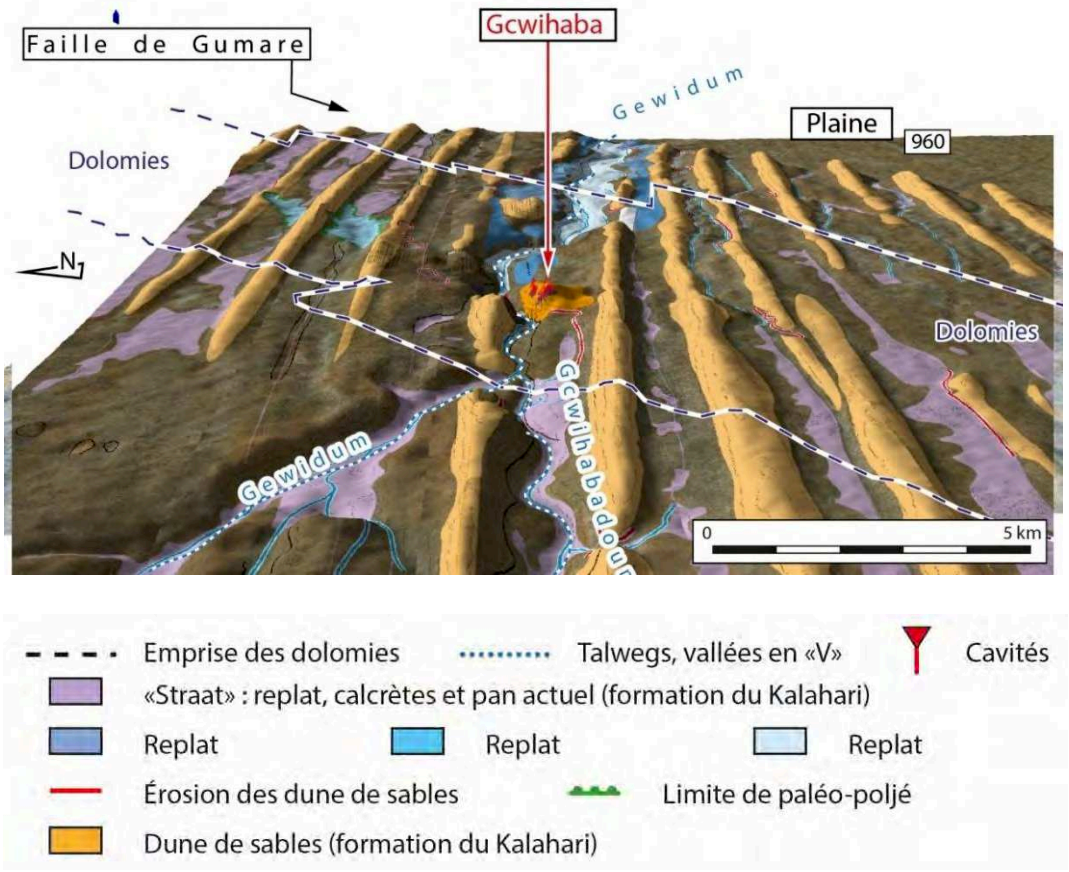


Figure 774 Analyse morphokarstique de la vallée de Gewidum à Gcwihaba et de la plaine de l'Okavango en arrière-plan.

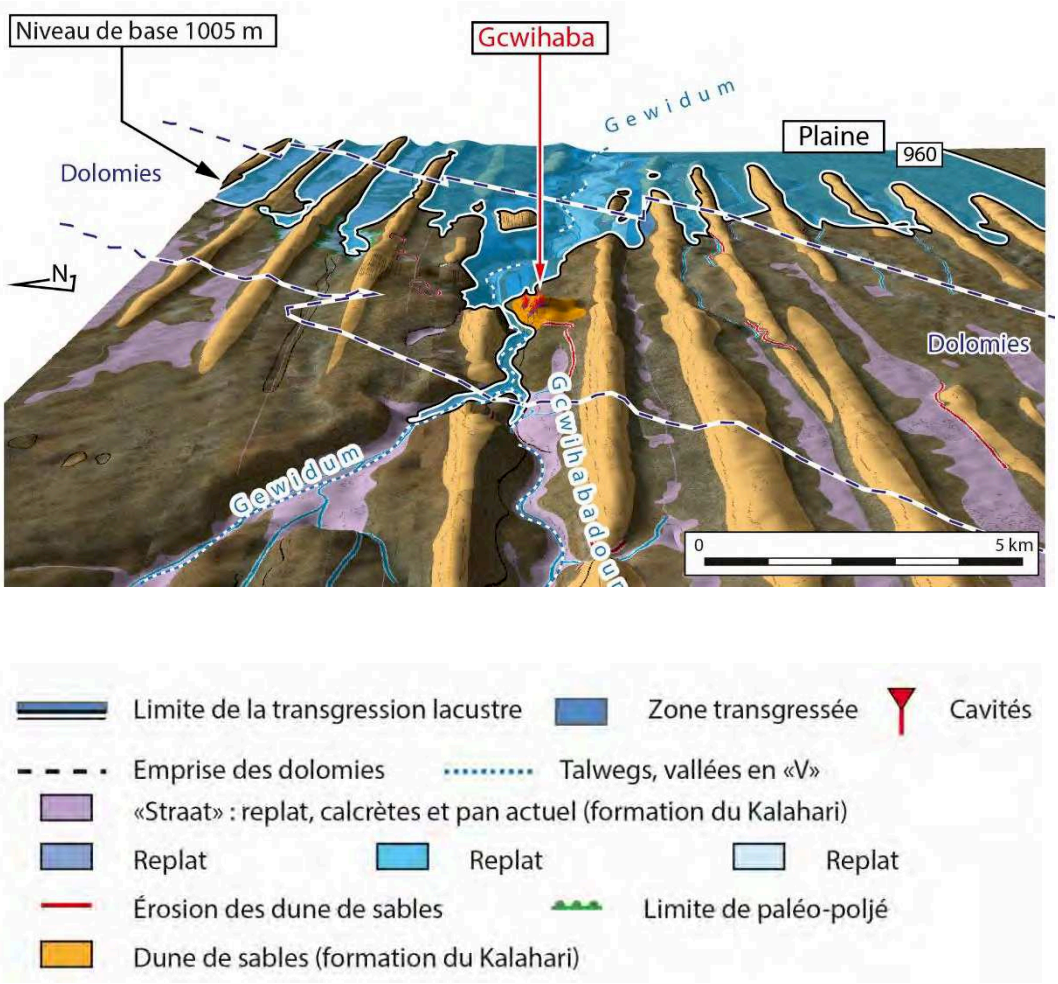


Figure 775 Transgression jusqu'à l'altitude de 1005 m.

TRIPTYQUE : VUE DEPUIS LA PLAINE DE L'OKAVANGO

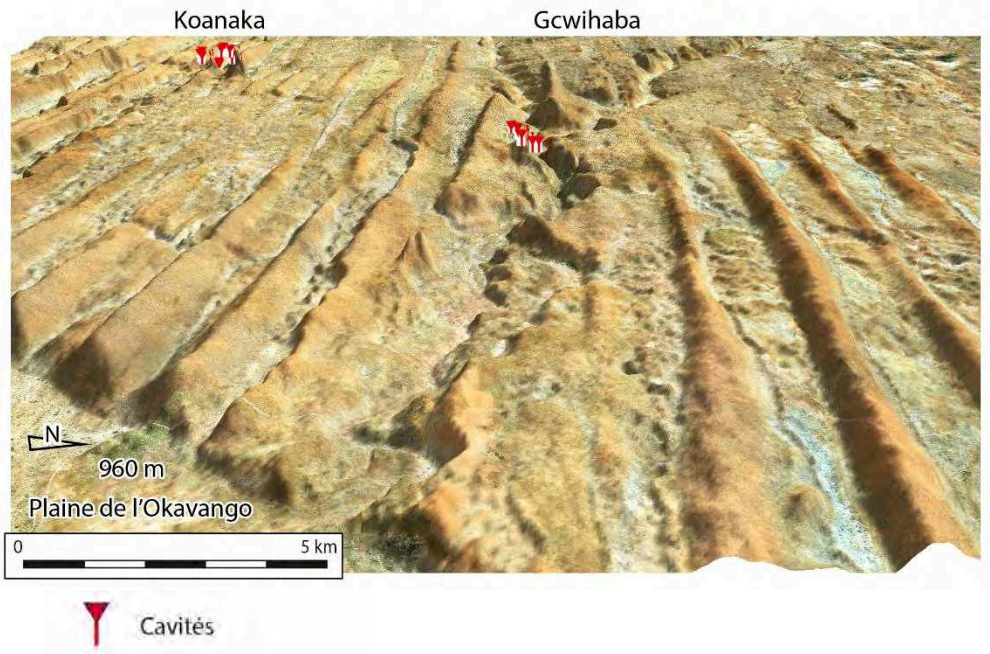


Figure 776 Gcwihaba Hills et Koanaka Hills depuis la plaine de l'Okavango.

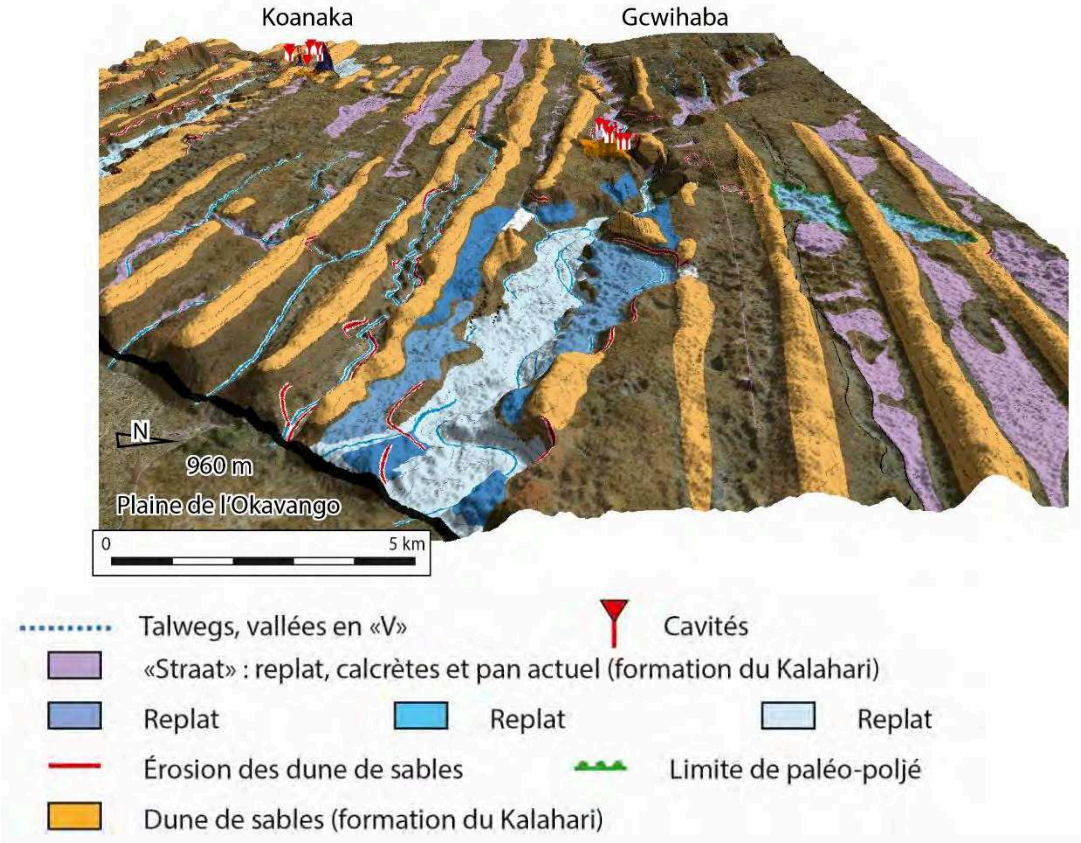


Figure 777 Analyse morphokarstique.

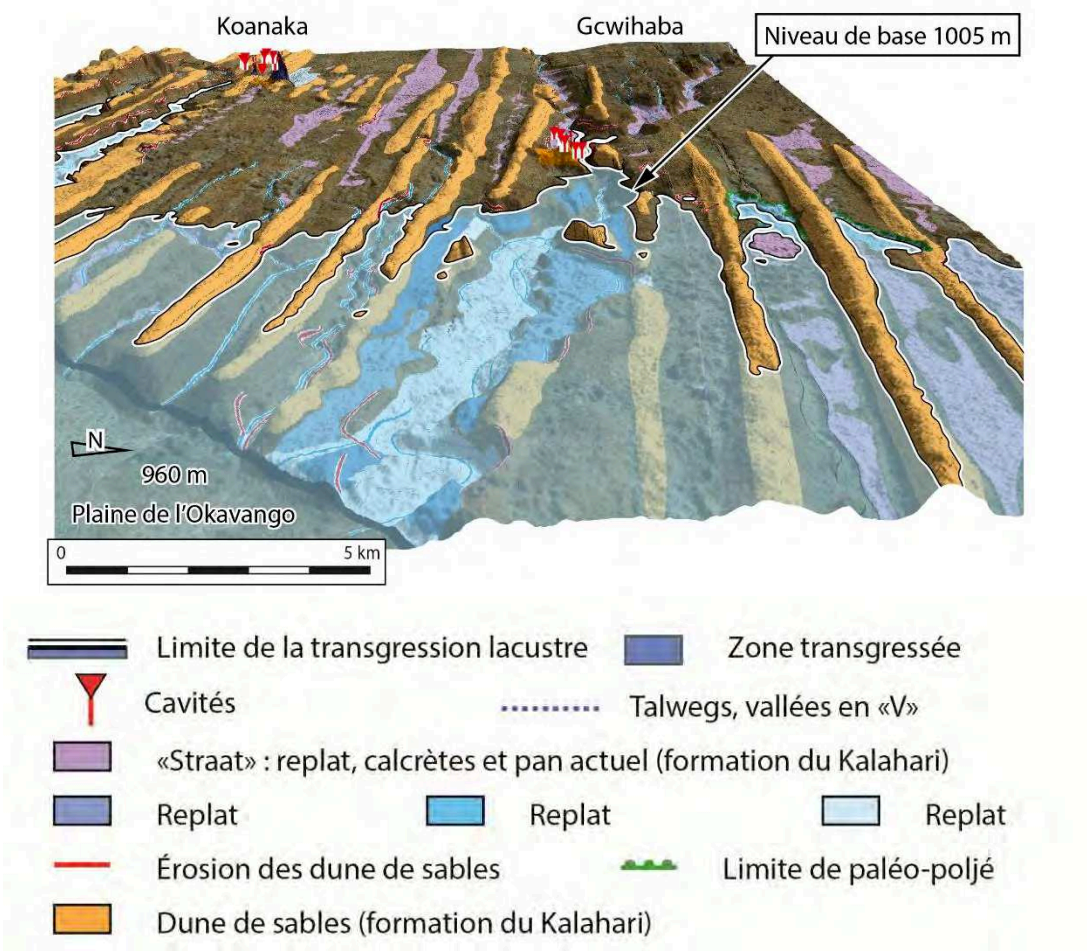


Figure 778 Transgression jusqu'à l'altitude de 1005 m.

4.4.2. Mise en évidence d'un paléoenvironnement lacustre à Koanaka à 1030 m

Comme à Gcwihaba, plusieurs arguments vont aussi en faveur de la présence de lacs (ou de vastes étendues d'eau) au pied des collines de Koanaka et seraient certainement liées aux conditions climatiques pluviales du passé.

Ce sont :

- des **morphologies du paysage** (formes) : comme les vastes surfaces horizontales qui séparent les dunes de sables ou les interrompent, appelées « *straats* » (*cf.* p.745) ou paléopans ;

- des **formations sédimentaires** : comme les calcaires coquilliers trouvés en surface des paléopans et les calcrètes rencontrées jusqu'à 60 m de profondeur par des forages ;

- l'étagement des galeries des grottes (réseaux de Diviner's, *Bone Cave*) ou des paléokarsts en surface (fouille au sud de K1) autour de 1030 m d'altitude ;

- le fort concrétionnement dans la grotte de *Bone Cave*, notamment dans le puits d'entrée où a été trouvé le crâne de babouin et dans les salles inférieures ;

- la faune que nous avons découverte dans *Bone Cave*, qui comprend des restes de poissons et d'au moins 25 espèces d'oiseaux, dont des taxons étroitement liés à l'eau tels que des canards (Anatidés) et une grande diversité de limicoles (*Charadriiformes*) (sous presse) ;

- Selon Pickford et Mein (1988), le remplissage karstique le plus ancien à *Koanaka Hills* peut être corrélé avec la croûte calcaire la plus ancienne, la calcrète 1 de Cooke (1975). En 1988, ils devaient parler soit des brèches karstiques fossilifères trouvées sur le versant nord de la colline de K2 (p.647) ou bien des remplissages que l'on trouve sur le versant est et que nous avons commencé à fouiller en 2021 (p.645).

4.4.2.1. Les données de terrain

Plusieurs affleurements inédits ont été découverts lors de nos missions de terrain. Il s'agit de calcaires coquilliers situées au pied de la colline de K1 de Koanaka.

Du sud vers le nord, il s'agit (Figure 609) de :

- la fouille archéologique, en extérieur, du sol d'une ancienne grotte effondrée, au sud de la colline de K1, à 1047 m d'altitude (MNT JAXA) ;

- des calcaires coquilliers exhumées des sables, au pied du versant ouest de la colline de K1, et situées à 1037 m d'altitude (MNT JAXA) et dont certains ont été perforés par les lithophages (Figure 788) ;

- un plaquage résiduel de calcrètes et de brèches sur le versant ouest de la colline de K1, situé à 1040 m d'altitude (MNT JAXA). ;

- un galet (bloc n°1) de calcaire bioclastique parmi des colluvions.

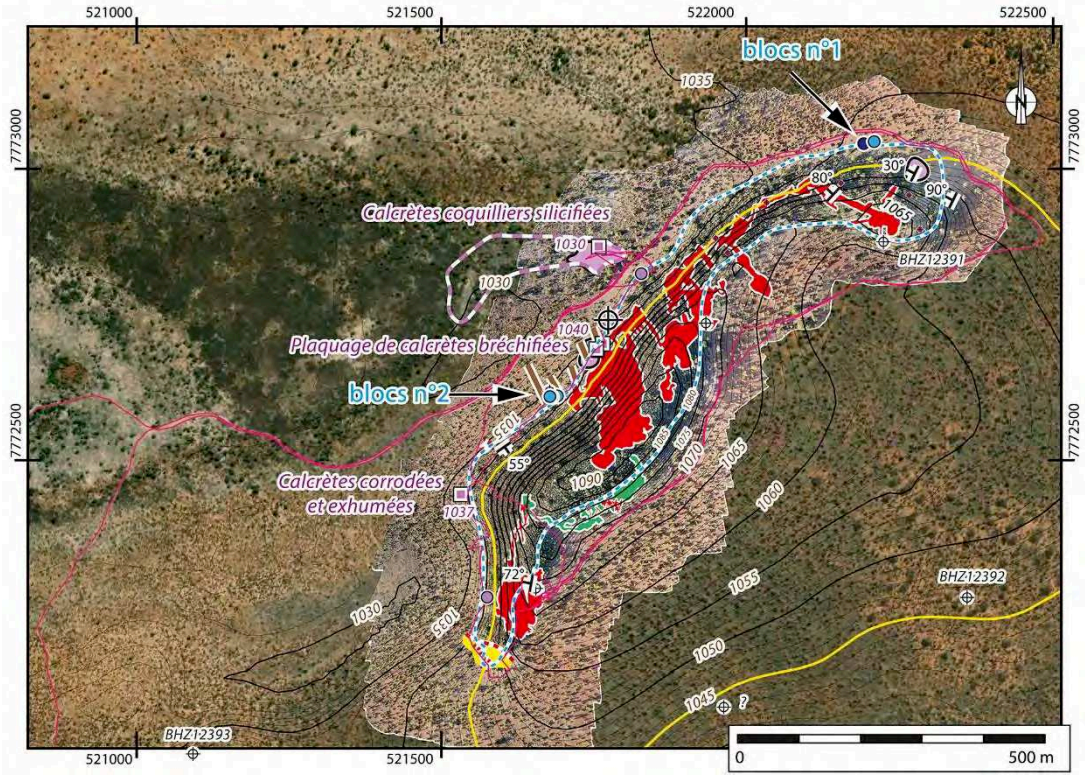


Figure 779 Carte synthétique des données de terrains autour de la colline K1.



Figure 780 Légende.

Une carte agrandie est présentée plus loin (Figure 813 p.797).

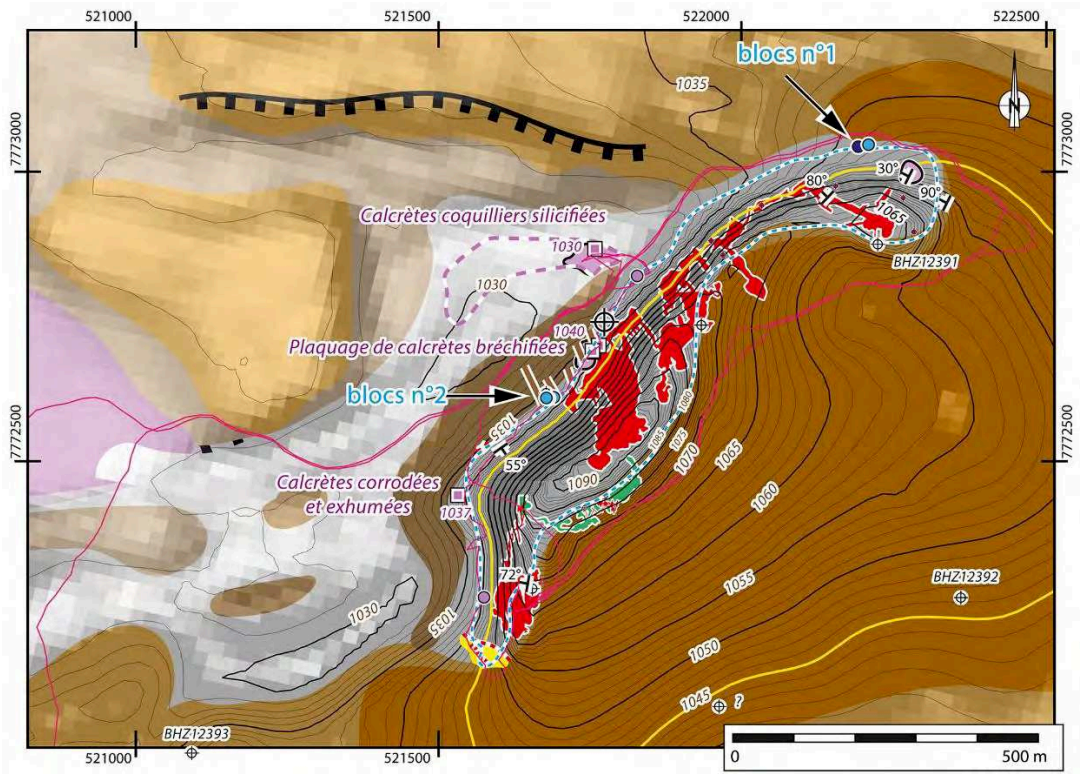


Figure 781 Cartographie géomorphologique de la colline K1.

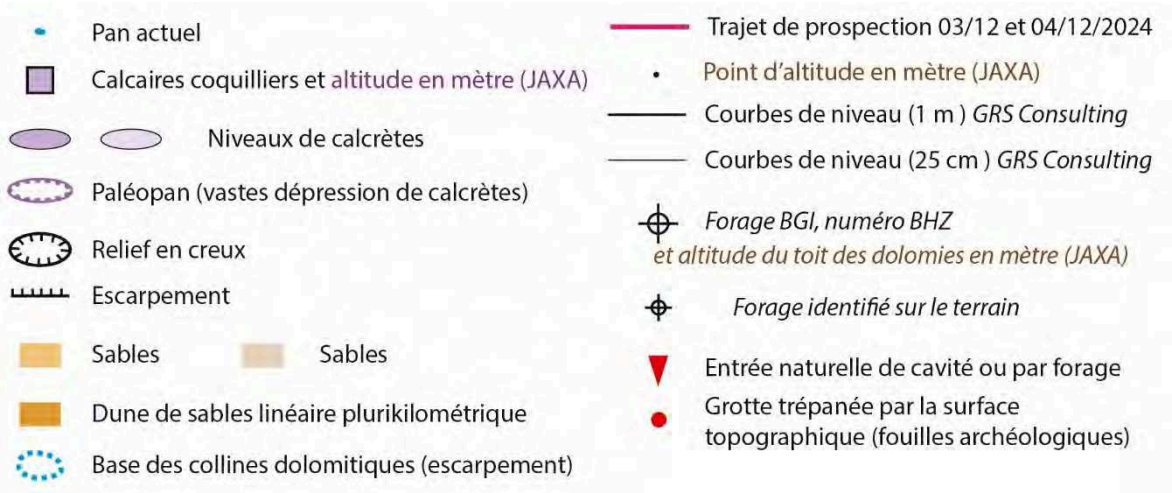


Figure 782 Légende.

4.4.2.1.1. À K1, découverte d'un affleurement de calcaires bioclastiques sombres (calcrètes 4 de Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975) ?)

À 1030 m d'altitude (MNT JAXA), sur la surface horizontale située au pied de la colline de K1 et correspondant à un paléopan, nous avons trouvé des calcaires bioclastiques à matrice sombre. Cette formation pourrait correspondre aux calcrètes 4 décrites par Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975) à Gcwihaba (lire p.725).

En s'éloignant du pied de la colline, des calcaires coquilliers (Figure 787) affleurent sur une vaste surface (Figure 789). Ils sont en position de dépôt et exhumés des sables qui les recouvraient. Certains sont altérés, blancs et perforés de conduits verticaux liés à la crypto-altération sous les sables (Figure 793), tandis que d'autres présentent des perforations de lithophages (Figure 788), voire une bréchification (Figure 791 et Figure 792).

Ces affleurements ont été identifiés à partir des images satellites, où leurs teintes claires contrastent avec les sables orangés (Figure 783). Nous les avons indiqués sur la carte ci-dessus (silcrètes et calcrètes coquilliers, Figure 779, p.784), ainsi que sur les cartes suivantes (p.801).

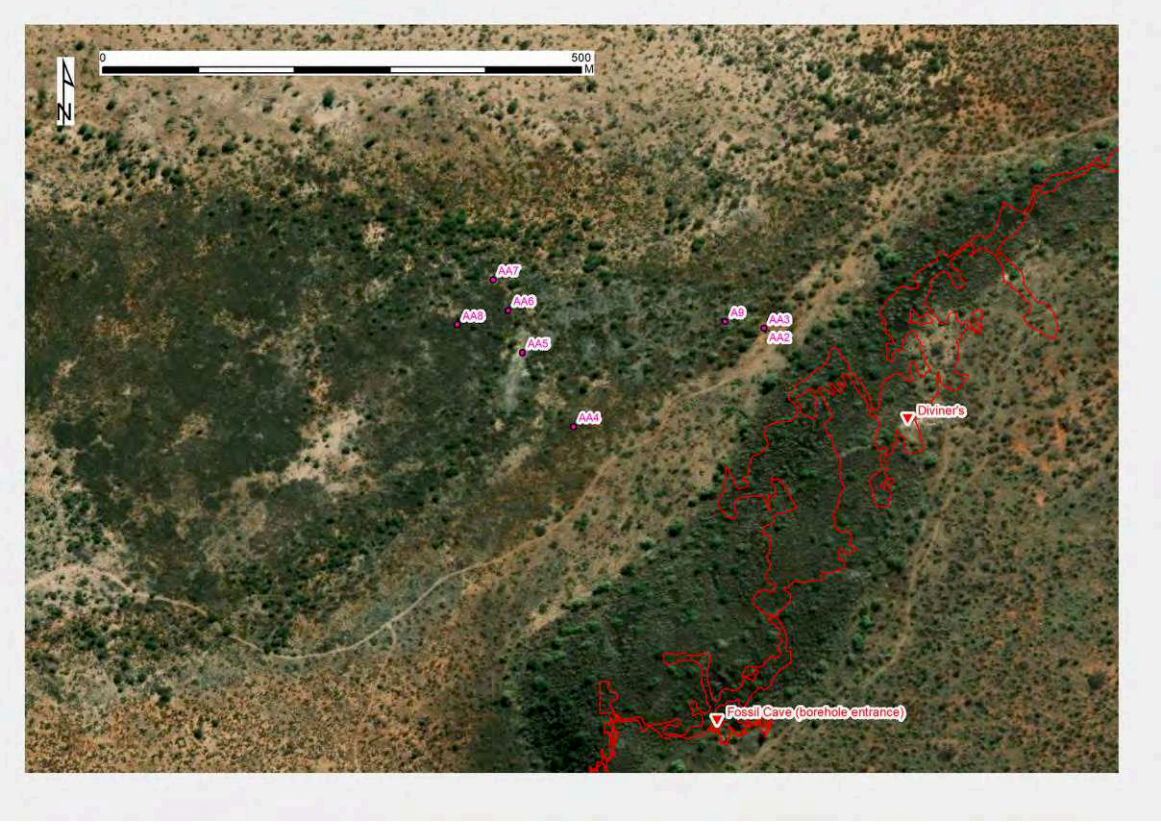


Figure 783 Image satellite de la colline K1 (réseau karstique de Diviner's *en rouge) et du vaste paléopan caractérisé par des calcaires bioclastiques.*

PLANCHE PHOTOGRAPHIQUE DES CALCAIRES BIOCLASTIQUES, À MATRICE SOMBRE, DE KOANAKA K1 (BOTSWANA)			
Latitude	Longitude	Altitude (mnt JAXA)	Date
20,141377°S	21,208468°E		04/12/2024



Figure 784
Échantillon prélevé de calcaire bioclastique (Source : Olivier V.).



Figure 785 Matrice sombre.



Figure 786 Idem.

PLANCHE PHOTOGRAPHIQUE N°1 DES CALCAIRES COQUILLIERS
(Affleurement n°AA3) DE KOANAKA K1 (BOTSWANA)



Figure 787 Détails sur les coquilles présentes dans les calcrètes (Source : Bruxelles L.).



Figure 788 Calcaire coquillier en place à 1030 m d'altitude (Calcrètes 4 de Cooke ?) (Source : Bruxelles L.).

PLANCHE PHOTOGRAPHIQUE N°2 DES CALCAIRES COQUILLIERS
(Affleurement n°AA7) DE KOANAKA K1 (BOTSWANA)



Figure 789 Vaste surface plane, exhumée des sables, au pied de la colline de K1 caractérisée par des calcaires coquilliers.



Figure 790 Détail des calcaires.



Figure 791 Ces dépôts sont parfois bréchifiés.



Figure 792 Détail des brèches.



Figure 793 Calcaires altérés et corrodés.

Les conduits verticaux, visibles ici (Figure 793 ; Figure 795), développés au toit des dépôts carbonatés situés au pied de la colline K1, résultent de la crypto-corrosion sous les sables. Les mêmes formes d'altération sont observées au toit des anciens dépôts karstiques de la fouille de K2, que nous avons exhumés des sables (p.528).



Figure 794 Affleurements de calcaires à coquilles silicifiées (silcrètes ?) perforés par les lithophages.



Figure 795 Surface aplanie et corrodée au toit des calcaires.



Figure 796 Vaste surface plane caractérisée par des calcrètes corrodées. De petits bosquets poussent à travers les larges trous centimétriques dus à la crypto-corrosion sous les sables.

PLANCHE PHOTOGRAPHIQUE N°3 DES CALCAIRES BLANCS EN BLOCS (Affleurement n°AA6) DE KOANAKA K1 (BOTSWANA)



Figure 797 Blocs de calcrètes.



Figure 798 Détail des calcrètes, elles sont homogènes.

Notons qu'au pied de la colline, nous avons aussi trouvé un galet d'une lithologie similaire (Figure 799 à Figure 801) au niveau d'un amas de blocs, principalement constitué de blocs de dolomies. Ce n'est pas un cordon littoral mais plutôt des colluvions (comm. orale Bruxelles).

PLANCHE PHOTOGRAPHIQUE DU BLOC n°1 DE CALCAIRE BIOCLASTIQUE, À MATRICE SOMBRE, À KOANAKA K1 (BOTSWANA)

Latitude	Longitude	Altitude (mnt JAXA)	Date
20,141170°S	21,208750°E	1030 m	05/12/2024



Figure 799 Bloc arrondi de calcaire coquillier à matrice sombre.



Figure 800 Calcaire bioclastique sombre.



Figure 801 Détail sur des petites coquilles blanches.



Figure 802 Monticules de blocs de dolomies et de galets de calcaires coquilliers.

4.4.2.1.2. À K2, des calcrètes à gastéropodes

Nous avons trouvé des calcaires coquilliers au pied de la surface plane au sud de la colline de K2 (Figure 477, p.517) mais le faciès est différent qu'à K1.

Koanaka K2 (au pied de K2)		04/12/2024
20,159417°S	21,193793°E	1037 m
Calcaire bioclastique beige		



Figure 803 Calcaire riche en fragments de coquilles trouvé au pied de la colline K2.



Figure 804 Calcaire bioclastique avec une vacuole trouvée au pied de la colline de K2.



Figure 805 Calcaires coquilliers, à ciment sombre, riche en matière-organique.



Figure 806 Calcaires coquilliers, à ciment clair.

4.4.2.1.3. Calcrètes corrodées et exhumées

À l'ouest de la colline de K1, ce qui faisait penser à un aven est en fait un affleurement de calcaire crypto-corrodé exhumé des sables. Ces formations pourraient correspondre aux calcrètes 1 et 2 décrites par Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975) du vallon de Gewidum (p. 719) à Gcwihaba.



L'altitude est de 1037 m (MNT JAXA). Les dimensions ont pu être mesurées sur l'orthophotographie drone de la colline de K1. Il mesure 9 m de longueur pour 4 m de large.

Figure 807 Vue du dessus par drone (10 décembre 2022) (Source : Bruxelles L.).

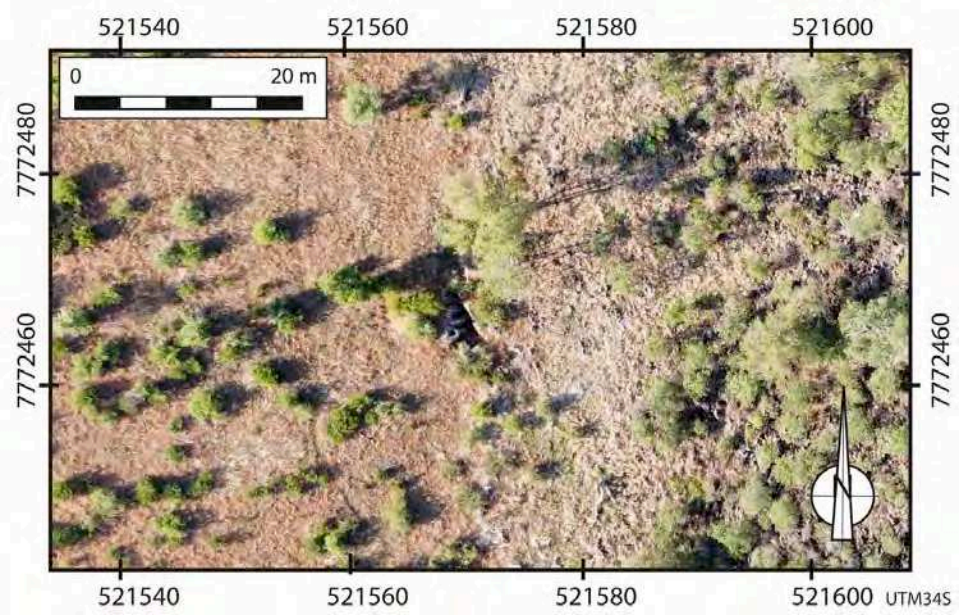


Figure 808 Plan orthonormé de cet objet.

Plus précisément, ce sont des **brèches infrabréchiques**, constituées de brèches plus anciennes, de couleur sombre. Elles-mêmes constituées de petits clastes clairs. L'ensemble est fracturé en zig-zag et les vides ont été cimentées par de la calcrète grise homogène.



Figure 809 Affleurement exhumé des sables montrant des calcrètes bréchifiées.

On distingue, du plus vieux au plus récent :

- les **brèches sombres**, à petits clastes claires, fissurées en zig-zag (Figure 810) pouvant correspondre aux Calcrètes 1 et 2 de Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975);
- ces fissures sont comblées par des **calcaires gris** homogènes (calcrètes) ;
- cet ensemble est crypto-corrodé sous les sables ;
- les sables sont exhumés.



Figure 810 Détails des brèches infrabréchiques.



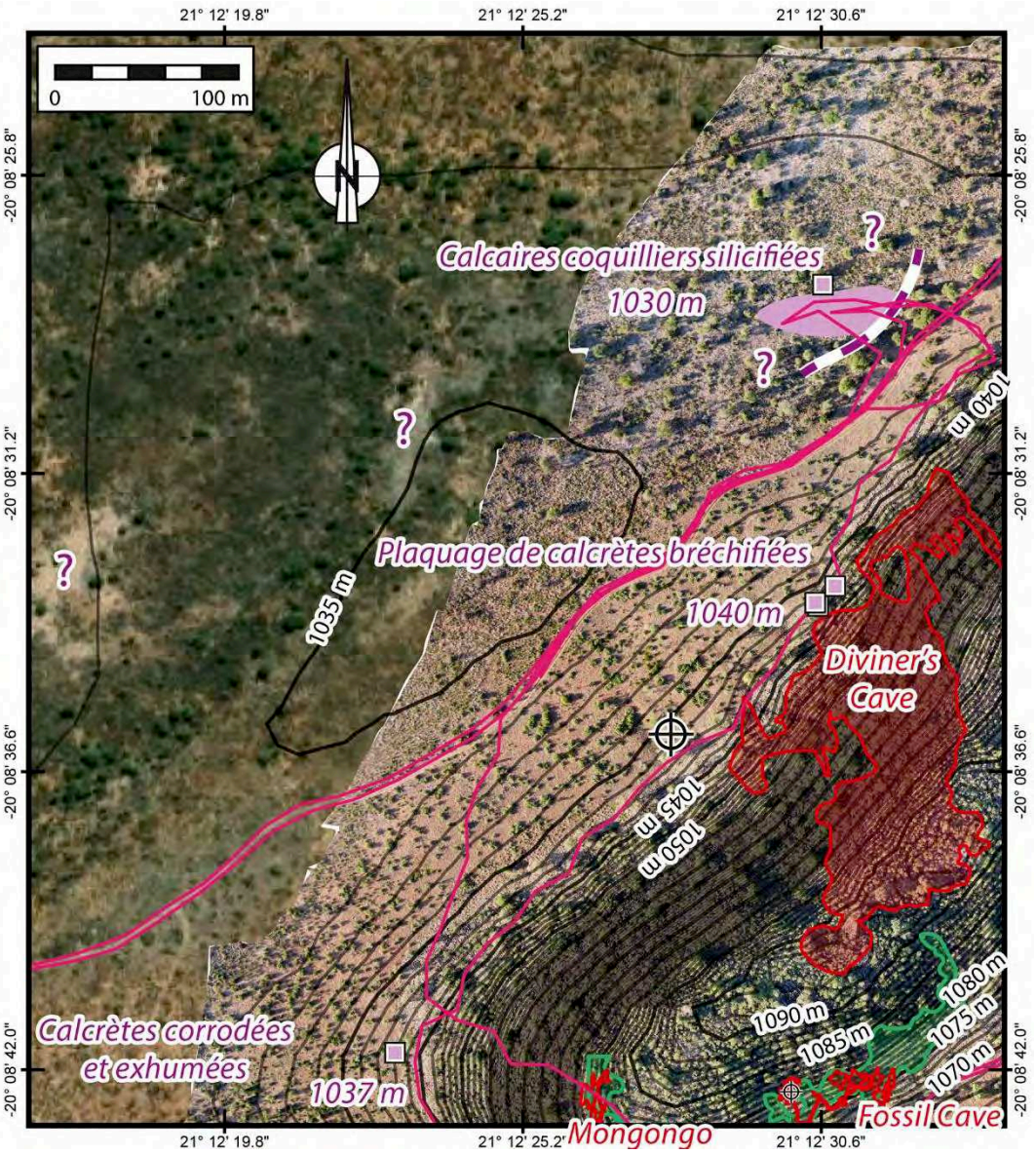
Figure 811 Calcrètes grises homogènes montrant des fissures récentes au sommet.



Figure 812 Vue du dessous montrant la crypto-corrosion réalisée sous les sables.

4.4.2.1.4. Plaquage de calcrètes 1 et 2 au pied du versant ouest de la colline K1 (Koanaka) à 1040 m d'altitude

À 330 m au nord de l'affleurement précédent et à la même altitude (1040 m d'altitude (MNT JAXA)) des brèches à ciment blanchâtre et à gros clastes sont présentes (Figure 814 à Figure 816) (Lien Google Maps).



Trajet de prospection du 03/12 et 04/12/2024
Calcrètes 1030 altitude calcrètes
Forage ? Secteur à prospecter
Réseau karstique supposé par gravimétrie
Réseau karstique topographié
Courbe de niveau 5 m *Selfe G. / GRS Consulting*
Courbe de niveau 1 m 1030 altitude courbe

Source des topographies :
Ellis R., Jacobs G., Ledimo O., Stander H., Tucker S. et Clark T (2011). Orthophotographie par drone de la colline K1 que nous avons effectué en 2021 par photogrammétrie drone (source des photographies Laurent Bruxelles). Image satellite (ESRI Arcgis).

Figure 813 Cartographie en cours des affleurements de calcrètes identifiés en 2024.



Figure 814 Brèches claires à gros clastes, trouvées, le 03/12/2024, au pied du versant ouest de la colline K1 (Koanaka) à 1040 m d'altitude (20° 8'33.54"S; 21°12'30.49"E) (-20,14265000; 21,20846944).



Figure 815 Détail des gros clastes.



Figure 816 Brèches claires à gros clastes, trouvées le 09/12/2022 (20°8'33.24"S, 21°12'30.85"E) (-20,14256667; 21,20856944).

4.4.2.1.5. Les brèches à gros clastes du versant nord de K2



Des brèches à gros clastes constituent la base de la séquence de remplissage karstique (Figure 657 p.647) sur le versant nord de la colline de K2, en-dessous de l'entrée de Bone Cave.
Ce sont des brèches grossières où les clastes sont en vrac cimentées par une matrice fine homogène rougeâtre. Les blocs ne sont pas imbriqués et indiquent un mode de dépôt de type coulée de boues (Laurent Bruxelles, comm. orale). On observe un léger pendage vers le nord.
Ce faciès ressemble aux calcrètes 1 et 2, définies par Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975), décrites précédemment (p.720).

Figure 817 Les premiers niveaux du versant nord au pied de la colline de K2 sont constitués d'une brèche à gros clastes).



Figure 818 Détail des brèches à gros clastes et ciment rougeâtre (pendage 10°S).



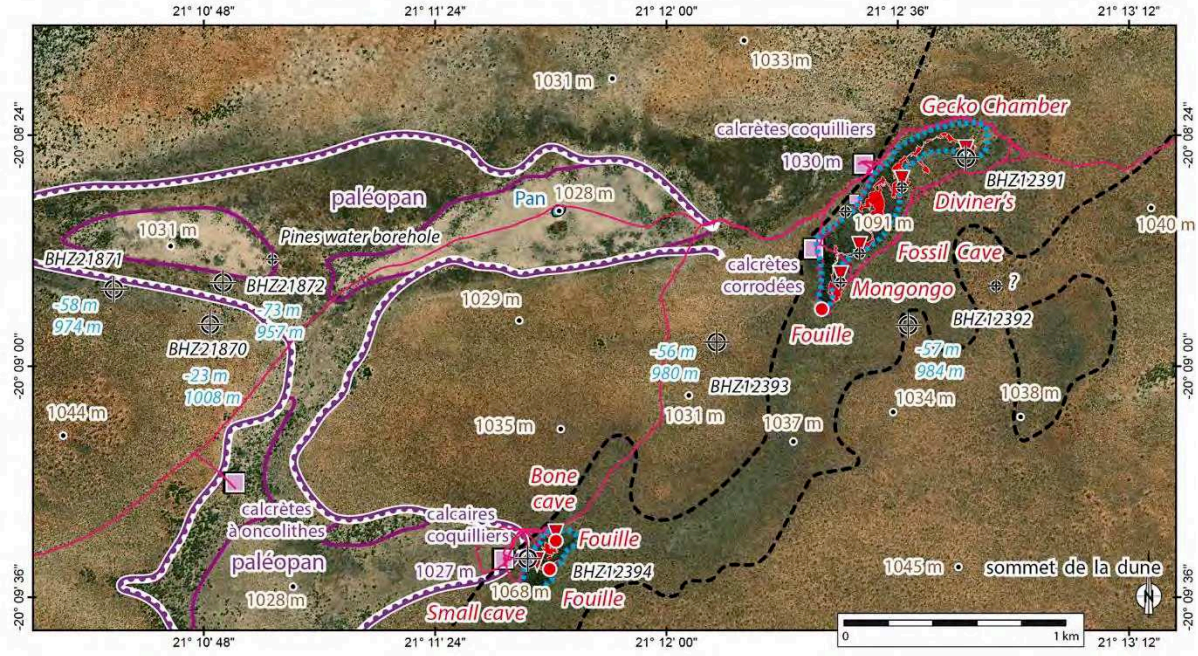
Figure 819 Brèches à gros clastes sur versant nord de la colline K2 à Koanaka.



Figure 820 Détail des clastes.

4.4.2.2. Les forages à Koanaka Hills

Précédemment, nous avons décrit le secteur de *Koanaka Hills* (Figure 598 p.602). Les forages **Z21871** (lien) et **Z21872** (lien) (Tableau 33 p.677) sont situés à 3 km à l'ouest de la colline de K1 *(Diviner's Cave)*, à une altitude respective de 1031 et 1029 m (MNT JAXA). Ils ont rencontré des calcrètes et des silcrètes respectivement sur 55 m entre les cotes **1028 m à 973 m** et sur 73 m entre **1026 à 953 m**, avant d'atteindre les dolomies. Pour information, le forage Z21871 traverse 228 m de dolomies et le forage Z21872, 174 m de dolomies. D'autres forages ont été réalisés. Les forages BHZ12391, BHZ12392 et BHZ12393 sont situés par de la colline de K1. Le forage BHZ12394 est situé près de la colline de K2.
Les affleurements de calcaires coquilliers et de calcrètes ont été décrits plus haut (p.783).



Pan actuel

Affleurement de calcrètes en place, exhumé des sables du Kalahari et altitude en mètre (JAXA)

Paléopan (vaste dépression de calcrètes)

Calcrètes en place (en blanc sur les images satellites)

Sols sombres

Base des collines dolomitiques

Prospection pédestre du 03/12 et 04/12/2024

Point d'altitude en mètre (JAXA)

-58 m
974 m

Forage BGI, numéro BHZ, profondeur du toit des dolomies (en m) et altitude du toit des dolomies en mètre (JAXA)

Forage sans données géologiques

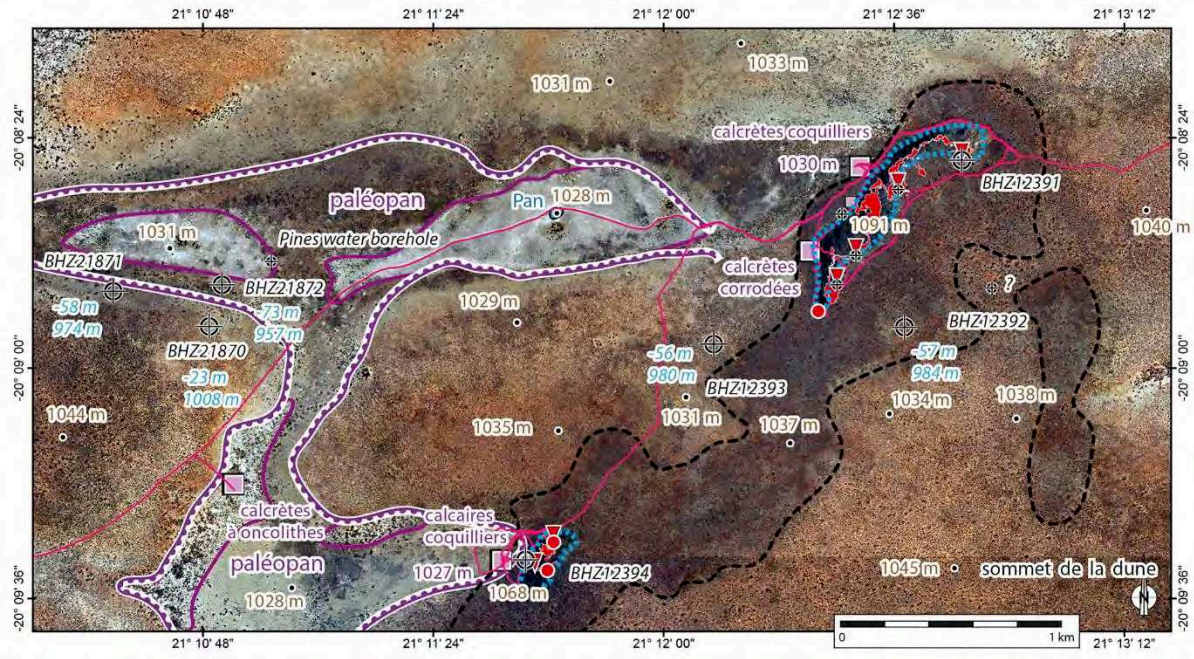
Entrée de cavité

Fouille archéologique d'anciennes cavités tronquées par la surface topographique

Report en surface de la topographie d'une cavité

Figure 821 Analyse de l'image satellite de Koanaka Hills (K1 et K2).

Les couleurs sombres des images satellites dépendent de l'humidité des sols et varient en fonction de la date des clichés comme le montrent ces deux exemples (Figure 821 et Figure 822). Nos cartographies des dolomies subaffleurantes ne sont donc pas fiables.



Pan actuel

Affleurement de calcrètes en place, exhumé des sables du Kalahari et altitude en mètre (JAXA)

Paléopan (vaste dépression de calcrètes)

Calcrètes en place (en blanc sur les images satellites)

Dolomies subaffleurantes (sols sombres)

Base des collines dolomitiques

Prospection pédestre du 03/12 et 04/12/2024

Point d'altitude en mètre (JAXA)

Forage BGI, numéro BHZ, profondeur du toit des dolomies (en m) et altitude du toit des dolomies en mètre (JAXA)

-58 m
974 m

Forage identifié sur le terrain

Entrée de cavité

Report en surface de la topographie d'une cavité

Ancienne cavité trépanée par la surface topographique faisant l'objet de fouille archéologique

Figure 822 Autre version des dolomies subaffleurantes d'après l'analyse de l'image satellite (ESRI Arcgis).

Numéro	Latitude	Longitude	Alti-tude MNT SRTM3V2	Alti-tude MNT JAXA	BGI	Google-maps	Profondeur (m) /altitude du toit des dolomies (MNT Jaxa)	Information	Présence de calcrètes
BHZ12391	-20.14098	21.21295	1039	1039	lien BGI	lien	forage dans les dolomies	qlqs cavités remplies de sables de 13 à 15 m de profondeur	non
BHZ12392	-20.14823	21.21046	1040	1041	lien BGI	lien	-57m / 984	51 m de sables avec des lentilles de boues carbonatées (mudstone) entre 17 et 23 m et des calcrètes entre 23 et 48 m et enfin les gneiss du groupe de Koanaka à 57 m de profondeur	oui
BHZ12393	-20.14896	21.20218	1037	1036	lien BGI	lien	-56m /980	19 m de sable rouges puis quartzites avec lentille de silcrètes de 24 à 56 m) et enfin les dolomies à -56 m	oui
BHZ12394	-20.15833	21.19401		1029	lien BGI	lien	forage dans les dolomies	Cavité sableuse de 19 à 41 m	non
BHZ21870	-20.148194	21.180278		1031	lien BGI	lien	-23 m / 1008	5 m de sables rouges, puis 18 m de calcrètes et à -23 m on trouve les dolomies	oui
BHZ21871	-20.146667	21.176111		1032	lien BGI	lien	-58m /974	3 m de sables rouges puis 57 m de calcrètes et silcrètes et à -58 m on trouve les dolomies	oui
BHZ21872	-20.146389	21.180833		1030	lien BGI	lien	-76m /954	3 m de sables rouges puis 73 m de calcrètes et silcrètes et à -76 m on trouve les dolomies	oui

Tableau 48 Données concernant les forages à Koanaka selon le portail géologique du BGI.

Remarque :

Le forage Z14302 (lien BGI, lien Google Maps) alimentait le pan de Seretse vers la colline K3 à Koanaka. Il est situé à 1024 m d'altitude JAXA. L'aquifère est présente à 98.4 m de profondeur, soit à 925 m JAXA. La colonne stratigraphique indique 24 m de sables marrons, ensuite il est plus difficile d'interpréter l'altitude du toit des dolomies.

On a observé que les sols sombres, qui suggèrent la présence des dolomies en sub-surface et dont l'interprétation est validée par la gravimétrie (Figure 599 p.604) correspondent également à des surfaces élevées orientées nord sud, intercalées entre les dunes de sable linéaires orientées est-ouest.

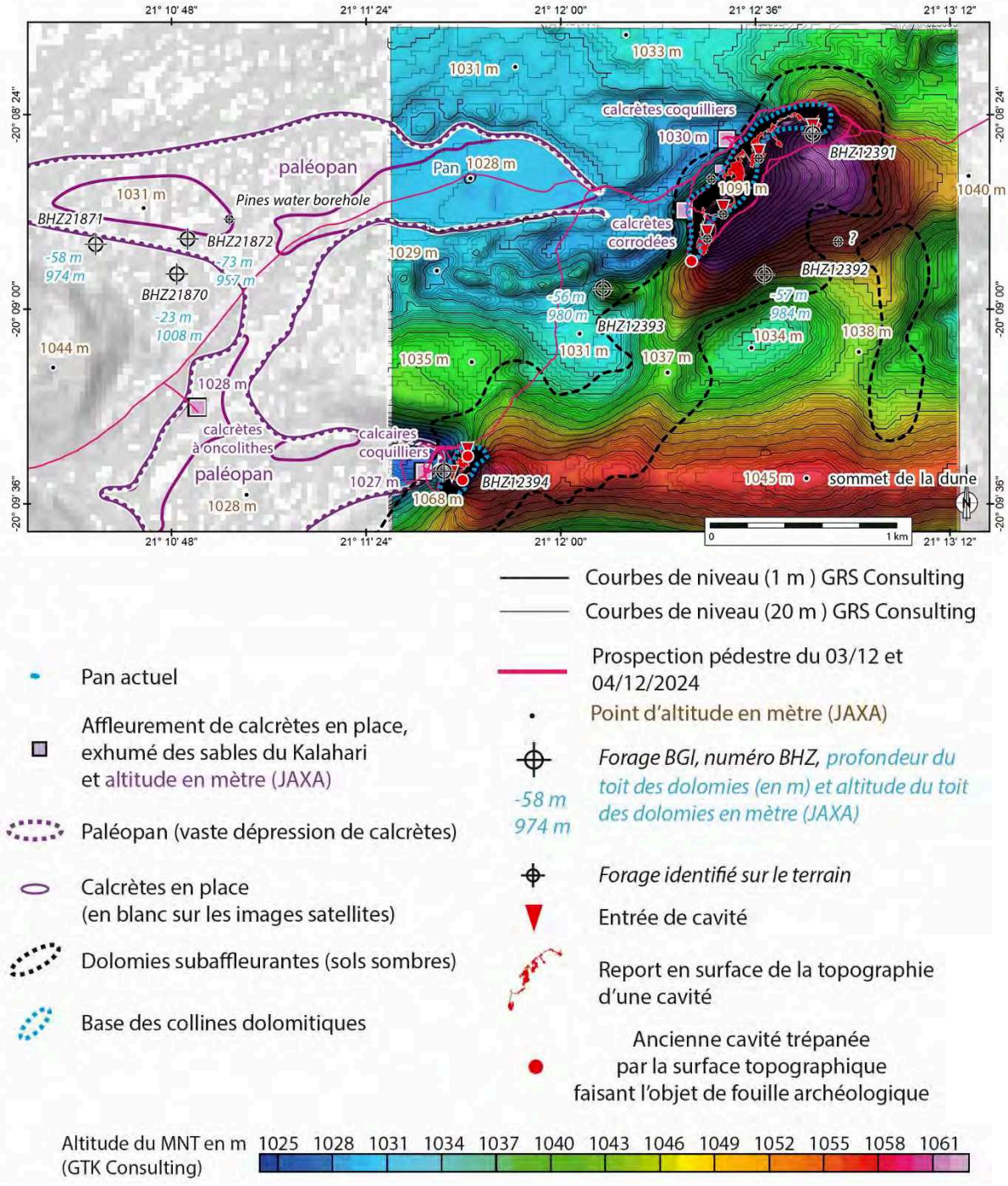


Figure 823 Hypsométrie de Koanaka Hills (K1 et K2).

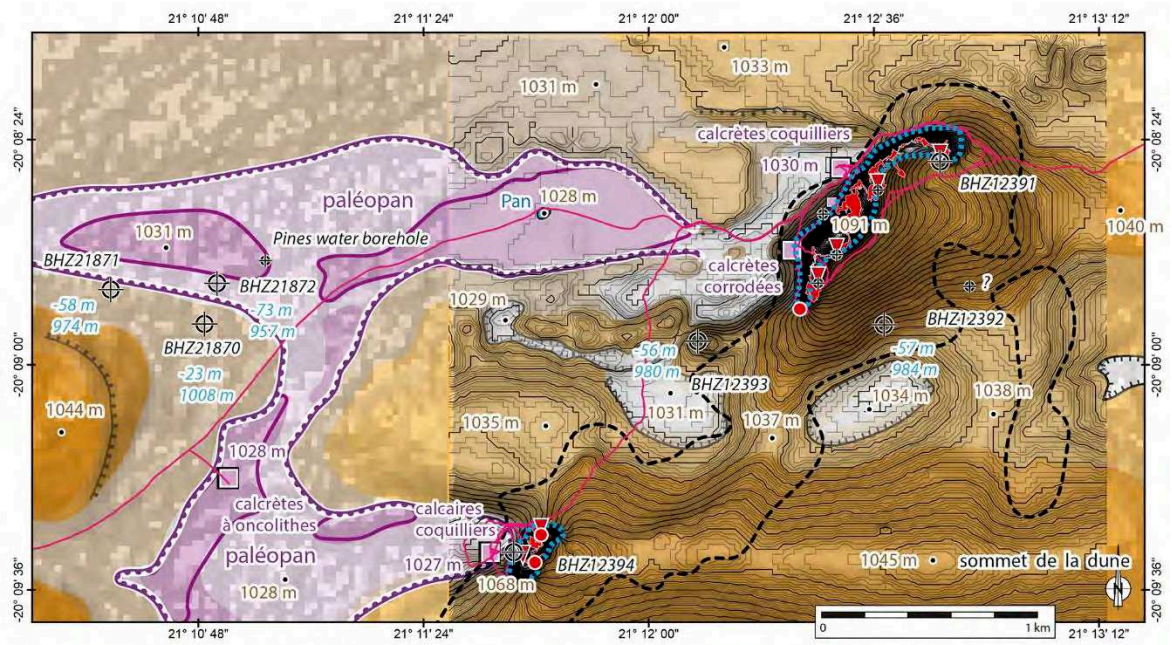
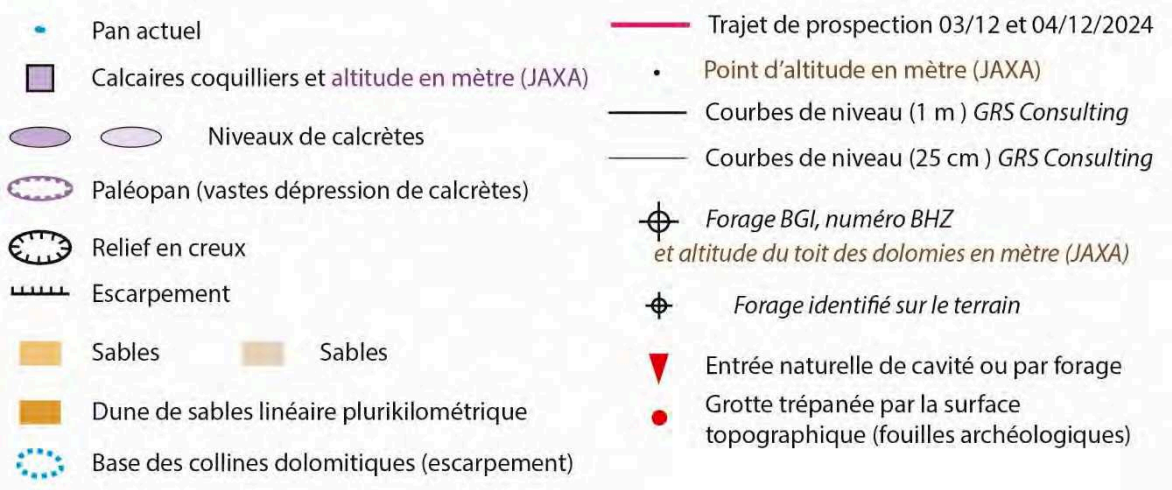


Figure 824 Analyse morphokarstique de Koanaka Hills.



Remarques :

Ne sont figurées que les courbes de niveau à haute résolution (1 m) issue du levé par GPS différentiel de *GRS Consulting* (Selfe, 2005, 2013). Elles ne recouvrent pas toute la zone de cette carte.

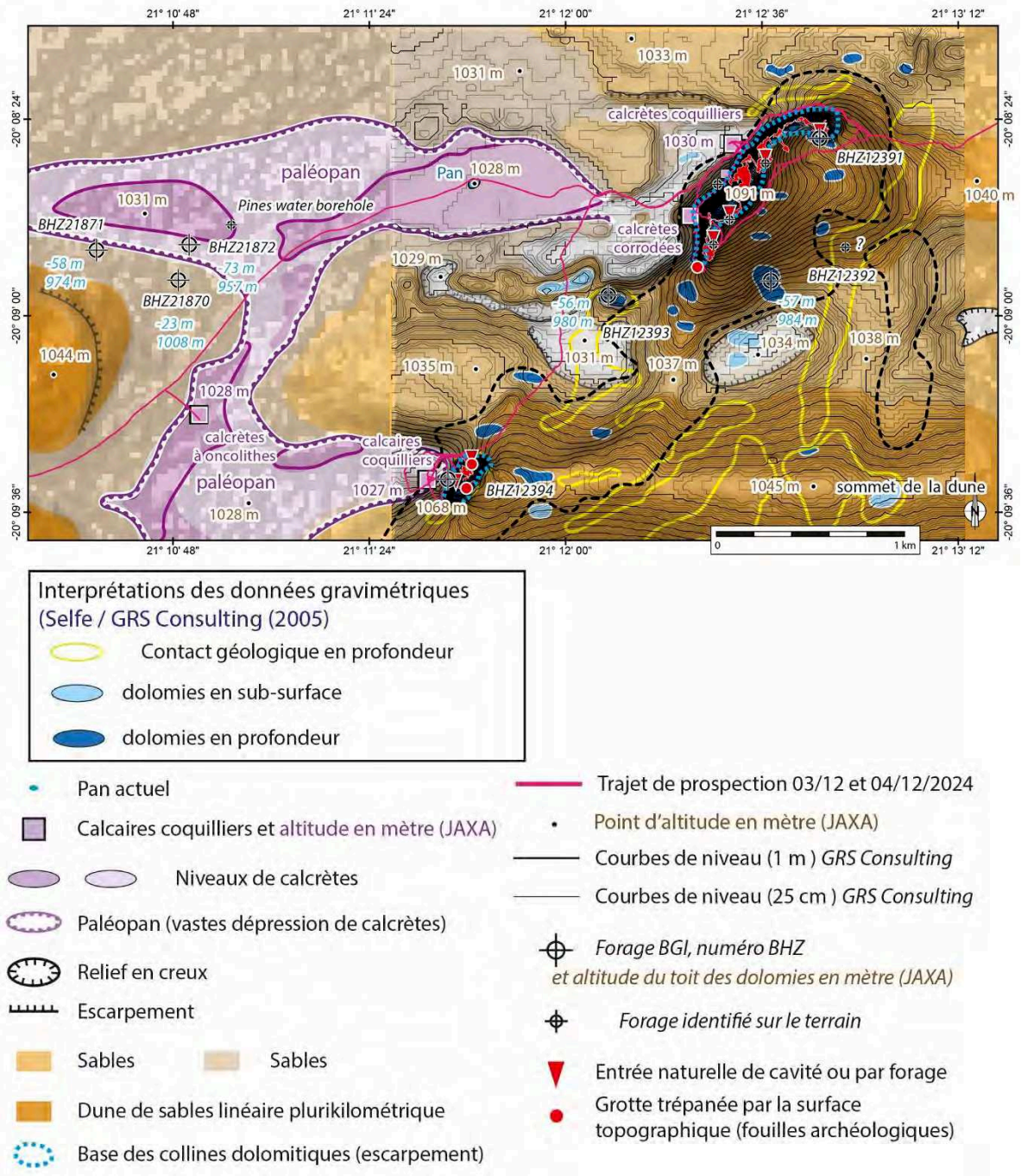


Figure 825 Rajout des données d'interprétation des données gravimétriques de Selfe/GRS Consulting (2005).

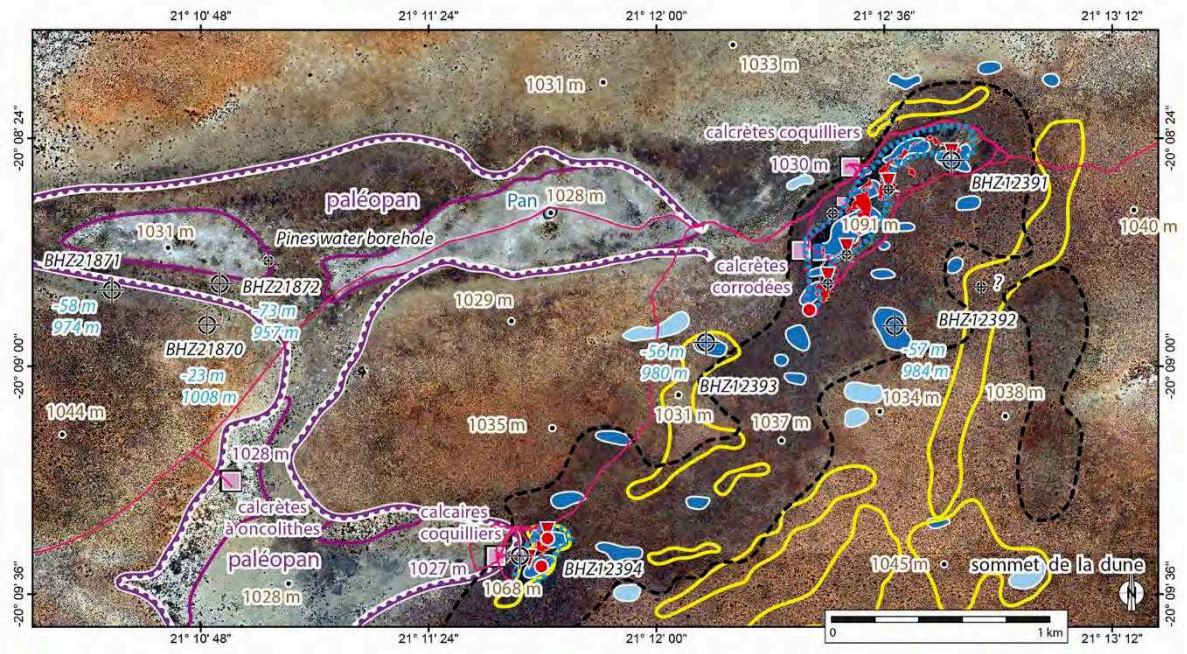


Figure 826 Rajout des données d'interprétation des données gravimétriques de Selfe/GRS Consulting (2005). En bleu foncé les dolomies profondes, en bleu les dolomies peu profondes, en jaune les contacts géologiques.

4.4.2.3. Synthèse cartographique et analyse géomorphologique des paysages des Koanaka

Comme nous l'avons fait précédemment pour Gcwihaba (p.768), nous allons présenter ici une synthèse cartographique des paysages de Koanaka.

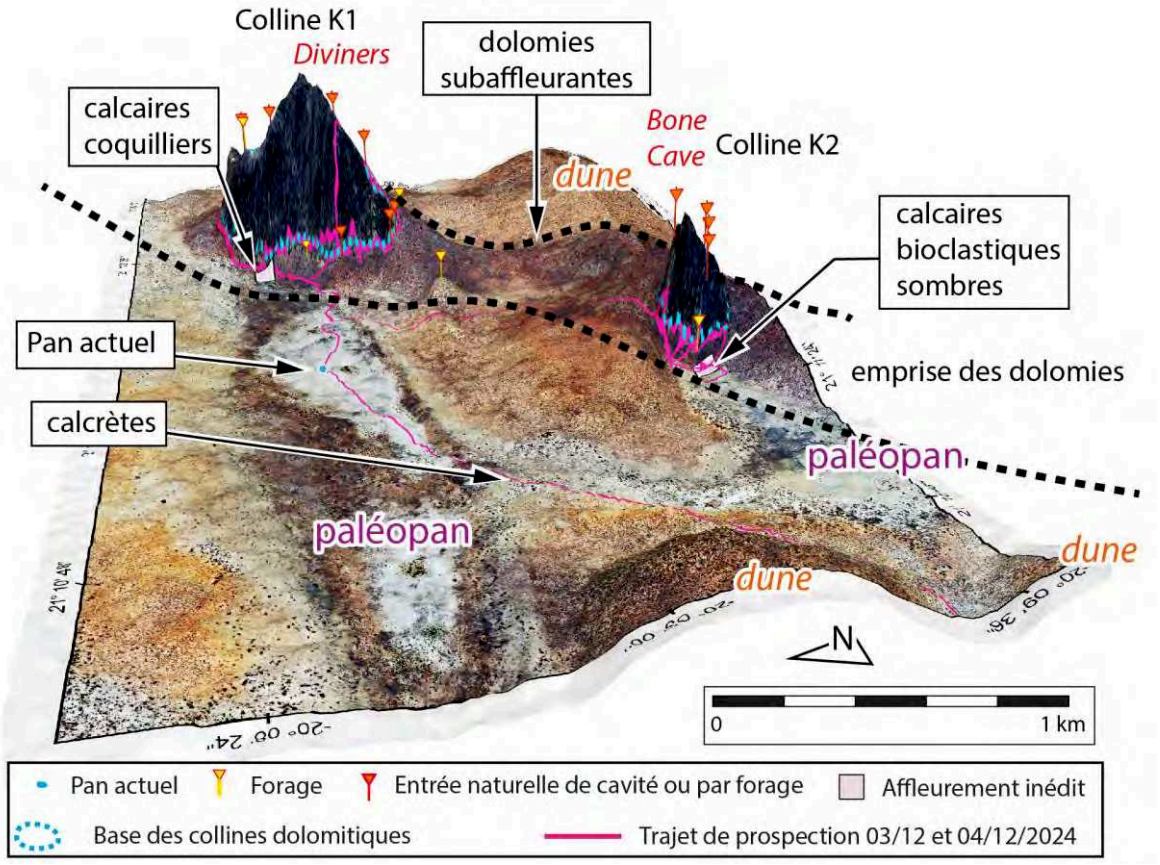


Figure 827 Vue en relief (2,5D) des collines de Koanaka, exagérée 10 fois.

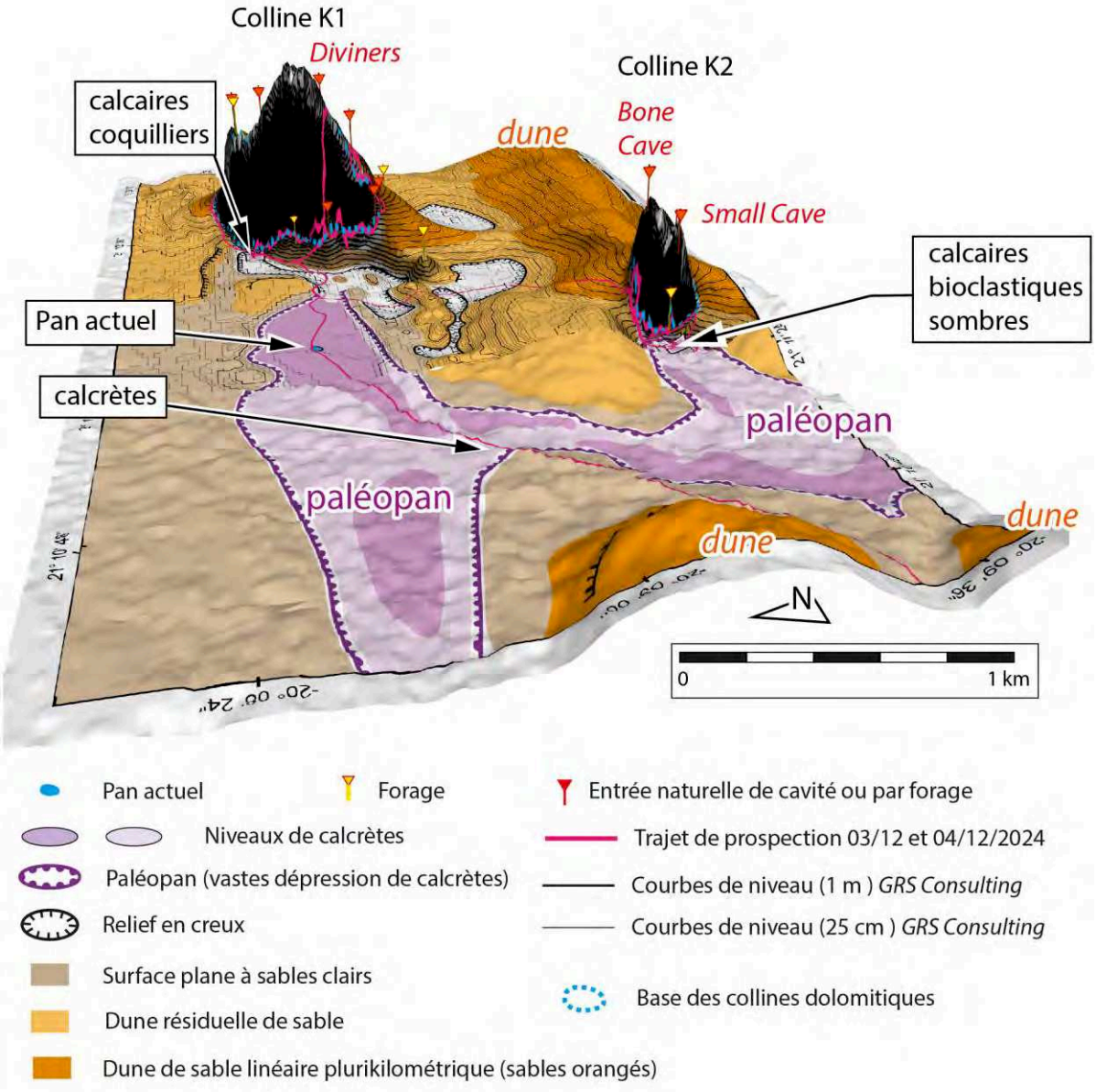


Figure 828 Analyse morphokarstique, en relief, des collines de Koanaka –(exagérée 10 fois).

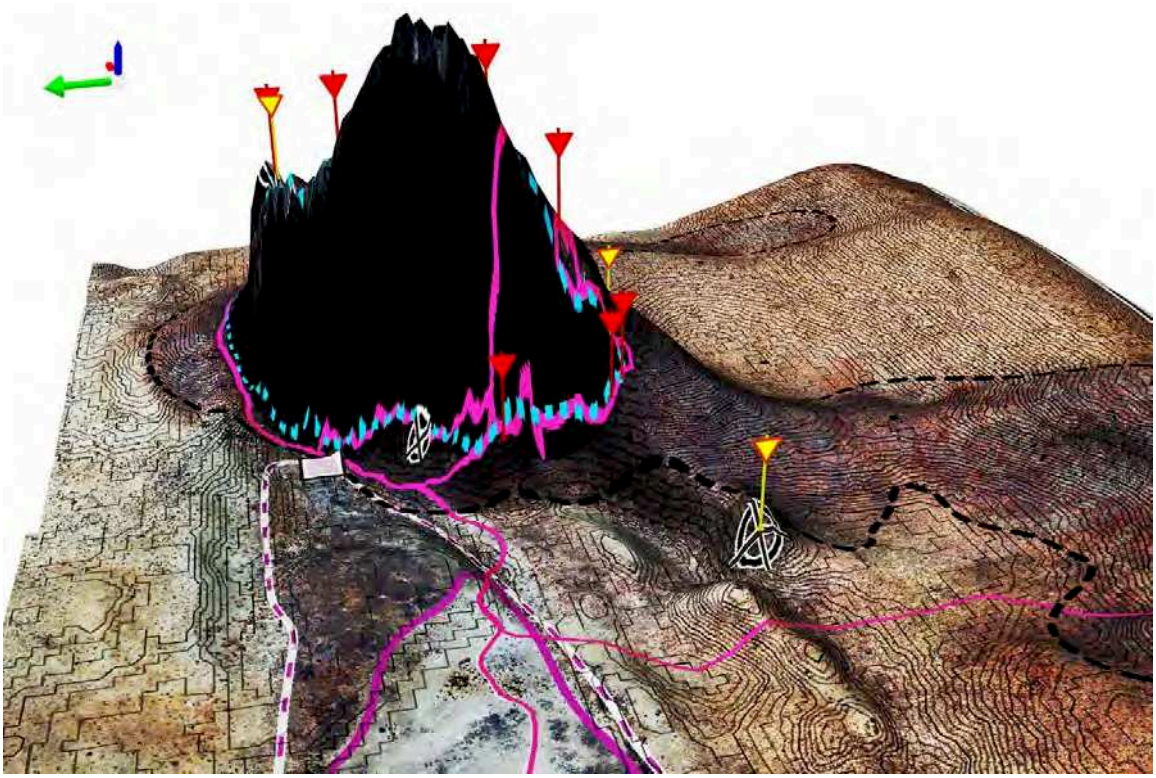


Figure 829 Vue en relief (2,5D) des collines de Koanaka, exagérée 10 fois.

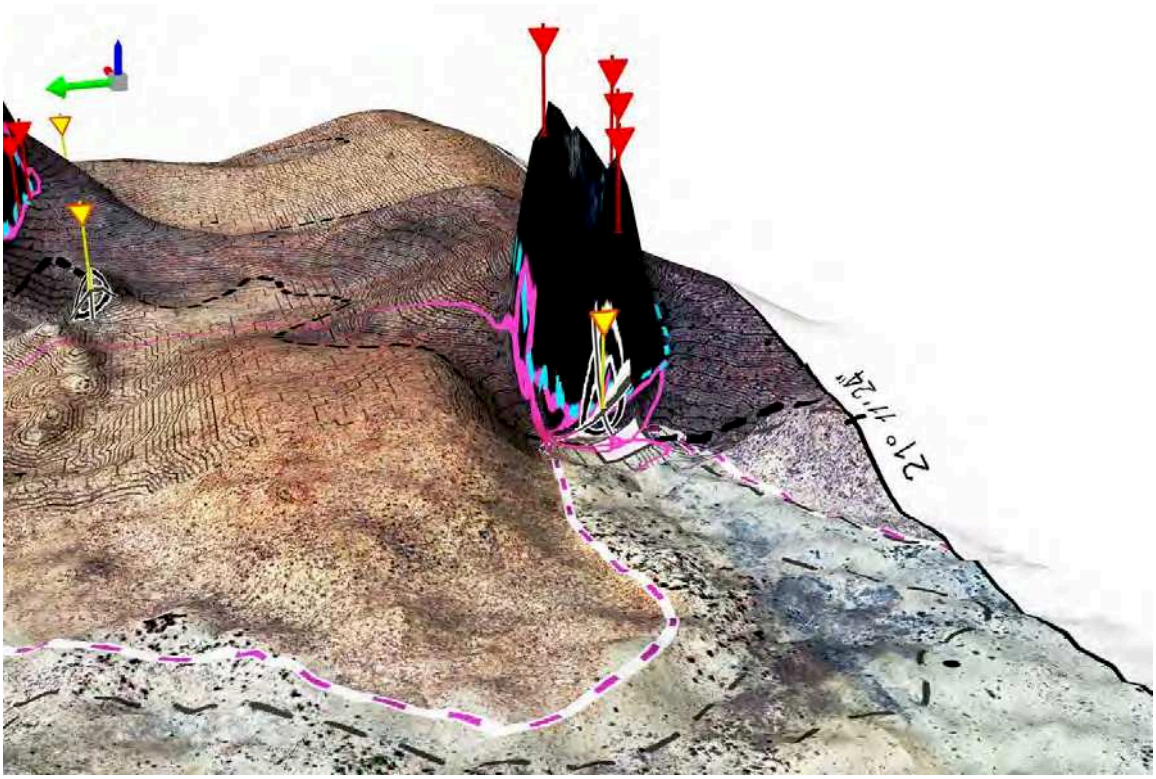


Figure 830 Vue en relief (2,5D) des collines de Koanaka, exagérée 10 fois.

TRIPTYQUE : PANORAMA DE LA COLLINE K1 ET DU PALÉOPAN, DEPUIS LA COLLINE K2.



Figure 831 Panorama photographique.

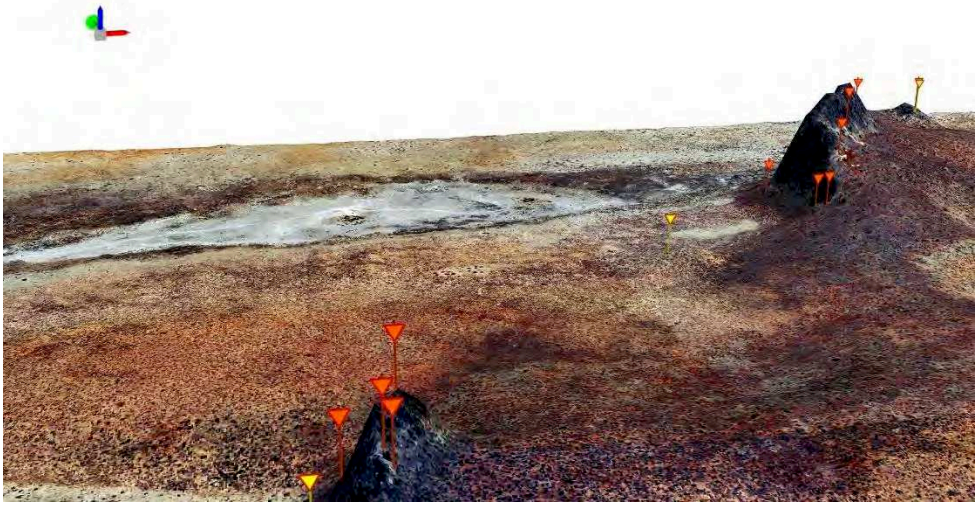


Figure 832 Image satellite en relief (2.5D) issue du SIG , exagérée 10 fois.

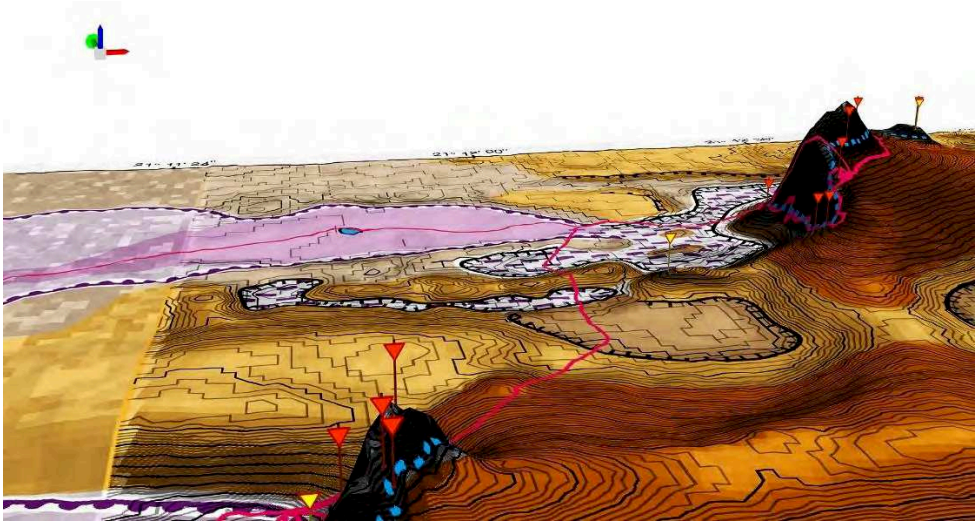


Figure 833 Analyse morphokarstique.

TRIPTYQUE DE K1 ET K2 (KOANAKA HILLS)

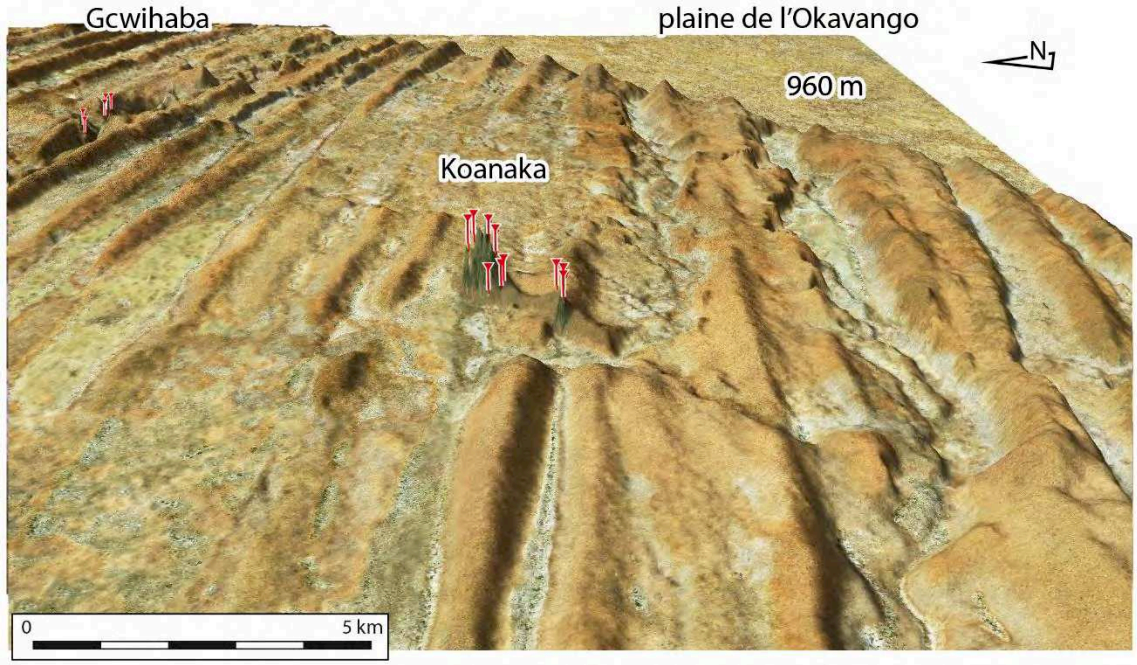


Figure 834 Image satellite de K1 et K2 à Koanaka Hills, en perspective et exagérée 10 fois.

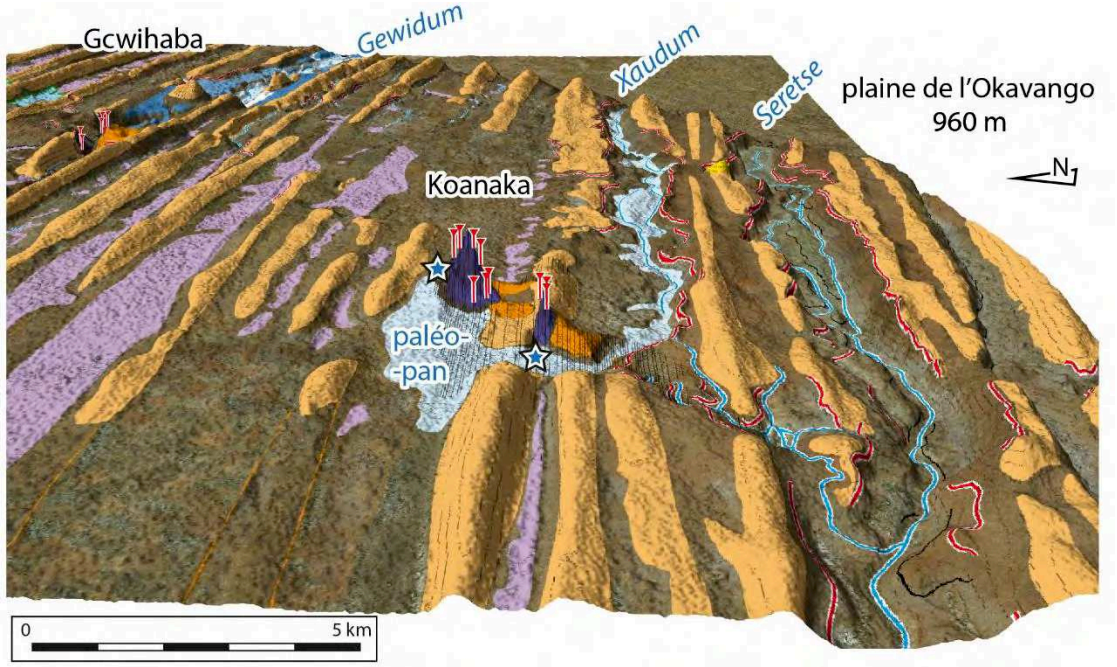


Figure 835 Analyse morphokarstique de K1 et K2 à Koanaka Hills. Légende ci-dessous.

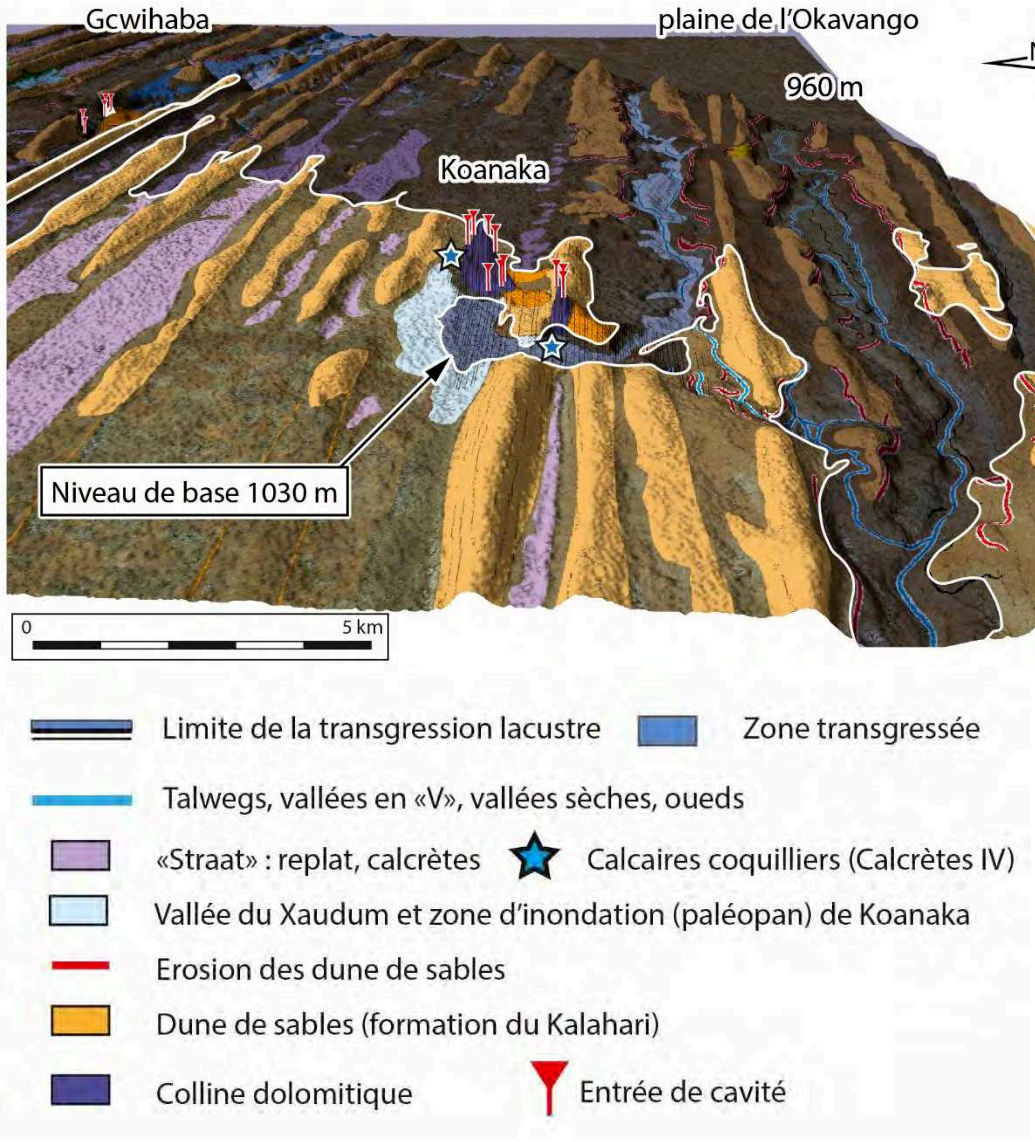


Figure 836 Transgression jusqu'à 1030 m.

La Figure 500 (p.531) permet de localiser la vallée de Xaudum.

TRIPTYQUE DE K3 (KOANAKA HILLS)

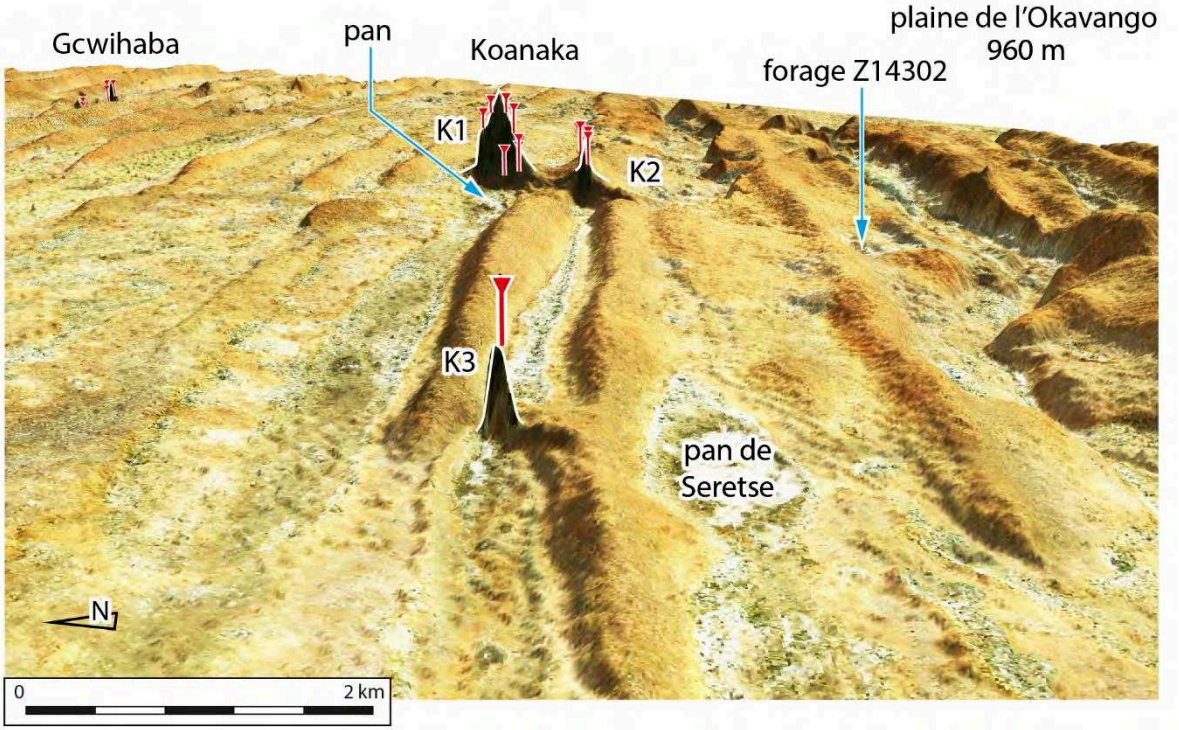


Figure 837 Image satellite des Koanaka Hills, en perspective(2.5D sous SIG) et exagérée 10 fois.

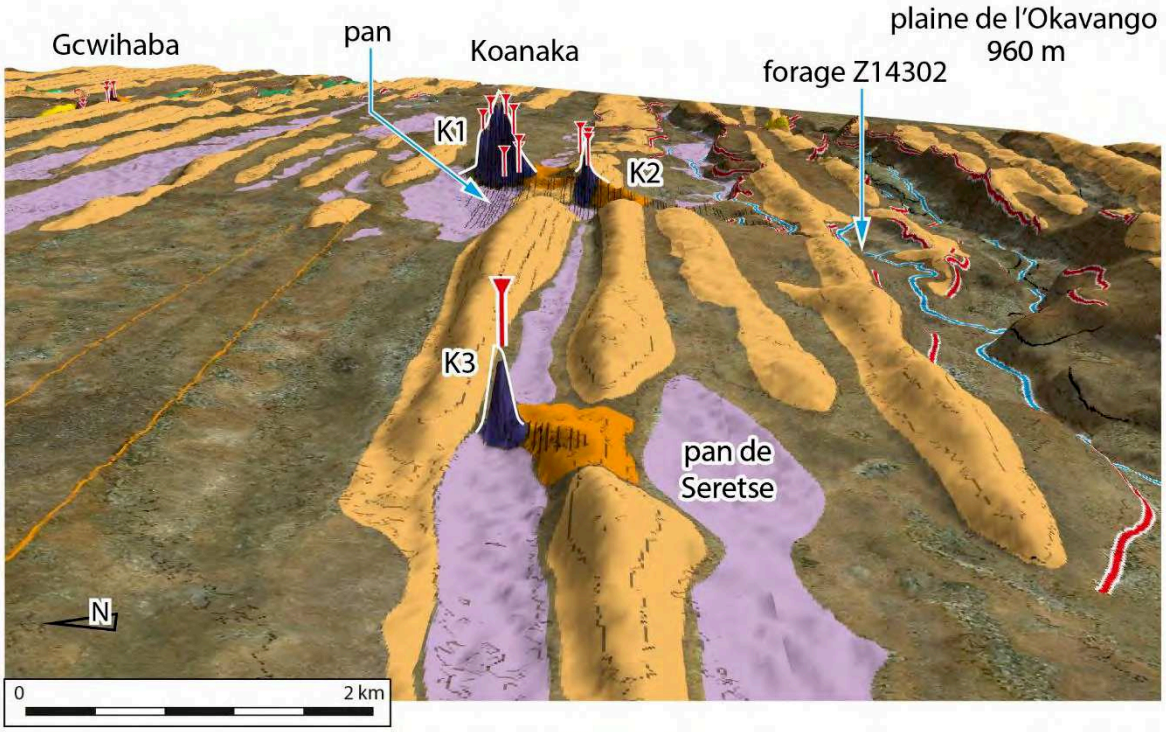


Figure 838 Analyse morphokarstique des Koanaka Hills. Légende ci-dessous.

Ici, nous simulons une inondation du paléolac jusqu'à l'altitude du pan de Seretse actuel, situé à 1043 m MTN JAXA. Toutefois, il est tout à fait possible que celui-ci n'ait été alimenté que par les eaux de pluies. Plus récemment, un forage alimentait le pan de Seretse.

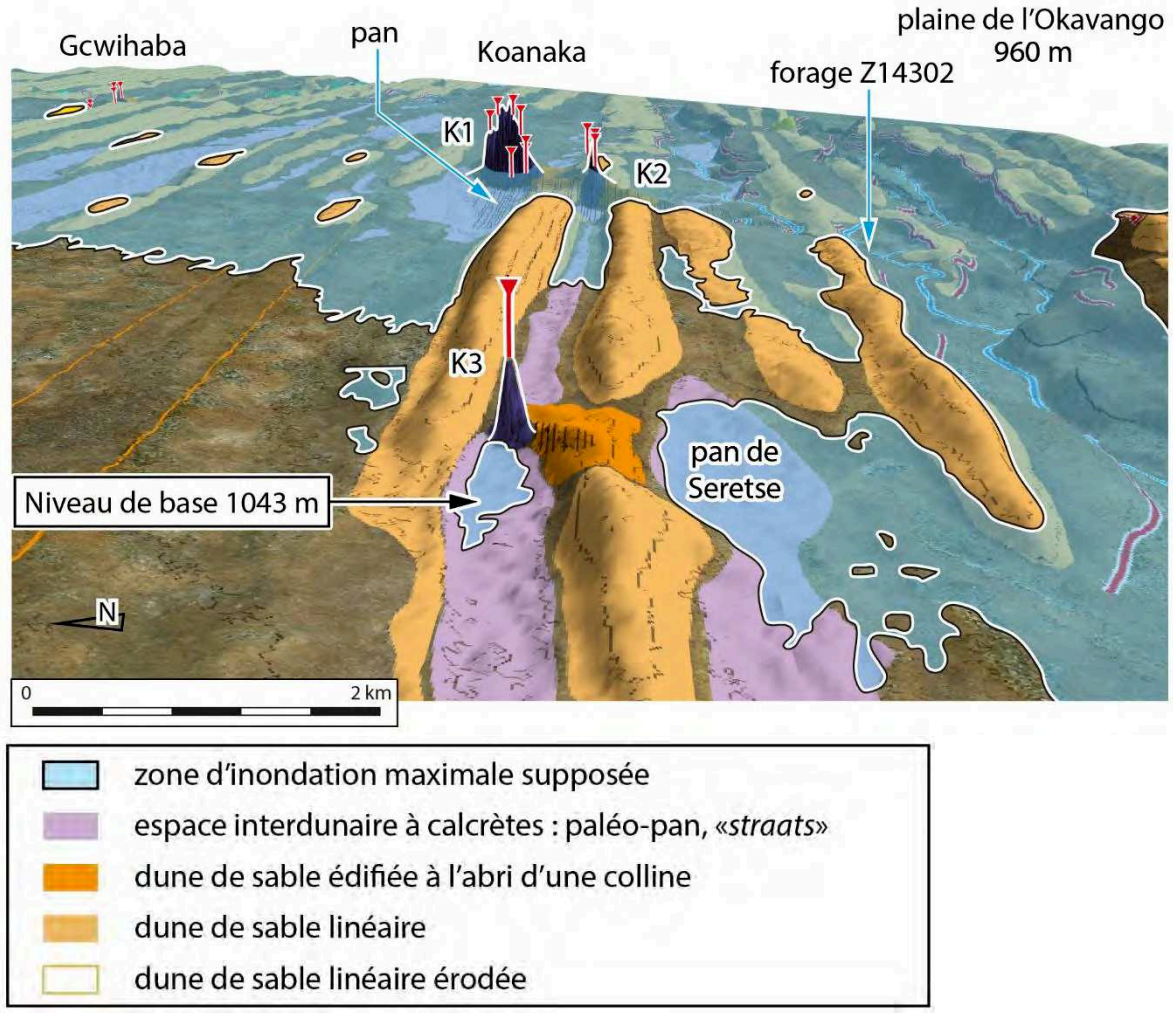


Figure 839 Transgression jusqu'à 1043 m.

4.4.3. Un paléoenvironnement lacustre déjà mis en évidence à Tsodilo

Les reliefs de Tsodilo (Figure 840), dont le sommet culmine à 1400 m d'altitude, sont riches en art pariétal préhistorique, mais ils n'appartiennent pas au domaine du karst car tout simplement, ce ne sont pas des carbonates. Ce sont des quartzites (Wendorff, 2005) et ils forment des reliefs que l'on appelle des *inselbergs*. Il n'y a pas de cavité mais des abris sous roche. Nous avons localisé Tsodilo sur la Figure 877, ci-dessus. Dans le secteur, quatre paléo-rivages ont été identifiés, ainsi que trois phases de paléolacs élevés situés à des altitudes comprises entre 1025 m et 1017 m, datant d'au moins 100 000 ans (Geppert *et al.*, 2021) (Figure 841 p.816).



Figure 840 Inselbergs en quartzites de Tsodilo Hills au Nord-Ouest du Botswana (Source : Arte L'Afrique vue du ciel, Botswana).

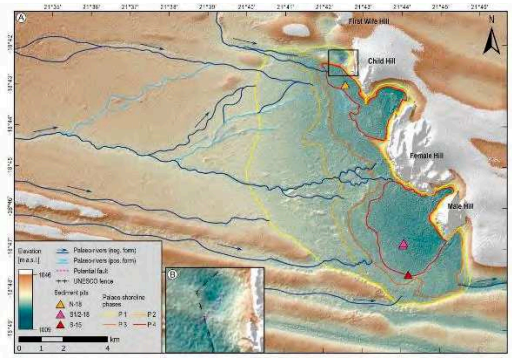


Figure 841 Paléolacs de Tsodilo Hills (Geppert et al., 2021, Fig.7).

À *Tsodilo Hills*, dans l'abri de *White Paintings Shelter*, Robbins *et al.* (1994) ont découvert un fragment en os qui pourrait correspondre à un harpon ou à une sagaie, daté entre 4000 et 5 000 ans BP ou autour de 20 000 ans *(Late Stone Age)* (Yellen, 1998).



Figure 842 Fragments de pointes barbelées en os trouvés à Tsodilo Hills (Source : Robbins et al., 1994, Fig.7, p.1100)

4.4.4. Un paléoenvironnement lacustre déjà mis en évidence à Ngami

À 4 m de profondeur, sous le lac Ngami les sédiments ont été datés de 40 000 ans (TL) (Huntssman-Mapila *et al.*, 2006 et Gamrod, 2008 *in* Ringrose, 2022, Table 4.3 p.69). Des diatomées permettent de caractériser le type d'environnement (Huntssman-Mapila *et al.*, 2006 et Gamrod, 2008 *in* Ringrose, 2022, Table 4.3 p.69).

4.4.5. Des paléolacs identifiés dans le graben du Rift de l'Okavango (bassin de Makgadikgadi)

Cooke (1979) discute déjà des replats particuliers à 1000 m, 945, 920 et 912 m de l'altitude. Il remarque que la surface à 912 m est marquée par une faible élévation sableuse et que celle de 920 m est marquée par une couche de calcrète, ainsi que d'anciennes flèches sableuses organisées en des barres *offshores*. Il identifie une pente à 945 m d'altitude recouverte par des calcrètes et des dépôts lacustres. Il se demande : *« si un grand lac a existé ici par le passé, trois grandes questions se posent immédiatement. Premièrement, d'où provenait l'eau qui le remplissait ? Deuxièmement, où est-elle passée ? Troisièmement, à quelles périodes du passé ce grand lac existait-il ? ».*

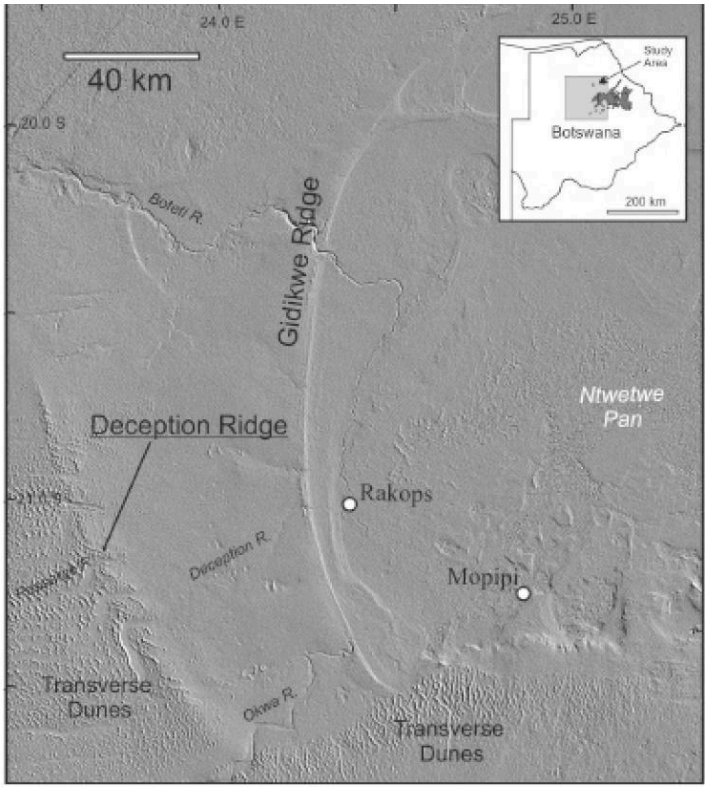


Figure 843 Mise en évidence de la bordure des paléolacs sur un modèle ombré (Mc Farlane et Eckardt, 2008).

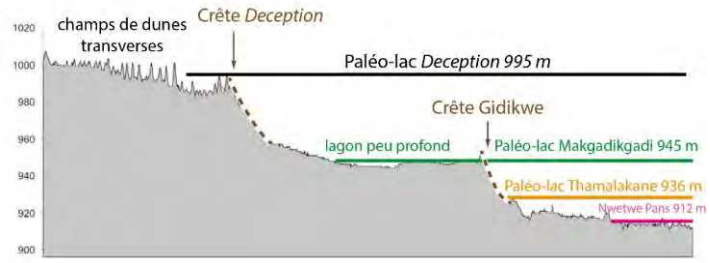


Figure 844 Analyse du profil (Moore et al., 2012, 2022).

L'identification de ces bordures de paléolacs ont été réalisées à l'aide des outils de la géomatique et à partir des données de mesures satellitaires des reliefs, les MNT (voir Chapitre n°1). Mc Farlane et Eckardt (2008) ont identifiés à 350 km plus à l'est, dans le bassin de Makgadikgadi, des reliefs laissés par la présence de paléolacs (*ridge*, paléo-rivage, rupture de pente, etc.) et associés à des sédiments lacustres. Ils distinguent ainsi plusieurs paléolacs, à 995 m, à 945 m, à 836 m et à 912 m (Figure 843 et Figure 844).

Grâce à cette méthode et en la corrélant avec les données géologiques sur le terrain, les auteurs ont identifié plusieurs paléolacs situés dans le graben du Rift de l'Okavango. Listons-les :

- Le paléolac Deception à 995 m d'altitude ;

La région de *Deception Valley* (lien Google View) est une surface plane située à 995 m d'altitude, comme le montrent les courbes de niveau, en noir, sur notre carte (Figure 854 p.830). Aujourd'hui, on y trouve des pans (*Gcingha pan, Guy pan, Lamont pan, Crail's pan, Khudia pan*) et des reliefs émergent de cette surface (*Ngwanalekau Hills, Khwebe Hills, Haina Hills, Pimpl Hill* à 1033 m, *Tsau Hills*). Ils ne semblent pas appartenir à des formations carbonatées et il n'y devrait pas y avoir de karsts.

- Le paléolac Makgadikgadi à 945 m ;

- Le paléo-Thamalakane à 936 m ;

- Le paléolac Bukozi à 920 m.

Nous ne décrirons pas les secteurs où des paléolacs ont été identifiés lorsqu'ils se situent trop bas en altitude et sont donc récents par rapport à nos problématiques de recherche. Intéressons-nous, maintenant au contexte paléo-hydrologique de la région, afin de comprendre comment les fleuves et les cours d'eau étaient organisés dans le passé et voir si cela peut expliquer la présence de ces paléolacs.

4.5. RECONSTITUTION CARTOGRAPHIQUE SYNTHETIQUE DES PAYSAGES ET DES PALEODRAINAGES DU KALAHARI DEPUIS LE CRETACE (D'APRES LA BIBLIOGRAPHIE) ET ETABLISSEMENT DE LACS DANS LE RIFT DE L'OKAVANGO AU PLIO-PLEISTOCENE

De nombreuses publications traitent de la reconstitution des paysages de l'Afrique australe à partir du Jurassique notamment des travaux anciens (Du Toit, 1933, 1939 ; King, 1954, Lister, 1987 ; Partridge et Maud, 1987, 2000).

Cependant, leurs concepts et leurs cartes sont aujourd'hui obsolètes, notamment depuis l'arrivée des **données satellites** et leurs utilisations pour l'analyse des reliefs, comme nous l'avons décrit dans le 1. Ces nouvelles données ont apporté de solides arguments face à des concepts plutôt théoriques.
De plus, un autre type de données est venu renforcer la compréhension de ce qui s'est déroulé sur le continent de l'Afrique australe, ce sont les **données de sismiques réflexions** qui révèlent les **séquences stratigraphiques** des dépôts des deltas des fleuves sur les marges continentales. Une fois encore, les arguments ici sont solides et les publications nombreuses : Moore, Blenkinsop et Cotterill, (2009) ; Moore, Cotterill et Eckardt (2012), Linol *et al.* (2015), Fierens (2017), Baby (2017) ; Ponte (2018, Fig.2.20, p.81), Ponte *et al.*, (2018), etc.
Essayons de résumer brièvement les résultats de ces études à l'aide de cartes commentées, dont l'objectif est de reconstituer l'évolution des paysages et des paléodrainages de l'Afrique australe, afin de bien comprendre le contexte des karsts que nous étudions.

4.5.1. Chronologie

4.5.1.1. Un système de drainage unique au Mésozoïque.

Au Jurassique, un système de drainage unique parcourait cette partie du Gondwana et se jetait sur la cote est. Puis, le canal du Mozambique s'est ouvert à l'est, il y a **183 Ma** (Figure 857) (Eagles et Konig, 2008 ; Partridge et Maud, 2000, p.3 ; Duncan *et al.*, 1997 ; Jourdan *et al.*, 2008 *in* Stanley *et al.*, 2021 ; Duncan *et al.*, 1997 *in* Thomson, 2017, Fig.30, p.30).

Les premiers deltas enregistrés dans le canal du Mozambique datent du Valanginien au Cénomanien supérieur **(de 140 à 100 Ma)** et correspondent aux paléo-Zambèze, paléo-Limpopo et paléo-Tugela (Brown *et al.*, 1995, sur la base des données biostratigraphiques de McMillan, 2003 *in* Guillocheau *et al.*, 2012 ; Tardy et Rouquin, 1998, p.340).

Puis, au Crétacé inférieur, c'est au tour de l'Océan Atlantique sud de s'ouvrir et de séparer l'Afrique et l'Amérique du Sud (Figure 845 B et C). Les premiers deltas enregistrés à l'ouest sont datés du Barrémien (127 Ma) (Jungslager, 1999) et correspondent au paléo-Orange.

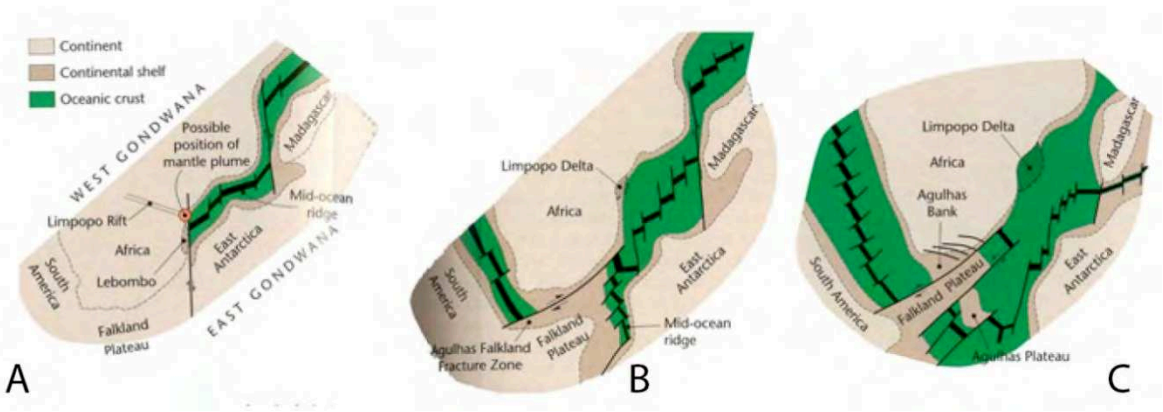


Figure 845 Au Crétacé, ouverture en trois étapes des bassins océaniques autour de l'Afrique australe (Source : Mc Carthy and Rubidge, 2005 in Moyen, 2008, Fig.1.25 p.25).

Pendant le Crétacé, le paléo-Okavango se jetait dans le paléo-Limpopo (Thomas et Shaw, 1990, Fig.2B, p.190 ; Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Fig.7), Fierens, 2017 ; Ringrose, 2022, Table 4.1 p.63) par l'intermédiaire de la rivière Shashe (Figure 857), jusqu'à une déconnexion de cette circulation, comme vont le montrer les cartes suivantes (Figure 857 à Figure 867) à cause de surrections tectoniques.

4.5.1.2. Des surrections à partir de la fin du Crétacé

Le taux de sédimentation du delta du Limpopo au niveau du Canal du Mozambique, calculé par stratigraphie séquentielle, montre un arrêt de sédimentation à la fin du Crétacé (Saïd *et al.*, 2015) (Figure 846 et Figure 847).

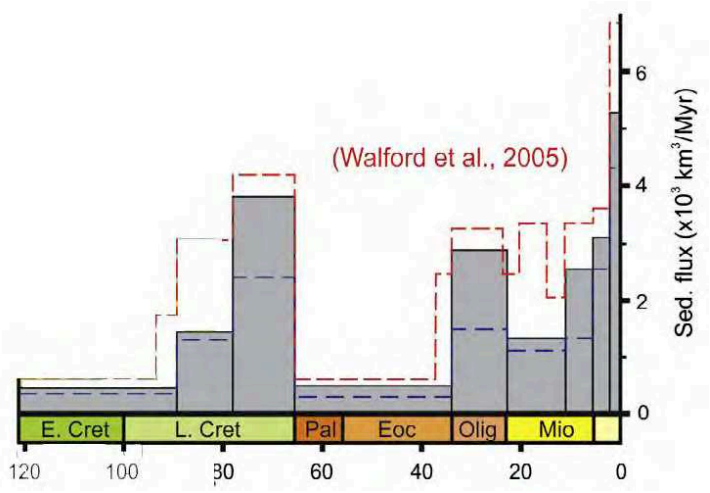


Figure 846 Evolution du taux de sédimentation du Zambèze (Walford et al., 2005 in Saïd, 2015, fig.7).

Cet arrêt correspond à une surrection tectonique (flexure épirogénique / flexure crustale du sous-continent), le long d'un axe Okavango-Kalahari-Zambèze, représentée en pointillé marron sur la Figure 858, initiée à la fin du Crétacé et pendant le Paléogène (Moore, 1999 ; Moore et Larkin, 2001 ; Moore, Cotterill et Eckardt 2012), qui déconnecte les fleuves du Kalahari (Okavango, Cuando, Luangwa et Kafue) d'avec le fleuve Limpopo qui se jette dans l'Océan Indien.

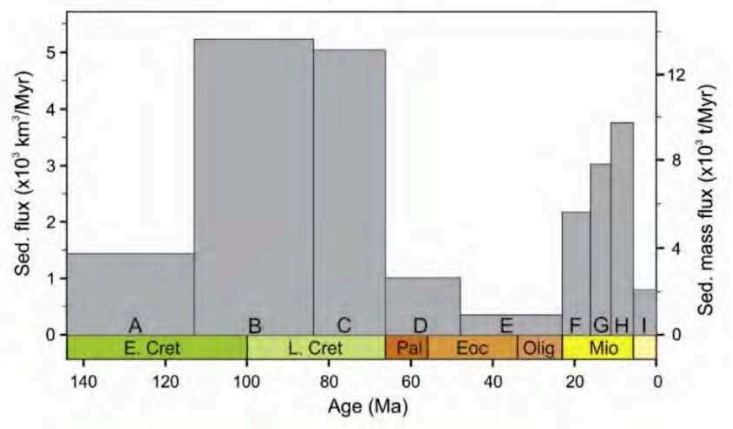


Figure 847 Evolution du taux de sédimentation du Limpopo (Saïd et al., 2015, Fig. 7).

La reprise des dépôts sédimentaires dans les bassins *offshores*, à partir de l'Oligocène (33 Ma) pour le Zambèze (Figure 846) et à partir du Miocène (23 Ma) pour le Limpopo (Figure 847) traduisent la réorganisation et le rétablissement des fleuves sur le continent à partir de ces époques (Ponte, 2018 et Fierens, 2019), comme l'indiquent les cartes suivantes (Figure 857 à Figure 865).

On remarque un arrêt et une reprise de l'érosion du Zambèze vers 10 Ma, pendant le Miocène (voir cartes de Fierens, 2019).

4.5.1.3. La mise en place du Rift de l'Okavango

Plus localement, un autre évènement géodynamique va venir impacter la région. C'est la propagation vers l'ouest de la branche occidentale du **Rift est-africain** (Scholz, 1975 *in* Shaw, 1988) (p.4) (Figure 862) qui va installer le **Rift de l'Okavango** au minimum vers **3.35 Ma** (Vainer *et al.*, 2024).

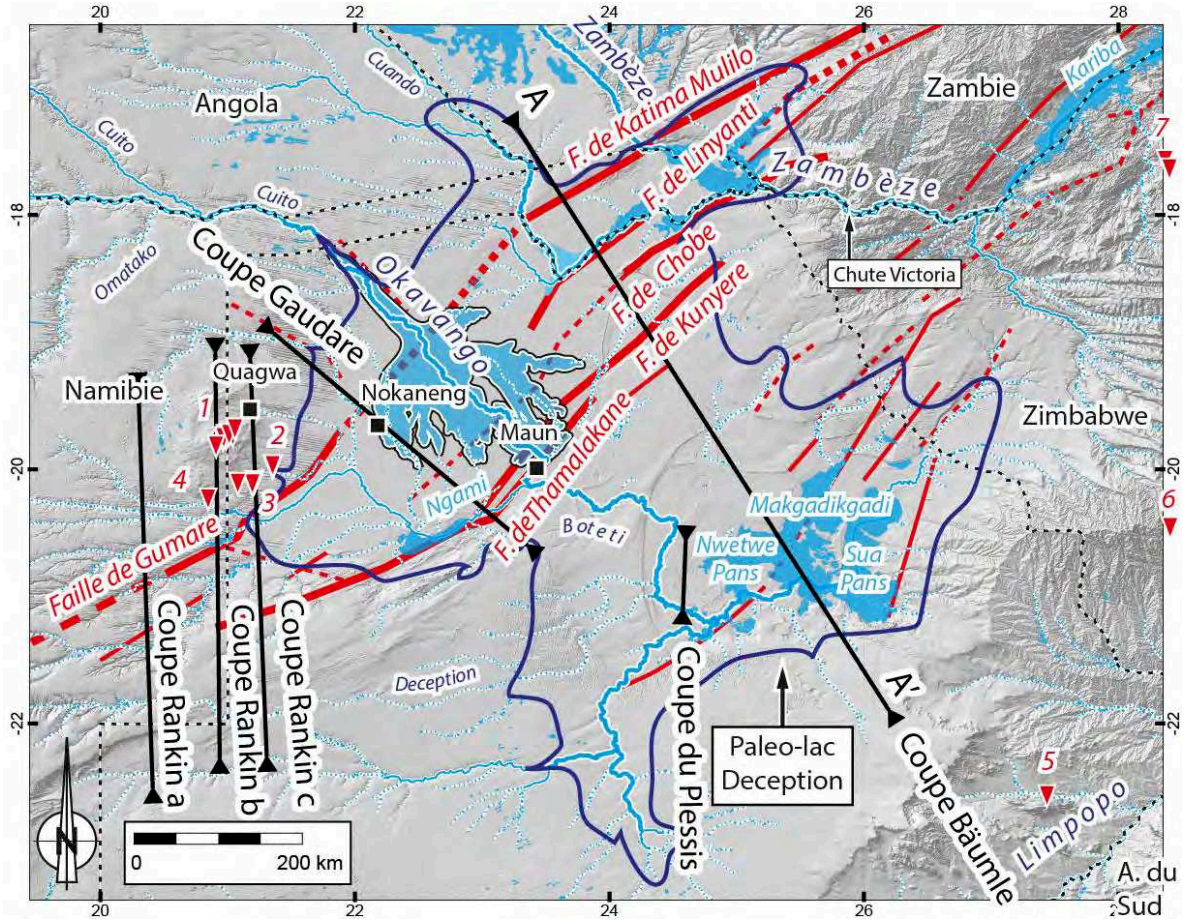
Ceci va impacter la région et les grottes que nous étudions indiquées par des points rouges sur la Figure 433. Elles sont situées à 150 km à l'est du Delta de l'Okavango actuel, sur un horst tectonique culminant à 1000 m d'altitude, soit 30 m au-dessus de la plaine de l'Okavango actuelle, située en contrebas de la faille de Gumara (Figure 854 et Figure 849). Les grottes sont situées à 20 km de la faille de Gumare.

Cette faille forme une bordure qui délimite à l'est la plaine de l'Okavango à 970 m d'altitude et à l'ouest le plateau où se situent nos buttes karstiques à 1000 m d'altitude et qui est recouvert par les dunes de sables de la formation du Kalahari, appelées ***Alab dune fields***.

Effectivement, le Delta de l'Okavango est installé au sommet d'un graben, profond de 400 m au milieu du rift (Figure 849 p.825) (Gaudare, 2024) et de 62 m en bordure du horst (forage JEB1, p.701), mis en place entre la faille de Gumare (parfois écrit Gomare) et la faille de Thamalakane et celle de Kunyere (en rouge sur la Figure 848) (*Water Surveys Botswana* et *Aqualogic*, 2001, Fig.11 ; Kinabo *et al.* 2008 ; Vanier *et al.*, 2024 ; Gaudare 2024, Fig.1.4, p.21 ; Dauteuil *et al.,* 2024, Fig.2, p.142). Les coupes géologiques structurales ci-dessous (Figure 849 à Figure 851) montrent la structure tectonique de ce rift installé entre le Craton du Congo et le Craton du Kalahari.

Cette structure géologique particulière, le rift, est propice à l'accumulation de sédiments et présente donc un certain intérêt pour la recherche de fossiles, notamment en raison de son influence sur l'abaissement du niveau de base régional et les conséquences, que nous avons démontré dans le Chapitre n°3, sur la spéléogenèse par fantômisation des réservoirs carbonatés (p.439).

Les structures tectoniques en extension ont favorisé la subsidence du rift, la formation de lacs et l'accumulation de sédiments. Ces processus ont un impact direct sur les niveaux de base et la karstification, en particulier sur les grottes que nous étudions, localisées sur la Figure 848 ci-dessous.



Coupe Gaudaré : Figure 849.
Coupe de Bäulme : Figure 902 (p.895).
Coupe du Plessis (Figure 851).

Numéro des karsts : 1: *Aha Hills*, 2 : *Gcwihaba Hills*, 3 : *Koanaka Hills* (K1 et K2 à l'est) et *Blue Cave* (K3 à l'ouest), 4 : Gam (Namibie), 5 : Cave in Phato Ye Sebilo Gorge (Afrique du Sud), 6 : Bamata (Zimbabwe) et 7 : Chirisa et Chitita (Zimbabwe).

Figure 848 Cadre structurale du Rift de l'Okavango et du Delta de l'Okavango en lien avec la branche occidentale du Rift est-africain (inspiré de Kinabo et al., 2008 ; Cotterill, 2006, fig.4.1a p.107 et aussi Moore et Larkin, 2001, Fig.10, p.55 et Moore et al., 2007, Fig.15-14, p.323).

La coupe de Gaudare (2024) (Figure 849) illustre la structure tectonique du Rift de l'Okavango et notamment la faille de Gumare, que l'on identifie facilement sur le terrain et qui marque la limite orientale des dunes de sables du Kalahari (Figure 500 p.531) et dans une moindre mesure l'extension occidentale des lacs. Nous montrerons comment le Lac *Deception* a transgressé cette limite (Figure 778 p.781).

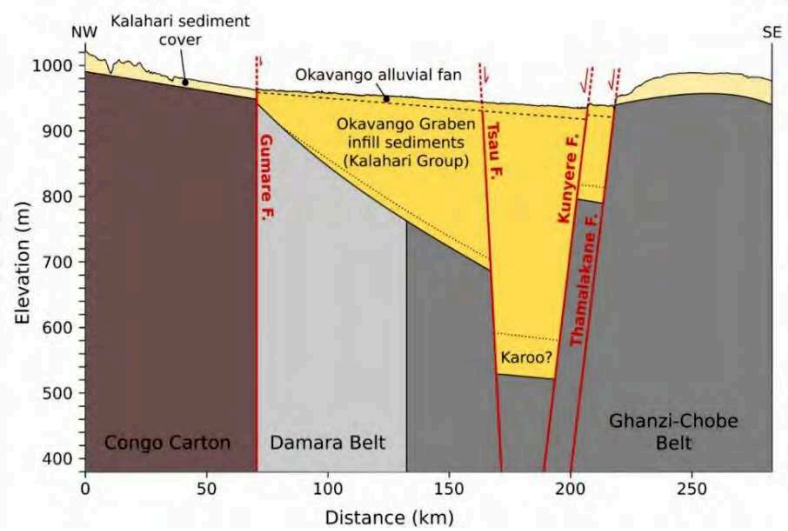


Figure 849 Coupe structurale du Rift de l'Okavango montrant la faille de Gumare (Source : Gaudare, 2024, Fig.1.4, p.21). La position de la coupe est indiquée sur la Figure 848.

Les coupes géologiques régionales, ci-dessous (Figure 850) de Rankin (2015), montrent les dolomies du groupe de Koanaka (en bleu foncé), où se situent les grottes que nous étudions. Les structures en extension du Rift de l'Okavango sont bien visibles notamment la faille de Gumare. Nous pouvons aussi nous reporter à la coupe de Bäulme : Figure 902 (p.895).

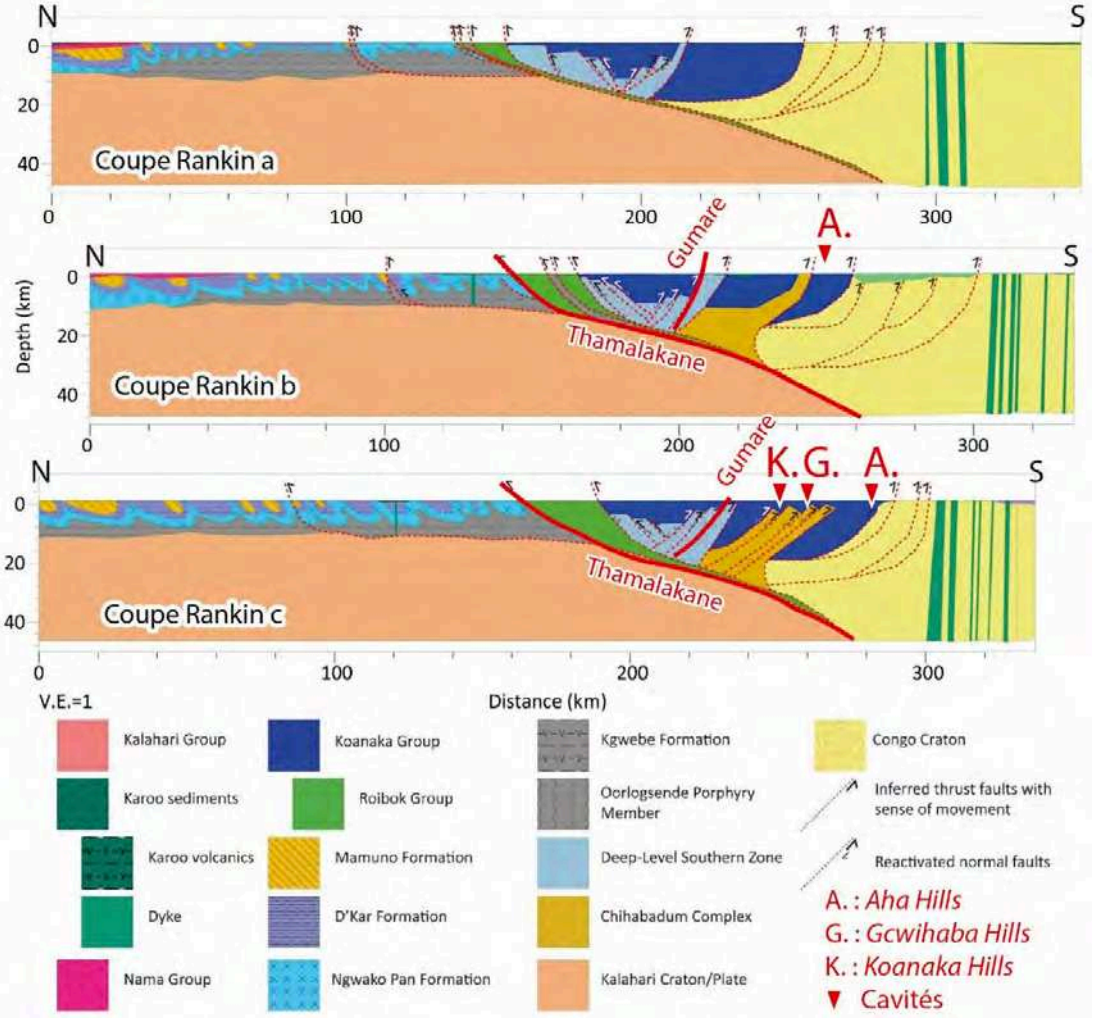


Figure 850 Coupes géologiques régionales à travers le Rift de l'Okavango, localisées sur la Figure 848 (Source : Rankin, 2015, p.321, modifié).

La coupe de De Plessis (1998), citée dans Moore, Cotterill et Eckardt (2012,t Fig.8, p.400), ci-dessous (Figure 851), montre les remplissages lacustres du **Miocène supérieur** (d'après les pollens fossiles) du bassin de Makgadikgadi.

Ces remplissages sont constitués, de bas en haut, de :

(1a) Boues carbonatées à pyrites et grès, correspondant à la mise en place d'une étendue d'eau profonde dans des conditions anaérobies ;
(1b) Boues carbonatées et grès témoignant d'un lac pérenne ;
(2) Carbonates gréseux à silex, associés à la présence d'un lac éphémère ;
(3) Grès, calcaires, silex et calcrètes, indiquant un lac éphémère peu profond ;
(4) Sables, silcrètes et calcrètes, correspondant à un environnement pédogénétique (au développement d'un sol).

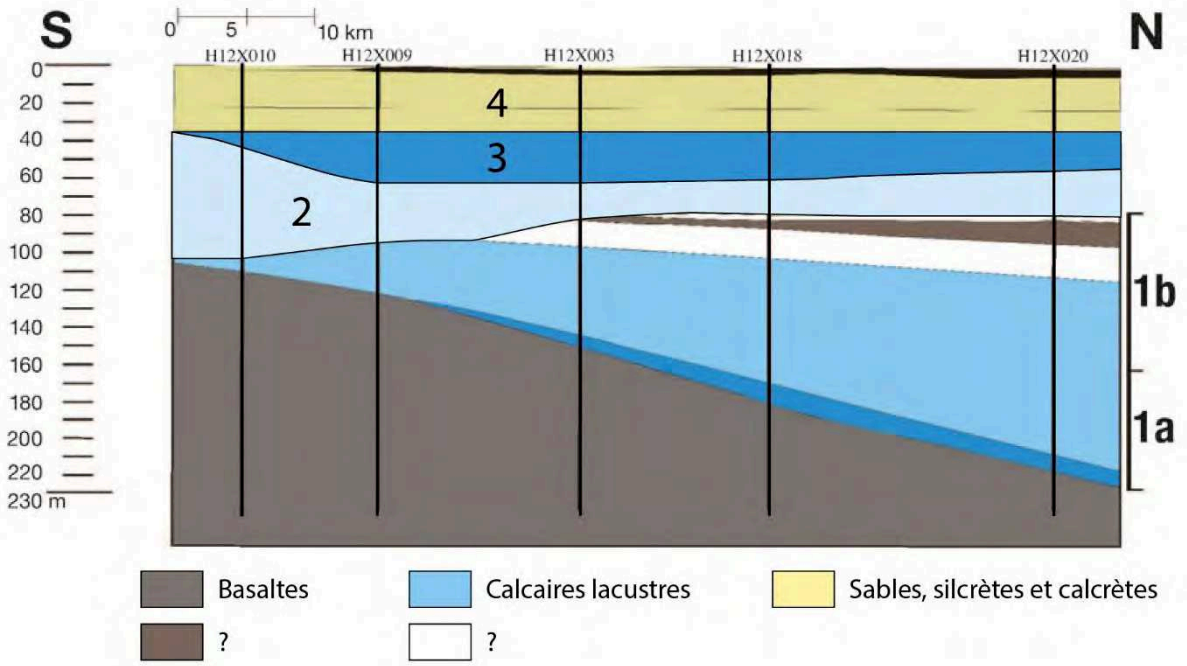


Figure 851 Coupe dans le bassin de Makgadikgadi (Source : De Plessis 1998 in Moore, Cotterill et Eckardt, 2012,t Fig.8, p.400, modifié). La position de la coupe est indiquée sur la Figure 848.

Les remplissages décrits correspondent au **groupe du Kalahari** (p.507), et qui sont la conséquence des systèmes de lacs endoréiques qui se mettent en place à partir du Paléogène (Figure 858 p.834) et que nous allons décrire plus loin (p.820).

> *« Nous attribuons cette discordance à la diminution marquée de l'apport en sédiments dans le bassin du Kalahari, suite à la capture du Haut-Zambèze par le Zambèze moyen. On en déduit que le dépôt de la séquence lacustre en eau profonde plus jeune a commencé à la suite de la dérivation du système Paléo-Chambeshi-Zambèze dans le nord du Botswana pour initier la séquence du méga-lac Makgadikgadi à la suite du soulèvement le long de la faille de Chobe » (Moore, Cotterill et Eckardt, 2012,t Fig.8, p.401).*

4.5.1.3.1. Au nord de Tsodilo Hills le site OGN permet de dater la base du groupe du Kalahari à 3.75 Ma

Les datations cosmogéniques du forage n°BH9696 (Figure 852) (-18.25111, 21.20392 ; lien vers le BGI ; lien de localisation sur googlemaps) (site OGN) indiquent des âges de **3.75 Ma** pour la base du groupe du Kalahari (Vainer *et al.*, 2021, Fig.3, p.1177 ; 2024).Ce forage décrit le groupe du Kalahari avec notamment des calcaires conglomératiques, indiqués en rose, situés entre 34 et 25 m de profondeur.

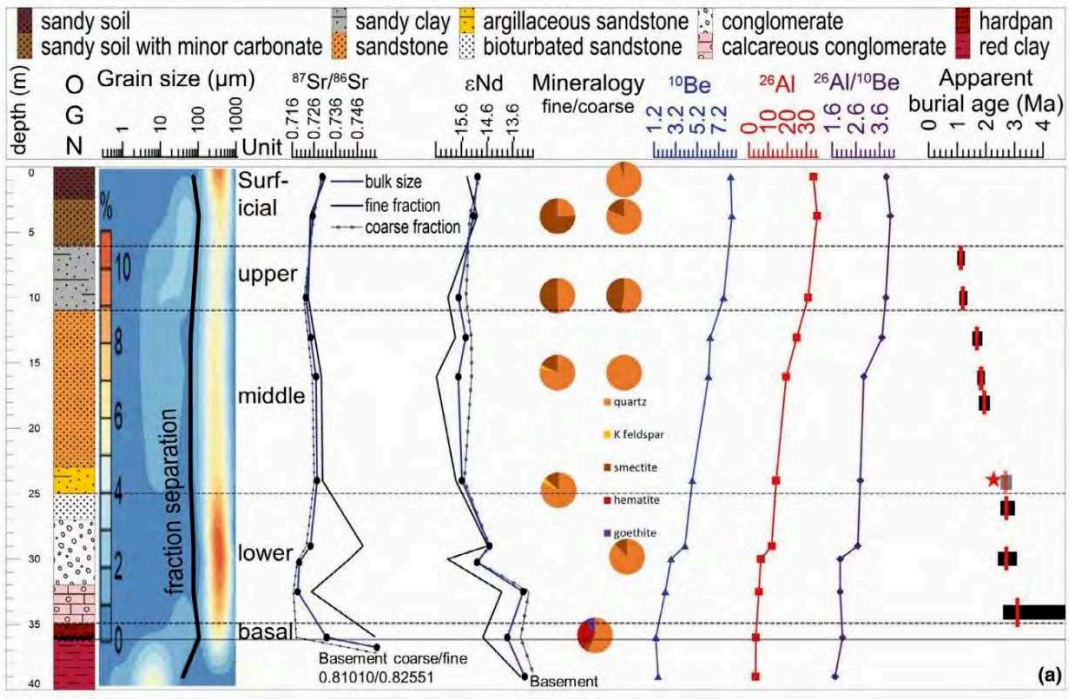


Figure 852 Datations des sédiments du groupe du Kalahari dans le forage 9696 (OGN) (Source : Vainer et al., 2001, Fig.3, p.1177).

> *L'âge d'enfouissement de **3,75 Ma**, obtenu à 66 m de profondeur sur le site **OGS**, marque le dépôt le plus ancien du Groupe du Kalahari, directement daté. Cette phase de dépôt s'est poursuivie au moins jusqu'à **3,35 Ma**, période durant laquelle 20 m de sédiments se sont accumulés. En supposant des taux d'accumulation similaires pour les 15 m supérieurs restants de l'unité inférieure à OGS (1 m 20 Ka−1, n = 2), cette phase s'est terminée vers **3 Ma**. L'unité inférieure d'**OGN** s'est déposée peu après, entre **3,06** et **2,73 Ma**, permettant l'érosion des strates préexistantes (**McFarlane, Coetzee, Kuhn, Vanderpost et Eckardt, 2007**). Ceci pourrait suggérer qu'une géométrie structurale différentielle existait déjà au Pliocène. L'impossibilité de déterminer l'âge d'enfouissement des unités basales des deux sites, en raison des faibles concentrations des deux TCN, laisse planer une certaine incertitude quant au dépôt le plus ancien du Groupe du Kalahari dans l'ouest du bassin de l'Okavango. […] La sédimentation initiale s'est probablement produite au début du Pliocène (Vainer et al. 2021).*

4.5.1.3.2. Dans le Rift de l'Okavango, à l'est de la faille de Gumare

Il existe quelques forages dans la plaine de l'Okavango et à l'est de la faille de Gumare comme le site OGS (Vainer *et al.*, 2021, 2024) et les forages JB1, JB7 et JEB1 (Mc Donald, 2008, données de forage p.54 ; Bruchs, 2008 ; Linol, 2013) et ceux du lac Ngami (Linol *et al.*, 2015).

Décrivons le Site OGS puis nous discuterons dans une nouvelle partie, des niveaux de calcrètes que ces forages traversent.

6. Site OGS (Vainer et al., 2021, 2024)

C'est dans ce forage (OGS) (Figure 853) qu'ont été datés les plus anciens dépôts appartenant au groupe du Kalahari. La date obtenue est 3.75 Ma (Vainer *et al.*, 2021, Fig.3, p.1177).
Des calcrètes ont été rencontrés entre 5 et 13 m de profondeur.

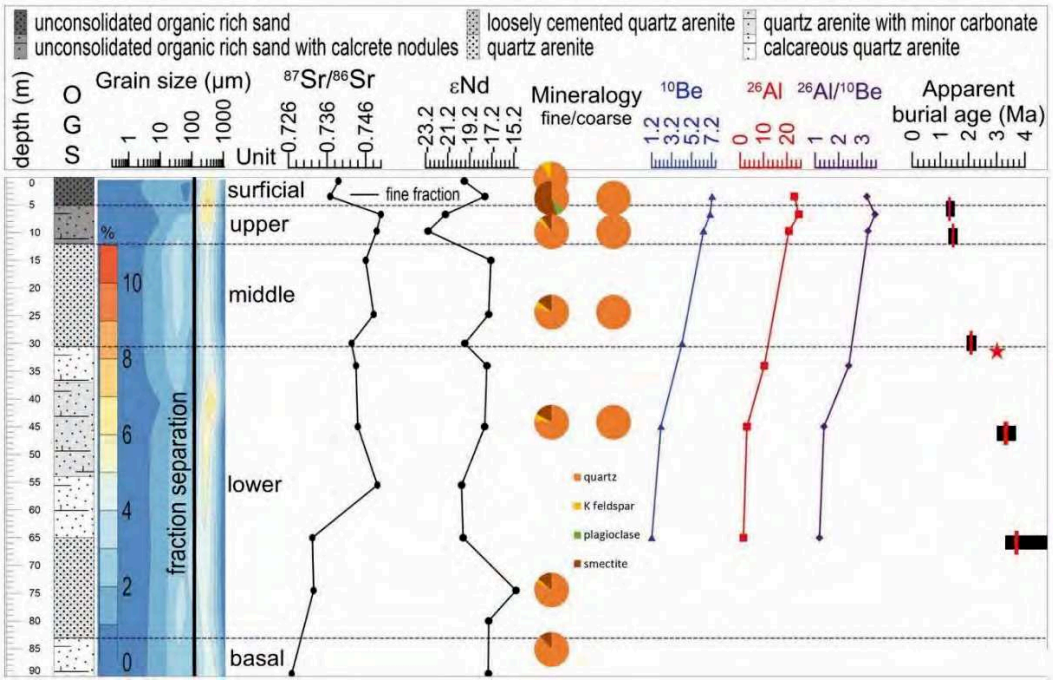


Figure 853 Datations des sédiments du groupe du Kalahari dans le forage OGS (Source : Vainer et al., 2001, Fig.3, p.1177).

4.5.1.4. Mise en place des lacs dans le Rift de l'Okavango

La déconnexion des fleuves de la région de l'Okavango avec l'Océan Indien lors de la surrection de la fin du Crétacé, ainsi que la mise en place du Rift de l'Okavango, au Pliocène, vont fortement impacter la région qui va devenir le réceptacle d'une grande quantité d'eau pendant le Tertiaire et le Quaternaire qui n'est plus évacuée vers l'Océan Indien par le Limpopo. De vastes lacs vont s'installer dans le Rift (Mc Farlane et Eckardt 2008).
Ils vont laisser des dépôts sédimentaires, comme la lagune peu profonde située entre *Deception Ridge* et *Gdikwe Ridge* (Moore, Cotterill et Eckardt, 2012,Fig.4) mais ces paléolacs ont surtout été mis en évidence lors d'analyses géomatiques des reliefs, telles que celle que nous avons décrites dans le 1 (p. 66), car ils ont des **formes** morphologiques d'érosion laissées par (a) les anciens rivages lacustres (comme la *Deception ridge* décrite par McFarlane et Eckardt, 2008) et (b) les fonds de lacs asséchés qui forment de grandes surfaces planes (*wave-cut surface*) recouvertes d'évaporites comme *Deception Valley*, à 1000 m d'altitude (Nash, 1992, p.75) ou les *Sua Pans* et *Nwetwe Pans* à 910 m à Makgadikgadi (Figure 848). Ces formes de relief sont corrélées à (2) des **formations** sédimentaires lacustres, palustres et évaporitiques (calcrètes, silcrètes, calcaires à gastéropodes, cordons littoraux) (Grove, 1969 ; Heine, 1978 ; Cooke, 1979 ; C Jones, 1982 *in Water Surveys Botswana* et *Aqualogic*, 2001 ; Fig.6, p.193 ; Shaw, 1988 ; Thomas et Shaw, 1990, Fig.4, p.193 ; Cotterill, 2006 ; Mc Farlane et Eckardt, 2008 ; Fierens, 2019, Moore *et al.* 2012, 2022 ; Royer 2020 ; Ringrose, 2022 ; Gaudare, 2024) . Ces différents paléoenvironnements sont également visibles sur les images satellites car ils s'y développent différentes végétations (Burrough *et al.*, 2009). Ainsi, cinq altitudes distinctes ont pu être distinguées dans la région (Moore, Cotterill et Eckardt, 2012), (Figure 854 p.830) :

- le Paléolac D*eception* à **995 m** d'altitude (qui correspond à l'altitude des galeries des grottes de Gcwihaba et Koanaka). Son étendue est indiquée par la courbe de niveau à 1000 m d'altitude sur la Figure 854 ;
- le Paléolac Makgadikgadi à **945 m** d'altitude ;
- le Paléolac Thamalakane à **936 m**.
- Le Paléolac Bulozi à **920 m**, qui n'appartient pas au Rift de l'Okavango mais est situé plus au nord, au niveau du Haut-Zambèze (indiqué sur la Figure 865).
- Actuellement, le bassin asséché du Makgadikgadi conserve le *Sua Pan* et le *Ntwetwe Pan*, à **912 m**.

Remarques :
Ringrose (2022, Fig. 4.6) a déterminé les paléoniveaux du Lac Ngami.
Fierens (2019, p.50) commet l'erreur de parler d'une profondeur de 1000 m pour le lac *Deception*, alors que l'on trouve aujourd'hui les vestiges de ce paléolac *Deception* à 1000 m d'altitude au-dessus de la mer.

Les courbes de niveau que nous avons calculées, comme expliqué en annexe, correspondent aux altitudes des paléolacs (Figure 854) sur la base des travaux de Jones (1982) *in Water Surveys Botswana*, 2000), Mc Farlane et Sedagika (2001), ainsi que Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Fig.3, p.392), etc. Par exemple, la courbe de niveau à 995 m, en noir sur la Figure 854, indique l'emplacement du **Paléolac *Deception***, dont subsiste aujourd'hui une vaste surface plane dans le secteur de *Deception*, indiquée sur la figure ci-dessous et correspondant à des dépôts évaporitiques et des pans. À l'est se trouve la **Crête *Deception*** *(Deception Ridge* de Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, Fig.3B*)* qui borde une autre surface plane, située au-

dessous, à 945 m, en vert, correspondant à des dépôts lagunaires du **Paléolac Makgadikgadi (**Moore, Cotterill et Eckardt, 2012), elle-même délimitée à l'est par la **Crête Gidikwe**. En contrebas se trouvent les pans actuels de **Makgadikgadi –** les *Sua Pans* et les *Nwetwe Pans* - correspondant aux anciens dépôts du **Paléolac Thamalakane**, comme illustré sur le profil topographique (Figure 855), dont la position est indiquée par le trait noir sur la Figure 854.

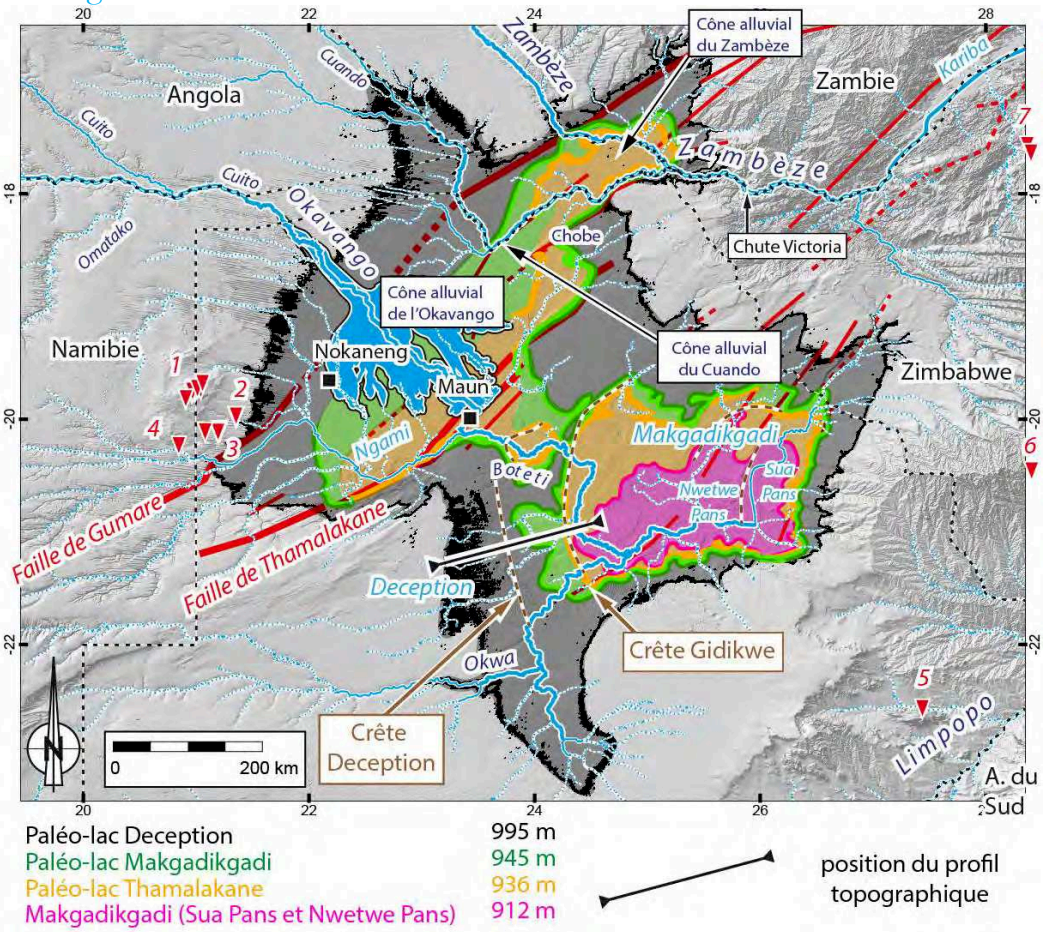


Figure 854 Paléolacs dans le Rift de l'Okavango, indiqués par des courbes de niveau.

Numéro des karsts : 1: *Aha Hills*, 2 : *Gcwihaba Hills*, 3 : *Koanaka Hills* (K1 et K2 à l'est) et *Blue Cave* (K3 à l'ouest), 4 : Gam (Namibie), 5 : Cave in Phato Ye Sebilo Gorge (Afrique du Sud), 6 : Bamata (Zimbabwe) et 7 : Chirisa et Chitita (Zimbabwe).

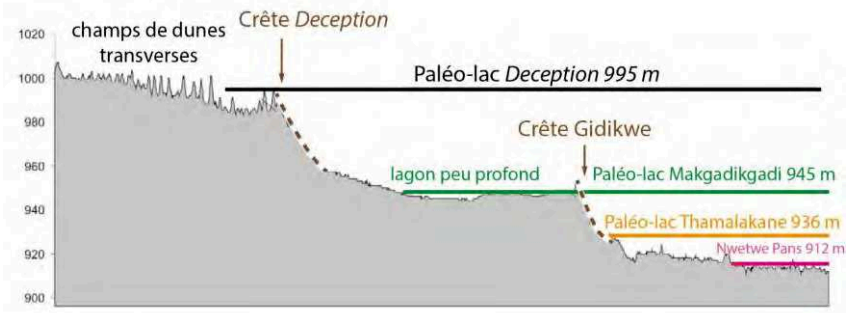
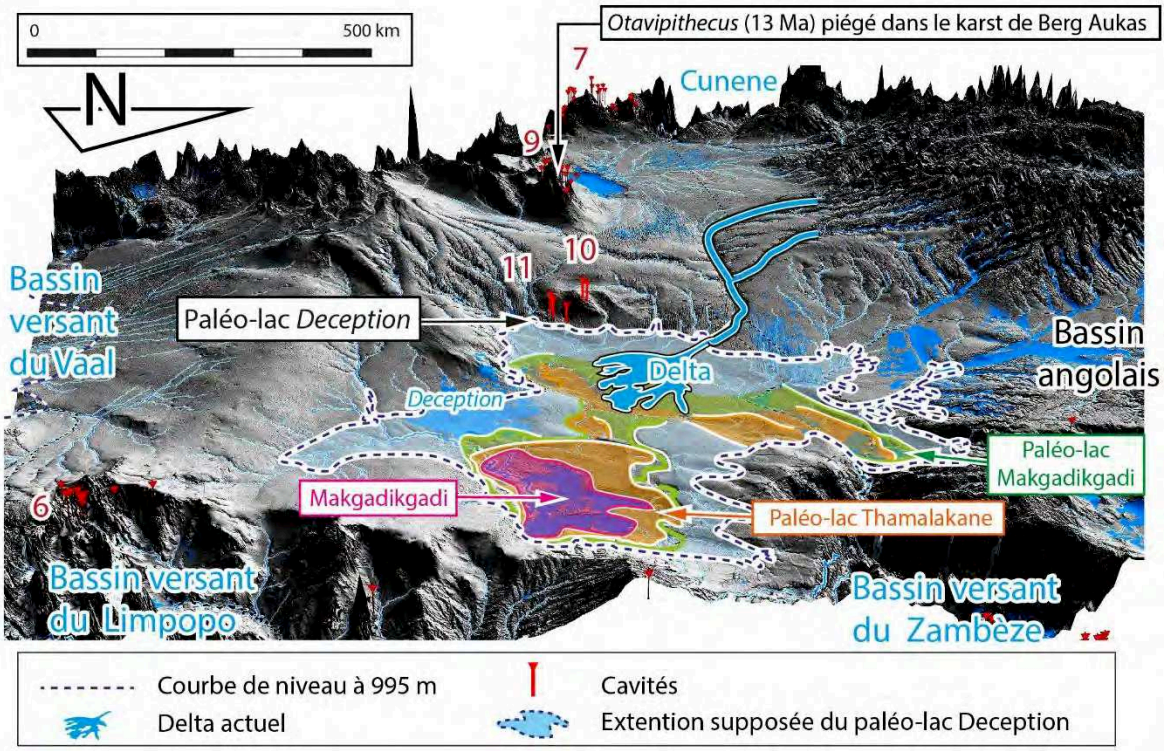


Figure 855 Profil topographique du Rift de l'Okavango mettant en évidence les paysages formées par la présence des paléolacs (Source : Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, Fig.3B, modifié).



Numéro des karsts : 6 Lobatse ; 7 Kaokoland ; 9 Harasib ; 10 Aha ; 11 Gcwihaba et Koanaka.

Figure 856 Extension supposée du paléolac Déception et des autres paléolacs, en relief exagéré 10 fois.

Plus au nord de l'Afrique, des évènements similaires sont bien documentés, notamment avec la présence de paléolacs au Tchad (Drake et Breeze, 2000 in Jones et Stewart, 2016) entre 6.35 et 2,6 Ma (forage du BRGM) (Florence, 2015) et à l'Holocène (Pouyaud et Colombani, 1989) et aussi les paléolacs du Congo (Goodier, 2010). Les circulations hydrologiques actuelles en Afrique australe sont encore étudiées (SADC-GMI, 2020).

4.5.1.5. La mise en place du Delta de l'Okavango

Le Delta de l'Okavango, localisé ci-dessous Figure 867, est présent depuis 200 000 ans pour Vainer *et al.* (2023) ou dès le Pléistocène pour Moore, Cotterill et Eckardt (2012).

Aujourd'hui, c'est le fleuve Zambèze qui est en train de capturer les eaux de l'Okavango via la rivière Magweqgana et la Linyanti (Figure 433) (Wellington, 1955 *in* Moore *et al.* 2007, p.327 ; Thomas et Shaw, 1990, Fig.2C, p.190 ; 1991 ; Mc Carthy *et al.*, 2002 *in* Vainer *et al.* 2024 ; Bäumle *et al.* 2019. Si ce processus se poursuit, le Delta de l'Okavango finira par s'assécher (Maire et Bruxelles, 2018 ; Dauteuil *et al.,* 2024).

4.5.2. Reconstitutions cartographiques des paléodrainages en Afrique australe à partir du Jurassique

Nous avons vu dans la partie précédente qu'il existe deux courants d'interprétation concernant les âges de mise en place des paysages dans cette partie nord-ouest du Botswana. Nous présenterons ici les travaux qui nous paraissent les plus cohérents avec nos observations de terrain, c'est-à-dire ceux qui proposent des âges anciens aux paléolacs.
Les cartes et les travaux de De Wit (1999, Fig.20, p.737) ; Moore et Larkin (2001, Fig.14, p.61) ; Cotterill (2006) ; Moore, Cotterill, Main et Williams (2007, fig.15-13, p.322) ; Goodier (2010, Fig.1.4, p.15) et Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Fig.7, p.399) reconstituent les paléodrainages et leur lien avec les paléolacs à partir du Crétacé. Certaines de ces cartes sont situées en annexe (p.1245). Les travaux de Moore, Cotterill et Eckardt (2012) montrent une évolution des idées par rapport aux travaux antérieurs. Des synthèses cartographiques, qui ont repris ces différents travaux, sont proposées par Ponte (2018) puis par Fierens (2019). Nous reprenons ici ces différentes cartes, auxquelles nous ajoutons les données relatives aux karsts.

4.5.2.1. Crétacé

Au Crétacé, la région du Kalahari est parcourue par des fleuves (Okavango, Cuando, Kafue et Luangwa) qui se jette dans le canal du Mozambique (Océan Indien) via le Limpopo (Figure 857) (Moore et Larkin, 2001 ; Moore *et al.*, 2017).

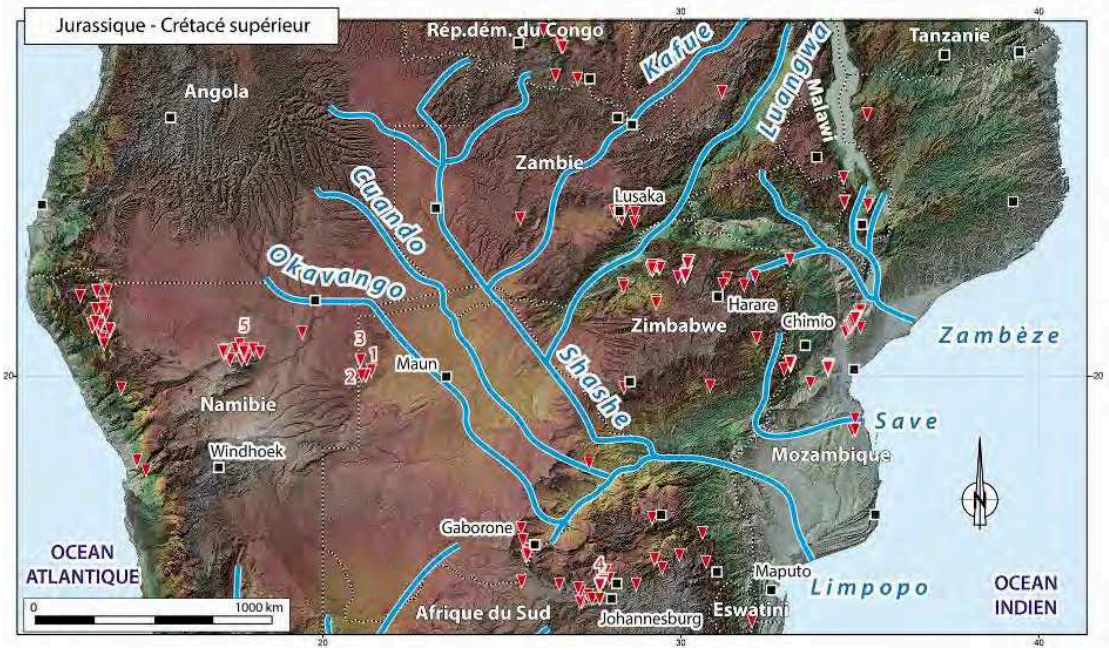


Figure 857 Réseau hydrographique au Crétacé (Moore et Larkin, 2001, Fig.14a; Moore et al., 2007, Fig.15.13a). Voir aussi Ponte, 2018 (p.81).

4.5.2.2. Paléogène

Au Paléogène tardif selon Moore, Blenkinsop et Cotterill, 2009 (p.312) et Moore, Blenkinsop, Cotterill et Plowes, 2009 (p.82), vers 25 Ma (Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, Tableau 2, p.390) (Tableau 70 p.1269), un soulèvement crustal orienté **selon un axe Okavango-Kalahari-Zambèze (O.K.Z.)**, représentée en marron sur la Figure 858, provoque une déconnexion entre les fleuves du Kalahari (Okavango, Cuando, Kafue et Luangwa) et l'Océan Indien, via leur déconnexion avec le Limpopo. C'est le début d'un système de drainage endoréique dans la région du Kalahari qui devient alors le siège de dépôts fluvio-lacustres et éoliens constituant le **groupe du Kalahari** (figuré en jaune sur la Figure 859 et décrit p.507). C'est l'établissement de l'immense **Surface Africaine*** (décrite p.268).

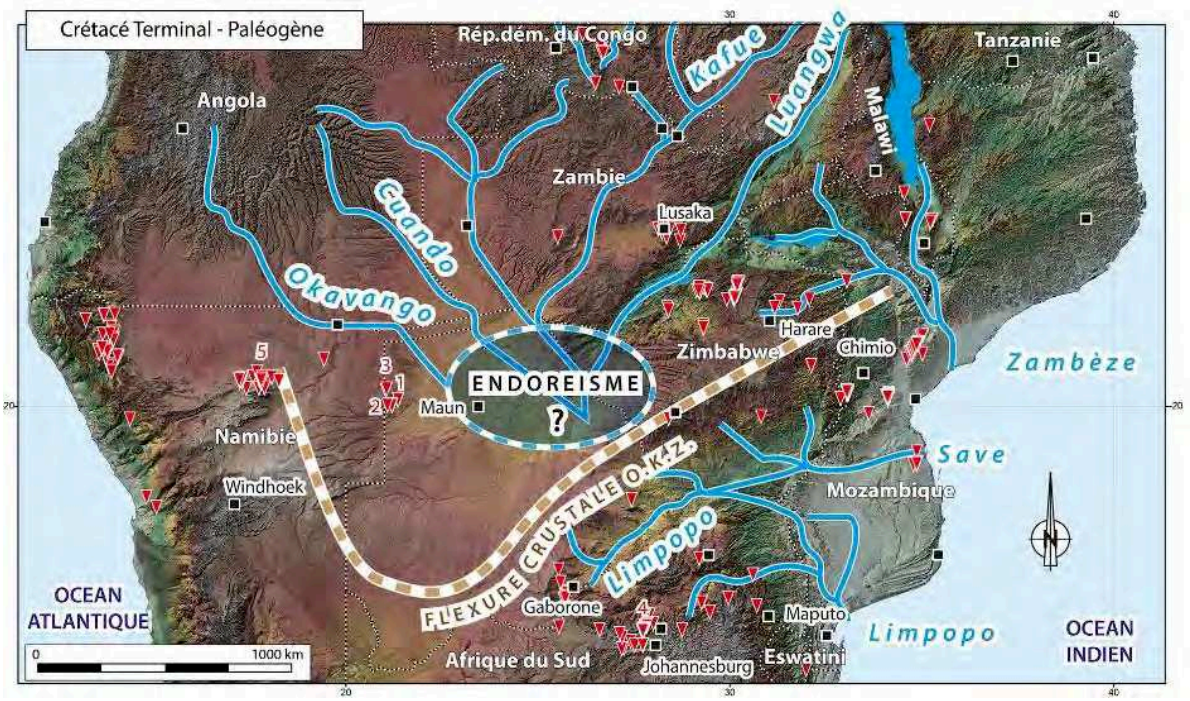


Figure 858 Réseau hydrographique au Paléogène supérieur (Moore et al., 2007, Fig.15.13b, modifié). Voir aussi Ponte, 2018, p.81.



Figure 859 Groupe du Kalahari, représenté en jaune (Moore et al., 2007, Fig.15.13b, modifié).

4.5.2.3. Oligocène

À l'Oligocène, *« l'érosion vers le nord du Zambèze, initiée par le soulèvement crustal, a entraîné la capture du Luangwa […] et l'incision des gorges de Cahora Bassa»* (Moore et Larkin, 2007) (Figure 860). Cela expliquant que le Limpopo dépose de moins en moins de sédiments au niveau de son delta, comme l'indique la Figure 847.

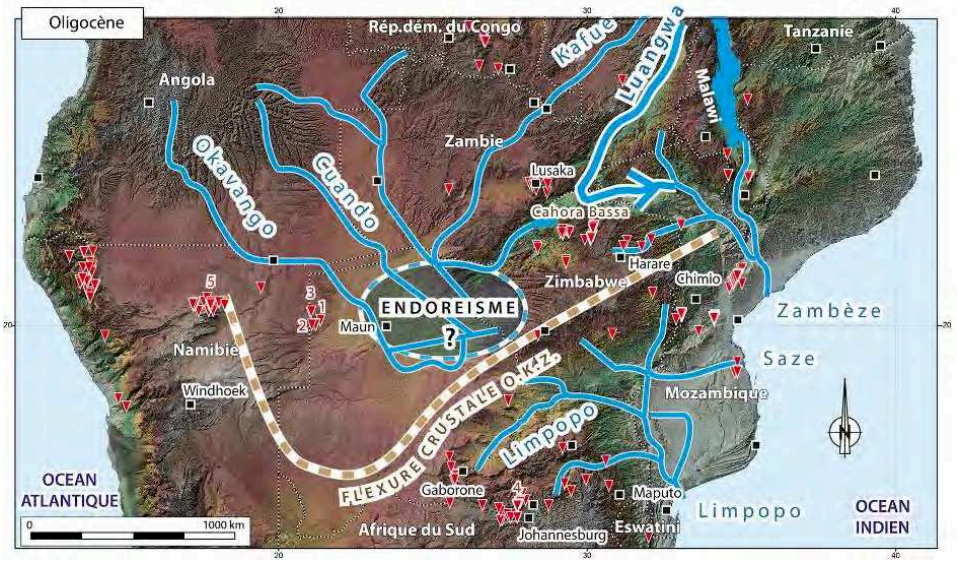


Figure 860 Réseau hydrographique à l'Oligocène (Moore et al., 2007, Fig.15.13c).

4.5.2.4. Miocène

À partir du Miocène, l'érosion du Zambèze se poursuit vers l'ouest où il continue de capturer des rivières et de creuser des gorges (Kariba). Le bassin versant du Zambèze est indiqué par des pointillées bleus sur les cartes suivantes (Figure 861 à Figure 848).



Figure 861 Réseau hydrographique du Miocène (23 Ma) au Pliocène (5 Ma) (Moore et al., 2007, Fig.15.13 ; Moore, Cotterill et Eckardt 2012, Fig.7A).

4.5.2.5. Pliocène

Au Pliocène, à partir de 3.35 Ma (Vainer *et al.*, 2024), l'extension tectonique de la branche occidentale du **Rift est-africain** progresse vers l'ouest, représentée en rouge sur la Figure 862 et installe le **Rift de l'Okavango** dans le Bassin du Kalahari. Il devient le réceptacle des cours d'eau déconnectées de l'Océan Indien (endoréisme).

L'érosion du Zambèze se poursuit vers l'ouest, comme le montre son bassin-versant en pointillé bleus déterminée par Fierens (2019, Fig.III.14B). Il capture la Kafue puis creuse les gorges de Kariba et celle de Bakota et capture le Haut-Zambèze. À la fin du Pliocène (2.6 Ma) (Moore, Cotterill et Eckardt 2012, Fig.7B, n°13, p.399), le Haut Zambèze, alimenté par la Kafue, s'écoule de nouveau vers l'Océan Indien via le Bas Zambèze (Figure 862 et Figure 863). Cela coupe l'approvisionnement en sédiments du groupe du Kalahari, en jaune sur la Figure 859, et initie, à partir du Pléistocène, la formation de lacs endoréiques dans le **Rift de l'Okavango**, comme nous allons le voir.

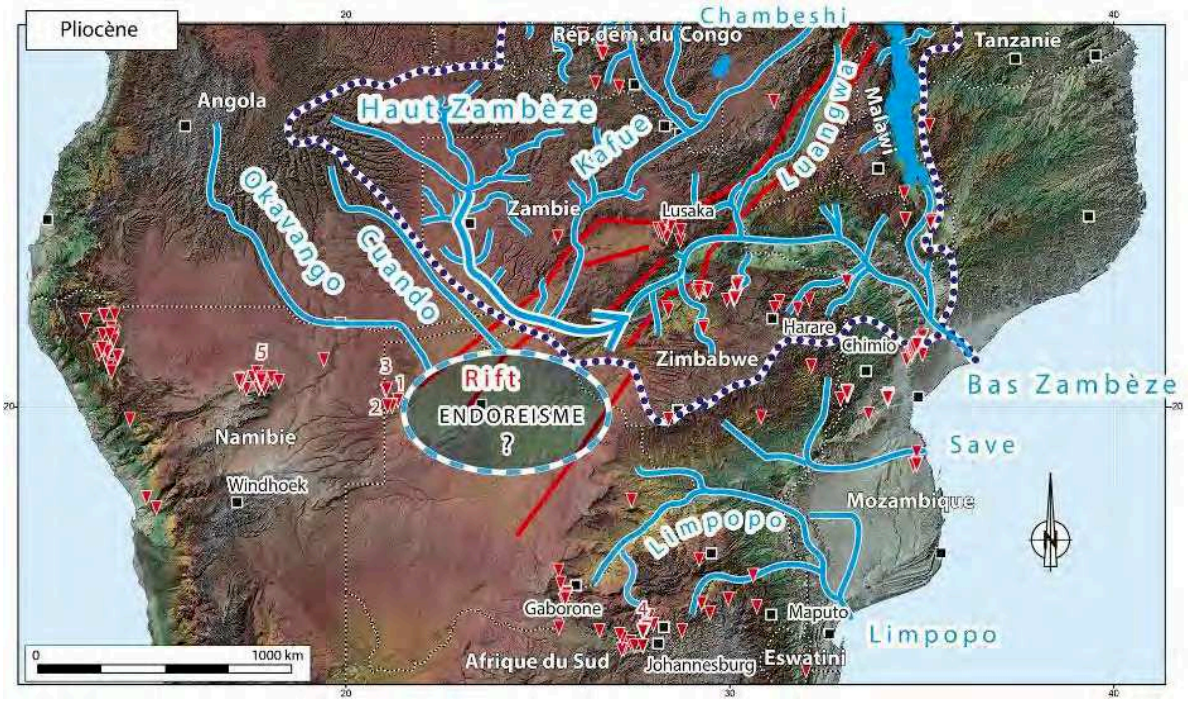


Figure 862 Réseau hydrographique à la fin du Pliocène (2.6 Ma) (Ponte, 2018, Fig.2.20, p.81; Fierens (2019, Fig.III.14B ; Moore, Cotterill et Eckardt 2012, Fig.7B, p.399).

4.5.2.6. Pléistocène inférieur

« *Le soulèvement du flanc du Rift le long de la faille de Chobe* (indiquée en rouge sur la Figure 863 et la Figure 848) *ainsi que le long du cours du fleuve Zambèze* » (Moore, Cotterill et Eckardt, 2012 ; Mokatse *et al.*, 2022), entraîne le détournement des rivières situées en amont du Kafue (notamment la Chambeshi), qui sont alors capturées par le Haut Congo et se dirigent vers l'Océan Atlantique.

Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Table 2) (voir p.1269) indiquent que le soulèvement tectonique le long de la faille de Chobe est mal contraint mais se situe vers un âge moyen autour de **1.4 Ma** et dans l'intervalle (de confiance à 95%) entre **2.5 Ma** et 600 000 ans.

Malgré cette perte, la Kafue traverse la plaine de *Machili* et rejoint le Haut Zambèze et inonde le Rift de l'Okavango où s'installe le **Lac *Deception*** (Moore et Larkin, 2001, Fig.14, p.61 ; Moore *et al.*, 2007, Fig.15.13d ; Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, Fig.7D, p.399 et Table 1, p.388 ; Cotterill, 2006 ; Mc Farlane et Eckardt, 2008 ; Cotterill et De Wit 2011 ; Moore *et al.*, 2009 *in* Fierens, 2019, Fig.III.15B ; Royer, 2020 ; Gaudare, 2024).

4.5.2.6.1. Lac Deception

L'âge du Lac *Deception* n'est pas bien contraint mais il est antérieur à **2.2 et 1.8 Ma** (Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, Table2), nous en parlerons plus loin. Selon Moore, Cotterill et Eckardt (2012), *« le remplissage du bassin a déclenché un mécanisme de rétroaction climatique majeur qui a localement augmenté les précipitations et abaissé les taux d'évaporation »*. Des indices de ce **Paléolac Deception**, encore conservés à l'altitude actuelle de 995 m, seront présentés plus loin (p.818), notamment ceux que nous avons identifiés au niveau des grottes de Gcwihaba et Koanaka (points 1 et 2 en rouge sur la Figure 863) (os de poissons dans *Bone Cave,* calcaires lacustres au pied des collines à Gcwihaba et au pied des collines K1 et K2 à Koanaka). Les rivières, à l'ouest du Rift, qui ont incisé les dolomies où se trouvent les grottes, sont présentes dès le Pléistocène inférieur (~1.8 Ma) d'après les cartes de Moore et Larkin (2001, Fig.14, p.61d) (voir carte d p.1246), Moore, Cotterill, Main et Williams *et al.*, (2007, Fig.15.13d) (voir carte d p.1249), Ponte (2018, fig.2.20) (voir carte p.1256) et Fierens (2019, Fig.III.15B) (voir carte p.1258).

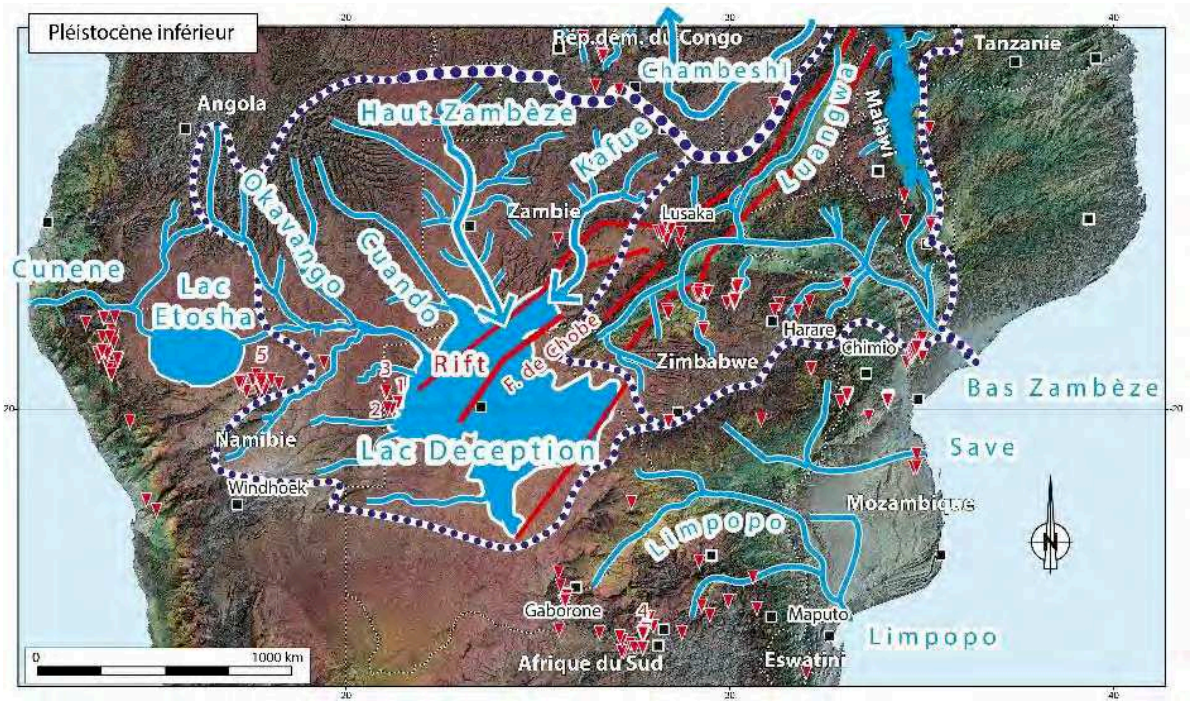


Figure 863 Réseau hydrographique et Lac Deception au Pléistocène inférieur (~ 1.8 Ma) (Ponte, 2018, Fig.2.20, p.81; Moore, Cotterill et Eckardt 2012, Fig.7C et bassins versants du Zambèze (Fierens, 2019, Fig.III.15A) et du Lac Deception.

Nous présenterons plus loin ces rivières – aujourd'hui réduites à des vallées sèches (*mekgacha* p.745) – telles que Gewidum, Gcwihabadum, Seretse et Danerb, illustrées sur la Figure 500 (p.546. Nous avons particulièrement étudié la vallée de Gewidum, qui passe directement sous les grottes de Gcwihaba (Figure 754 p.758 et Figure 740 p.738) et que l'on appelle parfois la vallée de Gcwihaba. En sub-surface, nous avons trouvé des alluvions de quartz blanc (p.723). Cette vallée est creusée dans des carbonates subhorizontaux à l'altitude de 1000 m qui contiennent des coquilles fossiles (Figure 718 p.726) et notamment des foraminifères **benthiques** tels que *Cymbella muelleri* (p.720) d'après **Gasse (1986)** et **Patrick et Reimer (1966, 1975)** *in* Robbins *et al.* (1996). Ces micro-organismes marins vivaient dans des eaux profondes et sont incompatibles avec un environnement fluviatile. Ces foraminifères benthiques pourraient témoigner d'inondations des vallées par les eaux plus profondes du paléolac Deception (à 995 m d'altitude), comme nous tâcherons de le démontrer plus loin (p.717).

Un proto-delta de l'Okavango serait déjà présent au Pléistocène inférieur selon les cartes de Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Fig.7C) (voir carte p.1253).

4.5.2.7. Pléistocène moyen

Au début du Pléistocène moyen, le Bas Zambèze capture la Kafue (par les gorges de Kariba) et capture le Haut-Zambèze, où est installé le **Lac Patrick** depuis **1.1 Ma à 649 000 ans** d'après Moore, Cotterill et Eckardt (2012, p.390) (voir p.1269).

La Cuando a rejoint le Haut-Zambèze par la plaine d'inondation de Matabele-Mulango, notée MM sur la Figure 865, (Moore, Cotterill et Eckardt,2012). L'ensemble de ces eaux sont maintenant drainées vers le canal du Mozambique (Océan Indien) et n'alimente plus le Rift de l'Okavango, ce qui entraîne une baisse du niveau du Lac *Deception* à l'altitude de 945 m, c'est le **Lac Makgadikgadi**.

4.5.2.7.1. Lac Makgadikgadi

L'âge du Lac Makgadikgadi n'est pas bien contraint mais il est estimé au Pléistocène inférieur, entre **1.8 à 0.8 Ma** (Moore et Larkin, 2001 ; Huntsman-Mapila, 2006 ; Burrough *et al.*, 2009.

Le soulèvement du bassin versant du Congo-Zambèze s'est produit entre **2.2 Ma et 1.4 Ma**, dans un intervalle (de confiance à 95%) entre **3.4 Ma et 600 000 ans** (Moore, Cotterill et Eckardt, 2012,p.401 et Cotterill et De Wit, 2011, Table 2, p.506) (Figure 864), d'après les signatures phylogéographiques de quatre espèces de poissons (E1 à E4). La datation de l'évènement géobiotique « E5 » est fournie par l'étude des fossiles de babouins. Nous reviendrons plus loin sur ces datations (p.846).

Geobiotic Event	Estimated Time of biotic events (Ma)	Geomorphological Interpretation	Tectonic Episode
E1	3.5 > 3.0 < 2.5	Formation of Kafue-Congo watershed shrinks PC drainage net to isolate PL Bangweulu in endorheic basin. PLM maintained by Proto Kafue, Upper Zambezi, and Okavango rivers	E Uplift (flexure) across S margin of Bw basin and Mweru graben
E2	3.4 > 2.2 < 1.4		
E3	2.6 > 2.1 < 1.5		
E4	2.5 > 1.4 < 0.6		
E5	1.98 > 1.49 < 1.03		

Figure 864 Extrait du Tableau 72 (p.1273) de Cotterill et De Wit (2011, Table 2, p.506).

Cet évènement tectonique est à l'origine du **Paléolac *Makgadikgadi*** (Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, Table 2, p.390) (voir tableau p.1269).

Le soulèvement tectonique du Congo s'est produit de **2.2 à 1.8 Ma** et dans un intervalle de confiance de 95 % entre **3.4 Ma** à **600 000 ans**.

Au minimum un âge moyen de **800 000 ans** et entre l'intervalle de **1.5 Ma et 500 000 ans** selon Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Table 1, p.388) (voir tableau p.1266) à partir de la datation moléculaire de l'expansion démographique des crocodiles *Crocodylus* (Bishop *et al.*, 2008) et de la radiation adaptative des poissons chat *Synodontis* (Day *et al.*, 2009 et Cotterill et De Wit, 2011), que nous décrirons plus loin.

Plus précisément l'âge moyen et de **890 000 ans** et entre l'intervalle **1.4 Ma à 420 000 ans** selon Day *et al.*, 2009 *in* Cotterill et De Wit (2011, Table 1, p.505).

0,8 Ma, HPD à 95 % : 0,4 à 1,)

Nous en reparlerons.

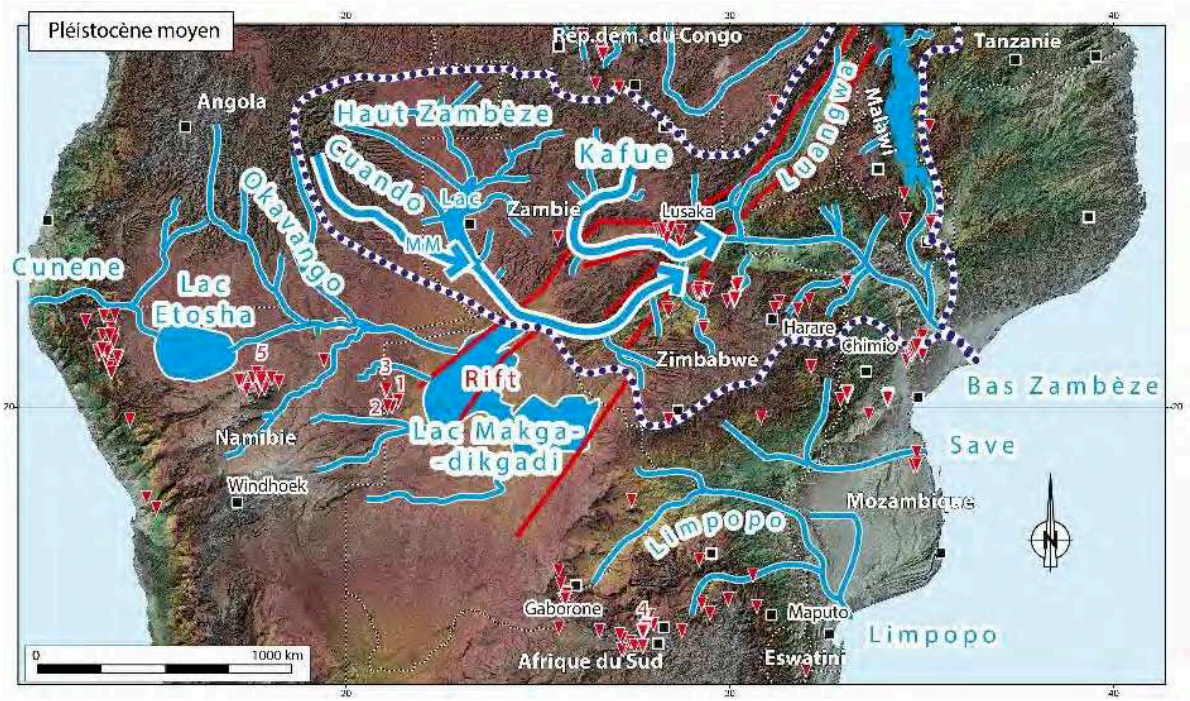


Figure 865 Réseau hydrographique et Lac Makgadikgadi entre 1.5 Ma et 800 000 ans (Moore, Cotterill et Eckardt 2012, Fig.7D).

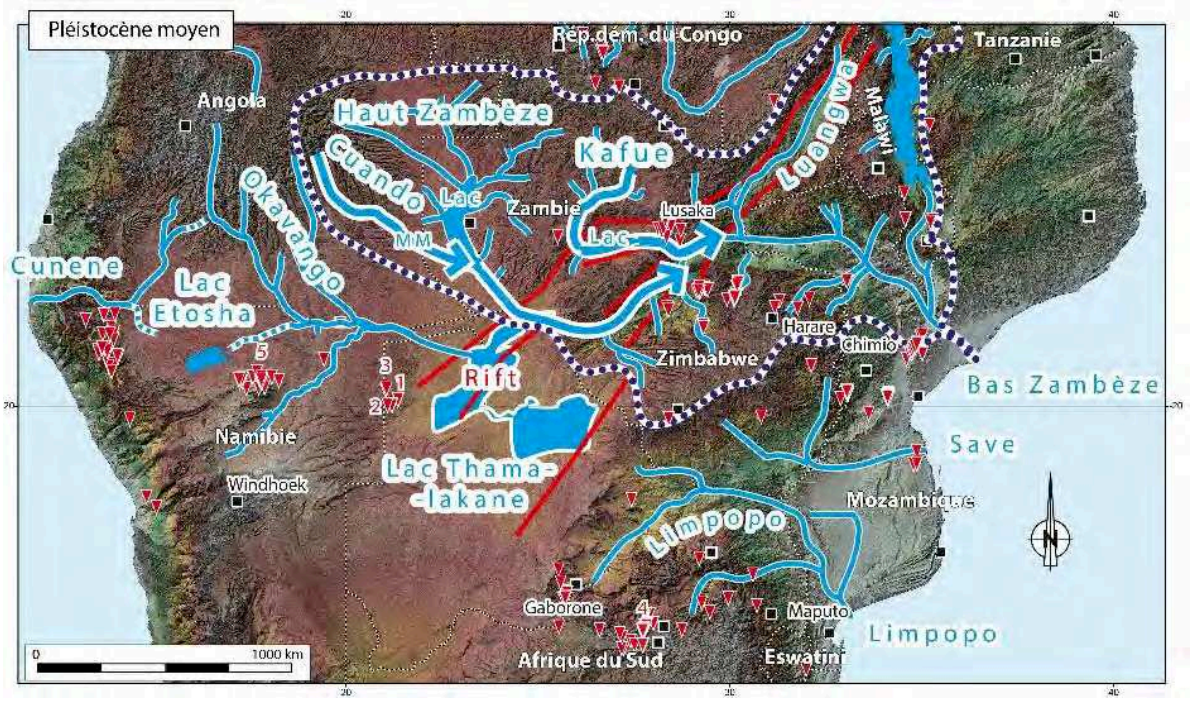


Figure 866 Réseau hydrographique et Lac Thamalakane du Pléistocène moyen vers 800 000 ans (Moore, Cotterill et Eckardt 2012; Cotterill , 2006, Fig.5.6, p.230).

La Cuando n'alimente plus le lac endoréique car elle est à son tour capturée par le Zambèze (Fierens, 2019). C'est la « rupture de l'ancienne liaison entre la Kafue et le Zambèze qui entraîne une nouvelle chute du niveau du lac à **936 m** d'altitude » (Moore, Cotterill et Eckardt, 2012). C'est le **Lac Thamalakane** (Figure 866).

4.5.2.8. Actuel

Enfin, c'est la mise en place du **Lac Bulozi** dans le Haut Zambèze, à **920 m** d'altitude, indiquée « Lac » ci-dessus (Figure 866). Son emprise est indiquée sur la carte de Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Fig.1, p.386) et correspond actuellement à la **plaine inondable de Barotse**. La présence de ce lac diminue le débit qui alimente le Lac Thamalakane, qui se contracte à l'altitude de **920 m**. *« L'incision continue du canal du Zambèze au niveau de la barrière de Chobe a finalement mis fin à l'apport de ce fleuve à la dépression de Makgadikgadi, provoquant une contraction du lac en dessous de 920 m, soutenue par le Cuando et l'Okavango avant la dessiccation finale »* (Moore, Cotterill et Eckardt, 2012).

Actuellement, le Rift de l'Okavango est toujours déconnecté du bassin versant du Zambèze mais la rivière Magweggana et la Linyanti sont en train de capturer les eaux de l'Okavango (Wellington, 1955 in Moore *et al.*, 2007, p.327 ; Thomas et Shaw, 1990, Fig.2C, p.190 ; 1991 ; Mc Carthy *et al.*, 2002 in Vainer *et al.*, 2024).

En tout cas, le bassin du Makgadikgadi est asséché et constitué des évaporites du *Sua Pan* et du *Ntwetwe Pan* , localisés sur la carte (p.830) et visibles sur la Figure 431.

Le Delta de l'Okavango, localisé ci-dessous Figure 867, est présent depuis 200 000 ans pour Vainer *et al.* (2023) ou 100 000 ans pour Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Table 2).

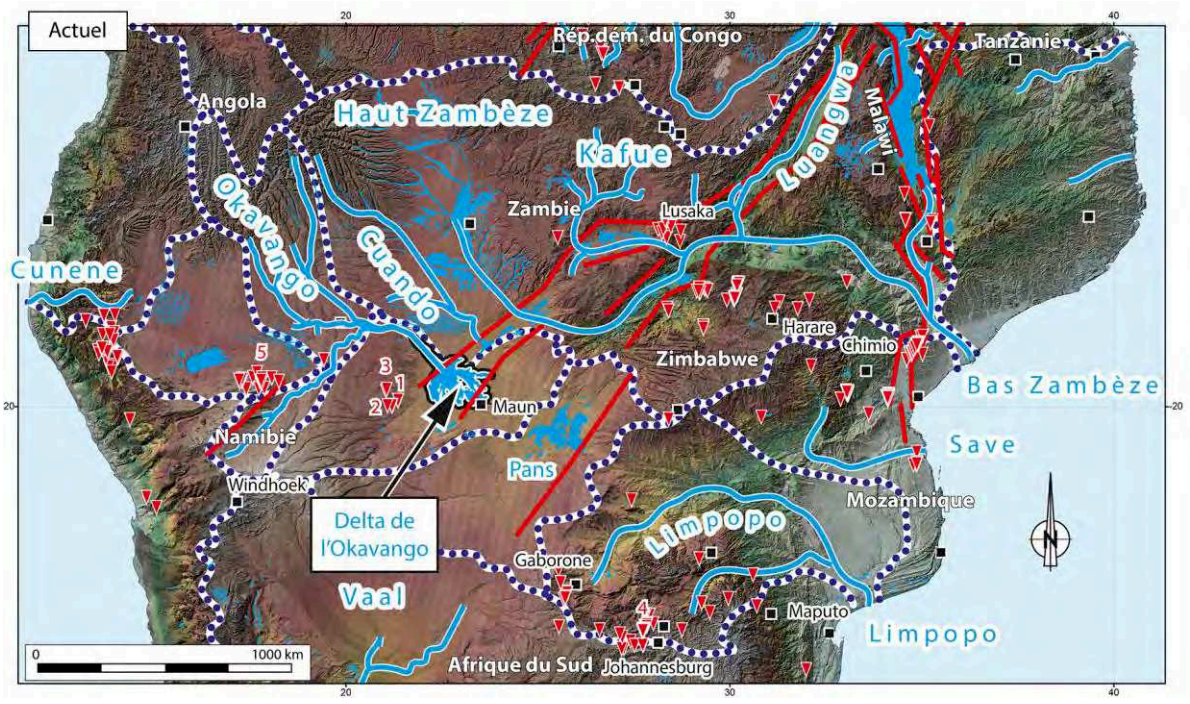


Figure 867 Oro-hydrographie actuel, localisation du Delta de l'Okavango et des bassins versants et des failles de rift. Voir aussi Figure 433 p.479.

4.5.3. Conclusion sur les paléodrainages et les paléolacs du Kalahari

L'évolution des paléodrainages et des paléolacs de l'Afrique australe sont principalement la conséquence de phénomènes tectoniques, en particulier au Pléistocène inférieur (Moore, Cotterill et Eckardt, 2012), contrairement aux modèles précédents qui invoquaient un forçage climatique au Pléistocène supérieur. Ce sont en effet des surrections successives du continent – d'abord d'axe OKZ, puis selon la direction de la faille de Chobe et celle du fleuve Zimbabwe - qui vont progressivement déconnecter les fleuves du bassin du Kalahari du canal du Mozambique, via leurs séparations d'avec le Limpopo. Cela permet l'établissement d'un vaste lac endoréique : le **Paléolac *Deception***.
À trois reprises selon Moore, Cotterill et Eckardt (2012), le niveau de ce lac s'élève suffisamment pour franchir la barrière formée par le Horst de Chobe, localisé sur la carte (p.830) et évacuer son trop-plein dans le Zambèze et en direction du Canal du Mozambique.

Ensuite, les captures successives par le Zambèze des cours d'eau qui alimentent ce lac (Kafue, Haut-Zambèze et Cuando) diminueront le niveau du lac par trois fois (Deception, Makgadikgadi, Thamalakane) et laisseront dans le paysage de profondes gorges (Cahora-Bassa, Kariba, Bakota).

Les bassins-versants de ces paléolacs étaient plus vastes que celui du Delta de l'Okavango actuellement, représenté en pointillé bleu sur la Figure 433 et Figure 848. Ils étaient plus étendus comme nous venons de le voir, notamment lorsque le Haut Zambèze, le Cuando et la Kafue alimentaient le Lac *Deception* (Figure 863).

Sur ce point, la chronologie des captures du Zambèze reste à étudier plus en détail, comme indiqué plus haut, les cartes de Moore ont évolué entre la publication de 2007 et celle de 2012. Plus précisément, les cartes des paléodrainages au Pléistocène de Moore et Larkin, 2001 et Moore *et al.* (2007, Fig.15.13d, p.322) sont différentes de celles de Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Fig.7), ce qui montre que les idées évoluent et qu'elles ne sont pas fixées. Certes, le Paléolac Deception est ancien (Pléistocène) mais peut-être que les mécanismes de capture et d'inondation du Rift de l'Okavango seront mieux compris dans le futur.

Les cartes synthétiques de Fierens (2019) montrent de mineures incohérences avec les cartes précédentes, notamment sur l'étendue du bassin versant du Zambèze à la fin du Pléistocène (vers 100 000 ans) où elle rattache les rivières, à l'ouest du Rift de l'Okavango, au bassin versant du Zambèze (Fierens, 2019, Fig.III.16). **Ceci est pertinent car ce sont les talwegs et les vallées sèches qui passent en contrebas de la grotte de Gcwihaba que nous étudions. Les autres auteurs les reportent sur les cartes du Pléistocène inférieur.**

Les cartes que nous proposons ont donc été complexes à réaliser et peut-être qu'elles devront être modifiées au fur et à mesure que les connaissances avanceront sur ces paléodrainages et ces paléolacs.

Cependant, ces reconstitutions cartographiques des paléodrainages sont essentielles pour bien comprendre le contexte hydrologique des karsts que nous étudions. La mise en place du Rift de l'Okavango au Pliocène correspond à une baisse généralisée du niveau de base régional, impliquant un débourrage des fantômes de roche dans les réservoirs carbonatés, comme décrit précédemment pour expliquer la karstification du *Cradle of Humankind*. Ce processus de karstification affecte le horst dolomitique où se situeront les karsts des *Aha Hills*, de *Koanaka Hills* et de *Gcwihaba Hills*, que nous détaillerons plus loin. Ainsi, à partir du Pliocène, les variations du niveau de base dans le Rift de l'Okavango ne sont plus contrôlées par le niveau de base de l'Océan Indien, mais par des phases climatiques humides et/ou par la tectonique (p.1067). Intéressons-nous à présent à la structure tectonique du Rift de l'Okavango.

L'impact sur les régions karstiques du Zimbabwe (Sanyati et Lomagundi) et de Lusaka en Zambie (*Broken Hill*, Chipongwe) sera à préciser et nécessitera des travaux ultérieurs à cette thèse (Voir carte p.906).
Nous n'avons pas détaillé ici l'évolution de la rivière Bloubank, de la Crocodile et du Limpopo dans la région du *Cradle of Humankind*, notamment lorsque la Limpopo a dû éroder la Montagne de Lebombo (Karoo volcanique).

Récapitulation des cartes de paléodrainages et de paléolacs en Afrique australe

A Crétacé



B Paléogène



C Oligocène



D Miocène



E Pliocène



F Pléistocène inférieur



G Début du Pléistocène moyen



H Pléistocène moyen



I Actuel



4.6. DES DATATIONS PROBLEMATIQUES CONCERNANT L'EDIFICATION DES PAYSAGES ET L'AGE DES PALEOLACS

L'ensemble des éléments que nous venons de décrire en première partie, témoigne de changements tectoniques majeurs survenus à partir de la formation du **Rift de l'Okavango**, il y a 3.35 Ma, au Pliocène (Vainer *et al.*, 2024), et pendant l'installation des paléolacs plio-pléistocènes. Toutefois, nombre de ces témoins ont disparu, ont été érodés ou recouverts par les unités stratigraphiques du **groupe du Kalahari** (p.507), voire déplacés verticalement sous l'effet de la néotectonique. Dans ces conditions, la reconstitution, la distinction et la datation précise de ces anciens lacs demeurent complexes. **Certains auteurs avancent pour ces paysages des âges anciens, autour du million d'années, tandis que d'autres proposent des âges récents, compris entre 100 000 et 10 000 ans.** Nous tenterons d'évaluer l'impact de ces paléolacs - traduisant d'anciens niveaux de base - sur les karsts du nord-ouest du Botswana que nous étudions, localisés sur la Figure 433, ainsi que comprendre leur rôle dans le piégeage des fossiles retrouvés dans ces grottes.

Les missions HOMINI'KARST, dirigées par Laurent Bruxelles, ont débuté dans le nord-ouest du Botswana en 2016. Elles consistent en des prospections spéléologiques, paléontologiques et archéologiques dans les karsts des *Aha Hills*, de *Gcwihaba Hills* et de *Koanaka Hills* (Bruxelles, 2015 ; Bruxelles *et al.*, 2016, 2017, 2018, 2019, 2021, 2022 ; Dandurand *et al.*, 2019 ; FFS, 2024 ; Fourvel *et al.*, 2024). Une chronologie de ces missions a été présentée supra (p.102 et Figure 82, Figure 83, p.105).

Des fouilles archéologiques et paléontologiques sont organisées chaque année, pendant un mois, depuis 2021 :
À l'intérieur des grottes :

- Corridor de l'entrée sud de la grotte de Gcwihaba (2022) (Fourvel *et al.*, 2024) ;
- *Bone Cave* (2024) (Koanaka K2) (Linchamps *et al.*, sous presse).

En extérieur, comme à *Koanaka Hills*, d'anciens sols de cavités ainsi que des remplissages karstiques concrétionnés et fossilifères sont mis au jour et fouillés. Il s'agit d'anciennes grottes dont les toits ont été décapités par l'érosion de la surface topographique actuelle :

- Versant sud-est de la colline de K2 (2021 à 2023) ;
- Versant nord de la colline K2 (2024) ;
- Versant sud de la colline de K1 (2023).

La région de l'Okavango présente une originalité majeure : l'eau ne s'y écoule pas vers l'océan, mais vers un bassin endoréique, dont la surface et la profondeur sont limitées. L'accommodation y est contrôlée à la fois par la tectonique et par la pluviométrie des phases humides. Or la spéléogenèse - la formation de vides souterrains – dépend directement du niveau de base, comme nous l'avons montré dans le Chapitre n°3 consacré au *Cradle of Humankind* (*cf.* spéléogenèse per descensum p.432).

Dans ce chapitre, nous étudierons les karsts du nord-ouest du Botswana et proposerons un modèle de karstification distinct de celui du *Cradle of Humankind*. Ces karsts se seraient développés au cours d'une phase endoréique du **Rift de l'Okavango**, contemporaine des paléolacs. Il pourrait s'agir de la phase régressive marquant la transition du **Paléolac *Deception*** au **Paléolac Makgadikgadi**, entre 2.2 et 1.4 Ma, période propice au piégeage des fossiles qui constituent le cœur de notre problématique.

Nous analyserons comment le rifting a influencé la karstification, et en quoi celle-ci diffère d'un modèle classique, propre à un bassin versant connecté à l'océan et soumis aux variations du niveau marin. Nous reviendrons sur ces points dans la conclusion de cette thèse (p.1058).

Quelles ont été les dynamiques au nord-ouest du Botswana pendant les changements climatiques du Plio-Pléistocène, notamment lors les périodes pluviales ? Quels ont été les impacts de ces variations de niveau de base sur la karstification et l'ouverture des grottes, qui ont permis le piégeage des fossiles ?

Nous nous interrogerons également sur l'âge des karsts et des paysages du nord-ouest du Botswana. Sont-ils aussi jeunes que le suggèrent Heine (1978, 1991, 1992), Thomas & Shaw (1991), Ringrose (2005) pour le Paléolac Ngami, Burrough *et al.* (2009), Burrough & Thomas (2013), Robbins *et al.* (2016), et Vainer *et al.* (2021, 2024) ou sont-ils plus anciens, comme le suggèrent Moore et Larkin (2001), Moore, Cotterill, Main et Williams (2007), Moore, Cotterill et Eckardt (2012), Ponte (2018), Fierens (2019), Royer (2020) et Gaudare (2024) ? Alors que cette région semble avoir été bien étudiée et que l'âge des paysages (paléodunes de sables, paléolacs, concrétions des grottes) paraît bien défini pour les derniers 280 000 ans (Vainer *et al.*, 2024), qu'en est-il des périodes plus anciennes ?

Des analyses génétiques récentes avancent l'hypothèse que les hommes anatomiquement modernes proviendraient de la région du **Paléolac Makgadikgadi** entre 240 000 et 165 000 ans (Chan *et al.*, 2019). Qu'en est-il des Hominines dans la région ? Aurons-nous la chance d'en découvrir dans les grottes ?

Les données de terrain et l'analyse des reliefs révèlent la présence de paléolacs, notamment à 995 m, 945 m et 936 m d'altitude (Cotterill, 2006 ; Mc Farlane et Eckardt, 2008 ; Fierens, 2019, Moore *et al.* 2012, 2022).

Comment ces massifs karstiques ont-ils réagi à des niveaux de base aussi élevés, notamment celui suggéré par le paléoniveau à 995 m d'altitude du Paléolac *Deception* ? Alors que justement l'étagement des galeries des grottes se situe autour de 1005 m d'altitude.



Figure 868 Importants massifs de concrétions de la grotte de Gcwihaba (Source : Fonds photographique Marshall d'Harvard University, 1950).

Pourquoi trouve-t-on d'aussi importants massifs de concrétions dans la grotte de Gcwihaba ? Quels sont leurs âges ?

Les remplissages karstiques que nous fouillons actuellement dans la grotte de *Bone Cave* (à *Koanaka Hill K2*), notamment les os de poissons qui y ont été découverts, sont-ils contemporains du Paléolac *Deception*, ou bien plus récents ?

Nous chercherons donc à déterminer à quelle époque les grottes se sont ouvertes, et quand ont-elles pu commencer à piéger des sédiments et des fossiles. L'enjeux est de dater précisément les fossiles que nous mettons au jour lors des fouilles.

4.6.1. Des datations controversées

Plusieurs méthodes de datation absolue ont été utilisées par les auteurs qui ont étudié la région :

- le radiocarbone (^{14}C) ; qui ne permet pas de dater au-delà de 45 000 ans ;
- la thermoluminescence des grains de quartz (TL) ;
- la luminescence stimulée optiquement des grains de quartz (OSL ou LD) ;
- la datation par enfouissement basée sur des nucléides cosmogéniques (Nucléides cosmogéniques terrestres (TCN) $^{26}Al/^{10}Be$;
- les datations U/Th des concrétions dans les grottes, ne permettant pas d'aller au-delà de 600 000 ans.

Il existe une controverse concernant l'âge de certains éléments du paysage comme les dunes de sables et les paléolacs (Bäumle et al., 2019). Les analyses et les études antérieures annoncent pour les paysages, les paléolacs et le creusement des grottes deux types d'âges, des âges anciens autour du million d'années (Moore et Larkin (2001), Moore, Cotterill, Main et Williams (2007), Moore, Cotterill et Eckardt (2012), Ponte (2018), Fierens (2019), Royer (2020) et Gaudare (2024)) et des âges récents à partir de 280 000 ans (Heine (1978, 1991, 1992), Thomas et Shaw (1991), Burrough *et al.* (2009), Burrough & Thomas (2013) et Vainer *et al.* (2021, 2024)) pour l'âge des lacs et Ringrose (2022) pour le Paléolac de Ngami). Les deux types d'âges sont compilés dans le Tableau 49 ci-dessous.

Nom du paléolac	Altitude (m)	Âge	Source
Paléolac *Deception* (Mc Farlane et Eckardt, 2008)	995	Au minimum, entre -2.2 et -1.8 Ma	Moore Cotterill et Eckardt (2012, Table 1, p.388) (voir p.1266)
Paléolac Makgadikgadi (Grey et Cooke, 1977 in Thomas et Shaw, 1991, p.133; Burrough *et al.*, 2009)	945	Age moyen de 800 000 ans et entre 1.5 Ma à 500 000 ans	Moore Cotterill et Eckardt (2012, Table 1, p.388) (voir p.1266)
		30 000 à 20 000 ans	Heine, 1978
	940-945	35 000 ans	Shaw 1988
	945	Vers 40 000 à 35 000	Mc Farlane et Segadika, 2001
	940	vers 25 000 et 20 000 (Carbone 14 sur des calcaires et des coquillages lacustres)	Cooke, 1979, p.41
		Vers 26 000 à 10 000 ans	Nash, 1992
Paléolac Thamalakane (Shaw, 1988 in (Thomas et Shaw, 1991, p.134)	936	25 860 ± 200 14C ans BP à Moremaoto	Shaw et Thomas, 1988 in Burrough *et al.*, 2009
		26 950 ± 200 14C ans BP à Moremaoto	
		90 700 +- 7200 ans	Ringrose *et al.*, 2005 in Burrough *et al.*, 2009
		200 000 à 100 000 ans	Ringrose (2022)
		Entre 21 000 et-17 000, assèchement final il y a 2000 ans	Shaw 1988
		À 17 000 et 13 000 ans	Mc Farlane et Segadika, 2001
Paléolac Bulozi (qui n'est pas situé dans le Rift de l'Okavango	920	12 000 à 9000 ans	Heine, 1978
Paléolac Ngami	945 à 920	À partir de 65 000 ans	Ringrose (2022, Table 4.3)

Tableau 49 Récapitulatif des paléolacs dans le Rift de l'Okavango.

4.6.1.1. Des âges récents

Certaines analyses et études antérieures annoncent pour les paysages, les paléolacs et le creusement des grottes des âges plutôt récents, à partir de 280 000 ans (Heine (1978, 1991, 1992), Thomas & Shaw (1991), Burrough *et al.* (2009), Burrough & Thomas (2013), Riedel *et al.,* (2014) et Vainer *et al.* (2021, 2024)) pour l'âge des lacs et Ringrose (2022) pour le Paléolac de Ngami).

Vainer *et al.* (2024, p.6) proposent un résumé des datations récentes dans l'Okavango :

> *Des hauts niveaux lacustres successifs ont été déduits entre* ***131 000 ± 11 000*** *et* ***92 000 ± 2 000 ans****, avec une autre phase centrée autour de* ***64 000 ans****, et des conditions fluctuantes entre 40 000 ans et aujourd'hui. La période entre* ***115 000*** *et* ***95 000 ans*** *coïncide avec l'accumulation éolienne dans les dunes du nord-est du bassin de rift* ***(Stokes et al., 1998)*** *et les stades de hauts niveaux plus récents déduits sont contemporains de l'accumulation de dunes dans les zones de bassin de rift du nord-ouest (****Thomas et al., 2000****). Dans l'enclave de Chobe, les âges des profils de profondeur dans les crêtes élevées varient entre* ***23 400 ± 1600*** *et* ***1900 ± 300 ans (Burrough & Thomas, 2008 ; Mokatse, Vainer, et al., 2022)****, tandis que le quartz dans les roches carbonatées a été daté à* ***48 200 ± 9600 ans*** *et les sables des plaines inondables enfouis à* ***~50 000 ans (Diaz et al., 2016)****. Combinés, ces âges indiquent un environnement fluvio-lacustre hydrogéologique dynamique au moins depuis* ***~280 000 ans****. » (Vainer et al., 2024).*

Vainer *et al.* (2023) indiquent un environnement lacustre vers 140 000 ans.

Burrough *et al.* (2009) proposent aussi un résumé.

Entre 20 000 et 30 000 ans BP (^{14}C) pour la bordure *(ridge)* à 945 m et entre 9 000 et 12 000 ans BP (^{14}C) pour la bordure à 920 m (Heine, 1978 in Burrough *et al.*, 2009).

Et entre 18 200 ± 902 ans BP (TL) pour du sable préservé dans une coquille de gastéropode trouvé dans la plaine à 920 m d'altitude (Ringrose *et al.*, 1999 in Burrough *et al.*, 2009).

108 600 ± 9020 ans (TL) et 102 200 ± 7600 ans pour la couche dure supérieure d'un *hardpan* (Ringrose *et al.*, 2005 *in* Burrough *et al.*, 2009).

À 936 m Sua Pans une date de 90 700 ± 7200 ans (TL) pour les bordures supérieures qui donnent des âges entre 80 000 et 90 000 ans (Ringrose *et al.*, 2005 *in* Burrough *et al.*, 2009).

À Moremaoto un lit de diatomées (rive nord du Boreto) situé 8 m plus haut que le lit actuel traduirait peut-être un haut de niveau de lac qui daterait entre 31 007 ± 2200 ans et de 27 800 ± 2400 ka (Shaw et coll., 1997) Burrough *et al.*, 2009.

"Ces âges sont concomitants avec les datations au radiocarbone d'une terrasse de 934 m d'altitude sur le côté sud de Moremaoto (26 950 ± 200 14C ans BP), d'une terrasse de 932 m d'altitude en amont de Moremaoto (25 860 ± 200 14C ans BP) et avec l'âge des calcrètes contenant des mollusques sur une terrasse de 925 m d'altitude en aval de Moremaoto (22 540 ± 200 14C ans BP) (Shaw et Thomas, 1988)" Burrough *et al.*, 2009.

La vallée relique d'Okwa pénètre dans la crête de Gidikwe au sud-ouest du bassin. Des échantillons de mollusques et de roseaux prélevés dans l'Okwa à l'intérieur et juste au sud de la gorge de l'Okwa sont révélateurs d'un environnement d'eau peu profonde, d'un delta ou d'un lac périphérique et ont des âges 14C non calibrés de 12 000 à 15 000 ans BP (Shaw *et al.*, 1992) Burrough *et al.*, 2009.

Au Quaternaire tardif (-15 000 et -3000 ans BP non corrigé à partir de mollusque du littoral, Shaw et Thomas (1988 in Thomas *et al.*, 2000, p.245) ont montré qu'il y avait un lac à l'est, au niveau de ce qui était appelé la bande de Caprivi. Il était déjà décrit par (Thomas et Shaw, 1991, p.132).

Au moins 280 000 ans selon trois échantillons datés par Vanier (Vanier *et al.*, 2024, p.6).

> *« Les caractéristiques fluvio-lacustres superficielles dans le Rift de l'Okavango représentent plusieurs phases de dépôt, résultant de changements dans la configuration fluviatile et de dépôts sur des alluvions plus anciennes* ***(Thomas et Shaw, 1991)****. Divers matériaux recueillis principalement sur les crêtes et les fonds de cuvettes ont été datés en appliquant des techniques de datation par luminescence et 14C et ont été interprétés comme représentant des stades humides et secs alternés* ***(Burrough et al., 2007 ; Burrough et Thomas, 2013)****. Les âges les plus anciens, aussi vieux que 280 ka, ont été évoqués à partir d'un nombre limité d'échantillons (n= 3) dans ces études, laissant un écart d'âge notable avec les âges d'enfouissement d'environ 1,1 Ma dans la partie occidentale du Rift de l'Okavango. Des hauts niveaux lacustres successifs ont été déduits entre 131 ± 11 et 92 ± 2 ka, avec une autre phase centrée autour de 64 ka, et des conditions fluctuantes entre 40 ka et aujourd'hui. La période entre 115 et 95 ka coïncide avec l'accumulation éolienne dans les dunes du nord-est de la région* ***(Stokes et al., 1998)*** *et les stades de hauts niveaux plus récents déduits sont contemporains de l'accumulation de dunes dans le nord de la région* ***(Thomas et al., 2000)****. Au sein de l'****enclave de Chobe****, les âges des profils de profondeur dans les crêtes élevées varient entre 23,4 ± 1,6 et 1,9 ± 0,3 ka* ***(Burrough et Thomas, 2008 ; Mokatse, Vainer et al., 2022)****, tandis que le quartz dans les roches carbonatées a été daté à 48,2 ± 9,6 ka et les sables des plaines inondables enfouis à ~50 ka (****Diaz et al., 2016****). Combinés, ces âges indiquent un environnement fluvio-lacustre hydrogéologique dynamique depuis au moins ~280 ka » (Vanier et al., 2024, p.6).*

4.6.1.1.1. Critiques des datations récentes

Plusieurs critiques ont été émises au sujet des datations récentes.

Par exemple, il convient d'être prudent lors de la corrélation de ces anciennes lignes de rivage entre elles, car elles ont pu être déplacées par des mouvements verticaux dus à la néotectonique (Cooke et Verstappen, 1984). Sur de petites surfaces, et à des petites échelles de temps, comme dans les sous-bassins Ngami et Mababe du Makgadikgadi, de telles corrélations ont été possibles (Burrough *et al.*, 2009, p.1397).

Notons qu'il y a eu plus de dates réalisées au carbone 14 qu'avec les autres méthodes et que ces dates au carbone 14 ne permettent pas d'aller au-delà de 45 000 ans. De plus, Moore *et al.* (2012) doutent de la fiabilité des dates au carbonte 14 des calcrètes car celles-ci sont constituées de plusieurs épisodes de formation.

7. Par Nash

Dans sa thèse, Nash (1992, p.124) évoque la date radiocarbone qui donne 14 570 ± 160 ans BP pour les calcrètes de la vallée de Xaudum et « de contaminations potentielles de carbonates inorganiques ». Il évoque la contamination des calcrètes par des eaux de percolation en plus des multiples générations de carbonates qui peuvent être incorporées dans une croûte dure, en citant Goudie (1983). Il cite aussi Rust *et al.* (1984) sur la contamination des calcrètes et les erreurs de datations.

8. Par Moore et al., 2012

Ils mettent une limite à la datation au ^{14}C des calcrètes qui : « reflètent de manière caractéristique plusieurs générations de formation, se poursuivant probablement jusqu'à aujourd'hui » **(Watchman et Twidale, 2002 ; Burrough et coll., 2009** *in* Moore *et al.* 2012, p.395**)**.

Ils mettent aussi en cause la fiabilité des datations de luminescence fournissant des âges récents, pour les dunes de sables du fait de la forte bioturbation des dunes (Moore *et al.*, 2012, p.396).

9. Par Linol et al., 2015

*« Une grande partie de cette cartographie et de ces recherches historiques a été résumée depuis dans des études régionales (par exemple, **Thomas et Shaw 1990, 1993 ; Haddon 2000 ; Giresse 2005**), mais très peu de nouvelles données de terrain ont été générées pour fournir des sections stratigraphiques détaillées et tester ces corrélations régionales. Les études les plus récentes dans le Kalahari se sont concentrées sur les sédiments de cuvettes proches de la surface, les silcrètes/calcrètes et les dunes de sable éoliennes pour fournir des informations sur le paléoclimat quaternaire et l'évolution du paysage (par exemple, **Summerfield 1983 ; Holmgren et Shaw 1996 ; Ringrose et al. 1999 ; Thomas et al. 2003 ; Huntsman-Mapila et al. 2006 ; Kampunzu et al. 2007 ; Burrough et al. 2009 ; Hürkamp et al. 2011 ; Moore et al. 2012 ; Eckardt et al. 2013**).*
*Ce n'est que dans le pan d'Etosha, au nord de la Namibie (Fig. 10.1a et 10.2 pour la localisation), que des forages récents et des études paléontologiques ont décrit en détail une succession plus complète du Kalahari (**Miller 2008 ; Miller et al. 2010**) » (Linol et al., 2015).*

10. Par Vainer

*« Divers matériaux collectés principalement sur les crêtes et les fonds de cuvettes ont été datés en appliquant des techniques de luminescence (LD) et de datation au ^{14}C et ont été interprétés comme représentant des stades humides et secs alternés **(Burrough et al., 2007 ; Burrough et Thomas, 2013)**. Les âges les plus anciens, aussi vieux que **280 000 ans**, ont été évoqués à partir d'un nombre limité d'échantillons (n= 3) dans ces études, laissant un écart d'âge notable avec les âges d'enfouissement d'environ **1,1 Ma** dans la Rift de l'Okavango. » (Vainer et al., 2024).*

4.6.1.2. Des âges anciens fournis par la géoécodymanique : datations moléculaires des temps de divergences des espèces et signatures phylogéographiques

Certaines analyses et études antérieures annoncent pour les paysages, les paléolacs et le creusement des grottes des âges plutôt anciens autour du million d'années (Moore et Larkin (2001), Moore, Cotterill, Main et Williams (2007), Moore et Cotterill (2011), Moore, Cotterill et Eckardt (2012), Ponte (2018), Fierens (2019), Royer (2020) et Gaudare (2024)).

Une méthode de datation complémentaire et originale est utilisée pour dater l'évolution des fleuves et des paléolacs, telle que nous venons de la décrire avec les cartes précédentes (p.833), en utilisant la géoécodynamique (Cotterill et De Wit, 2011) et les datations moléculaires de l'évolution du biote aquatique (Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, p.396) et notamment les datations moléculaires des temps de divergences et les signatures phylogéographiques des poissons (Day *et al.*, 2009 ; Goodier, 2010 et Goodier *et al.*, 2011) et des crocodiles (Bishop *et al.*, 2008).

Le **Paléolac *Deception***[17], dont les vestiges sont situés aujourd'hui à 995 m d'altitude, se serait installé au minimum entre **2.2 Ma et 1.8 Ma** (Cotterill, 2006 ; Mc Farlane et Eckardt, 2008 ; Cotterill et De Wit 2011 ; Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, Table 1, p.388 ; Moore *et al.*, 2009 *in* Fierens, 2019 ; Royer, 2020 ; Gaudare, 2024).

> Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Table 2) indiquent que l'âge de l'évènement géomorphologique à l'origine du **Paléolac *Deception***, le soulèvement tectonique le long de la faille de Chobe est mal contraint mais en moyenne de **1.4 Ma** avec une limite entre **2.5 Ma et 600 000 ans**.

La date du paléolac *Deception* provient « d'une datation moléculaire de l'initiation du paléolac Bulozi limitant l'afflux de la rivière paleo-Chambeshi » (Cotterill and de Wit, 2011; Goodier *et al.* 2011 **et Cotterril *et al.* unpublished data in** Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Table 1, p.388).

La détermination de l'âge du **Paléolac Makgadikgadi** provient de la géoécodynamique et des datations moléculaires à partir des signatures phylogéographiques (Cotterill et de Wit, 2011) de poissons-chats actuels

[17] *Deception* fait référence à une vaste surface plane, à 1000 m d'altitude, où est située la vallée *Deception* et des pans : lien Google View.

(*Synodontis*) (Day *et al.*, 2009 ; Goodier, 2010 et Goodier *et al.*, 2011) et de crocodiles actuels *(Crocodylus niloticus)* (Bishop *et al.*, 2008) venant de la région de l'Okavango et des fleuves voisins (Cubango, Haut Zambèze, Bulozi, Chobe, Kafue, Limpopo, etc.). Ces études phylogéographiques suggèrent que leurs ancêtres respectifs vivaient dans un environnement lacustre aujourd'hui disparu situé sur le plateau du Kalahari et supposé être le **Paléolac Makgadikgadi** situés dans le Rift de l'Okavango.

4.6.1.2.1. Âge moléculaire de la divergence des poissons-chats du genre Synodontis du Zambèze

Ces études permettent de déterminer *« un âge moyen encadré par des limites supérieures et inférieures d'un intervalle de confiance à 95 % »* (Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, p.396) concernant la divergence des poissons-chats (Moore *et al.*, 2007, p.311, p.327).

Selon Cotterill et De Wit (2011, Table 1, p.505), sur la base des travaux de Goodier *et al.*(2011, Fig.6), cette divergence serait datée entre **1,4 > 0,9 < 0,4 Ma** , que l'on traduit par un âge moyen estimé à **900 000 ans**, compris dans un intervalle de confiance de 95% entre un âge maximum de **1.4 Ma** et un âge minimum de **400 000 ans**. On trouve la date de **1,5 > 0,8 < 0,5 Ma** dans Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Table 1, p.388 et p.396).

4.6.1.2.2. Âge moléculaire de la divergence des poissons-tigres Hydrocynus dans le bassin versant du Congo-Zambèze

Selon Moore, Cotterill et Eckardt (2012, p.401), sur la base des travaux de Goodier (2010) et Goodier *et al.* (2011, Fig.6), cette divergence serait datée entre **2,4 > 1,4 < 0,4 Ma**.

> *« Le soulèvement du bassin versant du Congo-Zambèze est maintenant daté de **2,2 à 1,4 Ma** (IC global à 95 % = **3,4 à 0,6**) - les dates moléculaires pour lesquelles quatre complexes d'espèces différentes de poissons ont été isolés dans les bassins versants de Bangweulu-Chambeshi par rapport à Kafue-Haut-Zambèze (compilées à partir d'études phylogéographiques indépendantes - **Cotterill et de Wit, 2011 ; Cotterill et de Wit, données inédites**). Cela comprend l'événement de **1,4 Ma (IC à 95 % = 2,4 à 0,4)** qui a isolé les poissons-tigres, Hydrocynus spp, dans le bassin versant du Congo-Zambèze **(Goodier, 2010 ; Goodier et coll., 2011)**. Nous interprétons cette contrainte du Pléistocène inférieur **(2,2 à 1,4 Ma)** comme la période la plus récente où l'afflux de Paléo-Chambeshi aurait pu maintenir des lacs dans le nord-est du Botswana. Par extension, cela fixe un âge minimum pour la perturbation initiale du système du **Paléolac Makgadikgadi**. Cela a provoqué une contraction du Paléolac Deception au Paléolac Makgadikgadi » (Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, p.401).*

La carte suivante (Figure 869), adaptée de Goodier *et al.* (2011, Fig.6), indique les âges moléculaires, en million d'années, de la divergence des poissons-tigres *Hydrocynus* dans différents secteurs du Rift est-africain et notamment vers 1.4 Ma au niveau du Zambèze.

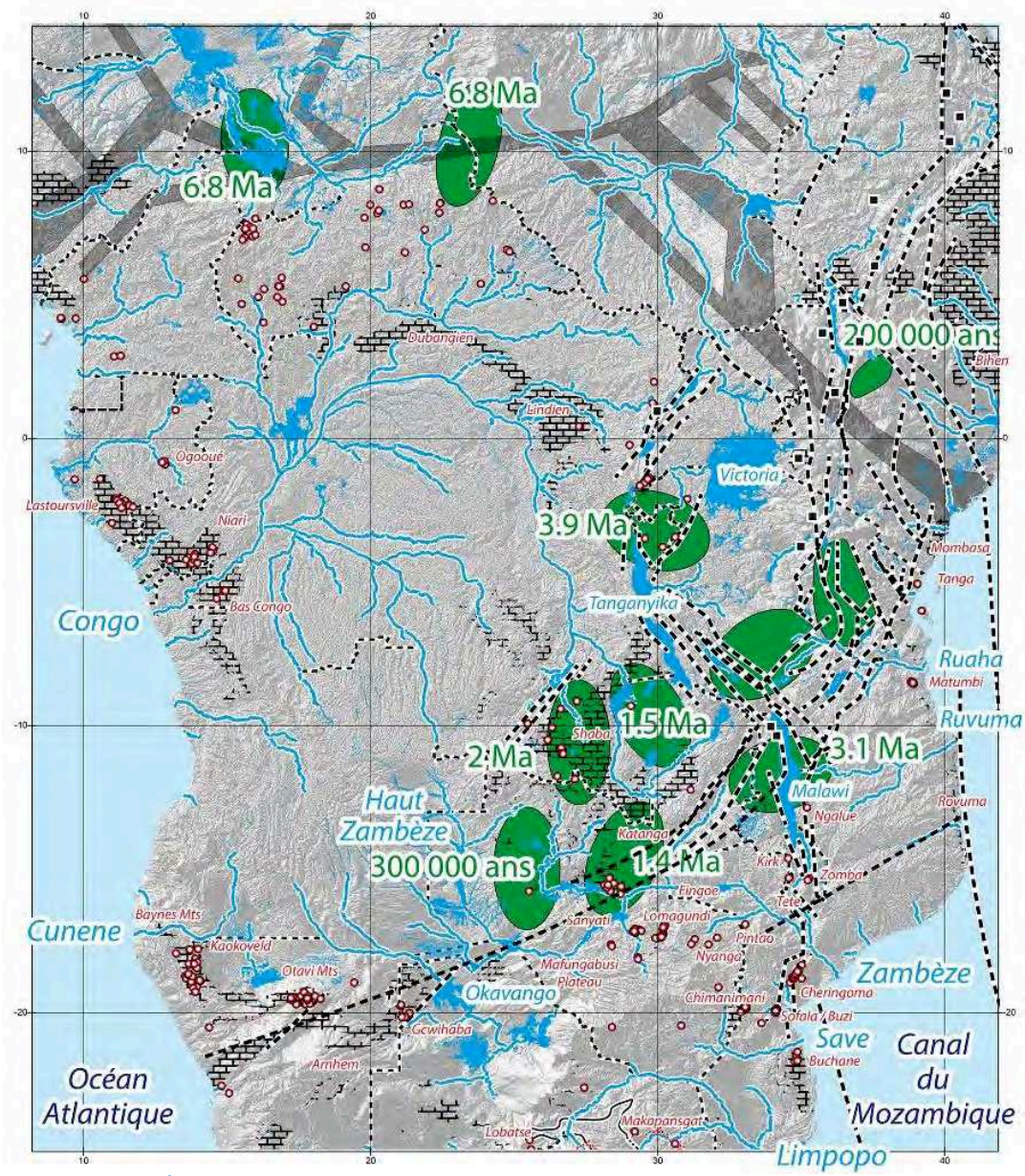


Figure 869 Âges moléculaires de la divergence des poissons-tigres Hydrocynus (Source : Goodier et al., 2011, Fig.6, modifié).

4.6.1.2.3. Âge moléculaire de la divergence des crocodiles Crocodylus niloticus des fleuves Kafue, Okavango et Zambèze

L'expansion démographique passée des crocodiles suggère également la présence d'un paléolac dans la région du Kalahari. Cette datation moléculaire indique :

- **1,72 > 0,45 < 0,12 Ma** pour les *Crocodylus niloticus des fleuves d'Afrique centrale et méridionale (Kafue, Okavango et Zambèze)* (Bishop *et al.*, 2008 in Moore, Cotterill et Eckardt, 2012 Table 1, p.388 et p.396 ; Cotterill, 2006 in Moore *et al.*, 2007, p.322).

4.6.1.2.4. Autres âges moléculaires inédits

Moore, Cotterill et Eckardt (2012, p.401) citent d'autres âges moléculaires inédits (Cotterill et de Wit, données inédites).

4.6.2. Chronologie de la mise en place des paysages selon les âges anciens

Moore, Cotterill et Eckardt (2012, p.394) proposent la chronologie suivante, du plus ancien au plus récent :

- Formation du champ de dunes linéaires (***Alab dune fields***) au minimum du Pliocène supérieur (Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, Table 1) ;
- Initiation de la faille de Gumare, correspondant à la mise en place du Rift de l'Okavango (3.35 Ma selon Vainer *et al.*, 2024) ;
- Paléolac Deception, entre 2.2 et 1.8 Ma (Cotterill, 2006 ; Mc Farlane et Eckardt, 2008 ; Cotterill et De Wit 2011 ; Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, Table 1, p.388 ; Moore *et al.*, 2009 in Fierens, 2019 ; Royer, 2020 ; Gaudare, 2024) ;
- Paléolac Makgadikgadi, vers 1.5 Ma, coïncidant à la formation de dunes transversales sur les crêtes (Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, Fig.3, fig.4) ;
- Paléolac Thamalakane, âge minimum de 500 000 ans, par rapport aux outils *ESA* (voir p.862).

Indiquons maintenant les éléments qui leurs ont permis de proposer cette chronologie.

4.6.2.1. Discussion sur l'âge du champ de dunes linéaires fossiles

Les dunes de sables linéaires, longues de plus de 40 km, présentent parfois des interruptions au niveau de ce qui a été interprété comme des oueds (Figure 774 p.778). Plutôt que de les attribuer à une érosion par les réseaux hydrographiques, comme le suggèrent certains auteurs, nous pensons que les dunes éoliennes ne se sont pas déposées dans les zones alors ennoyées et envahies par les paléolacs.

Le champ de dunes linéaires (***Alab dune fields***) est la forme de relief la plus ancienne de la région (McFarlane *et al.* 2005 ; Moore, Cotterill et Eckardt, 2012 ; **Mc Carthy, 2013** *in* Bäumle *et al.*, 2019), au minimum du Pliocène supérieur au Pléistocène inférieur d'après les outils lithiques ESA trouvés à leur base (**Miller, 2008** *in* Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, Table 1) . Ces dunes linéaires auraient aussi, selon Moore, Cotterill et Eckardt (2012) un âge minimum qui serait Pléistocène inférieur (~ 781 000 ans) d'après la présence d'outils lithiques ESA trouvés à la base des dunes, comme l'indique **Miller (2008)** *in* Moore, Cotterill et Eckardt (2012, p.396). Les dunes les plus anciennes auraient 2 millions d'années (Moore et al., 2013 *in* Bäumle *et al.*, 2019). Cooke (1979, p.40) évoque déjà la date de 3 millions d'années pour les dunes alab mais sans fournir d'argument.

Elles sont tronquées par des failles, comme la faille de Gumare qui correspond à l'extension vers l'est du Rift est-africain (Mc Farlane et Eckardt (2007). Ces dunes sont donc antérieures à l'ouverture du Rift de l'Okavango (Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, p.393), datée à 3.35 Ma (Vainer *et al.*, 2024).

De plus, la faille de Gumare correspond aussi à la limite du rivage du **Paléolac *Deception* (Mallick *et al.*, 1981 ; Mc Farlane et Eckardt, 2007** in Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, p.393), les dunes linéaires sont donc plus anciennes que le paléolac, daté à 2.2 Ma. Les dunes transversales, dans le secteur de Deception sont considérées contemporaines au Paléolac Makgadikgadi.
Des outils taillés ont été trouvés sur la surface du **Paléolac Makgadikgadi**, comme le montre la carte (p.866), à **Gweta** vers 945 et 920 m d'altitude (Mc Farlane et Segadika, 2001) (p.872) et à **Orapa**, vers 995 m d'altitude (p.870) (Walker et Segobye, 2001).
D'autres éléments trouvés au pan d'Etosha en Namibie, à 500 km de l'Okavango, situent l'âge des dunes linéaires entre 4 et 2 Ma (Miller, Pickford et Senut, 2010) alors que les âges par luminescence (LD) des dunes donnent des âges vers 50 000 et 20 000 ans (Thomas *et al.*, 2000 *in* Moore *et al.* (2012, Fig.5). Ces âges récents n'étant mesurés qu'à seulement 2 m de profondeur pourraient effectivement correspondre à des remobilisations des dunes ou bien de la bioturbation, comme le suggèrent Thomas et al., (2000) ; McFarlane *et al.* (2005, 2010) et Linol *et al.* (2015).

4.7. QUELLES REPONSES APPORTEES PAR L'INDUSTRIE LITHIQUE ANCIENNE ?

Cette région a fait l'objet de nombreuses prospections archéologiques qui ont permis de découvrir de rares artefacts lithiques comme ceux datés de 12 200 ±115 ans BP dans l'entrée nord de la grotte de Gcwihaba (Yellen *et al.*, 1987) pour citer la découverte la plus proche de nos sites d'étude. Synthétisons ici les découvertes lithiques du nord-ouest du Botswana à partir de nos propres découvertes ou de celles publiées.

4.7.1. Nos découvertes inédites

Lors des missions dirigées par Laurent Bruxelles (*cf.* Liste p.100) des artefacts ont été trouvés.

4.7.1.1. Koanaka K2

Un galet de quartz blanc, rougi, a été trouvé pris dans les dépôts karstiques de la fouille de Koanaka K2 (*in press*).

Des outils de ce type avaient déjà été découverts :

> *« Les seuls fragments lithiques susceptibles de représenter des outils en pierre ont été découverts sur les sites de Koanaka. À Koa O et Koa N, on trouve des éclats et des galets anguleux de quartz et de quartzite. Du quartz filonien est présent* in situ *sur les deux sites, et il est probable que la plupart, voire la totalité, des occurrences de quartz soient d'origine locale. Leur exploitation par les premiers hominidés reste à déterminer. Les fragments de quartzite, cependant, appartiennent à une lithologie qui n'affleure pas à proximité et représentent des matériaux transportés dans la grotte, naturellement ou par l'homme primitif. Un éclat de quartzite rougeâtre, mesurant 5 cm sur 3 cm,* in situ *dans un bloc de brèche dolomitique cimentée par du sable, présente plusieurs cicatrices d'éclat, dont au moins une avec un bulbe de percussion clair. Ceci pourrait être interprété comme une preuve de la présence d'hominidés primitifs dans la région au Plio-Pléistocène. Ces fragments représentent donc les plus anciennes preuves d'outils en pierre connues au Botswana » (Pickford, 1990).*

4.7.1.2. Waxhou North

Au sud du puits de *Waxhou North*, le 29/11/2022, nous avons prospecté des petits reliefs métriques de dolomies qui affleurent et émergent des sables (Figure 874 et Figure 873) et qui nous avions au préalablement identifié sur les images satellites (Figure 875). A cet endroit, les dolomies sont recouvertes par des silcrètes rouges dont nous n'avons pas pu estimer l'épaisseur (Figure 871). Ce sont des jaspes rouges d'après O. Ledimo, le géologue du Muséum de Gaborone (comm. orale). Associés à ces affleurements, nous trouvons de nombreux artefacts en silcrète attribués au MSA par G. Porraz (comm. orale). Nous avons découvert des outils taillés *MSA,* à *Waxhou North* (Figure 875), près d'un affleurement de silcrètes ayant servi de matière première (Figure 871 et Figure 874).

Latitude (WGS84)	Longitude	Altitude	
19,727044°S	21,057385°E	1195 m	Lien Google Maps



Figure 870 Outils lithiques MSA, en silcrète, trouvés Waxhou North.

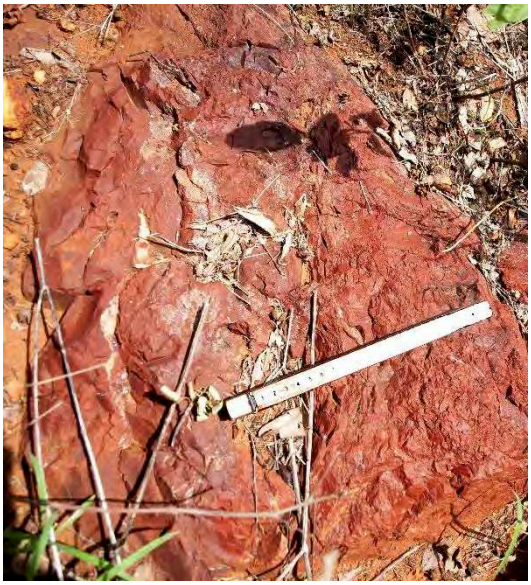


Figure 871 Affleurement de silcrète à Waxhou North.



Figure 872 Outil lithique MSA en silcrète de Waxhou North.

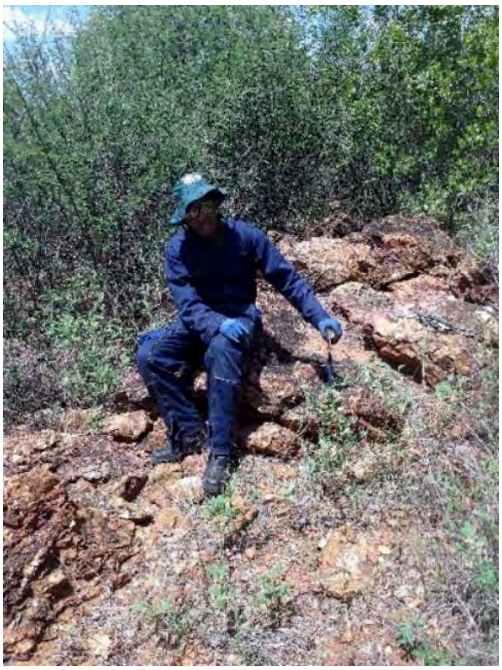


Figure 874 Affleurement de silcrète à Waxhou North.



Figure 873 Dolomies à silex de Waxhou North.

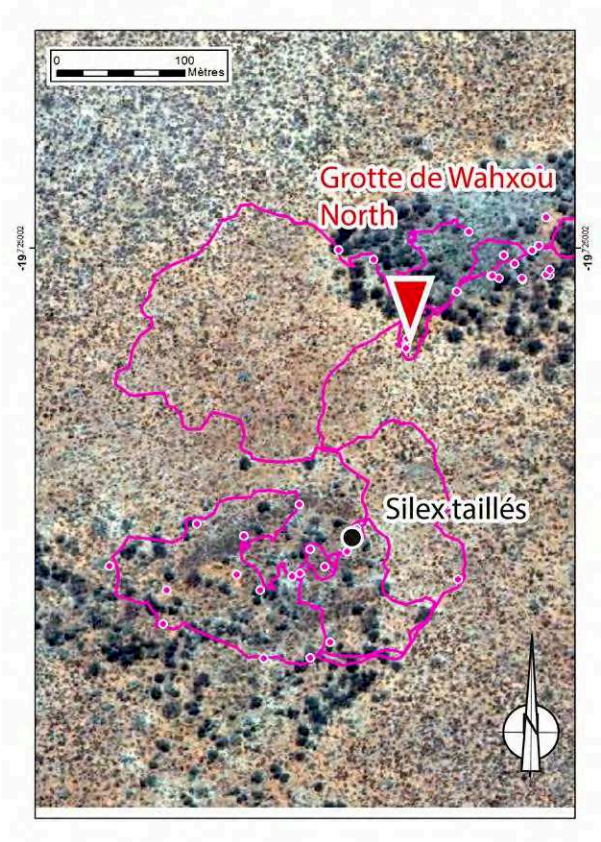


Figure 875 Trajet de prospection des buttes au sud-ouest de Waxhou North et points remarquables.



Figure 876 Brèches de Waxhou North.

4.7.2. Les découvertes lithiques publiées

Nous avons indiqué la localisation des sites archéologiques découverts dans la région de l'Okavango et nous les présentons brièvement :

- Tsodilo Hills (art rupestre et lithique (cf. p.816)) ;
- Orapa ;
- Gweta ;
- Gi ;
- Chute n'Gonye.

Nous avons aussi indiqué la vallée Okwa où prospectent Mooketsi C. et Michalec G. mais n'ont rien livré d'ancien. D'autres sources sont citées par Moore, Cotterill et Eckardt (2012) : Bond et Summers (1954) ; Clark (1950) ; Cooke (1979 ; Ebert et coll. (1976) ; Helgren (1984) ; McFarlane et Segadika (2001) ; Robbins (1988) et Robbins et Murphy (1998). D'autres sources de données sont disponibles : Burrough (2016, Table 9.1, p.170) et la synthèse de Colson *et al.* 2022.

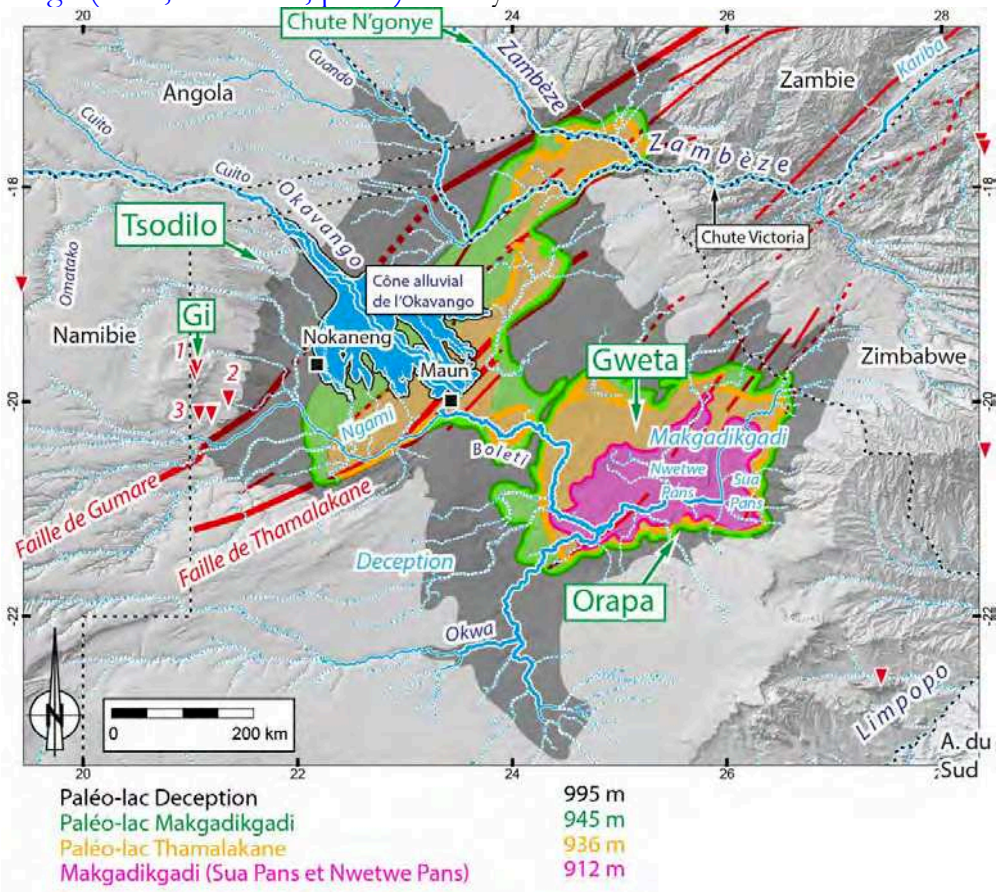


Figure 877 Carte des principaux gisements lithiques dans le nord-ouest du Botswana.

La carte ci-dessous (Moore *et al.* 2007, Fig.15.15, p.324) (Figure 878) indique des sites ESA (cercles noires). Les auteurs citent les travaux de Robbins et Murphy (1998) et Mc Farlane et Segadika (2001).

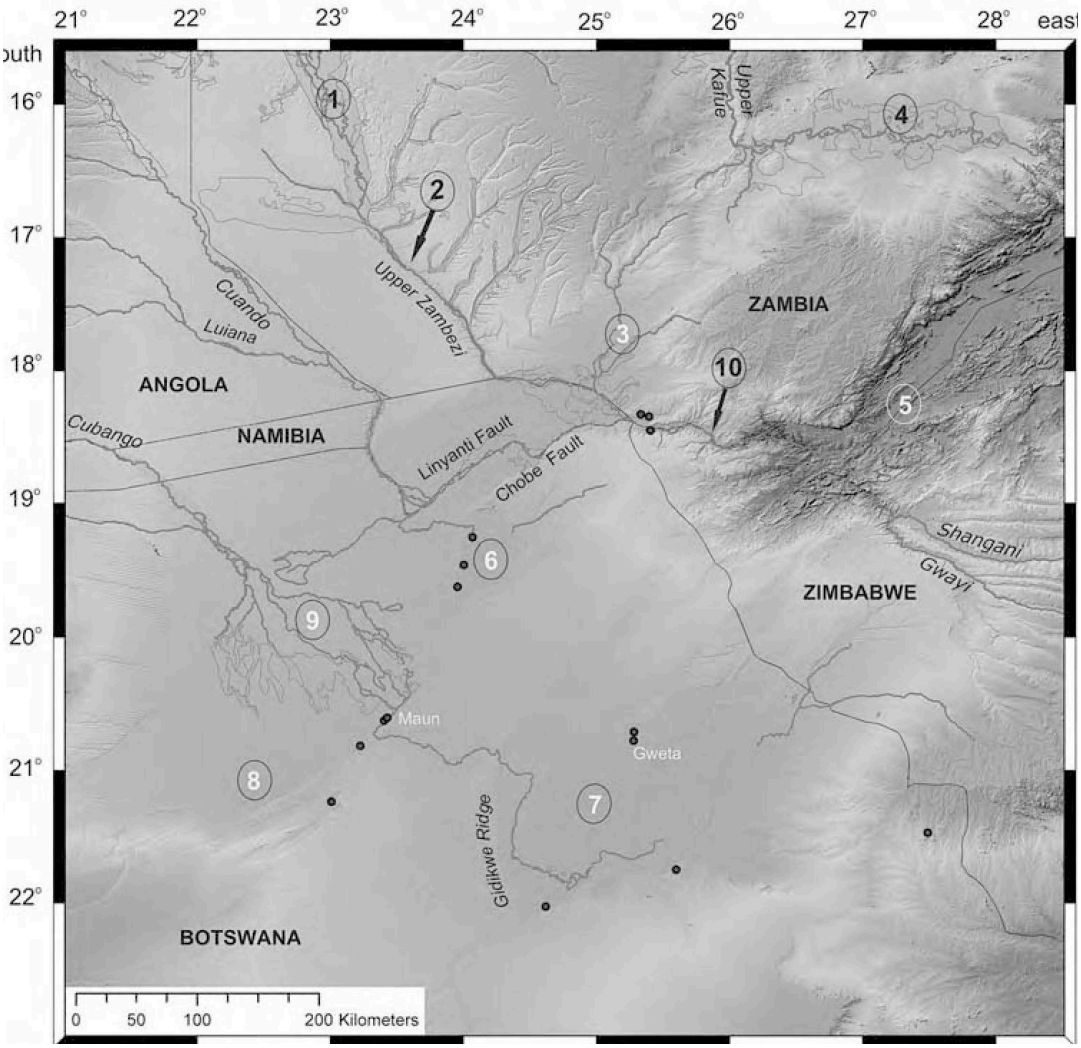


Figure 878 Carte synthétique des sites ESA (Source : Moore et al., 2007, Fig.15.15, p.324).



Une autre carte issue de la bibliographie synthèse les découvertes archéologiques.

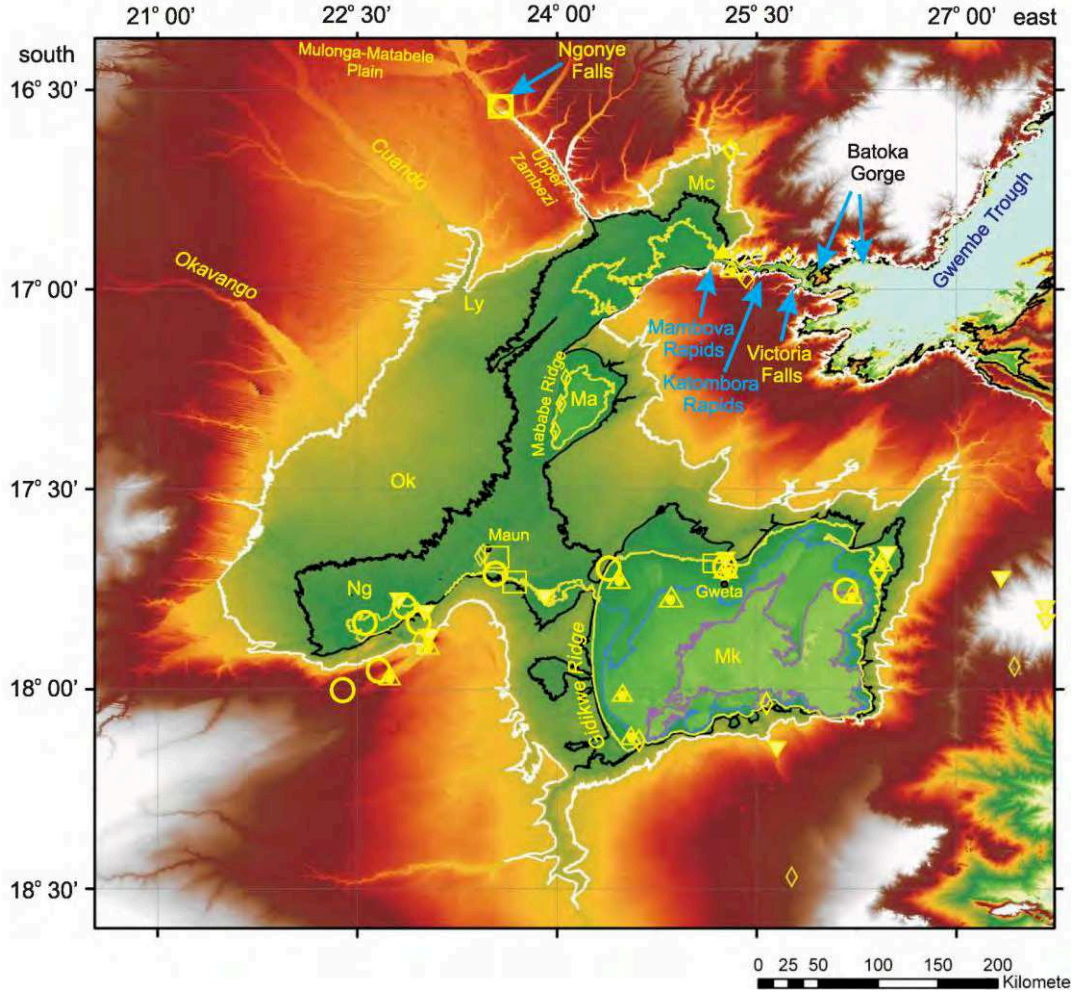
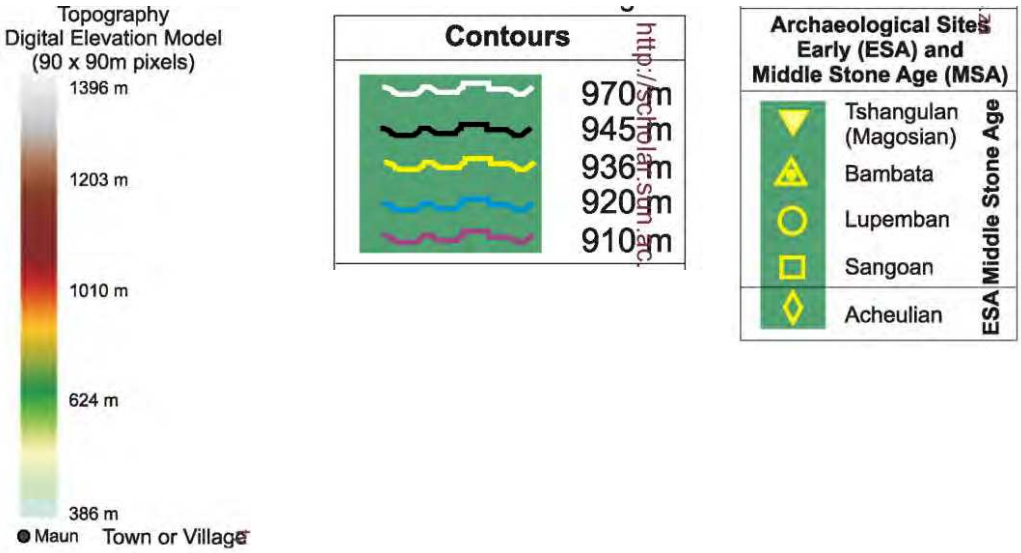


Figure 879 Carte synthétique des découvertes lithiques (Cotterill, 2006, Fig 5.5, p.221).



Ci-dessous, la légende de cette carte de Cotterill (2006).

« Détail de l'étendue des inondations de la partie nord-est du bassin du Kalahari (fossé de l'Okavango) par rapport aux sites d'habitat enregistrés d'Homo de l'âge de pierre ancien (ESA), moyen (MSA) et tardif (LSA). Les principales formations fossiles-lacustres du nord-est du Botswana sont indiquées par les altitudes des rivages formés par des paléolacs fluctuants : lac paléo-Makgadikgadi (LPM), 945 m maximum (a) ; lac paléo-Thamalakhane, 936 m (b) ; et des lacs plus petits à 924 m (c) ; 920 m (d) ; et 910 m (e) dans les sous-bassins de Chobe (C), Linyanti (L), Mababe (Ma), Makgadikgadi (Mk) et Ngami (N) (d'après Thomas & Shaw 1991).

La majorité des outils en pierre, préservés dans ces sites d'habitation, ont été principalement taillés dans des silcrètes qui constituent les fonds de lacs fossiles. Il est en outre à noter que ces artefacts s'étendent de la fin de l'âge de pierre ancien (ESA) à l'âge de pierre moyen (MSA). L'étendue spatiale des paléolacs est délimitée par des courbes de niveau calculées dans ArcGIS Spatial Analyst à partir de la topographie DEM (délimitée par des pixels de 1 800 m2). L'emplacement de ces reliefs est conforme à celui de la cartographie antérieure de H. J. Cooke (1979), Cooke & Verstappen (1984) et Thomas & Shaw (1991) à partir de cartes topographiques au 1:50 000, augmentées d'altitudes directement quantifiées.

Les sites d'habitat de l'ESA sont indiqués comme suit : 1. Rivière Metsemasweu, juste au nord de Serowe, à 5,5 km au nord-ouest du point 22 25'S, 26 45'E. Axes acheuléens (Ebert et al. 1976) ; 2. Gweta (à 6 km au nord-est) entre les rivages fossilifères de 945 m et 920 m. 3. Ngxaishini Pan (= Makawe Pan) à environ 12 km au nord du site de Gweta (Robbins et Murphy 1998). Il existe des preuves d'une séquence d'habitat continue de l'ESA, en passant par l'âge de pierre moyen (MSA) et l'âge de pierre tardif (LSA) à Ngxaishini Pan (McFarlane et Segadika 2001). 4. Bassin de Nwetwe Pan (1), le long du bord de la plate-forme de grès de Karroo, près de 945 m de rivage - au-dessus du bassin de Nwetwe Pan, environ 21o 07'S, 25o 34'E (Helgren (1984). 5. « Des haches à main bien faites (ESA) façonnées à partir de silcrète sont des découvertes particulièrement courantes le long de la rivière Boteti, près de Maun où le silcrète affleure dans le lit de la rivière... » (Robbins & Murphy 1998 : 53). 6. Artefacts MSA du delta de la rivière Nata ; presque identiques aux artéfacts Lupemban dans les graviers plus récents autour des chutes Victoria. Ce site est situé sous le rivage à 920 m (Bond & Summers 1954). 7. Kudiakan Pan avec des outils MSA tardifs, qui semblent similaires à l'industrie Bambata. Ceux-ci ont été taillés à partir d'abondants nodules de silcrète, qui sont abondants à la surface de la cuvette. Il est pertinent pour l'âge du stade paléolac que ces artefacts MSA soient fabriqués » (Cotterill, 2006, p.220).

4.7.2.1. Orapa (Makgadikgadi)

Dans une mine des kimberlite à Orapa, sur les sites de Debswana Damtshaa, (B/K9 ou K009) et B/K12, des outils lithiques oldowayens, datés entre 3.4 Ma et 1.7 Ma, ont été découverts à une altitude d'environ 995 m d'altitude (Walker et Segobye, 2001 ; Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, p.396).

> *De petits artefacts en silcrète du ESA précoce (culture Oldowayenne 2 à 1.5 Ma) ont été trouvés à la base du sable du Kalahari, juste au-dessus des kimberlites calcrétisées 2125B/K9* ***(Walker, 2001)*** *et 2125B/K12* ***(Jim Gibson, comm. pers. 2017)*** » *(De Wit, 2018, p.3).*



Figure 880 Outils lithiques LSA d'Orapa (K006). (Perkins et al.2006, Plate 5.13, p.79).



Figure 881 Mine de Damtshaa (Source : internet).

Les coordonnées de la mine de Debswana Damtshaa (B/K09) sont :

Latitude (WGS84)	Longitude	Altitude (MNT SRTM3v2	
21°18'20.11"S	25°32'13.01"E	965 m	Lien Google Maps

Dans cette région, les artefacts successifs de l'âge de pierre plus anciens sont concentrés à des niveaux de lac progressivement plus élevés comme le montre le Tableau 50 ci-dessous (De Wit, 2018, p.3).

Earliest ESA	3,4 Ma	1,7 Ma	995 m
ESA	1,7 Ma	300 000	945 m
MSA	300 000	50 000	< 945 m
LSA	50 000	20 000	< 920 m

Tableau 50 Informations issues des sites archéologiques autour du bassin de Makgadikgadi

(De Wit, 2018, p.3)

Concernant K006 et des artefacts LSA trouvés et des os :

Le transect de la rivière. (591335 ; 7480433 à 592229 ; 7480986) Quelques tessons adiagnostiques (à 591614 ; 7480780) pourraient provenir du village K5 mentionné ci-dessus, car ils ont été trouvés dans un ravin longeant ce site. Une ancienne fosse, maintenant envasée, contenait de gros éclats de quartzite rouge et un polyèdre dans le tas de sol dégonflé (à 591929 ; 7480866), mais la découverte la plus intéressante était les rares dispersions d'éclats et de carottes de quartz LSA à environ 50 m au sud de la rivière Susulela, une dispersion de 30 m à 591986 ; 7480768 et une dispersion de 50 m à 591876 ; 7480763. Le premier présentait des os. (27D2.3g)

La localisation des sites K006 avec du LSA est précisée par Cusworth (2006 ou 2011).

4.7.2.2. Gweta (Makgadikgadi)

La découverte de ces industries anciennes du Middle Stone Age qui sont recouvertes par des dunes de sable sont donc plus jeunes que 200 ka (McFarlane et Segadika, 2001 in Garzanti *et al.*, 2022, p.12). Ils sont situés entre 920 et 945 m d'altitude (Moore *et al.*, 2007, p.326 ; Burrough *et al.*, 2009, p.1395).

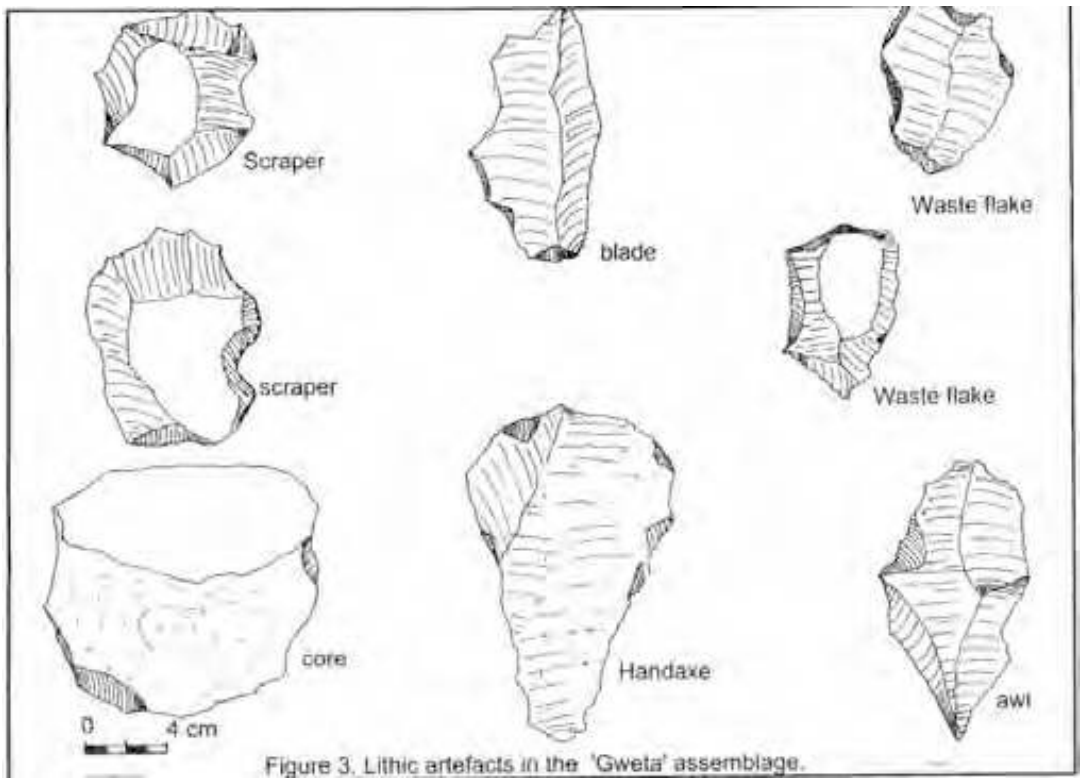


Figure 882 Planche des outils lithiques MSA trouvés à Gweta.

« Ces artefacts acheuléens indiquent que le lac est au moins antérieur à la fin du ESA, aujourd'hui estimée à au moins 300 000 ans, et probablement même plus ancien » (Barham et Smart, 1996 ; McBrearty et Brooks, 2000 in Moore et al., 2007, p.326).

4.7.2.3. Gisement MSA de Gi

A Gi, au nord des Aha Hills, a été découvert du lithique LSA et MSA (Brooks & Yellen, 1977, Helgren et Brooks, 1983 ; Yellen et Brooks[18], 1988; Lombart et Churchill, 2022) en lien avec le cours d'eau semi-aride du début du Pléistocène supérieur (Early Upper Pleistocene (Helgren et Brooks, 1983) et d'un interval humide qui a mis en place un grand lac dans la vallée de Dobe et qui s'est ensuite asséché en laissant des pans (Figure 885).

Les industries LSA ont été recouvertes par des dépôts lacustres de -23 980 ± 590 ans(Kuman, 1984).

Ce gisement a fourni entre autres des coquilles d'œufs d'autruche datées de -40 ka (Helgren & Brooks, 1983) dans un contexte de calcaires lacustres et de pans.

Thomas et Shaw (1991, p.175) indiquent qu'il y a eu pendant deux périodes la présence d'un lac dans la vallée, profond de 4 à 9 m, un premier lac pendant le MSA et un second entre 23 000 – 22 000 ans BP.

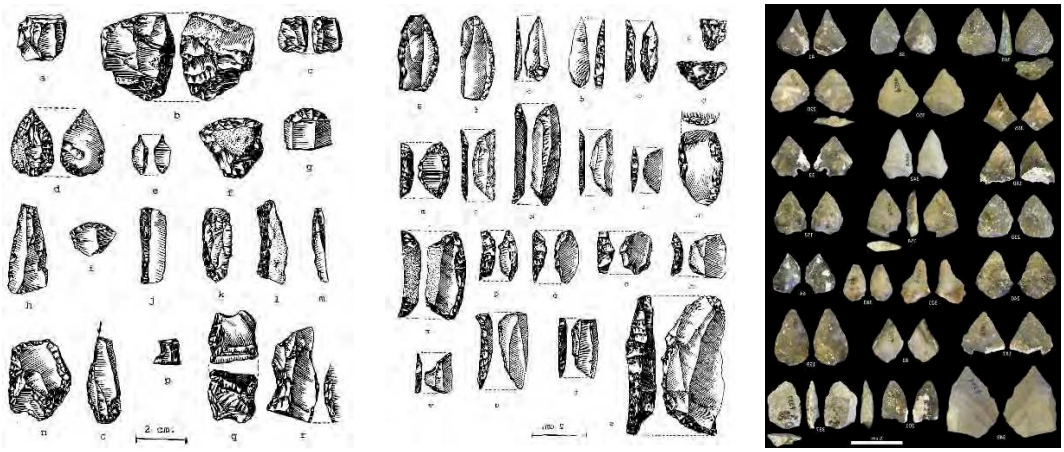


Figure 883 Planches des outils lithiques LSA et MSA trouvés à Gi (Yellen et Brooks, 1988 ; Lombart et Churchill, 2022).

[18] Yellen et Brooks (1987) ont aussi fouillé dans le porche sud de la grotte de Gcwihaba.

Level	No.	Material	Apparent radiocarbon years before present
Unit 1A	SI-4098	charcoal	110±50
	SI-4091A	carbonaceous soil coarser than 125 microns	495±45
	SI-4091C	carbonaceous soil finer than 125 microns	810±60
Unit 2B	SI-4090	limestone	23,980±590
	SI-4647	limestone	22,250±290
Unit 3	SI-4089	limestone	10,255±80
	SI-4648	limestone	31,470±1,010
Unit 4	SI-4097	ostrich egg shell	>42,000
	SI-4094	ostrich egg shell	>40,000
	SI-4095	ostrich egg shell	>43,000

[a] Dates provided by Robert Stuckenrath, Smithsonian Radiation Biology Laboratory.

Figure 884 Datations (Source : Helgren et Brooks, 1983)

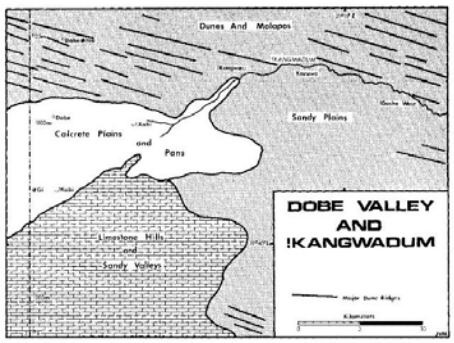


Figure 2. Dobe Valley and Kangwadum.

Figure 885 Calcrètes et pans à Gi (Source : Helgren et Brooks, 1983).

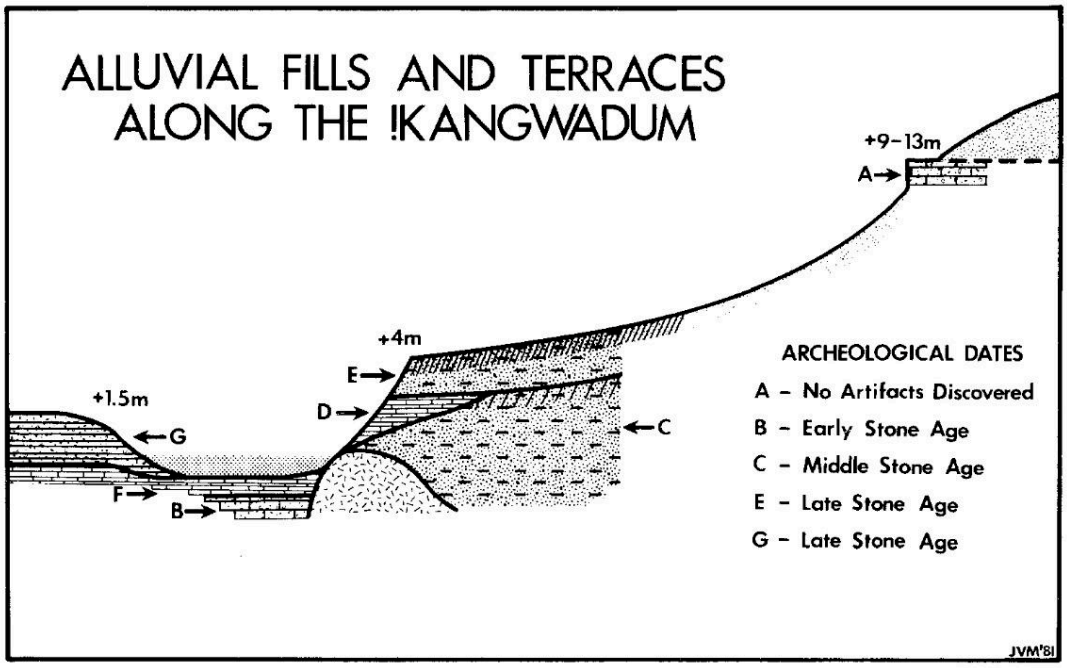


Figure 886 Relation entre les artefacts lithiques et les paléo-nivaux de lac (Helgren et Brooks, 1983).

4.7.2.4. Les chutes de N'gonye

Des artefacts du MSA ont été découverts par Clarke en 1950 (Moore *et al.*, 2007, p.327) dont ce biface *Sangoan* du début du *Middle Stone Age*, pris dans des ferricretes au niveau des chutes de N'gonye dans le cours supérieur du Zambèze (Figure 887).



Figure 887 Biface Sangoa *à N'gonye (Cotterill, 2006, p.188) (Source : Northern Rhodesia Information Department).*

4.7.2.5. A Okwa

Des outils lithiques ont été trouvés dans cette région et des prospections sont menées par Mooketsi C. et Michalec G. (https://uwr.edu.pl/en/archaeological-research-in-africa/). Nous présentons cette région carbonatée, potentiellement karstique, plus loin (p.987).

4.8. SYNTHESE ET CONCLUSION DE L'ETUDE DES KARSTS DU NORD-OUEST DU BOTSWANA

Avant de commencer, nous pouvons préciser qu'aucun hominine n'a encore été découvert au Botswana. Cependant des outils lithiques oldowayens ont été trouvés à Makgadikgadi, à Orapa, dans une mine (Walker et Segobye, 2001 ; Walter In Prep) et dateraient de l'*ESA* entre -3.4 Ma et -1.7 Ma (De Wit, 2018). C'est un argument de plus en faveur de la potentielle présence des hominines dans cette région. D'autres éléments vont dans cette direction : la présence de l'eau et d'une faune passée aquatique.

Le gisement de Gi au nord des Aha Hills a révélé du LSA et MSA (Helgren et Brooks, 1983) (p.872).

Un crâne de primate a été découvert bréchifié et concrétionné dans la grotte de *Bone Cave*, à Koanaka Hill (K2), en 2012. La datation d'une des concrétions de la grotte indique un âge supérieur à 317 000 ± 114 000 ans (soit entre - 431 000 et - 203 000 ans) (Williams *et al.*, 2012).

La première découverte en 1971, puis en 1988, ont révélé des brèches riches en microfaune (rongeurs) trouvées en surface de la colline C à Gcwihaba qui dateraient entre -3.2 et - 2.6 Ma. Ces sédiments correspondent à des remplissages karstiques, c'est-à-dire qui se sont déposés à l'intérieur de cavités, qui aujourd'hui sont décapitées par l'enfoncement de la surface topographique par érosion (Pickford et Mein, 1988 ; Pickford, 1990 ; Pickford *et al.*, 1994a et b.

D'autres éléments, d'ordre géologique, comme des dépôts calcaires lacustres, subhorizontaux, riches en diatomées, dont des foraminifères benthiques, qui vivent dans les eaux de grande profondeur indiquent que la région a été envahie par l'eau.

Trois causes principales, et pouvant être concomitantes, peuvent expliquer cette augmentation du niveau de base :

- de fortes précipitations en amont sur la Namibie et l'Angola (phase pluviale). Les bassins versants sont aujourd'hui érodés.

- un blocage des écoulements au niveau de l'exutoire en aval, avec la présence de paléolacs comblant le Rift de l'Okavango ;

- une cause tectonique avec la mise en place du Rift impliquant un *uplift* du horst où sont situées les grottes.

La vallée actuelle de Gcwihaba a été creusée par l'eau dans des dépôts lacustres anciens datés de 11 430 ± 60 ans BP (Robbins *et al.*, 1996). Une ancienne rivière coulait dans ce talweg, aujourd'hui à sec, comme le soulignent les alluvions de quartz blanc conservées. À cette époque, des hommes préhistoriques fréquentaient l'entrée sud de la grotte de Gcwihaba, comme le montrent les outils lithiques et les perles en coquille d'autruches (Yellen *et al.*, 1987).

Aujourd'hui, cette vallée sépare :

- en rive droite, les grottes de Gcwihaba et Dimapo ;
- et la grotte de Wadum et la colline C situées en rive gauche.

Nous avons étudié et prospecté ce secteur. Nous avons montré le lien entre la karstification des collines (vidange du fantôme *per descensum*) et le creusement de la vallée incisée que révèle le forage n°11471A (données issues de Mc Donald (2008) et Bruchs (2008)). La base de cette vallée incisée est aujourd'hui située à -144 m de profondeur (1008-144 = 864 m MNT Jaxa) (Figure 754 p.758). Sa présence indique une importante phase d'incision régionale que nous essayerons de corréler avec la vidange des fantômes de roche (karstogenèse) et la phase régressive qui assèche le Paléolac Deception, à 1000 m d'altitude en paléolac Makgadikgadi, à 950 m d'altitude (Moore et Larkin, 2001 ; Cotterill, 2006 ; Huntsman-Mapila, 2006 ; Mc Farlane et Eckardt, 2008 ; Burrough *et al.*, 2009 ; Fierens, 2019, Moore *et al.* 2012, 2022 ;) qui se serait produite entre -2.5 à -1.5 Ma (Royer 2020) ou entre 1.5 et 400 000 ans (selon la profondeur du paléolac).

Les missions archéologiques menées par Laurent Bruxelles dans ce secteur depuis 2015 (p.102 et Figure 82, Figure 83, p.105) ainsi que les trois missions auxquelles nous avons eu la chance de participer en 2021, 2022 et 2024, ont permis de mieux comprendre les paléoenvironnements et les conditions de dépôts fossilifères dans les grottes de ce secteur (Bruxelles *et al.*, 2016, 2019 ; Dandurand *et al.*, 2019 ; Fourvel *et al.*, 2022 ; Linchamps *et al.*, sous presse)

Notamment grâce :

- aux outils de la géomatique qui ont permis d'étudier les formes du relief (géomorphologie) ;
- à la modélisation 3D des réseaux souterrains (Kim Genuite) qui ont permis de déterminer le rôle de la fantômisation dans la karstogenèse et donc le rôle des variations des niveaux de base et notamment la vidange des fantômes de roche per descensum (modèle du Cradle of Humankind, cf. chapitre 2).
- aux prospections géologiques sur le terrain qui ont permis de trouver et caractériser les dépôts lacustres résiduels présents sur les grandes surfaces planes situées entre les dunes de sables éoliens du Kalahari ;

- aux fouilles paléontologiques qui ont permis l'identification de faunes caractéristiques de certains types d'environnement aquatique (Pickford, 1990 ; Robbins *et al.*, 1996 ; Linchamps *et al.*, sous presse).

Dès l'établissement, en 2021, des cartes géomorphologiques inédites que nous avons réalisées en préparation de la première mission à laquelle nous avons participé, nous avions été intrigués par :

- l'interruption brutale des longues dunes de sables éoliennes, de plus de 50 km de long, qui recouvrent le horst à l'ouest de la faille de Gumare ;
- qui coïncidait avec la présence de vastes surfaces planes situées dans les interdunes de sables et qui sont recouvertes de sables blancs.

Nous venions d'identifier les indices géomorphologiques et sédimentologiques qui indiquaient la position des paléolacs aujourd'hui asséchés. Les calcaires lacustres ont presque tous été érodés en sable blanc.

À cela s'ajoute la faune trouvée dans les grottes fouillées, comme à *Bone Cave* à *Koanaka Hills* où des os de poissons ainsi que des os de plus de 25 espèces d'oiseaux, dont des taxons étroitement liés à l'eau tels que des canards (Anatidés) et une grande diversité de limicoles (*Charadriiformes*) suggèrent l'existence dans le passé d'un système hydrique complexe et d'une vaste étendue d'eau (sous presse). Effectivement, l'analyse des paysages de Koanaka, notamment les paléosurfaces, et l'étude des sédiments anciens vont clairement en faveur de la présence de vastes étendues d'eau fossiles.

Est-ce que le niveau de grottes, à 1005 m d'altitude (que nous avons décrites p.529), est corrélable au niveau du paléolac Deception à 1000 m d'altitude ?

Sous les sables du Kalahari sont présents des calcaires lacustres subhorizontaux notamment au niveau des limites des surfaces aplanies à 1000 m, au pied des collines karstiques de Gcwihaba et de Koanaka. On y trouve des gastéropodes. Sont-ils lacustres ou terrestres ? Quel âge ont ces dépôts ?

Le contexte général montre donc que le bassin versant du paléo-Okavango était différent de celui d'aujourd'hui. Nous nous poserons la question lorsque nous chercherons à comprendre la provenance de quartz blancs qui constituent les alluvions allochtones de la vallée de Gcwihaba (*cf.* p.723).

Existe-il une correspondance entre les altitudes des galeries des grottes sur le horst de l'Okavango et les altitudes des paléolacs dans le graben, comme synthétisée sur les profils morphokarstiques suivants (Figure 888 à Figure 893).

L'altitude de l'entrée de la grotte de Waxhou North est de 1177 m et cet aven atteint 70 m de profondeur. Le haut de la colline de K1 est mesuré sur le MNT JAXA à 1050 m d'altitude tandis que sa base est à 1010 m. L'altitude du tubage pour rentrer dans la cavité est de 1058 m (MNT JAXA). La profondeur du tube à laquelle on atteint les galeries subhorizontales est de 50 m. L'altitude des galeries est donc située à 1008 m. Le haut de la colline de K2 est mesuré sur le MNT JAXA à 1055 m d'altitude tandis que sa base est à 1005 m. L'altitude de l'entrée de la grotte de *Bone Cave* est de 1045 m (MNT JAXA). La profondeur du réseau est de 40 m. L'altitude de la salle du fond, qui est subhorizontale est donc de 1005 m d'altitude. C'est l'altitude des galeries de la grotte de Gcwihaba situées à 22 km. Le haut de la colline de K3 est mesuré sur le MNT JAXA à 1071 m d'altitude tandis que sa base est à 1030 m. L'altitude de l'entrée de la grotte de *Blue Cave* est de 1070 m (MNT JAXA). La base des galeries des grottes se situe 40 m plus bas, vers 1030 m d'altitude.

4.8.1. Profils morphokarstiques du Rift de l'Okavango

La position du profil morphokarstique du Rift de l'Okavango (Figure 888) est indiquée en noir sur la carte ci-dessous. Nous allons ajouter au fur à mesure des figures (Figure 888 à Figure 893) des données stratigraphiques comme le paléoniveau du paléolac à 1000 m, les forages de Gcwihaba projetés, l'incision de la vallée de Gewidum et les forages projetées de Koanaka Hills. Ces profils permettent de visualiser et de reconstruire l'évolution des paysages.

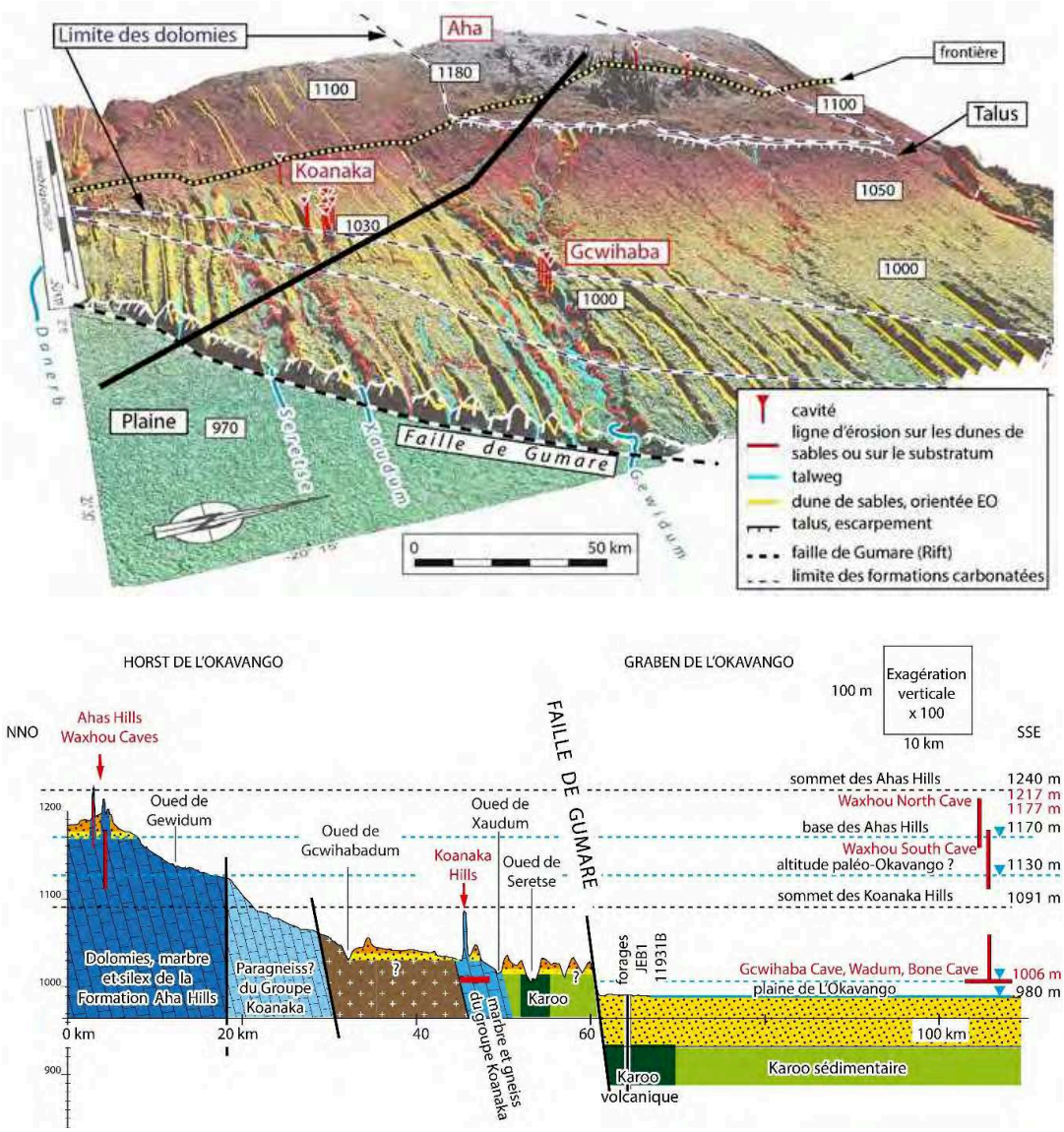


Figure 888 Profil morphokarstique actuel du Rift de l'Okavango.

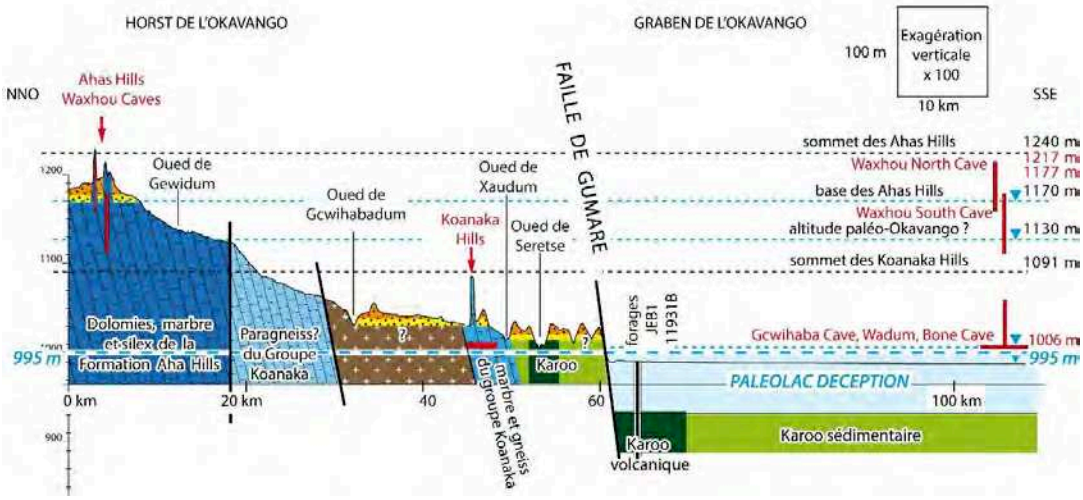


Figure 889 Position du paléolac Deception à 995 m.

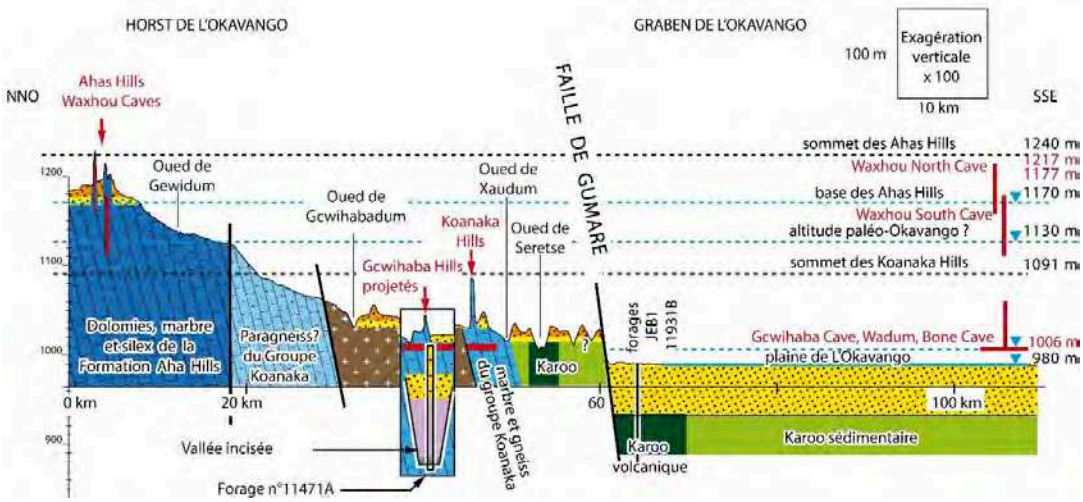


Figure 890 Ajout du karst de Gcwihaba Hills.

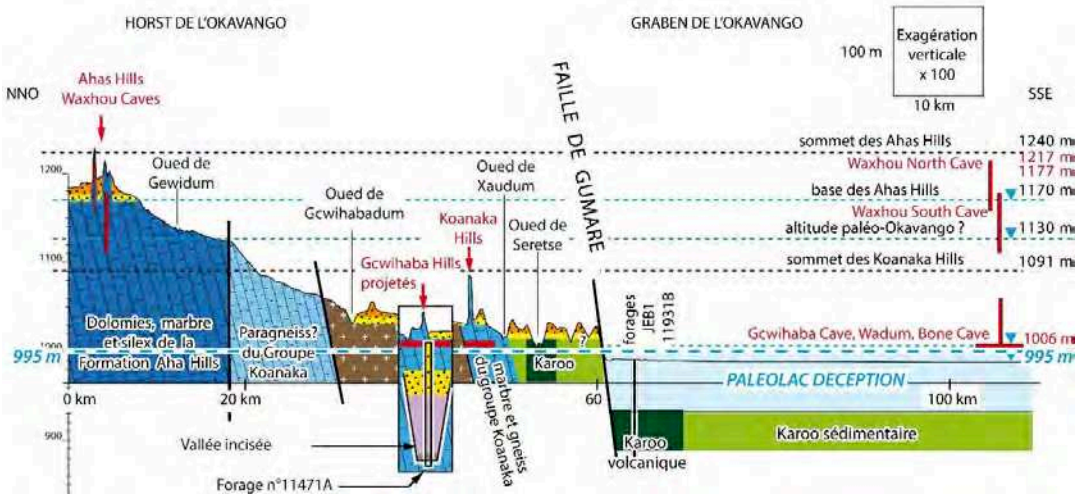


Figure 891 Position du paléolac Deception à 995 m.

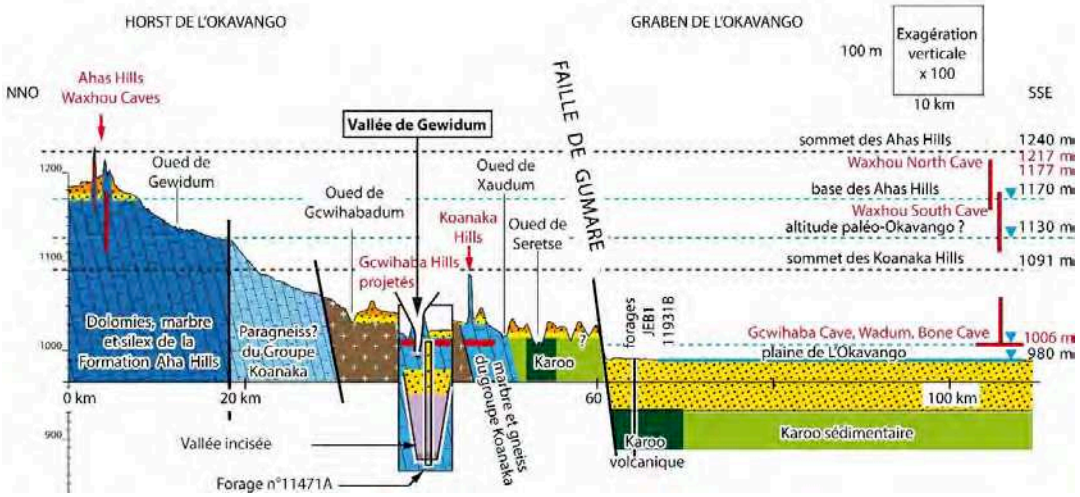


Figure 892 Ajout de la vallée actuelle de Gewidum à Gcwihaba (-7 m).

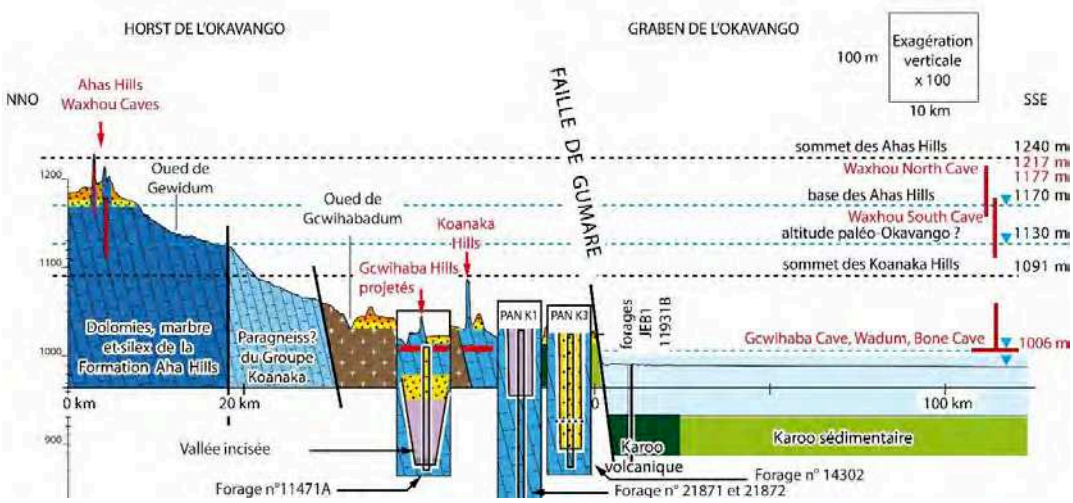


Figure 893 Ajout des forages des paléopans de Koanaka (K1 et K3).

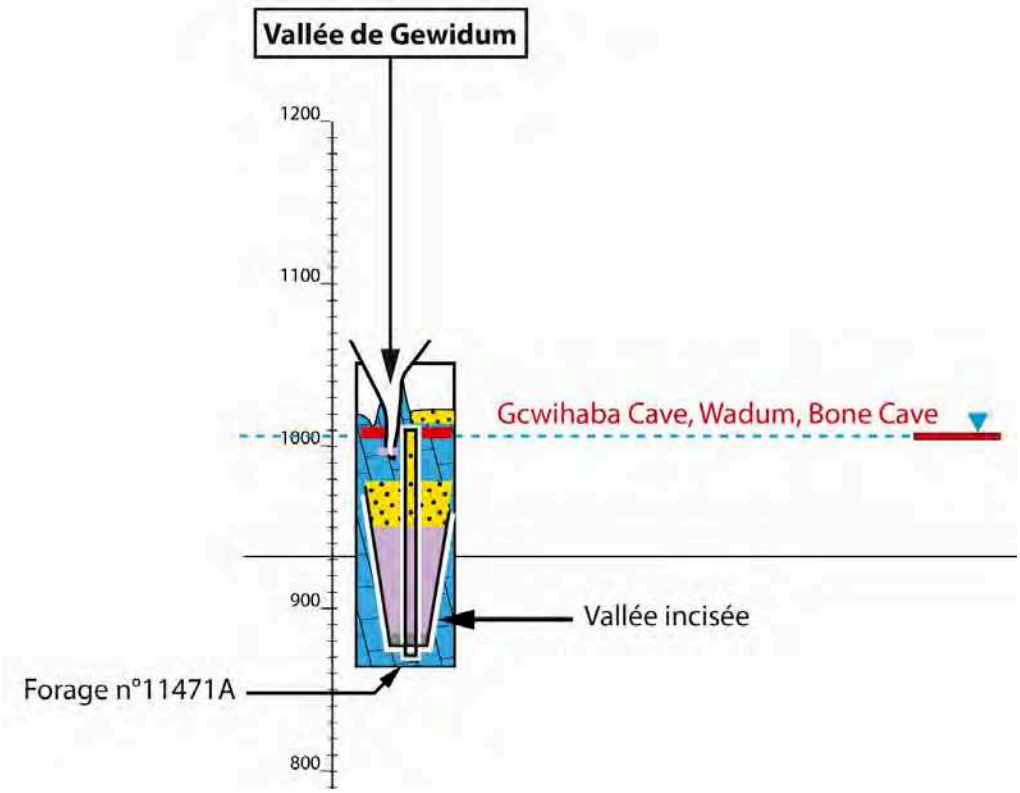


Figure 894 Détail de la vallée actuelle de Gewidum et de la vallée incisée.

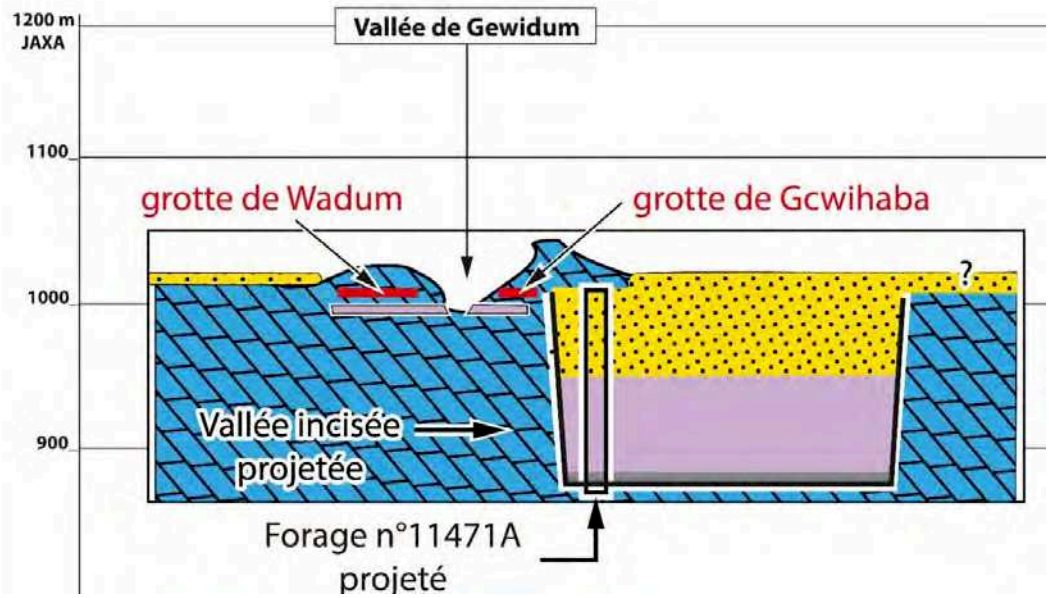


Figure 895 Schéma de la vallée incisée et niveau d'étagement des galeries des grottes de Gcwihaba (Voir aussi Figure 754 à Figure 760 p.758).

4.8.2. Modèles géométriques et sédimentaires des brèches

4.8.2.1. Modèle prenant en compte la karstification

Ici en synthèse, nous proposons d'intégrer au modèle géométrique et sédimentaire des brèches, décrit précédemment (p.527), les phénomènes de karstification des dolomies (Figure 897), ainsi que les données paléoenvironnementales associées à la présence de paléolacs (Figure 899).

L'objectif est d'expliquer la coexistence de plusieurs types de brèches observés au niveau des collines du nord-ouest du Botswana. Le dernier schéma permet notamment de distinguer :

- un paléokarst à remplissage sableux, illustré par exemple du *Corridor South* de Gcwihaba (décrit p.568) ;
- des paléokarsts à brèches pédologiques, tels que celui de l'aven sur le versant ouest de la colline de Gcwihaba (décrit p.566) ;
- et (3) des cryptokarsts encore enfouis sous les formations du Kalahari et révélés par forage.

Ce modèle permet de localiser les processus en jeux sur les fouilles que nous effectuons au pied des collines au Botswana, telle que la fouille à l'est de la colline de Bone Cave et celle au sud de la colline K1 à Koanaka montrant des conduits verticaux de crypto-altération et crypto-corrosion induits par d'anciennes couvertures sédimentaires au toit des remplissages paléokarstiques (stalagmites et brèches ossifères). Le contexte sédimentaire de ces fouilles est illustré par le cas du paléokarst n°2 de la dernière étape du modèle et indiqué par un cadre noir (Figure 897).

Commentaires des étapes :

Étape n°1 : fin du Crétacé et au début du Tertiaire. Les fantômes de roche sont déjà présents et peut-être déjà quelques cavités.

Étape n°2 : abaissement de la topographie lié à l'altération et à l'érosion et bréchification pédologique au toit des dolomies et au toit des cavités (ou du fantôme) et au contact du sol.

Étape n°3 : poursuite de l'abaissement de la topographie et la production de brèches pédologiques. On a conservation des brèches pédologiques et des sables au niveau des paléokarsts.

Étape n°4 : poursuite de l'érosion des couvertures et mise à l'affleurement des paléokarsts.

Étape n°5 : paysage actuel des collines du nord-ouest du Botswana.

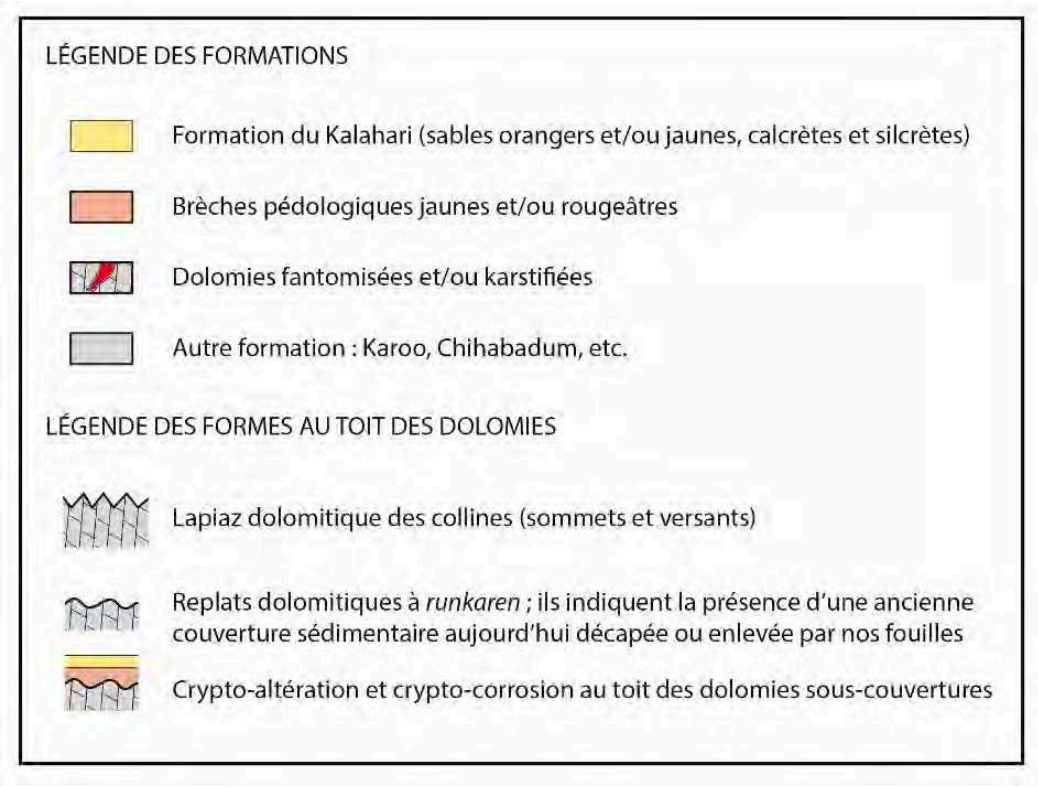


Figure 896 Légende de la figure suivante.

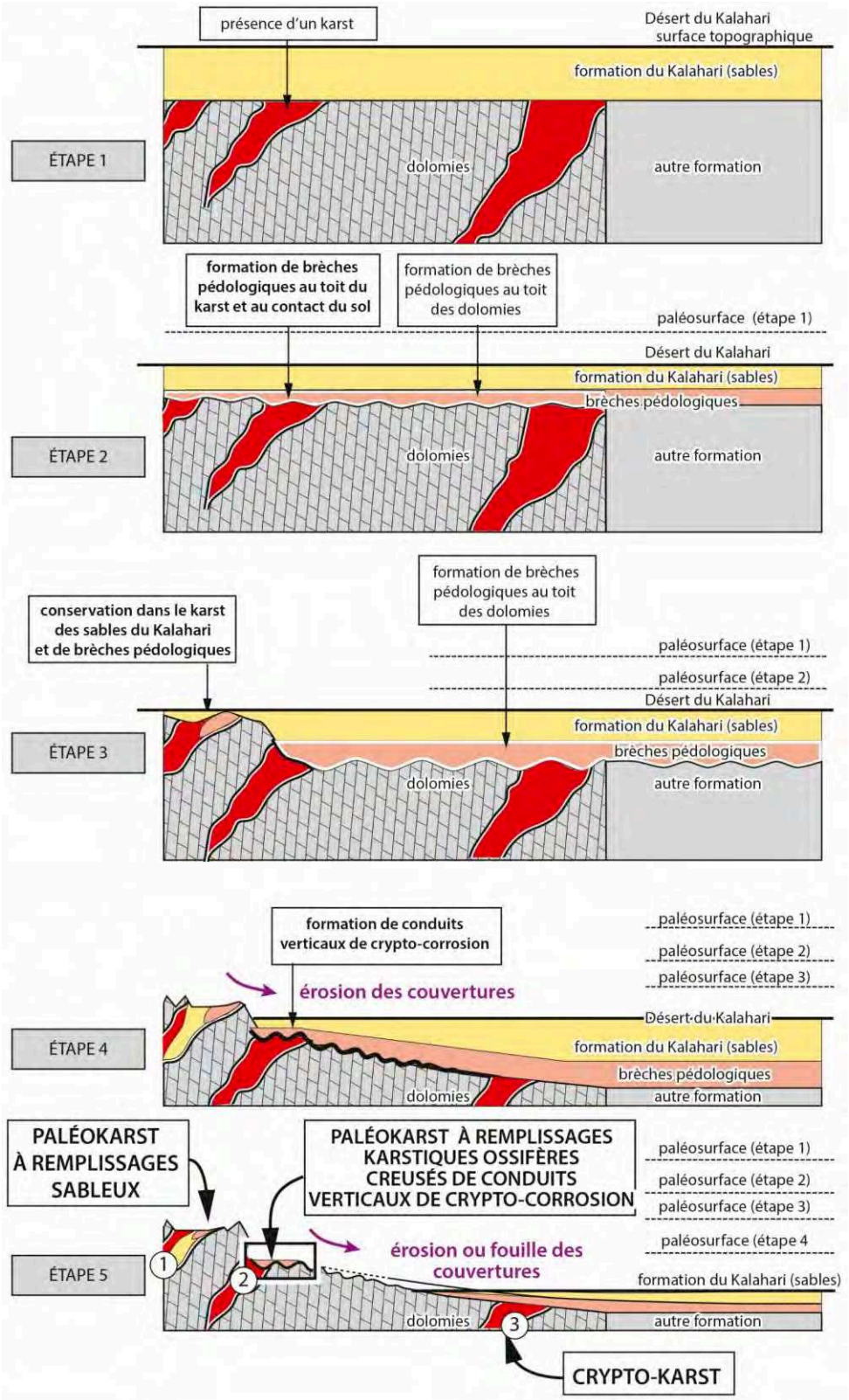


Figure 897 Modèle géométrique et sédimentaire des différents karsts (1 : paléokarst à sables, 2 : paléokarst à brèches pédologiques et 3 crypto-karsts) observées au Botswana.

4.8.2.2. Modèle prenant en compte les paléoenvironnements

Rajoutons les données paléoenvironnentales présentées dans ce chapitre. Ce modèle permet entre autres de comprendre la présence des collines du nord-ouest du Botswana.

Ce modèle permet de donner des arguments au contexte paléoenvironnementale pour expliquer la présence d'os de poissons et de fossiles de faunes aquatiques conservés dans la grotte de *Bone Cave* et dans une moindre mesure dans celle de Gcwihaba.

Pour cette dernière, la présence d'une vallée pourrait indiquer qu'une rivière était présente et expliquer par ce fait la présence de fossiles d'une faune aquatique (Robbins et al., 1996) mais n'explique pas la présence des foraminifères benthiques. Tandis qu'à Koanaka aucune vallée n'existe.

Ce modèle explique la présence des collines et la présence des escarpements sur le pourtour des collines, comme K2 à Koanaka et il explique aussi la présence des brèches à clastes à la base.

Commentaire des étapes :

Étape 1 : fin du Crétacé et au début du Tertiaire. Les fantômes de roche sont déjà présents et peut-être déjà quelques cavités.

Étape 2 : abaissement de la topographie lié à l'altération et à l'érosion et bréchification pédologiques au toit des dolomies et au toit des cavités (ou du fantôme) et au contact du sol. Elle n'est pas nécessaire à la compréhension du modèle (sauf si on fait intervenir la fantômisation lors de cette étape).

Étape 3 : En phase climatique humide (pluvieuse) le Rift de l'Okavango est inondé et la bordure occidentale du horst est transgressée par les eaux du lac, provoquant une surface d'érosion *(wavecut surface, wavecut tidal ou surface de ravinement)* (p.722) sur laquelle viendront ensuite se déposer des dépôts de calcrètes à clastes de calcrètes antérieures, de calcaires à foraminifères benthiques, des calcaires coquilliers, etc.

Étape 4 : L'eau se retire pendant les phases climatiques sèches et arides, la sédimentation chimique prend le dessus et la région connait la précipitation de vastes surfaces de calcrètes et de silcrètes.

Étape 5 : paysage actuel des collines du nord-ouest du Botswana.



Figure 898 Légende de figure suivante.

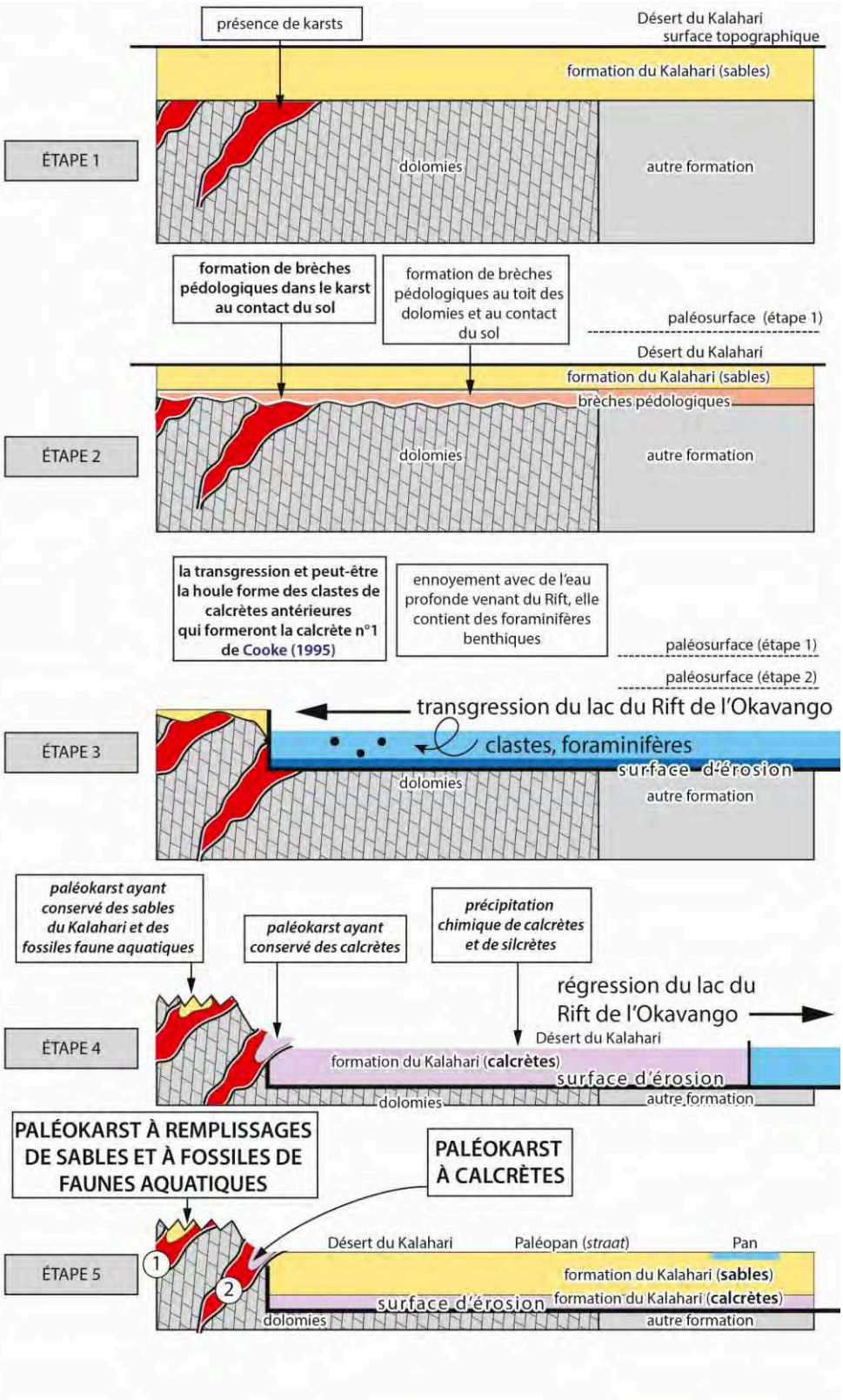


Figure 899 Modèle géométrique et sédimentaire prenant en contact les paléoenvironnements aquatiques (lacustres), notamment la surface d'érosion transgressive.

4.8.3. Analyse des données profondes au niveau du lac Ngami

Les forages décrits à Gcwihaba, Tsodilo Hills et Ngami traversent des niveaux de calcrètes. Ceux de Tsodilo et Ngami présentent une puissance comprise entre 10 et 60 m et correspondent à la **formation de calcrète de Nxau-Nxau** (Linol, 2013). Le forage de Gcwihaba a rencontré 66 m d'épaisseur de calcrètes (p.752) et les forages alentours environ une vingtaine (Figure 763 p.764) et ceux du pan de Koanaka font 55 et 73 m d'épaisseur (p.801). Est-ce que ce sont les mêmes niveaux de calcrètes ? Nous avons indiqué en définition que les calcrètes se forment généralement par accumulation de l'eau météoritique au niveau des pans et évaporation. Des études complémentaires devront être entreprises, notamment si les niveaux de calcrètes sont décalés par la faille de Gumare (Figure 900) ça voudrait dire que les calcrètes en profondeur au niveau des forages sur le horst et celles dans le graben sont très anciennes et anté-rift.

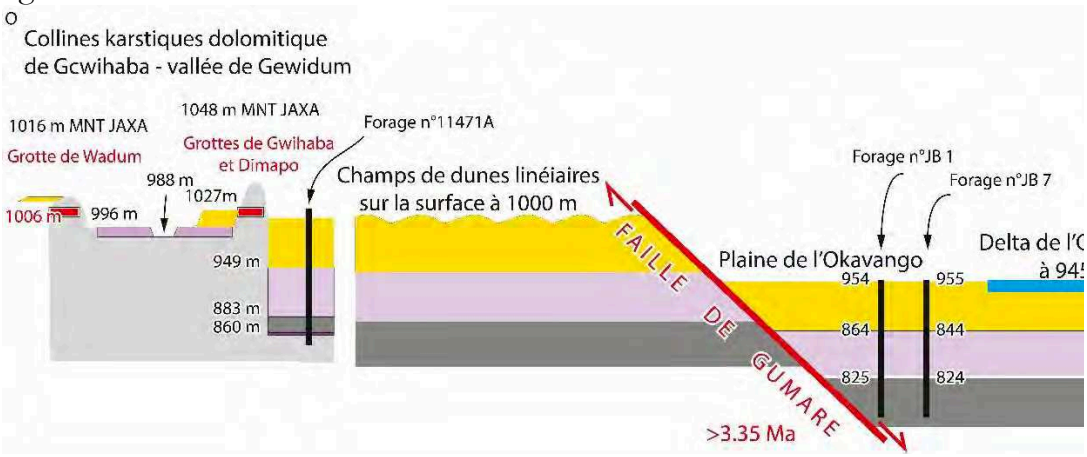


Figure 900 Corrélations schématiques (et sans échelle) entre la surface karstique à 1000 m (collines de Gcwihaba, vallée de Gewidum) recouverte par les dunes de sables et les dépôts lacustres (calcrètes) des forages JB1, JB7et JEB 1 de la plaine de l'Okavango.

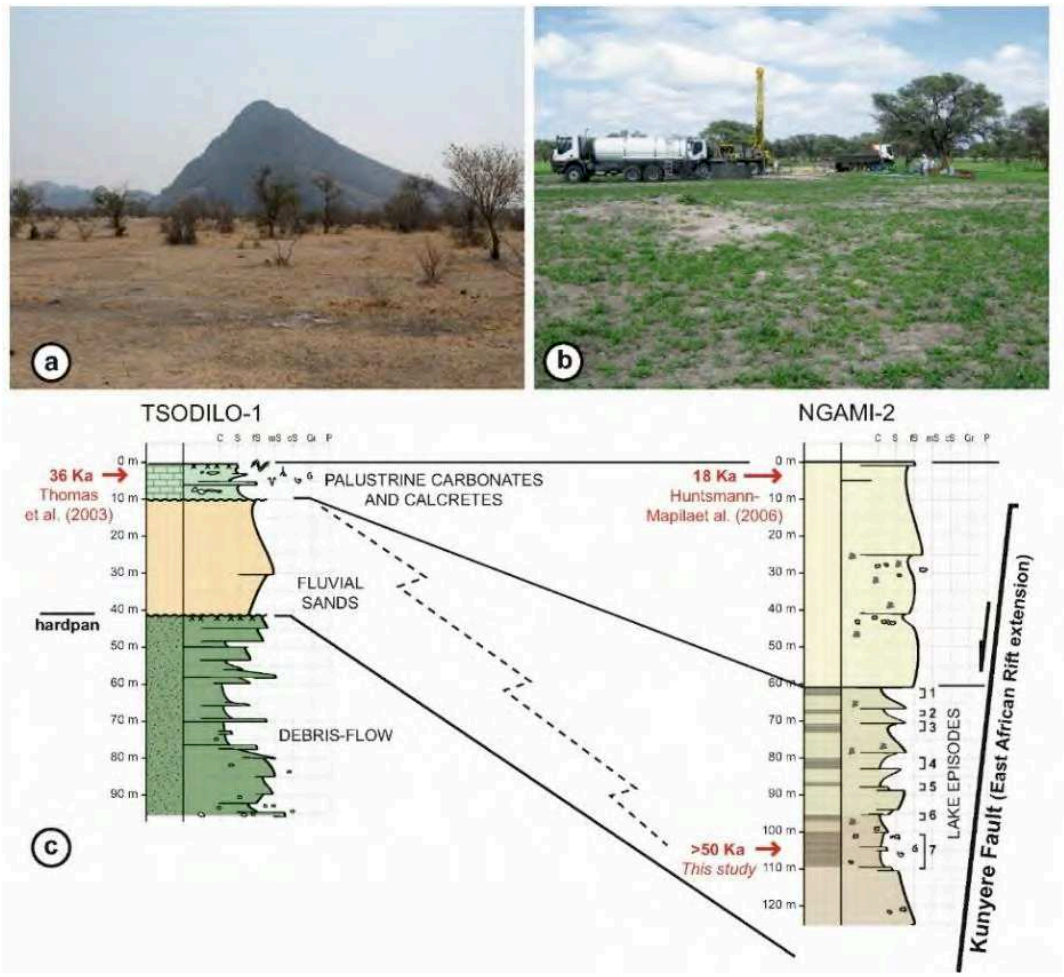
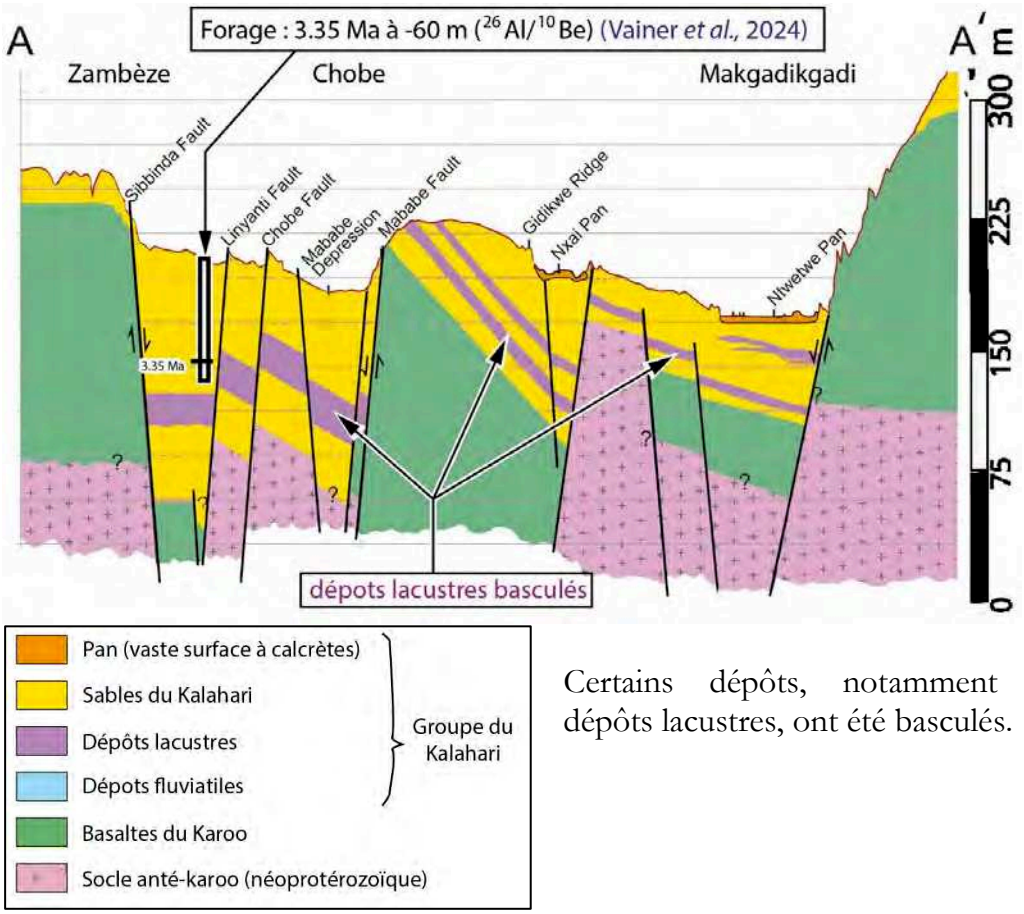


Figure 901 Coupe stratigraphique entre les deux forages selon Linol et al. (2015) (Source : Linol et al., 2015).

4.8.4. Comment interpréter les niveaux lacustres basculés dans le Rift ?

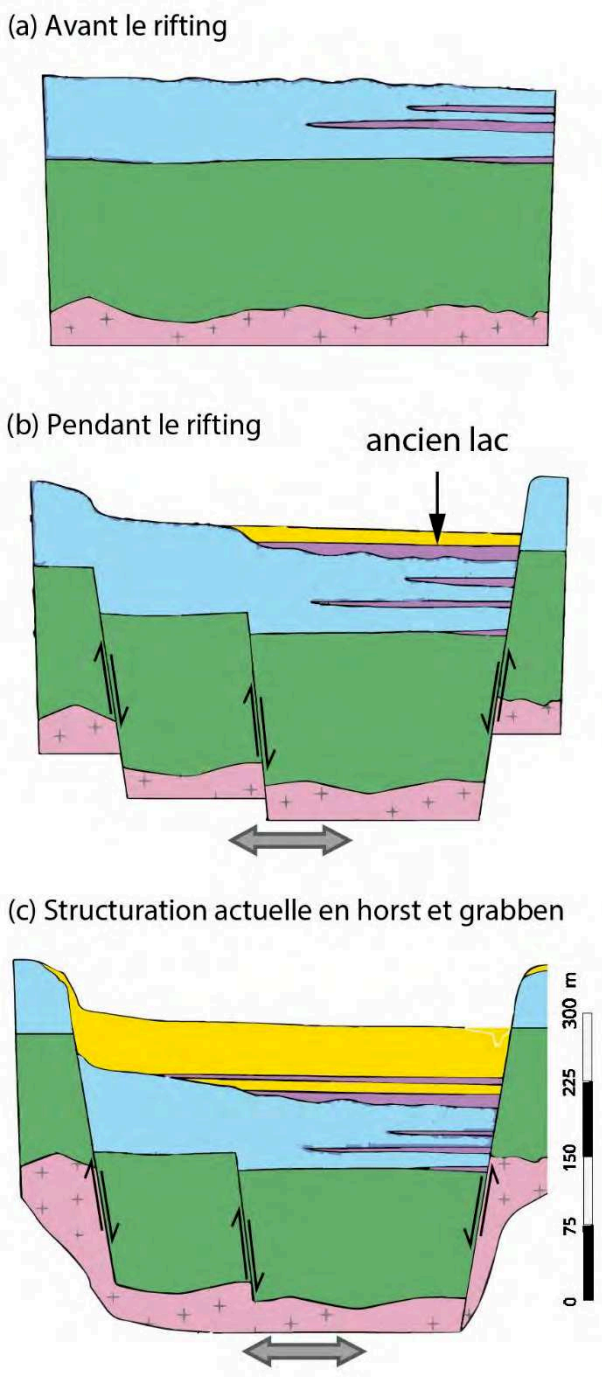
La coupe géologique ci-dessous (Figure 902), réalisée par Bäumle *et al.* (2019) (AA') à travers le **Rift de l'Okavango, et** localisée sur la Figure 848, montre des dépôts lacustres situés en profondeur (en violet) et leurs basculements. Cette interprétation irait dans le sens de dépôts de calcrètes très anciens, antérieurs au rift.

Le forage, réalisé à travers le cône alluvial du Cuando, a permis de dater des échantillons situés à 60 m de profondeur à 3.35 Ma (nucléides cosmogéniques terrestres $^{26}Al/^{10}Be$) (Vainer *et al.*, 2024). Le forage n'atteignant pas le plancher du Rift, ce dernier est donc antérieur à cette date.



Certains dépôts, notamment les dépôts lacustres, ont été basculés.

Figure 902 Coupe géologique de Bäumle (AA') à travers le Rift de l'Okavango, localisée sur la Figure 848 (Pas à l'échelle et profil topographique exagéré 500 fois)(Source : Bäumle et al., 2019, Fig.1, modifié).



Les coupes géologiques suivantes (Figure 903) montrent l'évolution du Rift de l'Okavango (a) du Pliocène ou Pléistocène récent, (b) pendant le Pléistocène récent à moyen et (c) actuellement selon Bäumle *et al.* (2019, Fig.13, modifié).

Les grabens sont comblés de plusieurs centaines de mètres de sédiments du groupe du Kalahari (défini p.507) dont des niveaux lacustres (en violet) qui sont intercalés entre des dépôts fluviatiles (en bleu) et les sables du Kalahari (au jaune).

Le système de failles normales compartimente le rift et fait varier les épaisseurs de sédiments.

Figure 903 Coupe géologique conceptuelle de l'évolution du Rift de l'Okavango montrant des dépôts lacustres en profondeur (en mauve) (Source : Bäumle et al., 2019, Fig.13, modifié).

Ces coupes permettent de reconstituer l'établissement des paysages étudiés.

4.9. CONCLUSION

Plusieurs éléments indiquent la présence de paléoenvironnements lacustres dans les secteurs de *Gcwihaba Hills* et *Koanaka Hills*, et plus généralement au niveau du horst dolomitique occidental du Rift de l'Okavango. Ces paléoenvironnements présentent de plus en plus les caractéristiques géométriques, sédimentaires et paléontologiques d'un paléolac, comme le suggèrent les épaisseurs de calcrètes rencontrées par les forages, atteignant jusqu'à 70 m à Koanaka. Comment expliquer une telle épaisseur de calcrètes s'ils se sont formés uniquement par évaporation de l'eau météoritique ?

Plusieurs arguments de nature différente convergent :

La **paléontologie**, avec les ossements fossiles que nous livrent nos fouilles à l'intérieur de la grotte de *Bone cave*, révèle des ossements appartenant à des espèces aquaphiles ou quasi-aquatiques (oiseaux, rongeurs palmés, crabes et poissons) (Fourvel et , sous presse), alors qu'actuellement nous sommes en plein milieu du désert semi-aride du Kalahari.

La présence de **foraminifères benthiques** (micro-organismes aquatiques vivant dans de grandes tranches d'eau) trouvées en abondance (Robbins *et al.,* 1996) dans les calcrètes creusées par la vallée de Gewidum à Gcwihaba ne peuvent s'expliquer que par des inondations de haut niveau d'eau venant depuis l'aval, c'est-à-dire des inondations du lac situé dans le graben du Rift de l'Okavango et inondant le horst dolomitique. Pourquoi une rivière venant de l'Angola transporterait des foraminifères benthiques ? C'est d'ailleurs au sein de ces calcrètes selon Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975), que sont associés des alluvions de quartz blanc, que nous avons également retrouvées (Figure 713 p.723). Leur provenance reste à déterminer.

Les **morphologies** identifiées sur les MNT (lire Chapitre n°1 p.56). Nous avons repéré des interruptions brutales de certaines dunes de sables linéaires, pourtant longues de plus de 40 km, qui ne peuvent que s'expliquer par la présence d'étendues d'eau au moment de leur dépôt et de leur déplacement, empêchant ainsi leur accumulation. Ces dunes sont datées, nous le verrons de plusieurs millions d'années.

Dans le secteur de Koanaka Hills, la gravimétrie permet d'imager le toit des dolomies et révèle effectivement la présence d'une paléovallée (Figure 603 p.608). Sa présence suggère des phénomènes de régressions et de baisses du niveau de base dans le passé, probablement provoqués par des inondations du lac situé dans le graben de l'Okavango au niveau du horst dolomitique. Si tel est le cas, ces phénomènes expliqueraient aussi le débourrage des fantômes de roche à l'intérieur des massifs dolomitiques, préalablement fantômisés, et la formation des grottes.

Nous avons trouvé des calcaires coquilliers dans la vallée de Gewidum à *Gcwihaba Hills*, déjà signalés par Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975) sur leur carte géologique. Nous en avons également trouvé au pied de la colline K1 et au pied de la colline K2 à *Koanaka Hills*. Les faciès entre Koanaka et Gcwihaba présentent des différences : certains possèdent des ciments sombres riches en matière organique, tandis que d'autres des ciments clairs, plus cristallisés, et peut-être plus anciens. Des prospections complémentaires devront être menées, notamment dans le vallon de Gewidum à Gcwihaba, afin de mieux caractériser les quatre niveaux de calcrètes identifiés par Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975).

5. CHAPITRE 5 : SYNTHESE ZONEOGRAPHIQUE DES KARSTS D'AFRIQUE AUSTRALE

Nous avons présenté, à la fin du Chapitre n°1 (p.138), les différentes cartographies réalisées au cours de la thèse. Ces cartes ont ensuite été complétées par les données géologiques (Chapitre n°2, p.158). Nous avons ensuite présenté le karst du *Cradle of Humankind* (Chapitre n°3 p.268) afin de définir les critères de reconnaissance morphologique d'un karst fossilifère à Hominines, puis abordé les karsts du nord-ouest du Botswana (Chapitre n°4 p.473).

Nous présentons ici l'étude des karsts ou des karsts potentiels situés entre le *Cradle of Humankind* et le Rift est-africain, afin de répondre à notre problématique de recherche exposée en introduction (p.1).

5.1. PRESENTATION (BLOCS 2.5D)..... 901

5.2. GRANDS PROFILS MORPHOKARTIQUES DES KARSTS ETUDIES EN AFRIQUE AUSTRALE..... 903

5.3. LOCALISATION DES KARSTS ET KARSTS POTENTIELS ETUDIES ET DES PROFILS MORPHOKARSTIQUES 905

5.4. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS ENTRE LE CRADLE OF HUMANKIND (N°1 SUR LA CARTE) ET LE RIFT EST-AFRICAIN 906

5.5. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS DANS LES FORMATIONS CARBONATEES DU BASSIN DU TRANSVAAL ENTRE L'ORANGE ET LE LIMPOPO (AFRIQUE DU SUD ET BOTSWANA) 908

5.6. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS DANS LES DOLOMIES PALEOPROTEROZOÏQUES EN DEHORS DU BASSIN GEOLOGIQUE DU TRANSVAAL..... 968

5.7. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS EN NAMIBIE..... 981

5.8. BASSIN DU KANYE 985

5.9. BASSIN DE PALAPYE 986

5.10. BASSIN D'OKWA 987

5.11. AU ZIMBABWE..... 989

5.12. EN ZAMBIE 995

5.13. AU MOZAMBIQUE..... 1003

5.14. AU MALAWI..... 1033

5.15. DANS LA REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO 1052

5.1. PRESENTATION (BLOCS 2.5D)

La carte en 2.5D ci-dessous (Figure 904) montre que l'Afrique australe est constituée du Plateau sud-africain, du Bassin du Kalahari (en orange), des grands bassins d'érosion des fleuves de l'Orange et du Vaal à l'ouest (Figure 905) et du Limpopo et du Zambèze à l'est (Figure 906).

On y distingue également le Grand Escarpement qui domine l'Océan Atlantique : le long de la côte namibienne, et l'Océan Indien : de l'Angola au Zimbabwe. Il forme la bordure orientale du Plateau sud-africain du côté de l'Océan Indien. Il est situé en retrait par rapport au littoral actuel, de 200 km environ. Les karsts étudiés dans cette thèse sont numérotés sur la vue 2,5D ci-dessous.



Figure 904 Les karsts étudiés en Afrique australe (Vue 2.5 D exagérée verticalement.

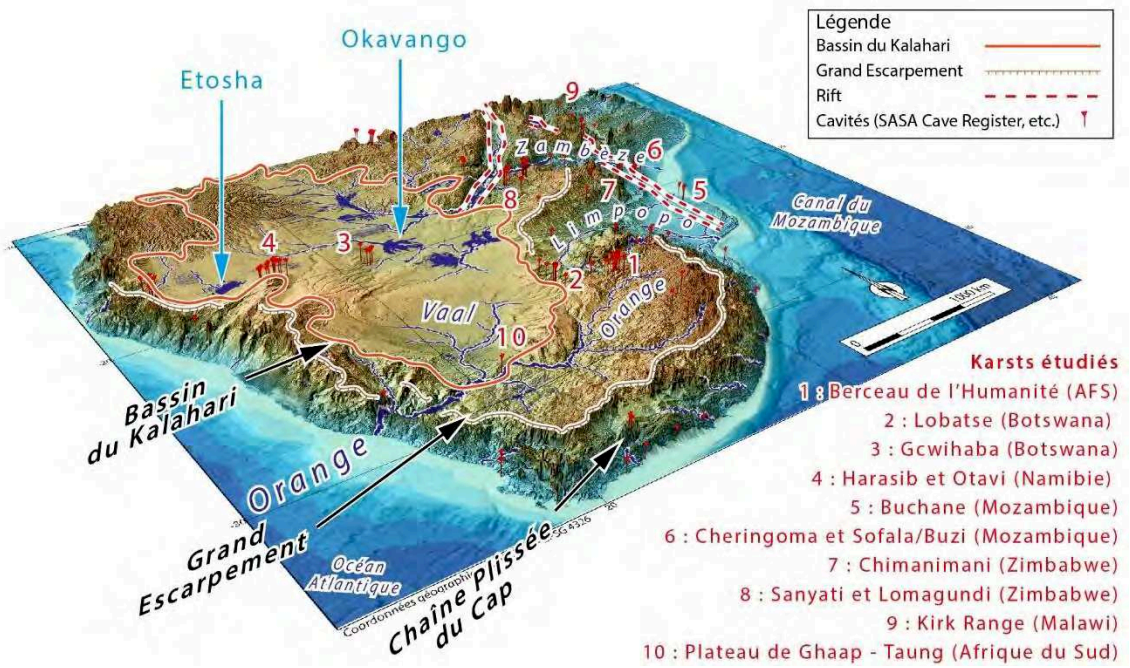


Figure 905 Cote ouest occupée par les grands bassins versants de l'Orange et le Vaal.



Figure 906 Cote est érodée par les fleuves du Limpopo et du Zambèze.

5.2. GRANDS PROFILS MORPHOKARSTIQUES DES KARSTS ETUDIES EN AFRIQUE AUSTRALE

Ces grands profils morphokarstiques (Figure 907) localisent l'altitude des différents karsts étudiés dans la thèse et l'altitude de la Surface Africaine que nous avons caractérisée dans le Cradle of Humankind dans le Chapitre n°1.

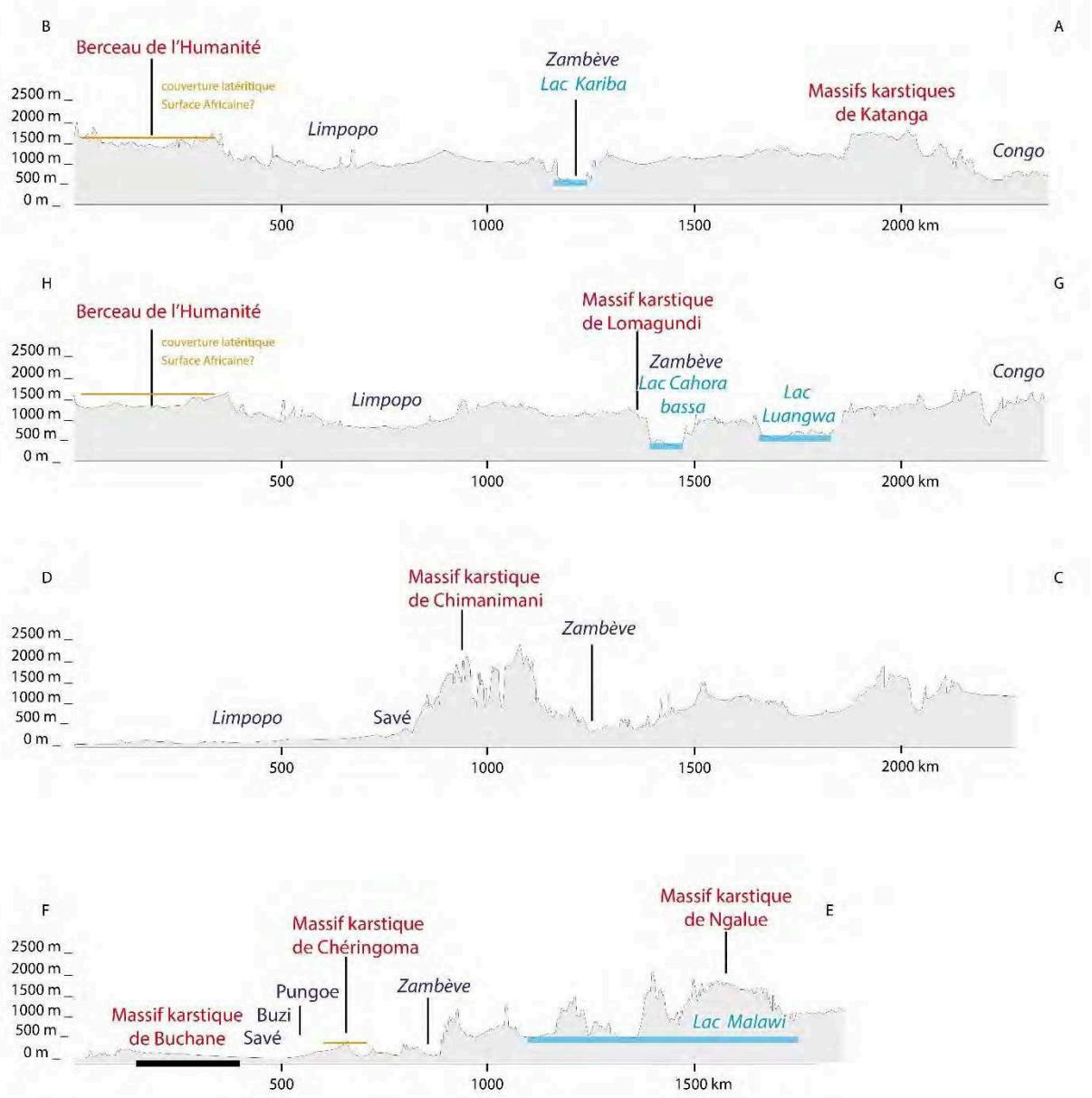


Figure 907 Grands profils morphokarstiques des zones étudiées en Afrique australe.

Ce grand profil morphokarstique (Figure 908) localise les karsts de Namibie (Otavi, Harasib), en lien avec le niveau de base de l'Océan Atlantique et les karsts du Botswana *(Aha Hills, Gcwihaba Hills et Koanaka Hills)*, en lien avec le niveau de l'Océan Indien avant de devenir le bassin endoréique de l'Okavango au Pliocène, décrit dans le Chapitre n°4 (p. 473).



Figure 908 Profil morphokarstique des karsts de Namibie et du Botswana.

L'ensemble des profils morphokarstiques décrits précédemment sont synthétisés sur cette figure, ci-dessous (Figure 909).



Figure 909 Profils morphokarstiques synthétiques des karsts de l'Afrique australe.

5.3. LOCALISATION DES KARSTS ET KARSTS POTENTIELS ETUDIES ET DES PROFILS MORPHOKARSTIQUES

Cette carte ci-dessous (Figure 910) localise les karsts et les karsts potentiels étudiés (cercles blanc) et la position des profils morphokarstiques réalisés (traits rouge et blanc) sur un fond hypsométrique et ombré où nous avons reporté les limites des bassins versants hydrographiques des grands fleuves d'Afrique australe, c'est-à-dire les limites des grands bassins d'érosion (traits bleu et blanc).

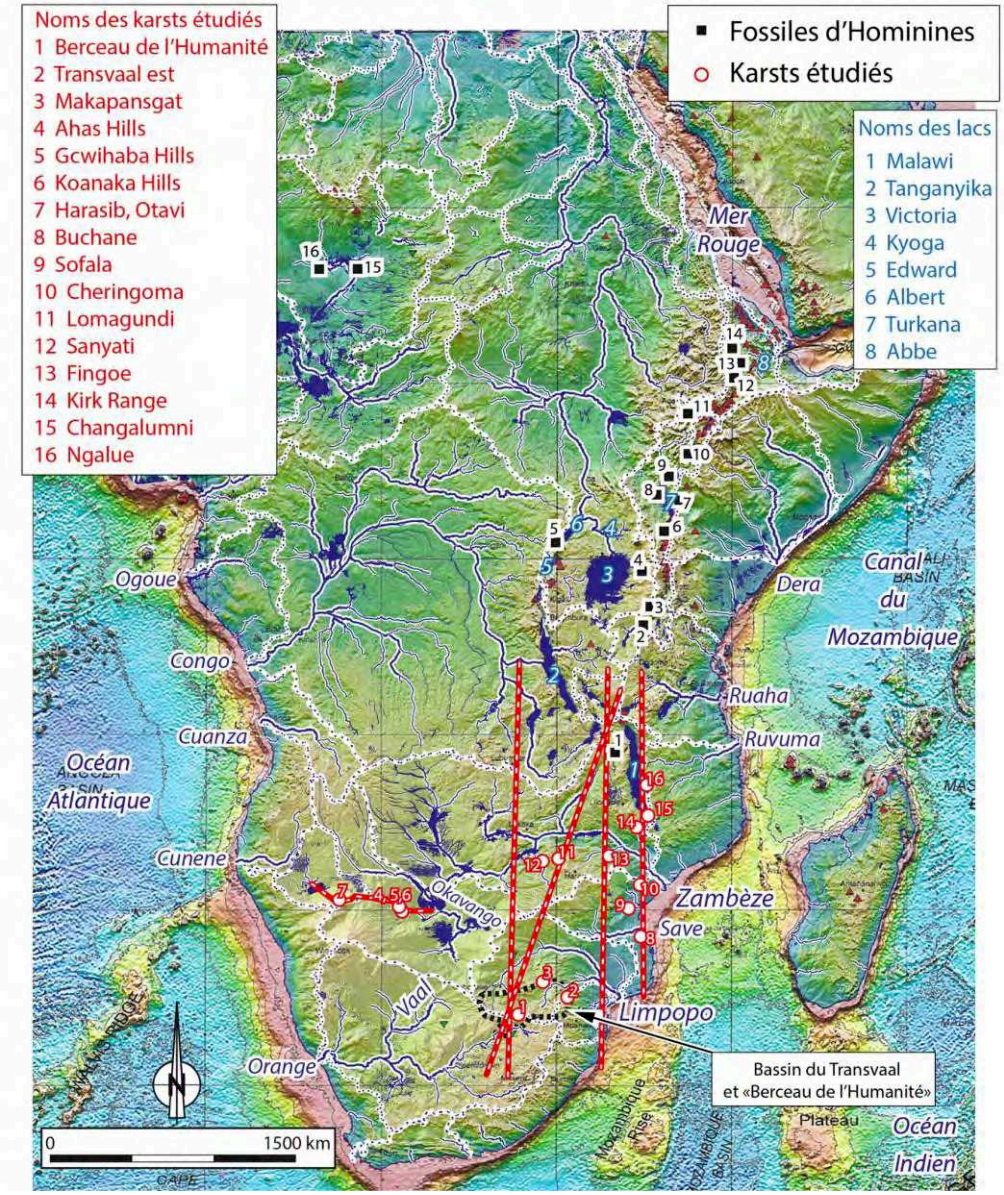


Figure 910 Karsts et karsts potentiels étudiés (cercles blanc) et grands profils morphokarstiques réalisés (traits rouge et blanc).

Sites paléoanthropologiques à fossiles d'hominines (carrés noir) du Rift est-africain : *1 Malema 2 Olduvai Gorge (Laetoli) 3 Peninj 4 Kanjera 5 Senga 5A 6 Lukeino Formation, Tugen Hills 7 Koobi Fora8 Turkana 9 Omo Valley 10 Konso Gardula 11 Mela Kunture 12 Middle Awash 13 Hadar Formation 14 Gona 15 Koro Toro 16 Toros – Menalla, Djurab Desert.*

5.4. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS ENTRE LE CRADLE OF HUMANKIND (N°1 SUR LA CARTE) ET LE RIFT EST-AFRICAIN

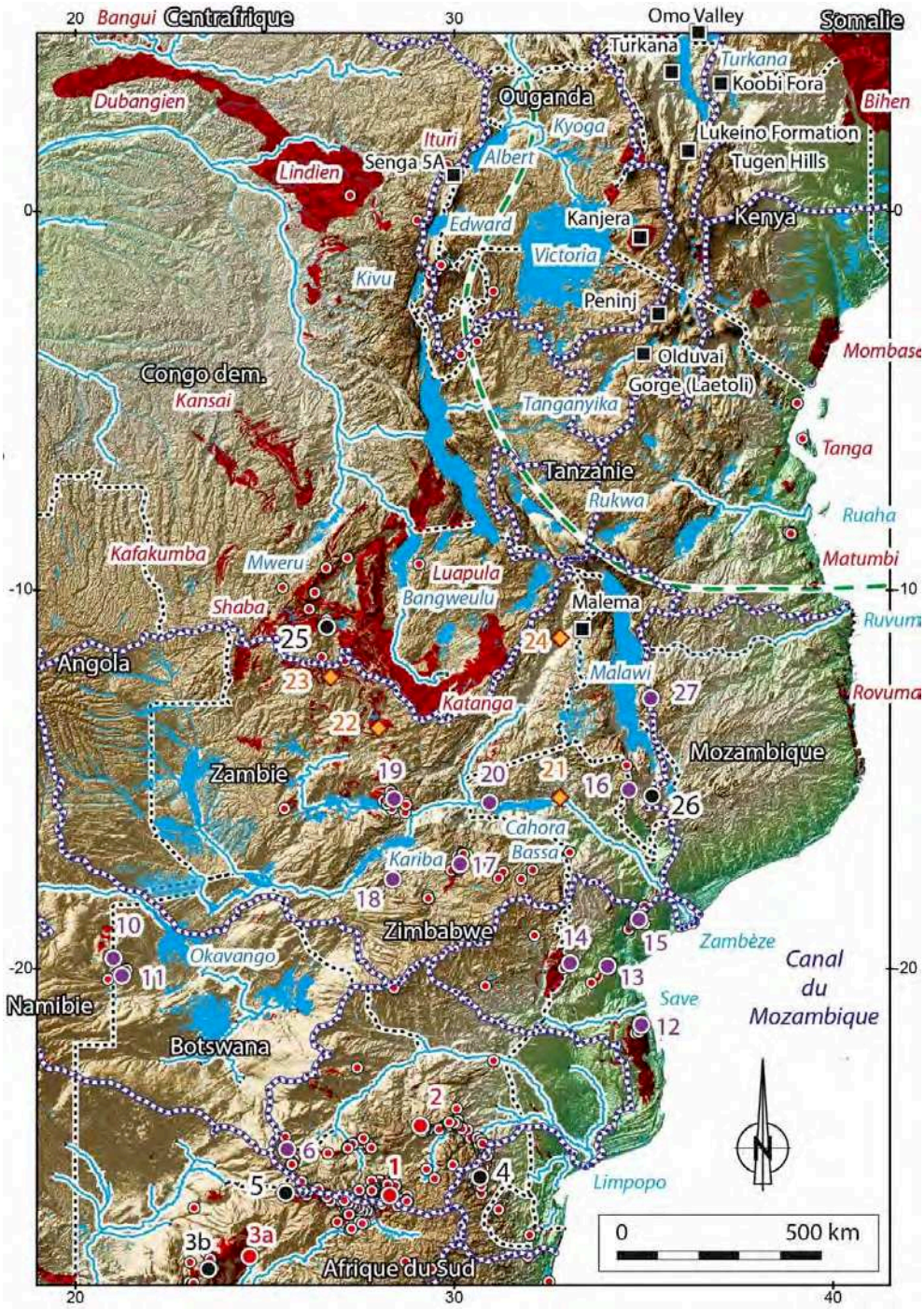


Figure 911 Karsts et karsts potentiels entre le Cradle of Humankind et le Rift est-africain. La légende est sur la figure suivante. En rouge, sont indiquées les formations carbonatées à l'affleurement (karsts potentiels).

5.4.1. Liste des karsts ou des formations carbonatées étudiées

Noms des karsts fossilifères à Hominines d'Afrique du Sud :
1: *Cradle of Humankind* (Dart, 1925a ; voir 2)
2: Makapansgat (Dart, 1948b; Brock *et al.*, 1977; Mc Fadden *et al.*, 1979; Partridge, 1979; Dirks *et al.* 2010 *in* Adams *et al.*, 2010, p.690; Herries *et al.*, 2013; Thackeray et Dyke, 2023)
3 : Carrière près de Taung (point rouge à l'est) et les grottes (point noir à l'ouest) (Dart, 1925b; DACEL, 1998 ; McKee, 1993 ; Partridge, 2000 ; Tobias, 2000 in Bailey *et al.*, 2011; Hopley P.J *et al.*, 2013; Thackeray et Dyke, 2023)
Noms des autres karsts ou des formations carbonatées étudiés (et références bibliographiques majeures) :
4 :Berlin (Martini, 1985)
10 : Aha Hills (Namibie et Botswana) (Bruxelles, mission HOB et Homini'karst)
11: Gcwihaba Hills et Koanaka Hills (Botswana) (Cooke et Baillieul, 1974; Cooke 1975; Pickford, 1990)
12 : Buchane (Mozambique) (Laumanns, 1998, 1999 et 2002 ; Bruxelles, 2019 ; cette thèse)
13 : Bùzi / Sofala (Mozambique) (Laumanns, 1998, 1999 et 2002 ; Bruxelles 2019)
14 : Chimanimani (Zimbabwe) (SASA) (Bruxelles, comm.) (Bruxelles participant au programme Hope-Z Raphaël Hanon et Sandrine Prat, septembre 2022), Dacata (Mozambique) (SASA)
15 : Cheringoma (Mozambique) (Laumanns, 1998, 1999 et 2002 ; Bruxelles 2019)
16 : Kirk Range (Malawi et Mozambique) (Dunstan, 1908, 1909 et 1911 ; Colonial Geology and Mineral Resources, 1950, 1953, 1954, 1955 ; Dixey, 1956) et Zomba (*Changalumi Pothole*) (Bloomfield, 1965) ;
17 : Lomagundi (Zimbabwe) (Bruxelles, comm.) (Bruxelles participant au programme Hope-Z Raphaël Hanon et Sandrine Prat, juin 2022);
18 : Sanyati (Zimbabwe) (Bruxelles, comm.) (Bruxelles participant au programme Hope-Z Raphaël Hanon et Sandrine Prat, juin 2022);
19: Lusaka (Broken Hill, Twin Rivers, Chipongwe) (Zambie) (White (1908, p.13); découverte d'un crâne Woodward, 1921; Mennell, 1929; Oakley, 1953; Barham, 1998; Clark, 2001, Avery, 2001; crâne daté à -300 000 ans par Grün *et al.*, 2020; Barham *et al.*, 2023) (mission en septembre 2024)
20 : Pintao (Mozambique), découvert lors de notre mission en 2022 cette thèse ;
21 : Tete et Fingoe, Caduco (Mozambique) (Cilek, 1989 ; Bosse, 1996)
22 : Lukanga (Zambie)
23 : Copperbelt (Zambie)
24 : Karonga (Malawi) (Dixey, 1956 ; Schrenk *et al.*, 1993), cette thèse ;
25 : Katanga (Zambie) (Buffard, 1984 ; Quinif, 1985 ; Quinif et Dupuis, 1989)
26: Zomba (Chanlagumi Pothole) (Bloomfield, 1965, p.155).
27 : Ngalue (Mercader *et al.*, 2009)



Figure 912 Légende de la carte précédente.

5.5. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS DANS LES FORMATIONS CARBONATEES DU BASSIN DU TRANSVAAL ENTRE L'ORANGE ET LE LIMPOPO (AFRIQUE DU SUD ET BOTSWANA)

Après avoir présenté en introduction les karsts fossilifères sud-africains (p.6, Figure 3 et Figure 7), puis consacré le 3 (p.268) au *Cradle of Humankind*, le 4 aux karsts du Nord-ouest du Botswana (p.473) et brièvement abordé le karst fossilifère de Makapansgat (p.236) ainsi que le Plateau karstique de Ghaap (p.244), nous allons désormais approfondir les analyses et la recherche de grottes.

Nous nous concentrerons dans un premier temps autour du *Cradle of Humankind*, au niveau des karsts connus du **Bassin géologique du Transvaal** (p.202) - notamment Vlakplaats-Hoogland, Ottoshop (n°D sur la Figure 915), Lobatse (n°1 sur Figure 913), Ramotswa et le « Pendant du Berceau » (Alary, 2017). Nous traiterons également des karsts potentiels situés au centre du Bassin du Transvaal : le ***Krokodil River Fragment* - Assen** (n°2) et le *Marble Hall Fragment* (n°3).

Nous étudierons ensuite, plus au sud, le **Bassin Occidental de Griqualand**, où se trouve le P**lateau karstique de Ghaap**. Cette région abrite deux karsts importants : (1) les cavités fossilifères de la carrière de Taung et ses travertins fossilifères (où a été découvert un crâne d'australopithèque), et (2) les cavités situées au sommet du plateau, dans lesquelles aucun fossile n'a pour l'instant été identifié.

Par ailleurs, des karsts potentiels pourraient exister dans le bassin du **Kanye** et le bassin de **Palapye**, constitués de dolomies paléoprotérozoïques similaires à celle du *CoH*, ainsi que le bassin d'**Okwa**, constitué de formations carbonatées du Néoprotérozoïque ou du Cambrien.

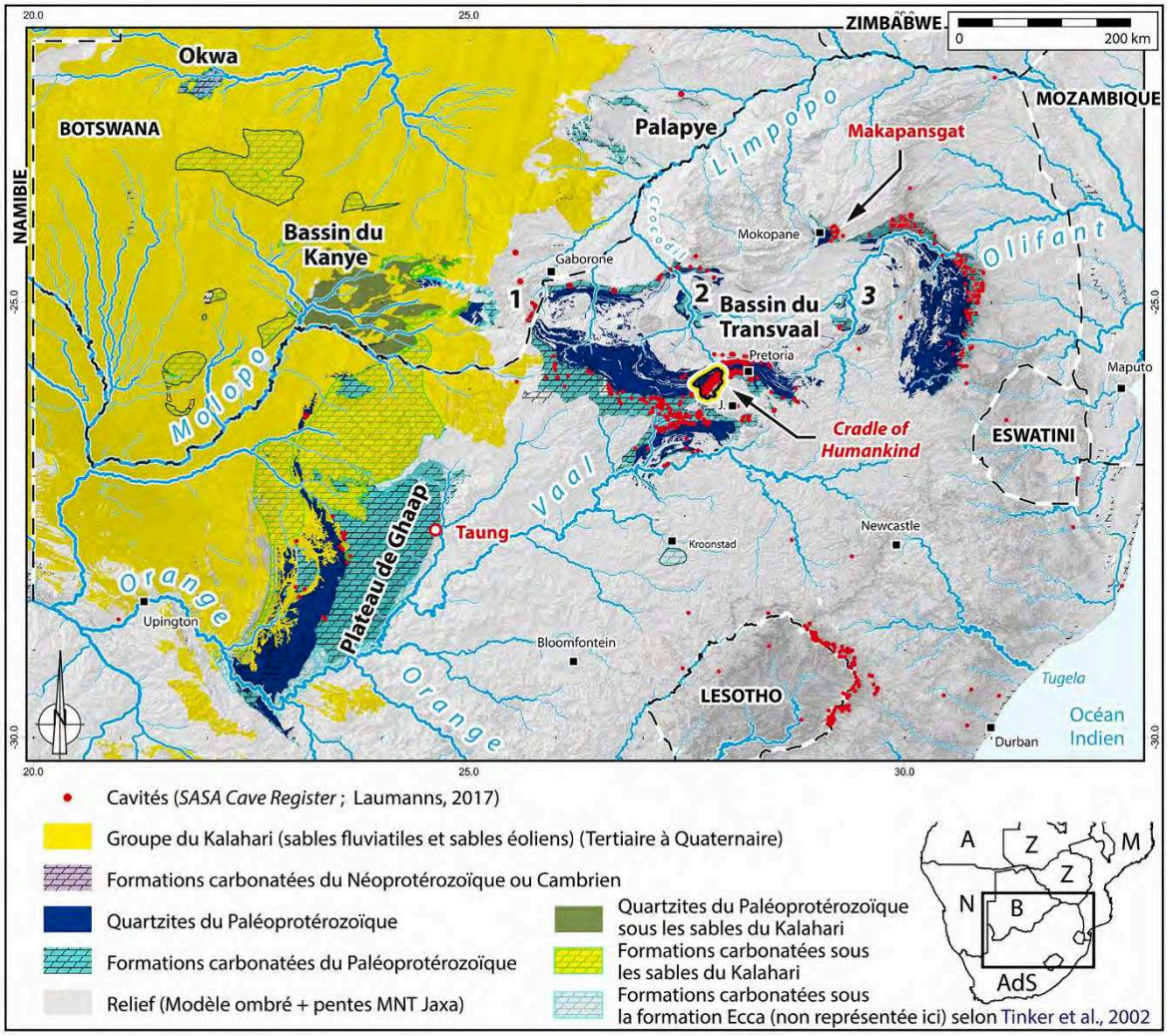


Figure 913 Karsts connus et karsts potentiels entre l'Orange et le Limpopo.

Dans le Bassin du Transvaal (Figure 914), nous avons représenté les dolomies, en bleu clair, limitées par le mur du *Black Reef* et le toit du groupe géologique de Pretoria. Ce dernier est cartographié en bleu foncé. Les cavités sont indiquées en rouge et sont en partie issues de l'inventaire du *SASA Cave Registre* et de notre propre synthèse (p.1090). Cette carte localise les coupes géologiques de la Figure 975 (p.961) et Figure 980 (p.966) et. Une carte géologique complète a aussi été réalisée (p.204).

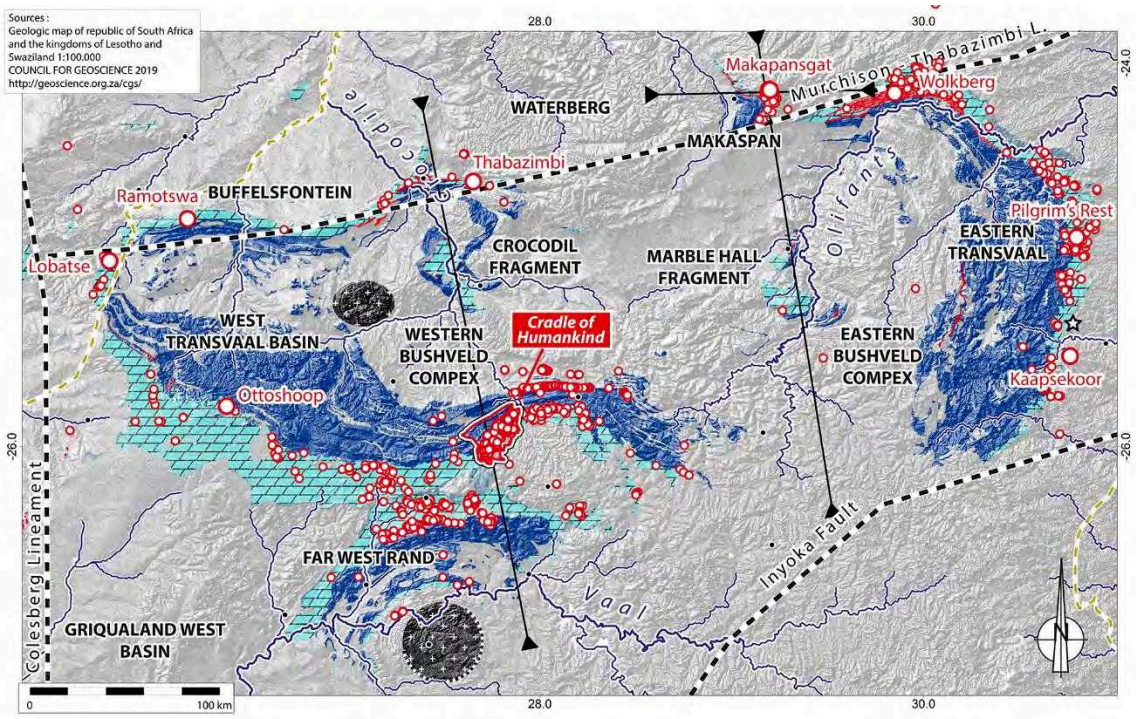


Figure 914 Détail de la carte précédente sur le Bassin du Transvaal montrant la répartition des cavités, en rouge, des formations carbonatées à l'affleurement, en bleu ciel, et des quartzites qui les surmontent, en bleu foncé.

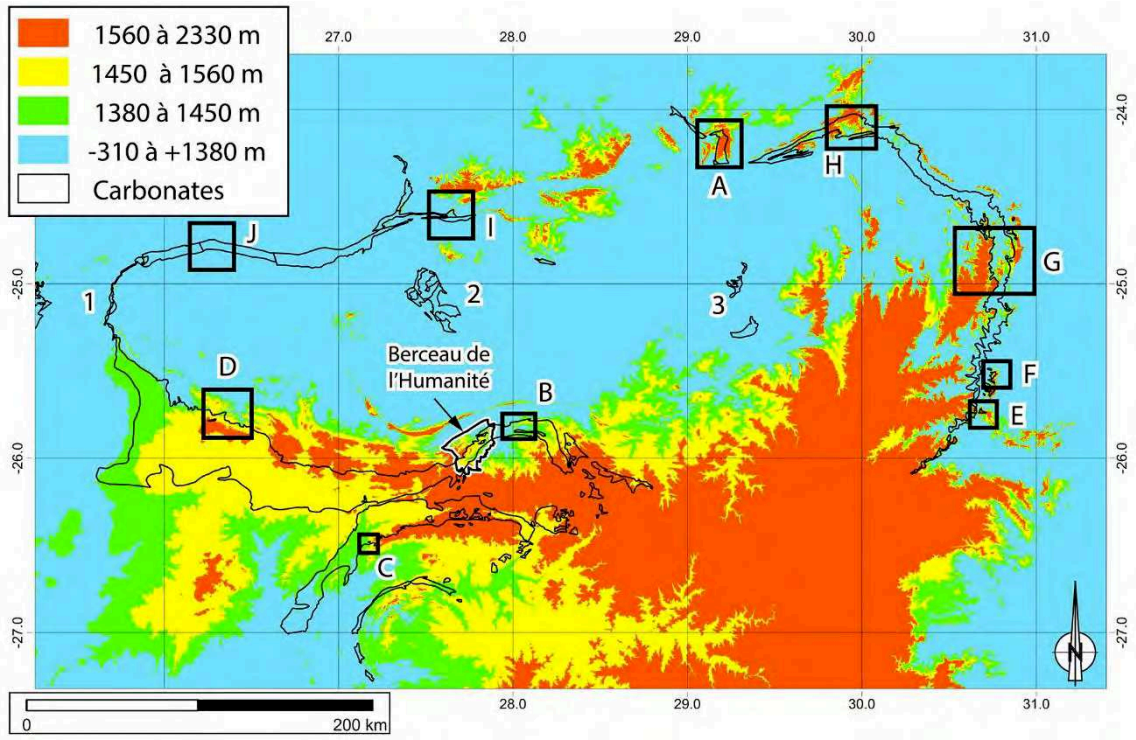


Figure 915 Altimétrie et position des karsts et des karsts potentiels pour rechercher des remplissages karstiques plio-pléistocènes.

Sur la carte ci-dessus (Figure 915), les secteurs carbonatés délimités par des contours noirs, dont certains sont karstifiés et se situent à une altitude comparable à celle des karsts fossilifères plio-pléistocènes du *Cradle of Humankind* et de Makapansgat. Ces secteurs pourraient donc abriter des cavités qui se seraient ouvertes et auraient piégé des fossiles au Plio-Pléistocène, en lien avec les surfaces d'aplanissement définies dans le *Cradle of Humankind* (3) :

A : Karst de Makapansgat ;
B : Karst d'Hoogland-Vlakplaats ;
C : Karst du « Pendant du Berceau » (Alary, 2017);
D: Karst d'Ottoshoop ;
E et F : Kaapsekoor ;
G : *Pilgrim's Rest* ;
H : Wolberg ;
I : Thabazimbi (Almond, 2012, 2014) ;

D'autres secteurs carbonatés, situés à une altitude plus basse - et donc potentiellement plus récents - restent néanmoins dignes d'intérêt :

1 : Karst de Lobatse (situé au Botswana)
J : Karst potentiel de Ramotswa (Selaolo, 1985) (situé au Botswana) ;
2 : *Krokodil River Fragment ;*
3 : *Marble Hall Fragment.*

Nous décrirons ces secteurs plus loin. Ensuite, nous commencerons nos recherches de karsts en direction du Rift est-africain. Nous rechercherons donc des karsts qui auraient été ouverts au Plio-Pléistocène, en mettant en corrélation les paléosurfaces définies précédemment dans le *Cradle of Humankind* (3 p.268), à Makapansgat (p.236 et p.954) et en recherchant l'extension de ces paléosurfaces en-dehors du *CoH* (p.899). Ces karsts potentiels ont ensuite été confrontés aux données de terrain recueillies lors des missions HOMINI'KARST menées au Botswana et en Namibie (4 p.473), au Mozambique (p.1003) et au Malawi (p.1033), au Zimbabwe (p.989) et en Zambie (p.995), afin d'orienter les perspectives de recherche et localiser de nouveaux « Berceaux de l'Humanité » potentiels.

Nous avons vu sur la carte ci-dessus (Figure 913) que le bassin carbonaté paléoprotérozoïque était autrefois bien plus étendu que ce qui est conservé aujourd'hui, une grande partie étant désormais recouvert par les sables du Kalahari. De nombreuses cavités et karsts sont connus dans ce bassin. Étudions à présent le karst de Vlakplaats et d'Hoogland, situé à 40 km au nord-est de Sterkfontein, dans la région de la *Hennops River*.

5.5.1. Karst à buttes fossilifères de Vlakplaats et Hoogland (Secteur B de la Figure 915 p.910) à 40 km à l'est du Cradle of Humankind

Le karst d'Hoogland – Vlakplaats a livré un primate pliocène (Broom, 1936 *in* Adams *et al.*, 2010) et des datations de concrétions indiquent que les grottes existaient dès le Miocène terminal (Hopley *et al.*, 2019). Des concrétions ont été datées entre -5.8 et -4.8 Ma (Hopley *et al.*, 2019) et des remplissages ont été datés par paléomagnétisme, vers -3.1 et -2.6 Ma (Adams *et al.*, 2010). Nous étudierons en détail ce karst (p.912). Dans les mêmes dolomies que celles du *CoH* - dont le contour est cartographié en orange sur la Figure 916 - à 40 km plus au nord-est que Sterkfontein, se trouve le karst perché de Vlakplaats et d'Hoogland, qui a été érodé par la *Hennops River*. Des fossiles de primates ont été découverts dans les remplissages karstiques mais ne sont pas datés (Broom, 1936 *in* Adams *et al.*, 2010) ; mais les datations U/Th des concrétions de cette grotte indiquent la fin du Miocène, entre -5.8 à -4.8 Ma (Hopley *et al.*, 2019) pour une cavité située à 1495 m (Bruxelles, 2021, p.31).
L'analyse des surfaces topographiques et des formes karstiques montre que les grottes sont situées à la même altitude que celles du « Berceau ». Toutefois, ce paysage conservé de la fin du Miocène est de faible dimension car il a été démantelé par l'établissement de grands poljés, que nous allons décrire. Cependant, de nombreuses cavités sont connues et pourraient avoir conservé des remplissages fossilifères d'Hominines. Les cavités d'Hoogland et Vlakplaats, localisées ci-dessous (Figure 916), ont été prospectées en novembre 2023 par Laurent Bruxelles, Jean-Baptiste Fourvel, Clément Zanolli et Dominic Stratford. En préalable à la mission, nous avons réalisé des cartes pour analyser les reliefs et localiser les cavités. La prospection a fourni des informations de premier ordre pour améliorer le modèle et comprendre cette karstification originale.

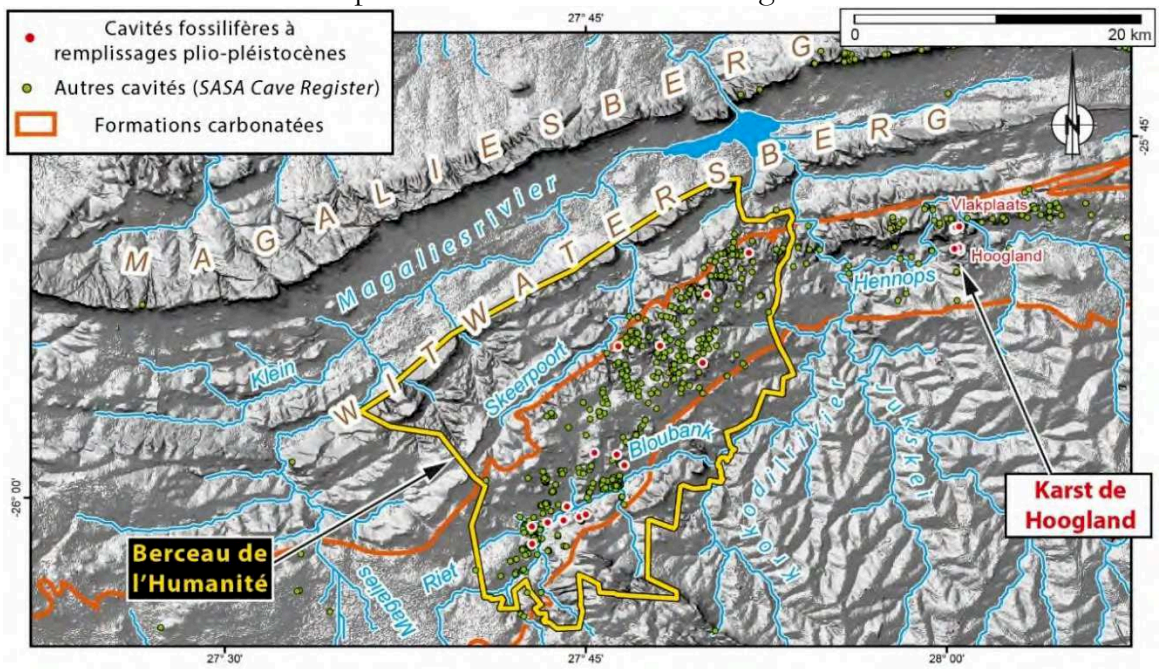


Figure 916 Localisation du karst de Vlakplaats et d'Hoogland, à 40 km à l'est du Cradle of Humankind (« Berceau de l'Humanité »). Les zones en orange marquent la base au sud et le sommet au nord des formations carbonatées karstifiées des dolomies de Malmani.

5.5.1.1. Suivi des paléosurfaces identifiées dans le « Cradle of Humankind » jusqu'au karst de Vlakplaats et d'Hoogland

Ce paléokarst est constitué d'un vallon perché, orienté nord-sud et situé à 1430 m d'altitude où s'ouvrent les cavités de Vlakplaats, inventoriées par le *SASA*[1] (*Bob's Cave* 1524 m, *Vlakplaats Pothole* 1513 m, *Vlakplaats Sinkhole* 1510 m, *Vlakplaats Cave 1A* 1489 m, *Vlakplaats Cave 1B* 1480 m, *Small dead sinkhole* 1471 m) (Figure 921 et Figure 922). Ce vallon est cartographié en vert sur la Figure 919. Cette surface est recoupée par la vallée actuelle, orientée ouest-est. On retrouve au sud une surface karstifiée à la même altitude, où l'on trouve, au-dessus, les cavités d'Hoogland (*Caracal Cave* 1511 m, *Sinkhole below Two Rabbits* 1493 m, *Two Rabbits Sinkhole* 1510 m, *Two Rabbits and an Aloe* 1514 m). Dans ces secteurs, la différence d'altitudes entre les entrées des cavités et la surface en contrebas indique la hauteur sur laquelle le fantôme de dolomie a été soutiré suite à la baisse du niveau de base (Figure 398, Figure 399, Figure 400, Figure 401, Figure 402 et Figure 403 p.442).

Ce karst est de faible dimension car il est érodé à l'ouest et à l'est par l'emboîtement de deux poljés successifs dont des planchers sont encore en place. À l'ouest on trouve les planchers d'un poljé à 1280 m d'altitude (en bleu clair sur la Figure 919) et à l'est le plancher d'un poljé vers 1380 m d'altitude, soit 100 m plus haut (en bleu foncé sur la Figure 919). La limite des poljés, caractérisée par des bordures de corrosion est cartographiée en vert sur la Figure 919.

Ce vallon à 1430 m. est peut-être un ancien plancher de poljé, recreusé par une vallée plus récente. On distingue donc trois surfaces dans ce paysage. Une surface de la fin du Miocène, à 1430 m d'altitude, puis un premier poljé à 1380 m et un second poljé plus jeune à 1280 m d'altitude. De nombreuses cavités sont présentes sur ces trois surfaces.

Les panoramas (Figure 928, Figure 929, Figure 930, Figure 931) orientés sud nord, observés depuis la colline au-dessus de la grotte de Caracal et de la grotte nommée *Two rabbits and Aloe*, permettent de voir les grottes de Vlakplaats qui s'ouvrent au-dessus d'un vallon perché à 1430 m d'altitude, indiquant un paléoniveau de base (ayant certainement débourrer les fantômes de dolomies situées au-dessus de cette altitude). Certaines des cavités qui s'ouvrent au-dessus de cette surface (n°1400 Sinkhole 1510 m ; n° 22 Cave 1A 1489 m ; n°23 Cave 1B 1480 m, n°1401 Small dead sinkhole 1471 m, n°24 Pothole 1513 m) (Figure 921 et Figure 922) sont fossilifères (Adams *et al.*, 2010) et des concrétions sont datées par U/Pb de -5.8 à -4.8 Ma (Hopley *et al.* 2019).

Ces cavités qui s'ouvrent vers les mêmes gammes d'altitude que le « Berceau de l'Humanité », sur la surface S3 et qui montrent des âges de la fin du Miocène sont des fragments reliques des paysages parcourus par les Hominines à partir de la fin du Miocène. Ces panoramas montrent l'érosion importante, à partir du Pliocène, qui a affecté cette surface à 1430 m et donnant les altitudes des plaines actuelles vers 1280 m (Figure 929).

[1] *SASA* : *South African Speleological Association*

En résumé, nous identifions dans le paysage de Vlakplaats les surfaces suivantes, résumée par cette Figure 917, ci-dessous.



Figure 917 Schéma des paléosurfaces identifiées dans le Cradle of Humankind au karst d'Hoogland-Vlakplaast.

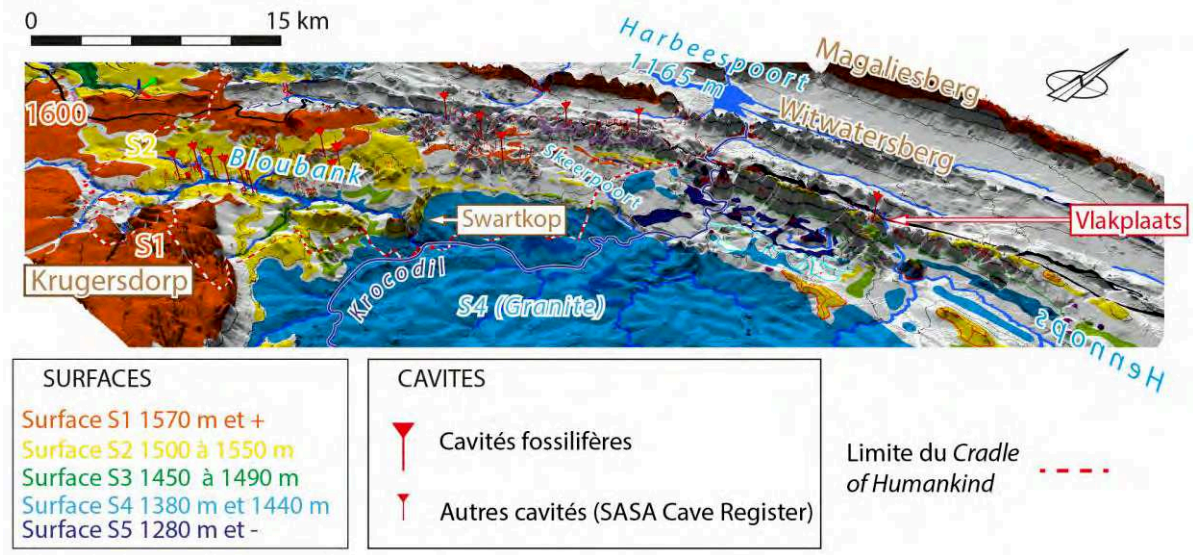


Figure 918 Prolongement de l'identification des surfaces du Cradle of Humankind jusqu'au karst d'Hoogland-Vlakplaats.

L'analyse morphokarstique de la *Hennops River* et du karst perché d'Hoogland et de Vlakplaats (Figure 919) permet d'identifier deux surfaces correspondant à des planchers de poljés incisés par l'érosion des cours des rivières de la Hennop's et de la Rietspuirt. À l'ouest on identifie la surface à 1280 m d'altitude (en bleu foncé) et à l'est un plancher de poljé mieux conservé, situé plus haut, à 1380 m d'altitude (en bleu clair).

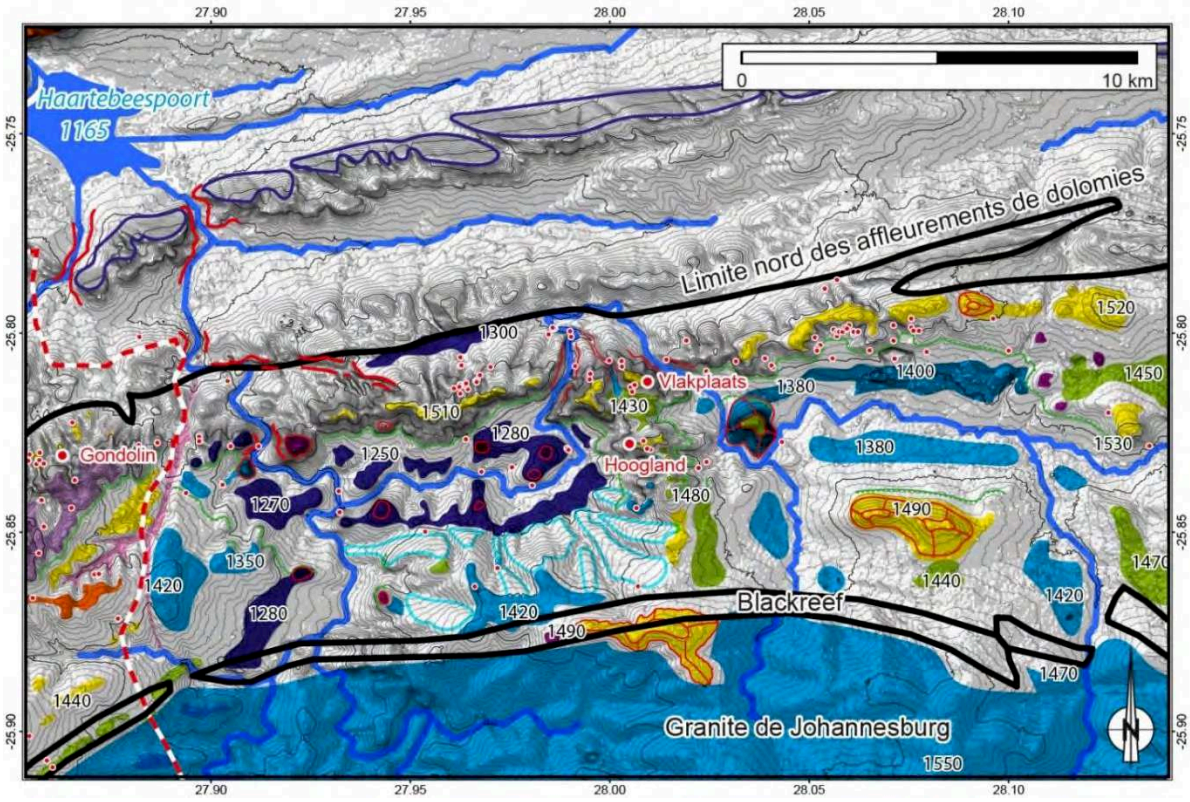


Figure 919 Analyse morphokarstique de la Hennops River et du karst d'Hoogland-Vlakplaats.

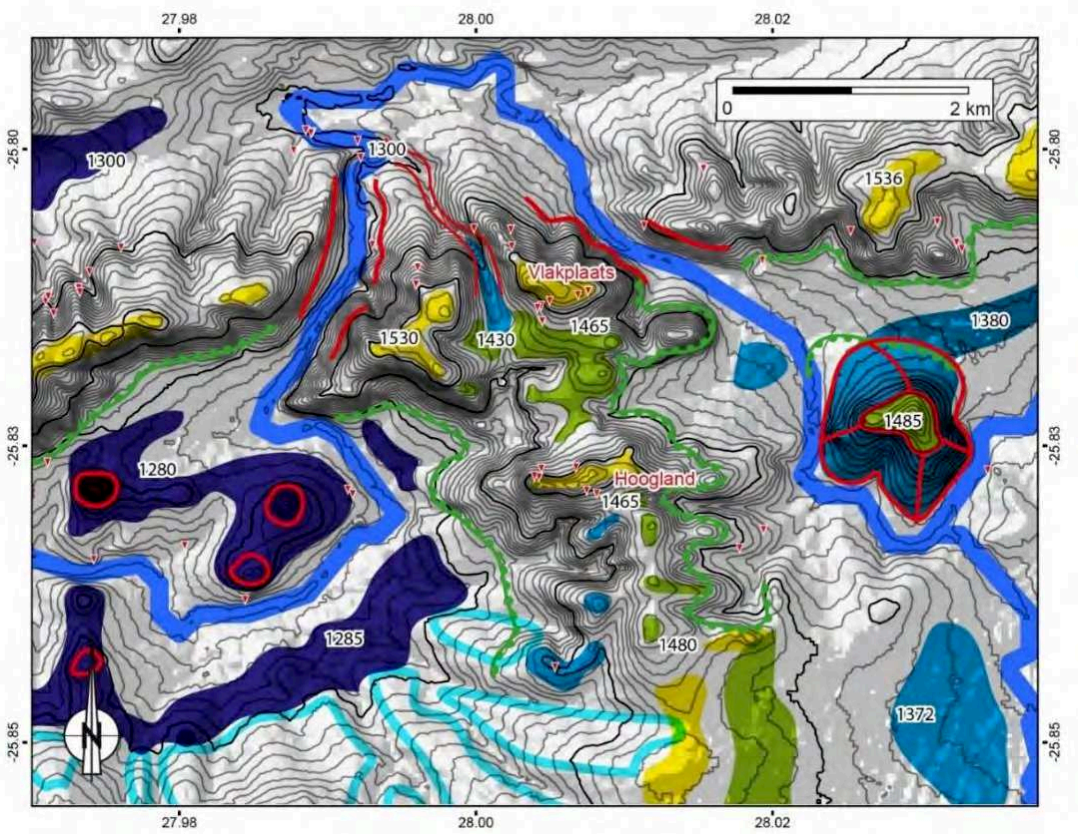


Figure 920 Analyse des surfaces d'aplanissement dans le secteur d'Hoogland-Vlakplaats.

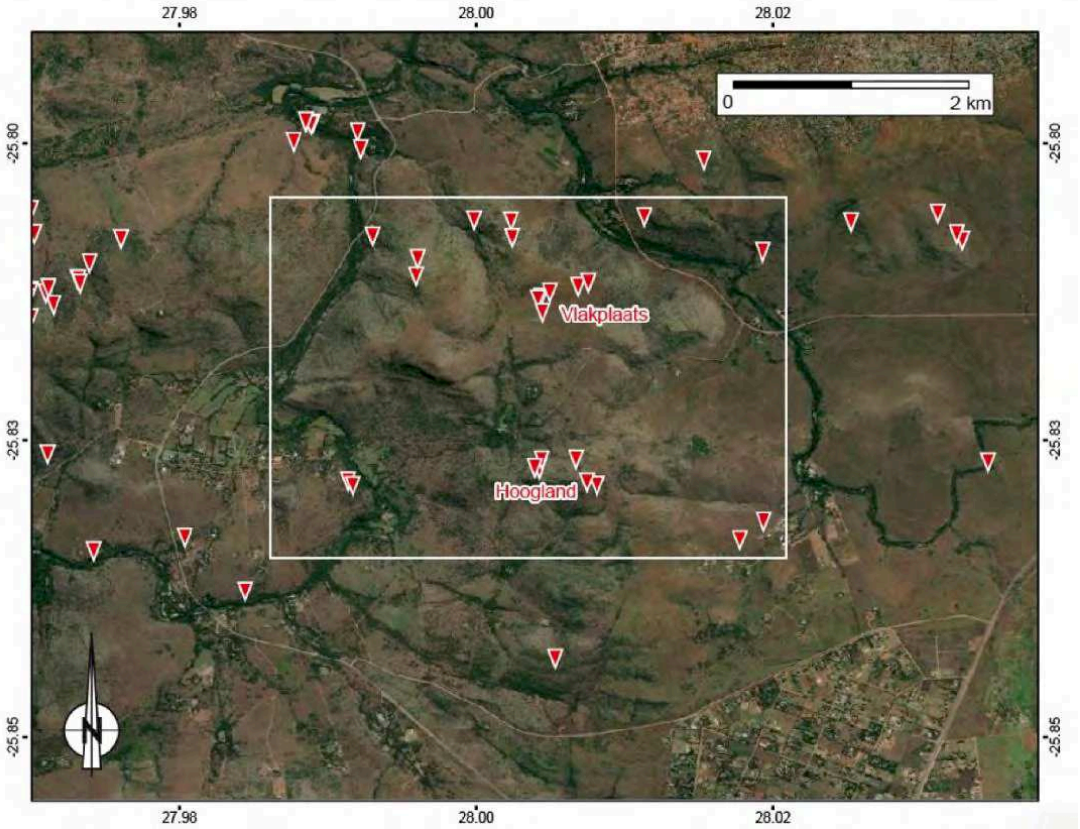


Figure 921 Localisation des cavités dans le secteur d'Hoogland et Vlakplaats.

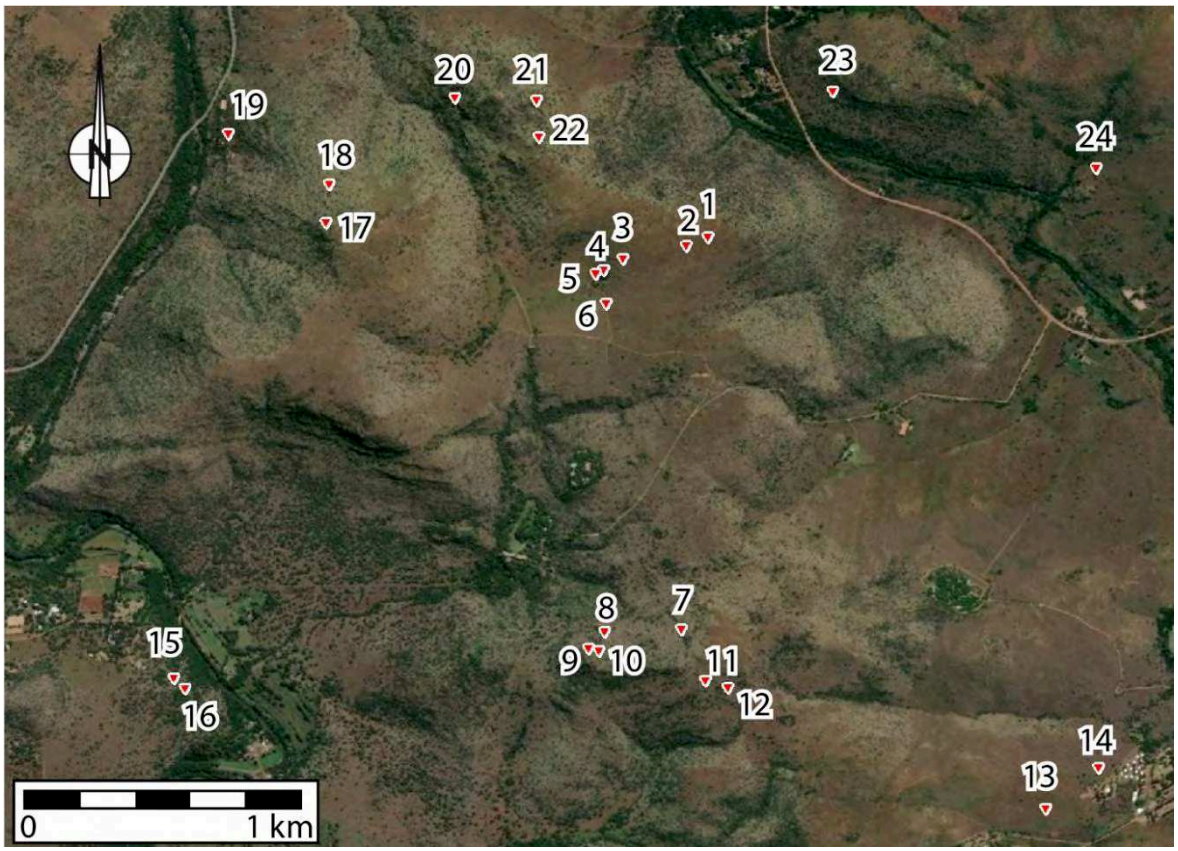


Figure 922 Localisation des cavités dans le secteur de Vlakplaats et d'Hoogland. Leur nom et l'altitude sont donnés ci-dessous.

Secteur de Vlakplaats
1 *Bob's Cave* 1524 m
2 *Vlakplaats Pothole* 1513 m
3 *Vlakplaats Sinkhole* 1510 m
4 *Vlakplaats Cave 1A* 1489 m
5 *Vlakplaats Cave 1B* 1480 m
6 *Small dead sinkhole* 1471 m

Secteur d'Hooglands
7 *Caracal Cave* 1511 m
8 *Sinkhole below Two Rabbits* 1493 m
9 *Two Rabbits Sinkhole* 1510 m
10 *Two Rabbits and an Aloe* 1514 m
11 *Porcupine Cave* 1504 m
12 *Small Caves* (n°1726) 1491 m

Autres secteurs
13 *Seymore Cave* 1394 m
14 *Johnson's Pothole* 1379 m
15 *Mamelodi Cave II* 1286 m
16 *Mamelodi Cave I* 1284 m
17 *Small Cave* (n°1732) 1487 m
18 *Small Cave* (n°1731) 1453 m
19 *Small Cave* (n°1730) 1310 m
20 *Small Cave* (n°1729) 1400 m
21 *Leopard Cave* 1451 m
22 *Duiker duiker* 1482 m
23 *Schurveberg Caverns* 1378 m
24 *Sinkhole* (n°1723) 1360 m

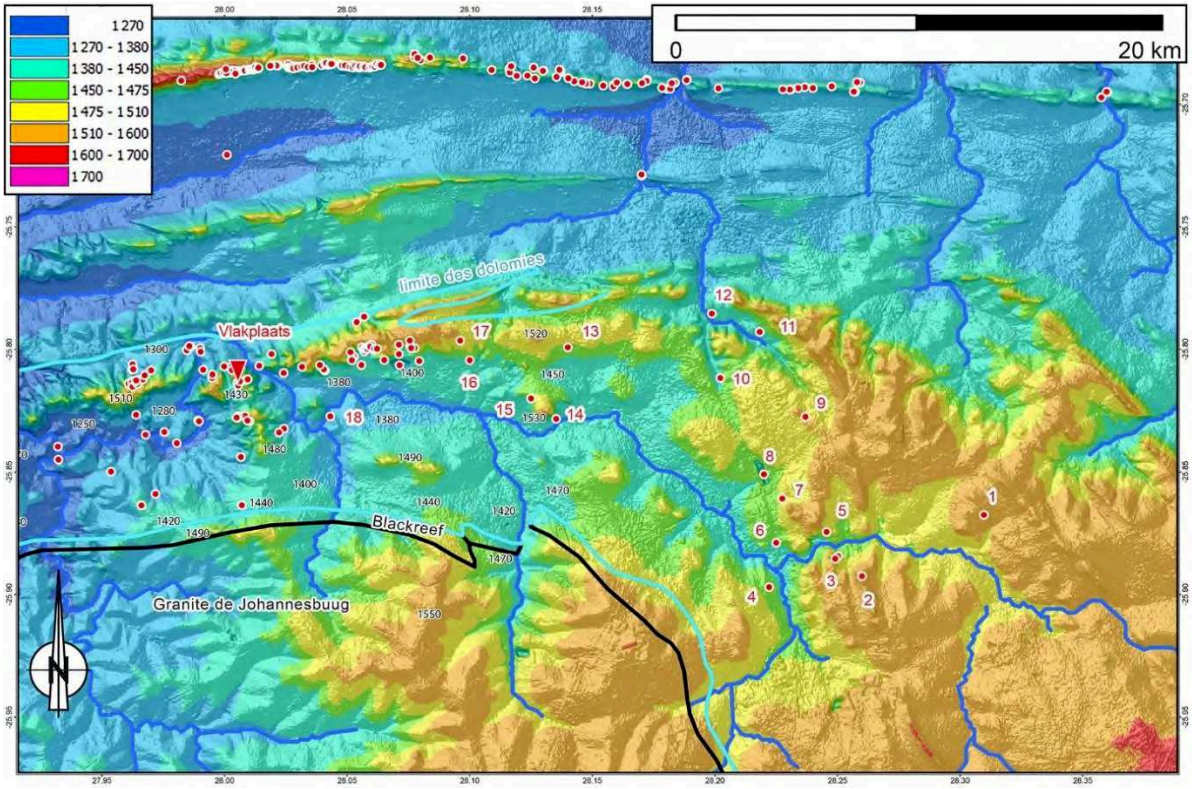


Figure 923 Analyse hypsométrique et localisation des cavités le long de la Hennops River. La limite sud d'affleurement des dolomies est indiquée en bleu ciel et le Black Reef en noir.

1 *Hall's cave* 1554 m longueur 50 m profondeur 24 m
2 *Swallows Nests Cave* 1487 m longueur 20 m profondeur 10 m
3 *Yolanda Joubert's Cave* 1 (1505 m, longueur 15 m) + 20 Year Dissapointment Hole (1489 m longueur 8 m)
4 *Bakwena Cave* 1467 m longueur 81 m profondeur 25 m
5 *Belt Cave* 1478 m longueur 15 m et profondeur 10 m
6 *Transports Cave* (1448 m, profondeur 4 m)
7 *Jakob's Cave* (1490 m)
8 *Lyttelton Dolomite Quarry* (1410 m)
9 *Pedro's cave* 1508 m
10 *Motor Bike cave* (1452 m longueur 19 m)
11 *Monument Park cave*
12 *Fountains Cave* (1403 m)
13 *Cave of Valhalla* (1463 m)
14 Swartkop 2 (1418 m)
15 Swartkop 1 (1463 m, longueur 18 m, profondeur 18 m)
16 *Cave of Erasmia* (1455 m)
17 *Coolie Cave* (1504 m)
18 *Rockshelter* (1359 m) une toute petite salle

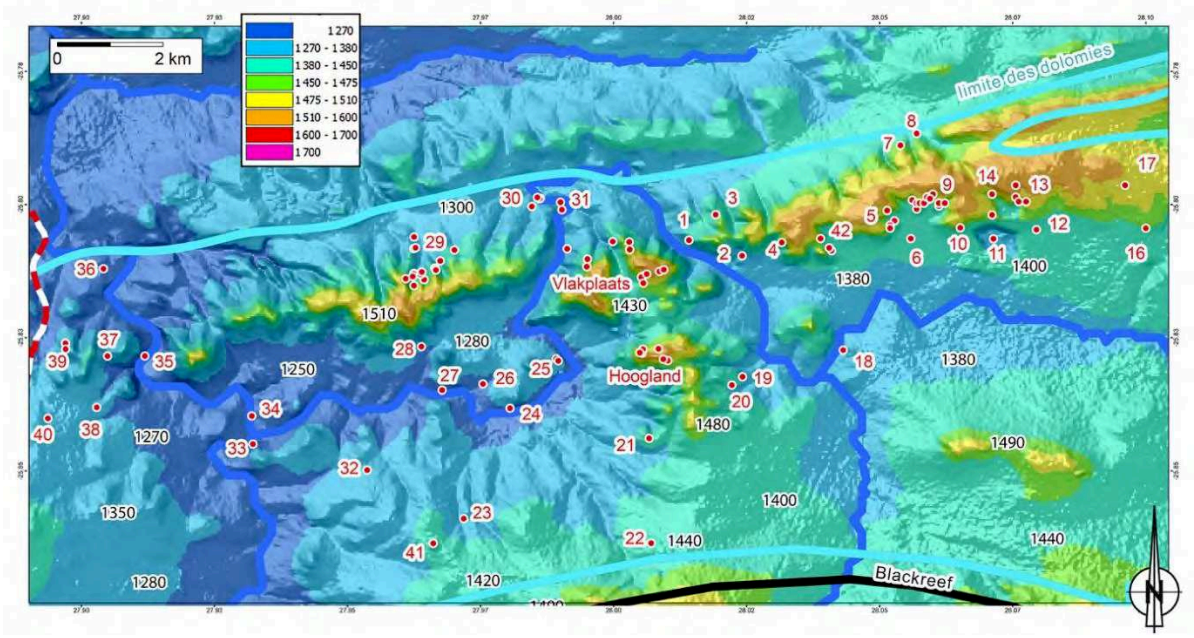


Figure 924 Zoom et analyse hypsométrique et localisation des cavités le long de la Hennops River.

1 *Schurveberg Caverns* (1378 m, profondeur 22 m)
2 *Sinkholes-entrance* 1 (n°1723) 1360 m
3 *Sinkholes-entrance* 1 (n°1724) 1436 m
4 *Steward's Caves* (1448 m) deux petites mines avec de nombreux fossiles
5 *Schurweplaas Cave* 14 (1478 m), 16 (1447 m), 17 (1453 m), 18 (1453 m)
6 *Red Cavern* (1447 m)
7 *Saulsville Cave* 2 (1463 m)
8 *Saulsville Cave* (1439 m)
9 *Schurweplaas Cave* 1 (1447 m), 2 (1447 m), 3 (1463 m) , 4 (1463 m), 5 (1463 m), 6 (1463 m), 7 (1478 m), 8 (1463 m) (1463 m), 9 (1481 m), 10 (1475 m), 11 (1456 m), 12 (1447 m), 13 (1463 m)
10 *Small Sites* (n°1722) 1455 m
11 *Mooiplaas Dolomite Quarry* (1357 m)
12 *Game Fence Cave* (1438 m)
13 *Aspeling's Cave* (1480 m), *Gunners Hill Cave* 1 (1524 m), 2 (1463 m), 3 (1478 m)
14 *Broken Cave* (1463 m), *Schurweplaas Cave* 19 (1469 m)
16 *Cave of Erasmia* (1455 m)
17 *Coolie Cave* (1504 m)
18 R*ockshelter* (1359 m)
19 *Johnson's Pothole* (1379 m, longueur 195 m)
20 *Seymore Cave* (1394 m)
21 *Talc Mine* (1405 m)
22 *Sinkhole dump* (n°1719)
23 *Koppie Alleen site* 1 (1359 m)
24 *Hennopsriver Cave* (1274 m)
25 *Mamelodi Cave* 1 (1284 m, longueur 98 m, profondeur 9 m et *Mamelodi Cave* 2 (1286 m, développement 71 m, profondeur 18 m)

26 *Small Cave* (n°1721) 1265 m
27 *Rooihoogte Rockshelters* (1256 m)
28 *Vorster's Cave* (1285 m, longueur 35 m, profondeur 11 m)
29 *Formation Cave* (1461 m), *Sinkhole* (n°1744) 1350 m, *Hennops Sink* (1358 m), *Mined Pit* 1 et 2, *Two mined holes* (1436 m, 2 et 5 m de longueurs), *Sinkhole* (n°1749) 1454 m brèches, *Stinging Man Cave* (1404 m), *Potshelter, Flat Rockshelter, Dassiopolis* (1408 m), *Crack Cave* (1401 m), *Small Cave* (n°1740) 1431 m, longueur 25 m, *Small Cave* (n°1743) 1337 m, *Tea Pot Cave* (1396 m), *Snake and a Warthog pit* (1393 m)
30 *Prumpie se Gat* (1321 m), *Cave 602* (1306 m), *Dassie Cave* 2, 3 (1309 m), 4
31 *Hospital Cave* (1299 m), *Dassie Cave* 5 (1306 m)
32 *Koppie Alleen site* 2 (1312 m)
33 *Cliff Caves* (1230 m)
34 *Caves* (n°1716) 1207 m
35 *Unnamed Rockshelter* (1208 m)
36 *Palaeo-karst* (n°1715) 1212 m
37 *Small Cave* (n°1712) 1318 m
38 *Small Cave* (n°1711)
39 *Reiss Cave 1* (1339 m) et 2
40 *Small Cave* (n°1710) 1333 m, profondeur 3 m
41 *Baskop Cave* (1425 m)
42 *Schrweplaas cave* 15 (n°313) 1463 m, *Shells Caves* 1 (1435 m) et *Shells Caves* 2 (1442 m)

5.5.1.2. Analyse géomorphologique du karst à buttes de Vlakplaats et Hoogland, vue de l'est

En arrivant depuis l'est à Hoogland, cette surface basale culmine vers 1380 m. Les collines carbonatées karstiques d'Hoogland et de Vlakplaats qui culminent de 1450 à 1510 m d'altitude forment un karst à buttes (Figure 925, Figure 926 et Figure 927) dont le sommet correspond à la surface S3.



Figure 925 Vue en arrivant depuis l'est sur le karst à buttes d'Hoogland. Au pied des buttes la surface est à 1340 m. d'altitude.

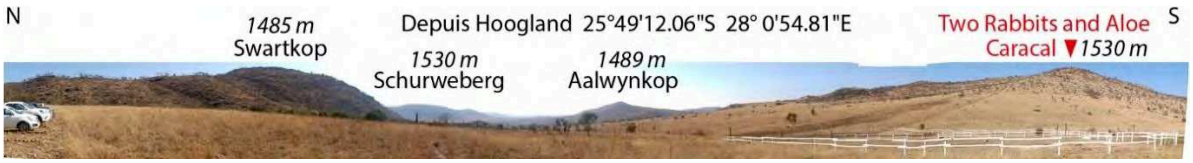


Figure 926 Vue panorama depuis l'ouest (25°49'12.06''S 28°0'54.81''E).

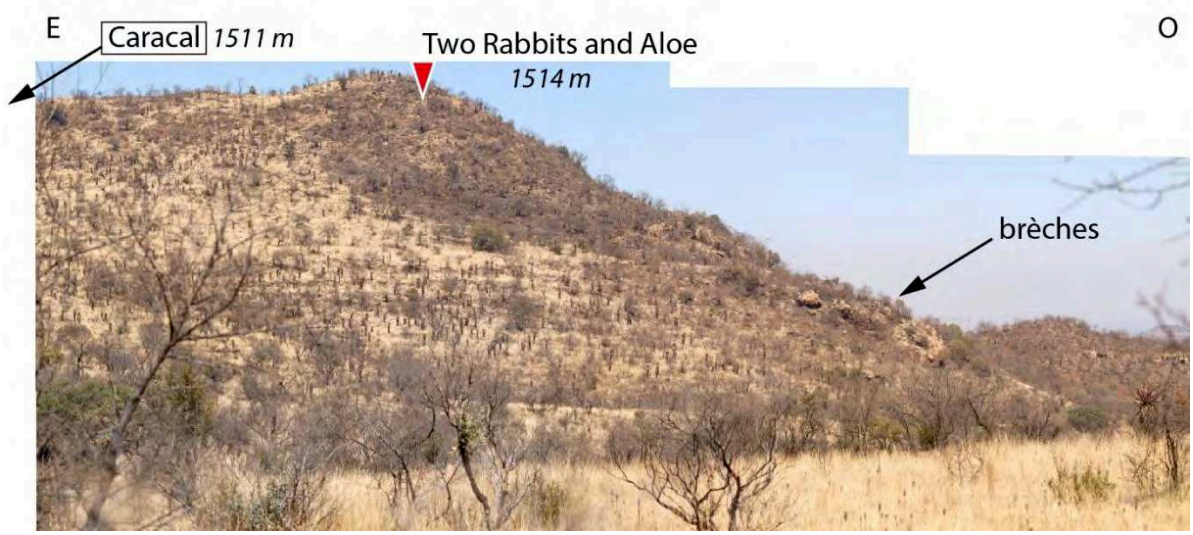


Figure 927 Colline des cavités de Caracal et de Two Rabbits and aloe. Des brèches sont visibles en bas de la pente.

5.5.1.3. Analyse géomorphologique des paysages depuis la butte karstique d'Hoogland

Le panorama visible (Figure 928) depuis le sommet de la colline où se situe les grottes de *Caracal* et *Two Rabbits and an Aloe*, permet d'identifier au nord un vallon carbonaté perché à 1440 m d'altitude (en vert sur la Figure 929) et les cavités de Vlakplaats étudiées par Adams (Adams *et al.*, 2010) et Hopley (Hopley *et al.*, 2019) (Figure 930) qui s'ouvrent au-dessus de ce vallon. On remarque aussi, en face, à l'ouest, l'érosion importante, d'une centaine de mètres, qui a érodé les paysages miocènes.

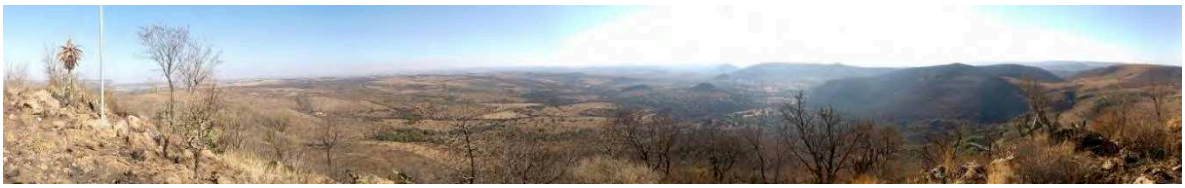


Figure 928 Panorama (sud à gauche et nord à droite) depuis le sommet de la colline où se situent les grottes de Caracal et Two Rabbits and an Aloe.

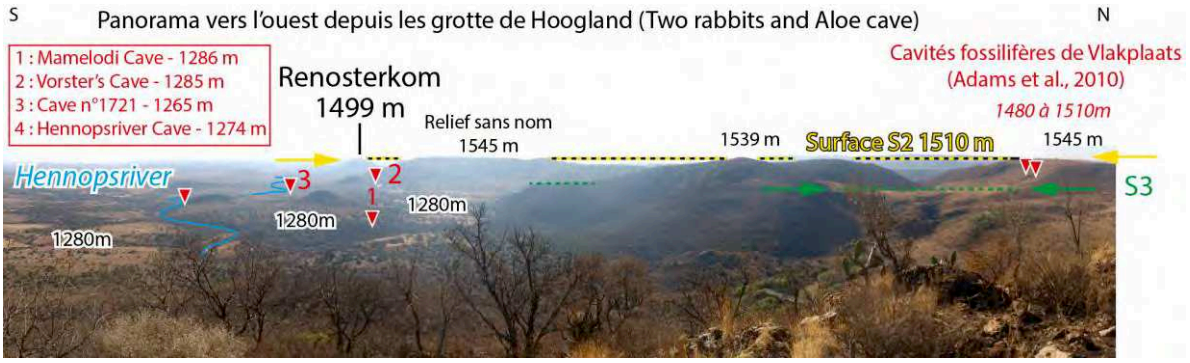


Figure 929 Détail du panorama précédent. Les cavités de Vlakplaats qui contiennent des fossiles (Adams et al., 2010) et des concrétions datées de -5.8 à -4.8 Ma (Hopley et al.2019) s'ouvrent au-dessus de la surface, indiquée en vert, à 1440 m. Au-dessus de cet ensemble, la surface S2, désignée par deux flèches jaunes, à 1510 m d'altitude, s'étend jusqu'au sud (à gauche) et correspond aux replats sur les reliefs (le Renosterkom et le relief sans nom à 1545 m).

Détail de ce panorama plus loin (Figure 932).

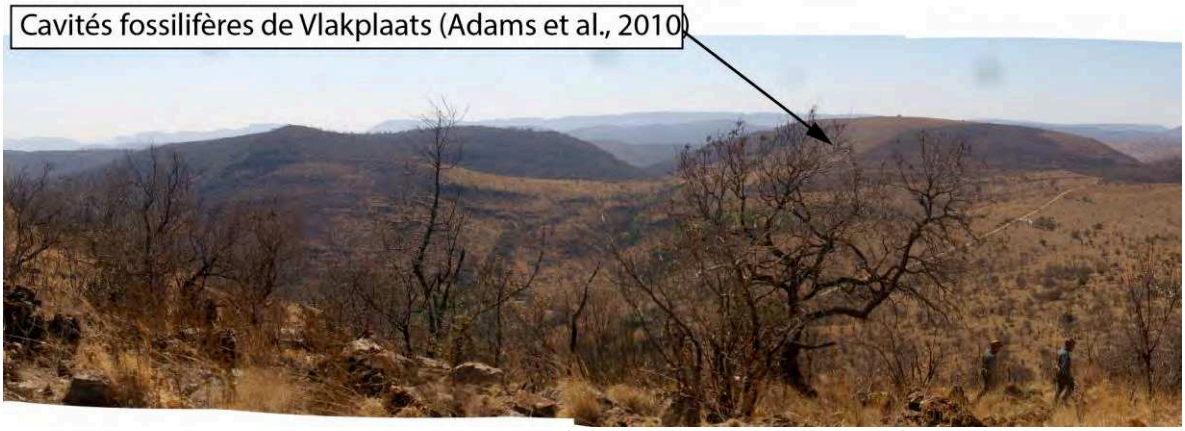


Figure 930 Zoom sur le panorama précédent montrant le vallon perché, à 1430 m d'altitude, où s'ouvrent les grottes de Vlakplaats, paysage relique du Pliocène où devaient circuler les Hominines.

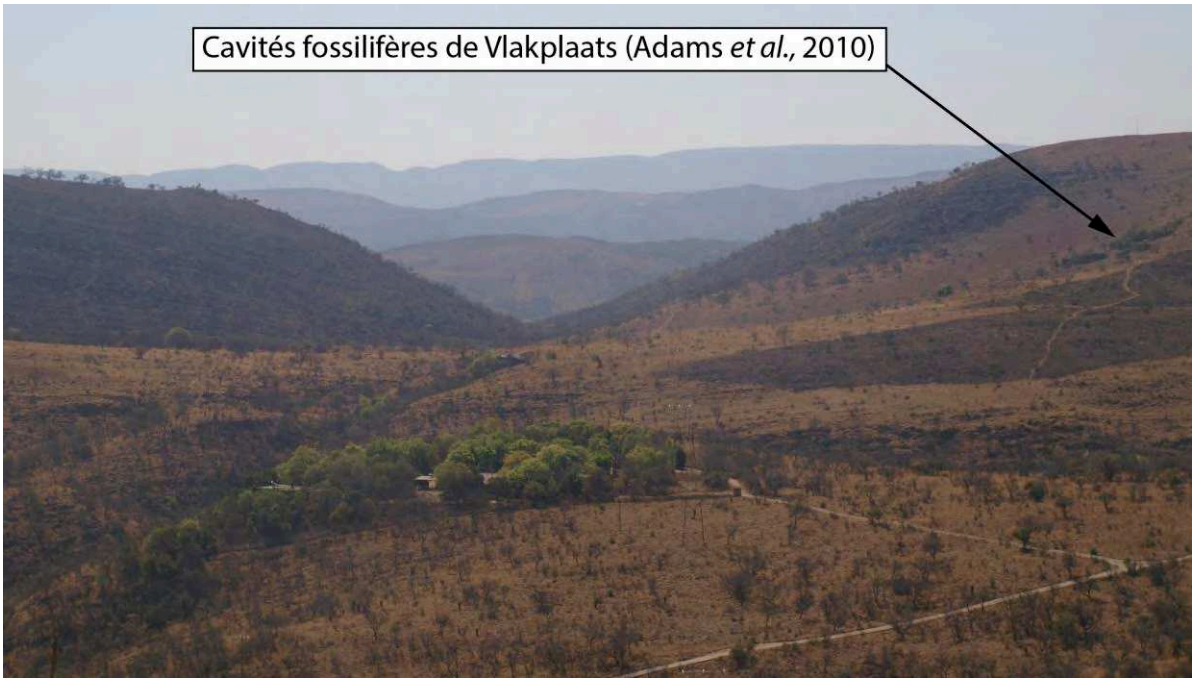


Figure 931 Détails du panorama précédent montrant le vallon perché à 1440 m d'altitude et précisant l'emplacement des cavités.

5.5.1.4. Analyse géomorphologique du karst à buttes de Vlakplaats et Hoogland

En regardant vers l'ouest depuis le sommet de Hoogland (Figure 932), situé sur la surface S2 (1510 m), on distingue deux buttes calcaires qui culminent à 1384 et 1375 m d'altitude (surface S4) et dominent la surface S5 à 1280 m. Elles sont révélatrices de la forte érosion qu'a subi ici le paysage carbonaté. À l'image des collines de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai, ces collines pourraient être karstifiées (fantômisées). Toutefois, leurs altitudes sont très basses (entre 1280 et 1380 m d'altitude) et nous font penser le contraire. Le front de fantômisation, qui a commencé sur la Surface Africaine à 1600 m n'atteint pas 400 m de profondeur et n'est donc pas descendu aussi bas.

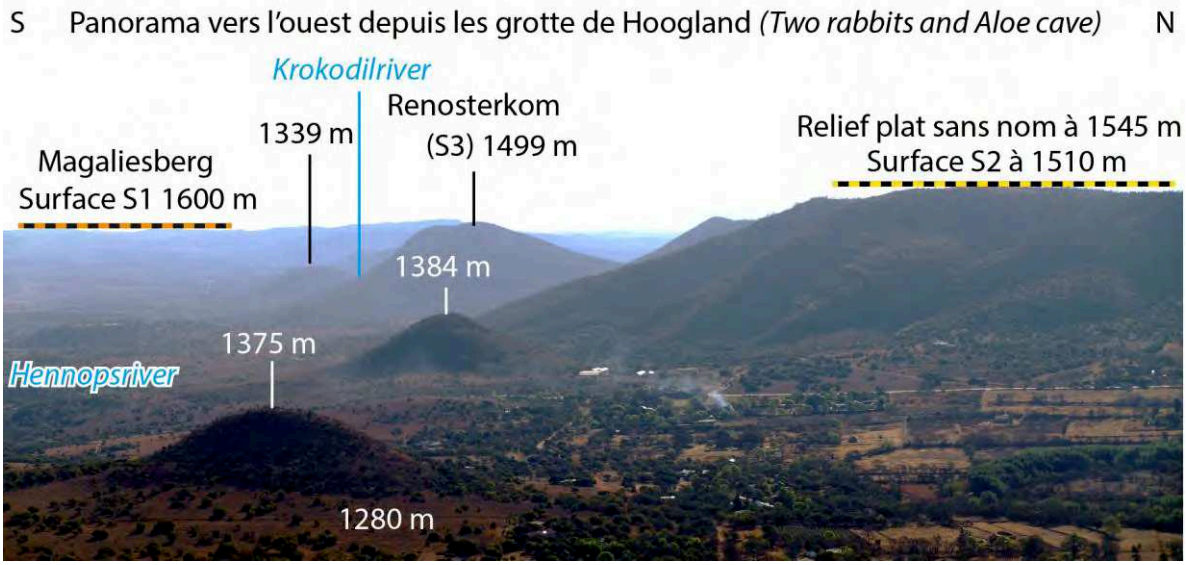


Figure 932 Analyse du panorama de la Figure 929.

5.5.1.5. Analyse géomorphologique depuis le Lion & Safari Park, à l'ouest

En Afrique du Sud, dans le *Cradle of Humankind*, ce panorama, orienté NO-SE, est visible depuis le *Lion & Safari Park*, à 1310 m d'altitude (Surface S4). On voit au premier plan une prairie où les zèbres pâturent. Ce sont les dolomies de Malmani, la formation de Monte-Christo, arasées et érodées jusqu'à 1310 m d'altitude. En arrière-plan, on distingue des reliefs dolomitiques qui montrent des replats vers 1510 m correspondant à la surface S2. Tout au sud-est, à droite sur la Figure 933, on distingue des buttes karstiques carbonatées.

Depuis la surface à 1310 m du *Lion & Safari Park* (25°50'40.84"S ; 27°54'27.50"E ; 1310 m) on observe des buttes karstiques, indiquées à 1384 et 1375 m d'altitude et la butte karstique de Vlakplaats-Hoogland. On observe un aplanissement des dolomies vers 1510 m d'altitude.

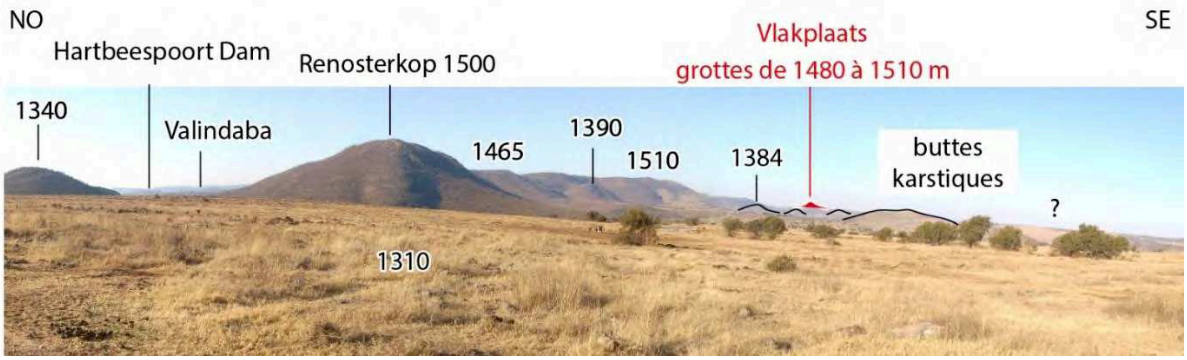


Figure 933 Panorama orienté NO-SE depuis le Lion & Safari Park montrant le karst de Vlakplaats-Hoogland.

5.5.2. Karst de Lobatse dans les dolomies de Malmani au Botswana (Secteur 1 de la Figure 915 p.910).

Nous avons déjà parlé des altérites et de la Surface Africaine en surface du plateau dolomitique dans le West Rand et le Central Rand, maintenant allons plus à l'ouest. Le karst de Lobatse, dans les dolomies de Malmani, est localisé à l'extrémité ouest du Bassin du Transvaal, comme l'indiquent nos figures (Figure 934) et les cartes géologiques (Altchenko, 2017, Fig.6, p.14 ; Dietvorst, 1988, Fig.1, p.642). Notons qu'il existe une carte des formes karstiques du karst de Ramotswa, que nous étudierons juste après (p.947).

Plusieurs études hydrogéologiques ont examiné ces karsts (Baillieul, 1973 ; BRGM, 1985 ; IH, 1986 ; Beger, 2001 ; Staudt, 2002,2003 ; Altchenko, 2017 ; Baqa, 2017) et décrivent des forages. On observe une épaisseur de 150 m de dolomie (cf. Staudt, 2003, forage n°Z6423, Ramotswa). L'un des forages, de 100 m de profondeur, a traversé ce qui semblerait être un fantôme de roche dans les dolomies (cf. Staudt, 2003, forage n°4348). Il est localisé ici :
X = 386621,68 E (UTM Lo27-zome 35) et Y = 7246007,51 N (UTM Lo27-zome 35), Z = 1024 m.
Des stalagmites ont été datées dans la grotte de Lobatse n°2 et indiquent des âges autour de 20 000 et 50 000 ans (Holmgren *et al.*, 1994, 1995 ; Holmgren et Shaw, 1999), dont les âges sont récapitulés dans le tableau de la Figure 940, ce qui est très récent par rapport à nos recherches.

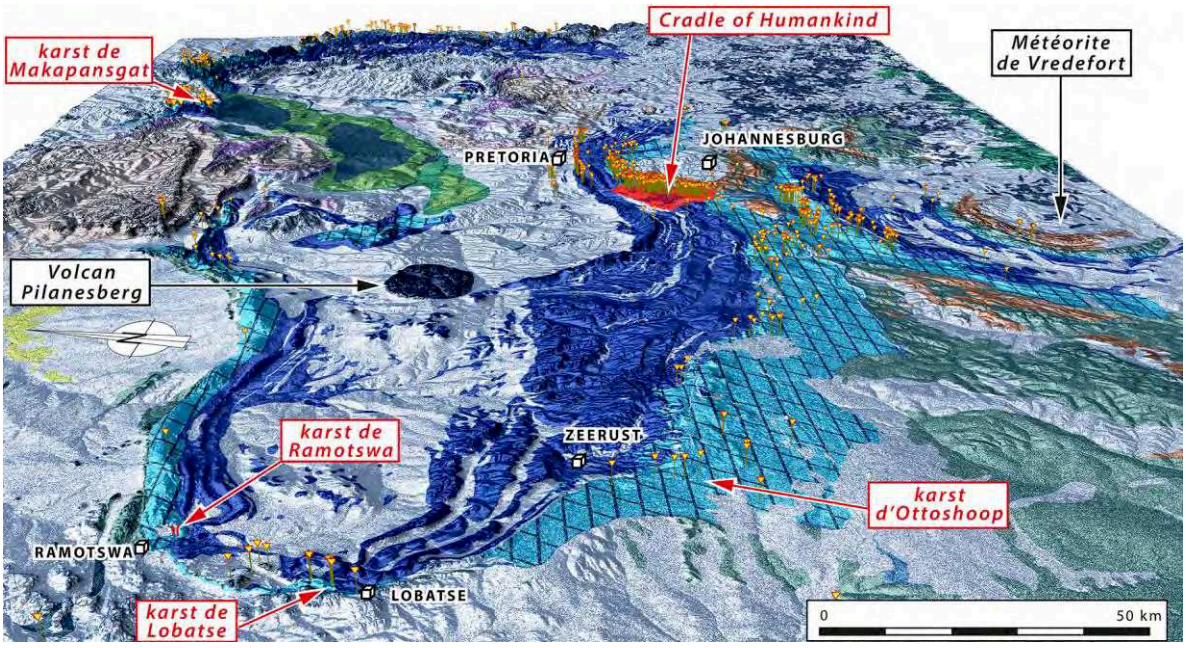


Figure 934 Localisation des karsts du Cradle of Humankind, de Makapansgat, de Lobatse, de Ramotswa et d'Ottoshoop dans le Bassin du Transvaal. Le volcan alcalin du Pilanesberg, à 50 km au nord du CoH et l'impact de la météorite de Vredefort, à 50 km au sud, sont indiqués.

5.5.2.1. Cartes régionales géologiques de Lobatse et carte hypsométrique

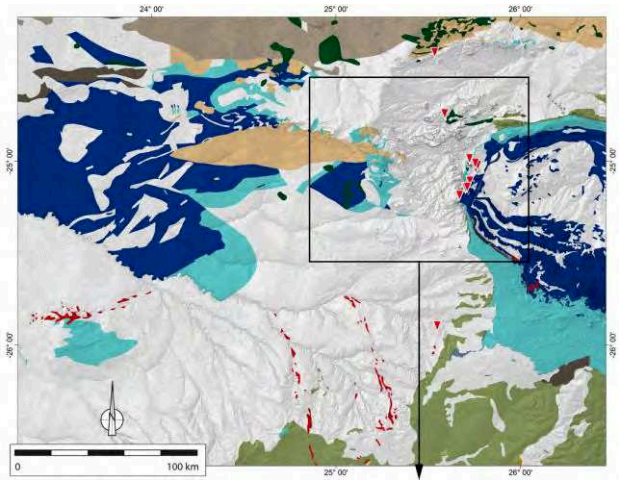


Figure 935 Dolomies paléoprotérozoïques, en bleu ciel, de l'ouest du bassin du Transvaal et du bassin de Kanye. Les formations du groupe de Pretoria sont indiquées en bleu foncé et les formations de Waterberg en marron clair.

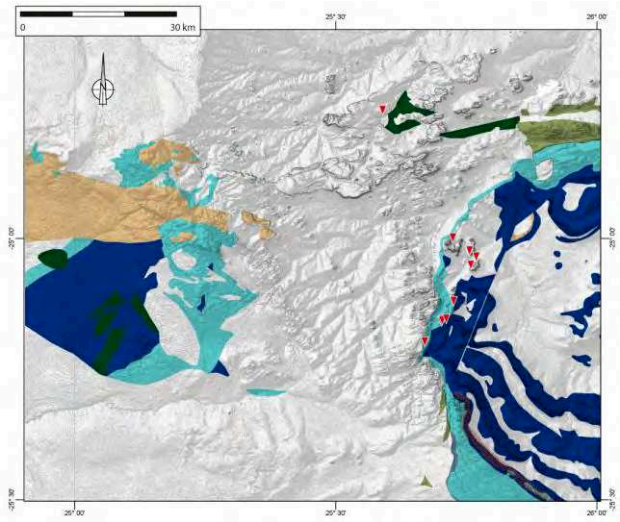


Figure 936 Détail de la carte précédente sur la région karstique de Lobatse au Botswana.

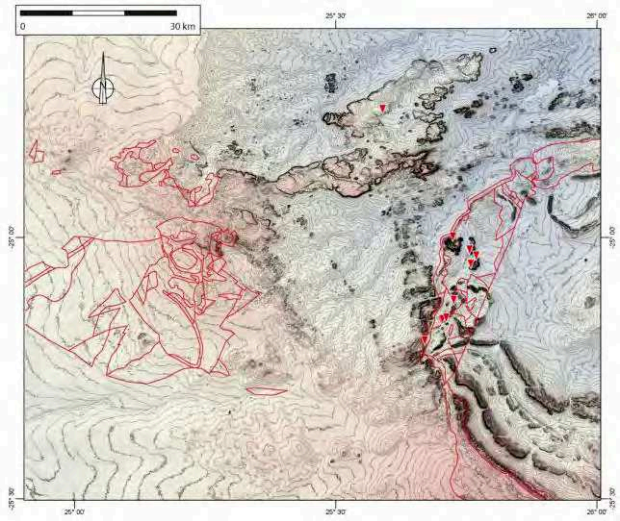


Figure 937 Analyse hypsométrique succincte de la région de Lobatse montrant des reliefs karstiques, en foncé. Les traits rouges correspondent aux formations carbonatées affleurantes.

5.5.2.2. Inventaires des cavités et données spéléologiques

Les cavités identifiées et cartographiées par King (1951) ont été revisitées lors de différentes expéditions spéléologiques (Baillieul, 1973 ; Cooke, 1975 ; par le *MLG en* 2006 (https://www.chilembwe.com/botswana/reports.html) ; Stephens *et al.*, 2022), grâce auxquelles nous possédons les positions géographiques. Certaines ne sont pas très précises et datent d'avant l'époque des GPS alors que d'autres ont été prises au GPS et sont fiables.

Détaillons ces données chronologiquement puis synthétisons-les.

5.5.2.2.1. Données spéléologiques, descriptions et cartes de King (1951)

L'expédition menée par King localise plusieurs grottes (King, 1951, fig.6, p.147). Les grottes de Lobatse sont localisées sur la carte de Cooke (1975, Fig.1, p.32) (Figure 939 p.929). Il fournit aussi des plans topographiques des grottes n°1 et n°2. Certaines des cavités de la région sont formées dans les quartzites de Pretoria ou les grès du Waterberg. Nous verrons qu'une grotte indiquée sur cette carte *(cave no red sand)* n'a pas été retrouvée par les expéditions plus récentes. Elle est entourée sur notre carte de synthèse (Figure 941 p.934) et des prospections devront être effectuées pour la retrouver.

> *« Les grottes à flanc de colline du domaine Woodlands près de Lobatsi, bien qu'elles ne disposent pas d'une séquence sédimentaire spéléogénique complète, ont un intérêt qui leur est propre. Les deux grottes les plus grandes sont accessibles par des puits verticaux de 70 et 80 pieds (25 mètres) de profondeur, et ont clairement été ouvertes en surface pendant une période beaucoup plus courte que les grottes du Transvaal dont nous avons parlé.*
>
> *Aucune des deux grottes ne contenait du sable rouge ancien, bien que les deux étaient déjà formées à cette époque mais n'étaient pas en connexion avec l'extérieur. Une seule contenait du sable rouge plus récent ; mais toutes les deux contenaient un dépôt tardif de guano de chauve-souris, et étaient habitées par des fourmis, des scarabées et des insectes ressemblant à des cafards, apparemment aveugles.*
>
> *Le fait que le sable rouge plus récent ait pu être distribué dans une grotte qui a aujourd'hui une si petite ouverture nécessite l'action de l'eau qui coule, mais même cela n'explique pas entièrement l'événement. Au cours d'une exploration d'un long tunnel, le sol sablonneux s'est avéré si abondamment jonché de petits os qu'ils se superposaient les uns aux autres ; l'endroit était un véritable charnier, intéressant car révélateur des conditions qui devaient exister ailleurs lorsque les sables fossilifères s'accumulaient.*
>
> *Enfin, les deux grottes de Lobatsi présentent actuellement un léger dépôt de chaux. A Ootsi, dans le grès du Waterberg, se trouve une grotte de type différent, une série de curieux creux en zigzag et d'ouvertures communes. Il ne contenait aucun des dépôts trouvés dans les grottes calcaires, mais nous avons trouvé dans les recoins les plus éloignés un certain nombre de grands pots indigènes ronds qui auraient été abandonnés par des réfugiés de Moselikatse. » (King, 1951, p.148).*

5.5.2.3. Expédition de Baillieul de 1973

La carte (Figure 938), ci-dessous, localise 3 grottes.

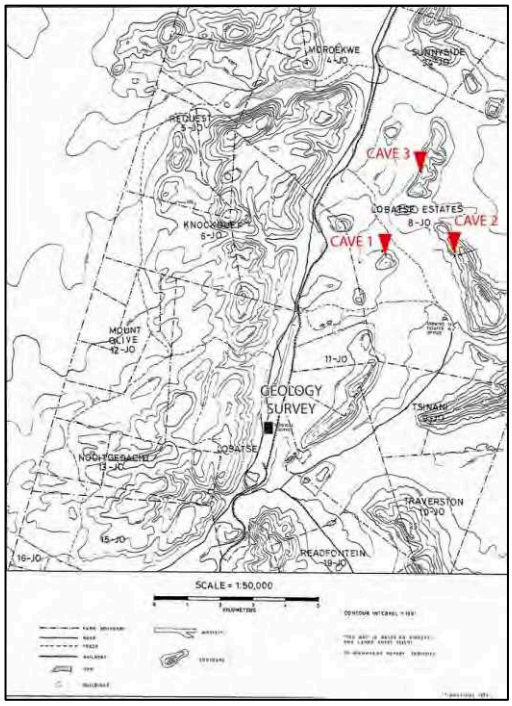
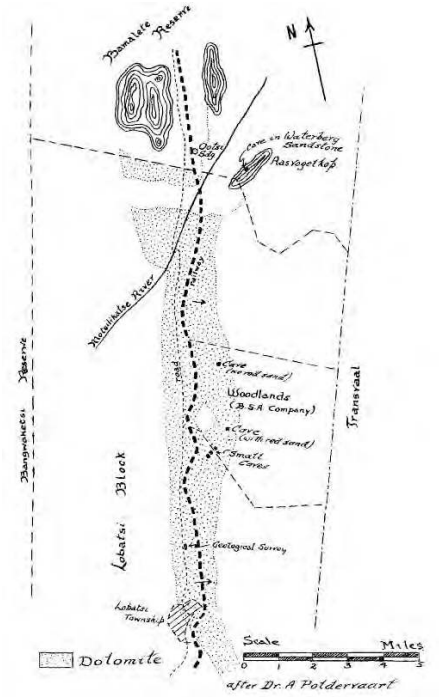


Figure 938 Localisation des grottes de Lobatse (Source : Baillieul, 1973).

5.5.2.4. Expédition de Cooke et article de 1975



La carte de localisation des grottes de Lobatse (Cooke, 1975, Fig.1, p.32) et les plans topographiques des grottes n°1 (p.33), n°2 (p.34) nous ont été très utiles pour localiser les grottes et les différencier, afin de s'y retrouver avec les numérotations données par les différents auteurs.

Figure 939 Le géoréférencement de cette carte de King (1951, fig.6, p.147) indique que la grotte indiquée « Cave (no red sand) » n'a pas été retrouvée par Stephens et al.(2022) ni par le Mother Lode Grotto (2006). Ce secteur est entouré en orange sur la carte (Figure 941 p.934).

5.5.2.5. Description de Martini et Kavaleries, 1976

Pour Martini et Kavaleries, les sables rouges dans les cavités de Lobatse correspondraient aux grès de Waterberg qui affleurent dans le secteur (Figure 935 p. 927 et Figure 936). Ils seraient la preuve d'une phase de karstification anté-Waterberg (Martini et Kavaleries, 1976, p.231). Bien sûr, Martini et Kavalieries ne connaissaient pas la spéléogenèse par fantômisation, que nous avons décrite précédemment (page 214), et la possibilité qu'elle offre de piéger, dans le karst, des dépôts de couverture antérieurs par effondrement du fantôme et soutirages.

5.5.2.6. Rapport de reconnaissance de 2006 de Mother Lode Grotto of the National Speleological Society

En 2006, John Hargreaves (*aka CaptNemo*) indique 4 cavités à Lobatse, des photos et des comptes rendus de prospections sont disponibles sur internet :
https://www.chilembwe.org/botswana/reports.html (mai 2024)
https://captnemo.smugmug.com/Caving/Africa/Lobatse-cave/ (mai 2024)
https://captnemo.smugmug.com/Places/Botswana-and-South-Africa/Lobatse/i-4Td5qph (mai 2024)

5.5.2.7. SASA, SEC Caving et SEC Cave Register

Voici les coordonnées du *SEC Caving*, fournis par Thilo Muller par mail :
Lobatse Cave I: -25.163625, 25.71097222
Lobatse Cave 2: -25.13117222, 25.72423611
Nous n'avons pas indiqué sur notre carte de synthèse (Figure 941 p.934) la grotte n°1 pour laquelle nous avons une autre position GPS vérifiée. Toutefois, la cavité n°2 de Mark Stephens (Stephens *et al.*, 2022) n'a pas été retrouvée au point GPS indiqué. Après échange par mail avec l'auteur, nous pouvons penser que la position GPS est correcte mais que le terrain a changé et que peut-être la grotte serait rebouchée, surtout qu'elle s'ouvrait au niveau du sol. Nous indiquons sur nos cartes la position de la grotte n°2 de Lobatse, indiquée par Thilo Muller, qui pourrait peut-être s'avérer être une autre grotte. Cependant, la prospection, en juin 2024 dans ce secteur n'a rien donné (Bruxelles, comm. orale). La carte (Figure 938), ci-dessous, de Baillieul (1973) indique une grotte (*Cave 3*) un peu plus au sud que les deux autres positions précédentes indiquées pour la grotte n°2. Elle pourrait être effectivement la position correcte de cette grotte que nous recherchons, indiquées en bleu sur la Figure 941 et la Figure 943. Nous n'avons pas pu prospecter ce secteur.

5.5.2.1. Inventaire dans l'ouvrage édité chez Springer de Stephens et al., 2022

Un inventaire des cavités du Botswana est réalisé par Stephens (Stephens M. *et al.* 2022, Table 14.4, p.249), nous l'avons compilé dans le tableau suivant (Tableau 51, p.932).

nom	region	S	E	latitude S	longitude	lithology	entrance geomorphology	stratigraphic information
Cave 1	Lobatse	25° 09, 771'	25° 42, 680'	25,16285	25,7113333	dolomitic	roof collapse	Transvaal Supergroup
Cave 2	Lobatse	25° 07, 751'	25° 43, 537'	25,1291833	25,7256167	dolomitic	initial quasi-horizontal passage from weathering/erosion of vertical fracture	Transvaal Supergroup
Cave 3	Lobatse	25° 09, 956'	25° 42, 228'	25,1659333	25,7038	dolomitic	weathering / erosion of a fracture producing a crevice	Transvaal Supergroup
Cave 4 (Mohu)	Lobatse	25° 10, 065'	25° 42, 122'	25,16775	25,7020333	dolomitic	roof collapse	Transvaal Supergroup
Athlone cave	Lobatse	25° 12, 400'	25° 40, 213'	25,2066667	25,6702167	siliciclastic	weathering / erosion of at intersection of fractures	Segwagwa Group
Lepokole cave	Lobatse					granitic	weathering / erosion of horizontal fractures	Central Zone of Limpopo Mobile Belt
Manyana Rockshelter and cave	Lobatse	24° 45, 831'	25° 35, 372'	24,76385	25,5895333	siliciclastic	Undercutting of horizontally bedded rocks and rock fall (rockshelter); weathering / erosion at intersection of bedding / vertical fracture (cave)	Waterberg Group
Thamaga rockshelters	Lobatse					siliciclastic	Weathering / erosion at base of kopje	Waterberg Group
Mmalogage (Lekgolobotlo)	Lobatse	25° 54, 944'	25° 32, 936'	25,9157333	25,5489333	siliciclastic		Waterberg Group

Kobokwe cave (Molepolole)	Lobatse	24° 25, 889'	25° 32, 132'	24,431 4833	25,535 5333	siliciclastic	weathering / erosion of vertical fracture	Waterberg Group
Malladiepe Cave	Otse	25° 01, 962'	25° 45, 354'	-25,032 7	25,755 9	siliciclastic	weathering / erosion at intersection of bedding / vertical fracture	Waterberg Group
Malladiepe rockshelter & spring	Otse	25° 02, 012'	25° 45, 306'	25,033 5333	25,755 1	siliciclastic	weathering / erosion of a bedding plane	Waterberg Group
Mannyelanong Cave	Otse	25° 2,669'	25° 46, 131'	25,044 4833	25,768 85	siliciclastic	weathering / erosion of horizontal bedding / vectical fracture	Waterberg Group
Mannyelanong (vulture cliff) Cave	Otse	25° 3,610'	25° 45, 504'	25,060 1667	25,758 4	siliciclastic	weathering / erosion of horizontal bedding / vectical fracture	Waterberg Group
Baratani - Segorong Cave	Otse	25° 00, 467'	25° 43, 449'	25,007 7833	25,724 15	siliciclastic	weathering / erosion of horizontal bedding / vectical fracture	Waterberg Group
Shoshong Cave	Otse					siliciclastic		Waterberg Group
Dimomo Cave	Tswapong Hills					siliciclastic		Waterberg Group
Cave in Phato Ye Sebilo Gorge	Tswapong Hills	22° 36, 676'	27° 26, 255'	22,611 2667	27,437 5833	siliciclastic		Waterberg Group
Gcwihaba Caves	Tswapong Hills	20° 1,487'	21° 21, 276'	20,024 7833	21,354 6	dolomitic	Root collapse	Waudum Group, Damara Belt
Aha hills	Tswapong Hills	20° 1,233'	21° 21, 573'	20,020 55	21,359 55	dolomitic	Root collapse	Damara Belt
Koanaka Hills	Tswapong Hills	19° 46, 685'	21° 3,421'	19,778 0833	21,057 0167	dolomitic		Koanaka Group, Damara Belt
Tsodilo Hills	Tswapong Hills	18° 43, 848'	21° 43, 864'	18,730 8	21,731 0667	siliciclastic	Majority from weathering / erosion of bedding planes and at intersection of horizontal bedding / vertical fracture; also, talus-type caves	Tsodilo Hills, Group Damara Belt

Tableau 51 Cavités du Botswana ont Lobatse (Source : Stephens et al. 2022, Table 14.4 p.249, modifié).

5.5.2.2. Carte synthétique des cavités de Lobatse

Nom de la cavité	Nom de l'objet daté	Âge minimum en années (BP)	Âge maximum en années (BP)	Référence bibliographique
Lobatse Cave 2	LII4	21425	27206	Holmgren *et al.*, 1994, 1995
	LII4-KH	21458	50943	

Figure 940 Données sur les datations de spéléothèmes dans la grotte de Lobatse n°2 selon Braun et al., 2019, Table 1.

Les différents inventaires, cités ci-dessus, et leurs vérifications par une expédition de terrain menée en juin 2024, ont permis de réaliser des cartes de localisation des grottes de Lobatse (Figure 941 à Figure 945) que nous présentons ci-dessous.
La carte de localisation des grottes de Lobatse (Cooke, 1975, Fig.1, p.32) et les plans topographiques des grottes n°1, n°2 nous ont été très utiles pour localiser les grottes et les différencier selon les numérotations données par les différents auteurs.
Du nord au sud, plusieurs cavités sont distinguées dans l'inventaire récent de Mark Stephens (Stephens *et al.*, 2022), synthétisé dans le Tableau 51 (p.932) :

- Manyana Rockshelter and cave ;
- Baratani – Segorong Cave ;
- Malladiepe rockshelter & Spring et Malladiepe Cave ;
- Mannyelanong Cave ;
- Mannyelanong (vulture cliff) Cave ;
- Lobatse Cave n°2 ;
- Lobatse Cave n°3 ;
- Lobatse Cave n°1 ;
- Lobatse Cave n°4 (Mohu), correspondant à la grotte n°3 du Mother Lode Grotto ;
- Athlone Cave.

Le report de la carte géologique de Dietvorst (1988, Fig.1, p.642) sur une carte hypsométrique (Figure 942) du karst de Lobatse permet de localiser des buttes karstiques non prospectées, qui pourraient contenir des cavités comme dans le Cradle of Humankind ou à *Gcwihaba Hills* et *Koanaka Hills* au Botswana. De plus, on remarque que les cavités sont localisées préférentiellement au toit des dolomies et au mur des quartzites du groupe de Pretoria, comme dans l'ensemble du *CoH*.

La carte hypsométrique est créée en calculant les pentes et une ombre projetée à partir du MNT et des logiciels SIG comme nous le décrivons dans le Chapitre n°1 (p.56).

Intéressons-nous ici seulement aux cavités situées dans les formations carbonatées où nous avons potentiellement plus de chance de trouver des fossiles conservés. Les grottes plus au nord sont situées dans les grès de Waterberg. Remarquons aussi que la *small cave* et la *cave n°2 - vertical enter* du *Mother Lode Grotto* sont situées respectivement dans les quartzites de Pretoria et au niveau dans la formation de Ventersdorp (Figure 942).

La carte produite, ci-dessous (Figure 941), permet de localiser les cavités de Lobatse. La zone circulaire délimitée en jaune correspond au secteur où devrait se situer la grotte indiquée « *Cave (no red sand)* » sur la carte de King (1951, fig.6, p.147) et qui n'a jamais été retrouvée lors des expéditions spéléologiques.

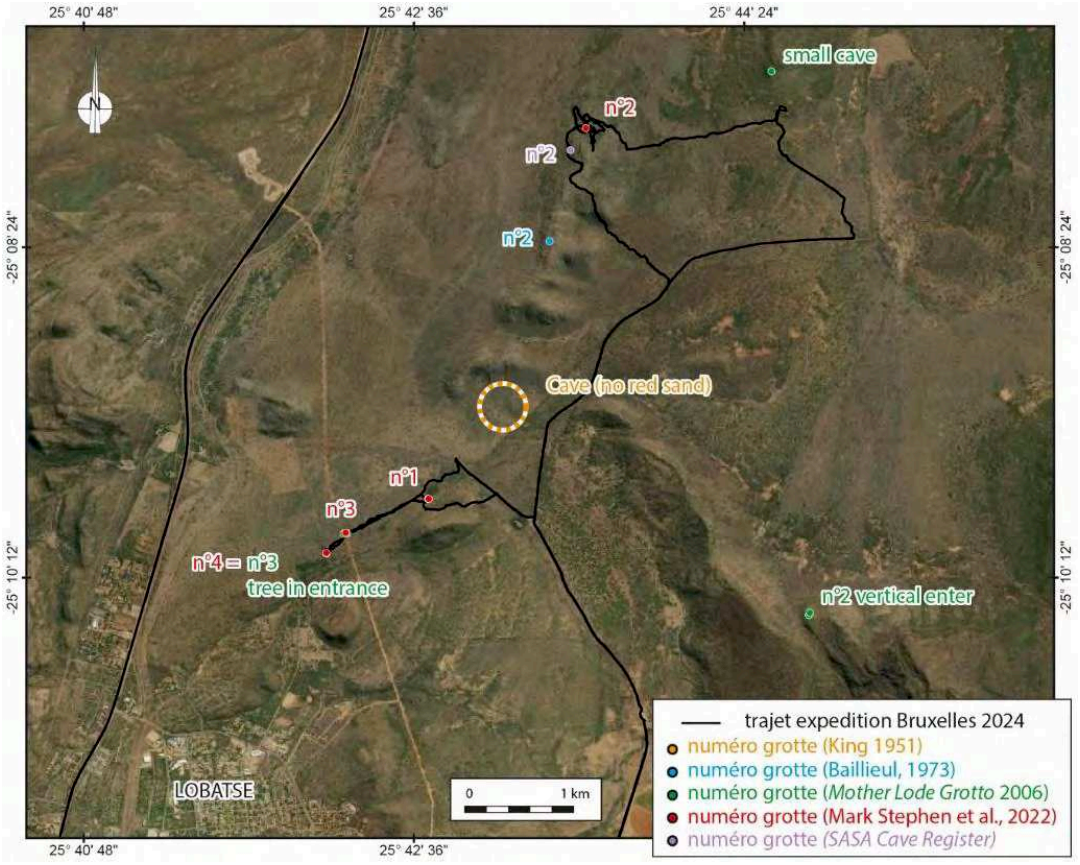


Figure 941 Synthèse cartographique des cavités de Lobatse, trouvées pendant les différentes expéditions.

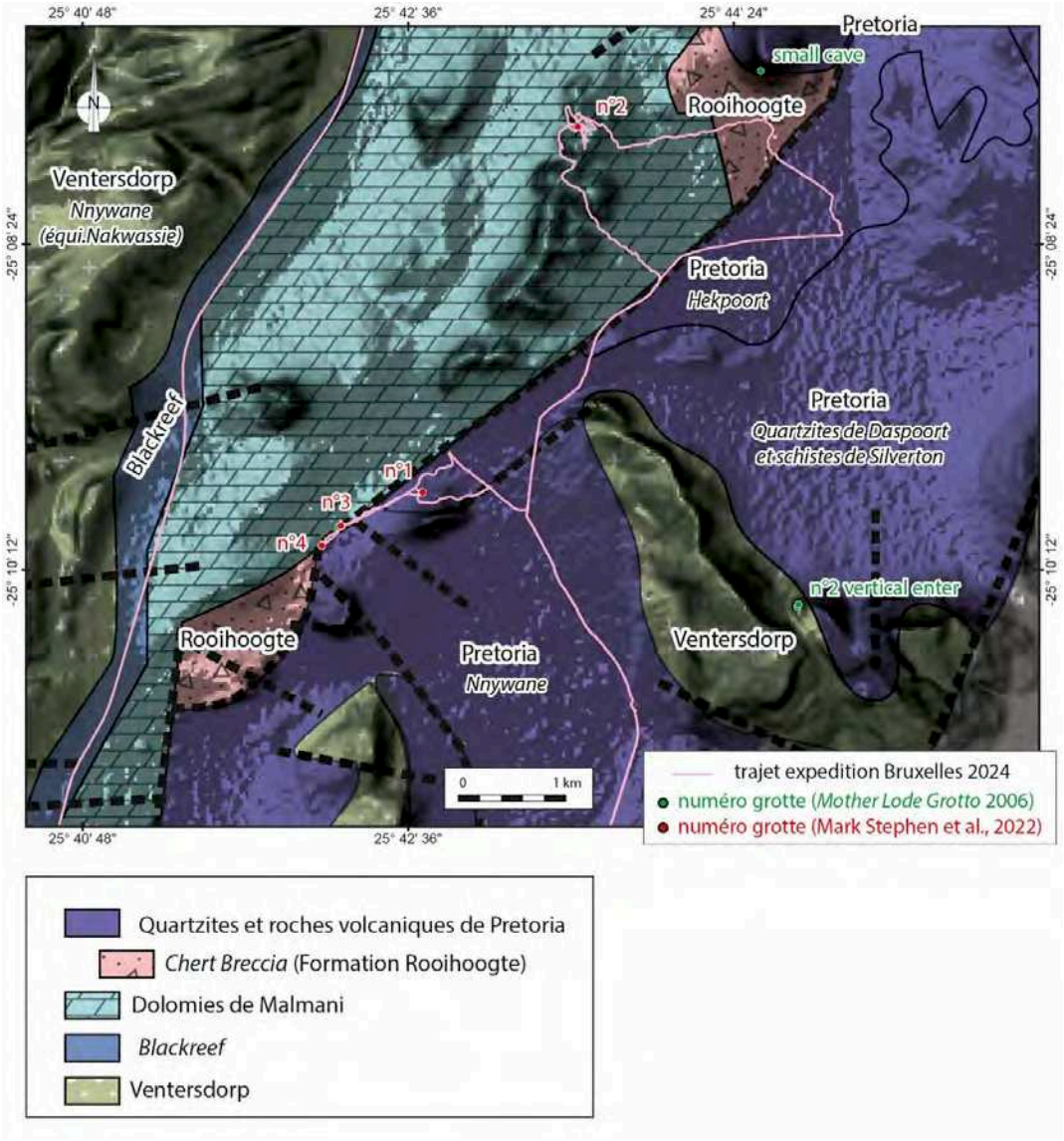


Figure 942 Report de la carte géologique (Dietvorst, 1988, Fig.1, p.642) et de la carte hypsométrique du karst de Lobatse. Des failles ont été indiquées par des traits en pointillé noir.

La rapide prospection de juin 2024, dont le trajet est indiqué en rose sur la Figure 942 et en noir sur la Figure 944 montre le potentiel spéléologique remarquable de ce karst qui forme « un replat sur lequel on trouve de nombreuses dépressions et cavités » (comm. orale Bruxelles).

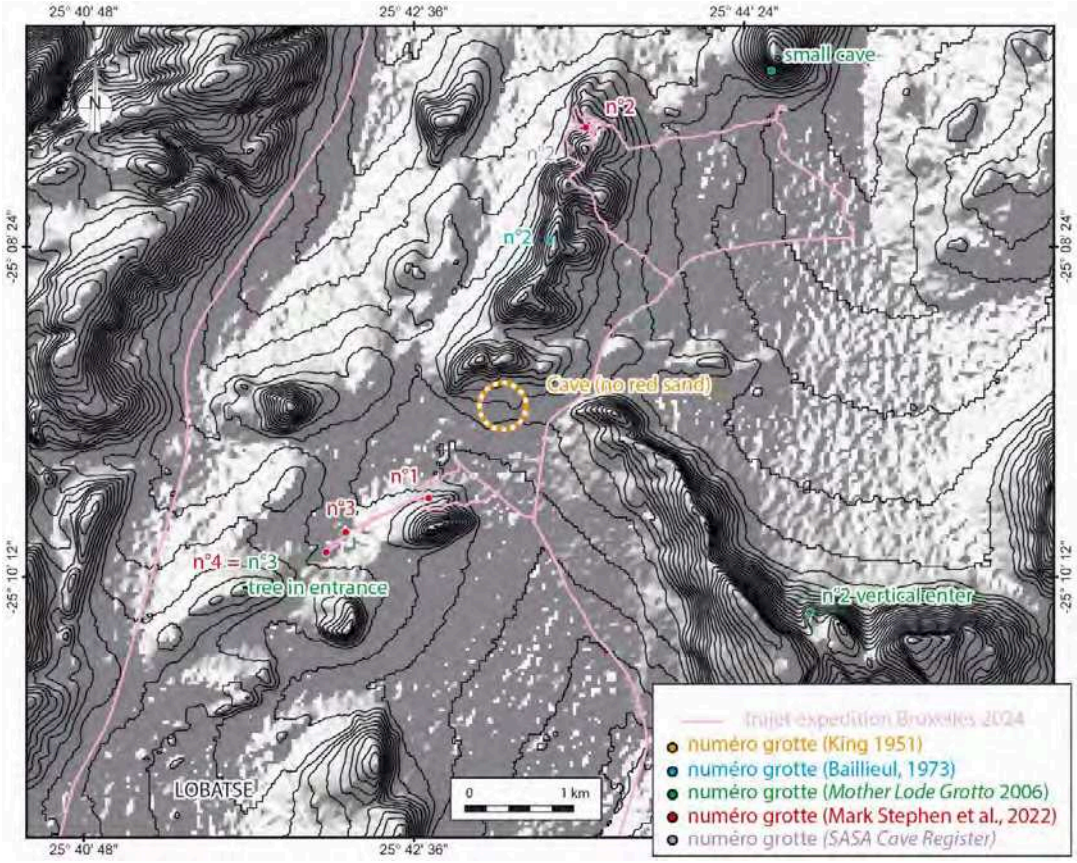


Figure 943 Carte (modèle ombré et pentes) du karst de Lobatse montrant des buttes karstiques et des surfaces subhorizontales.

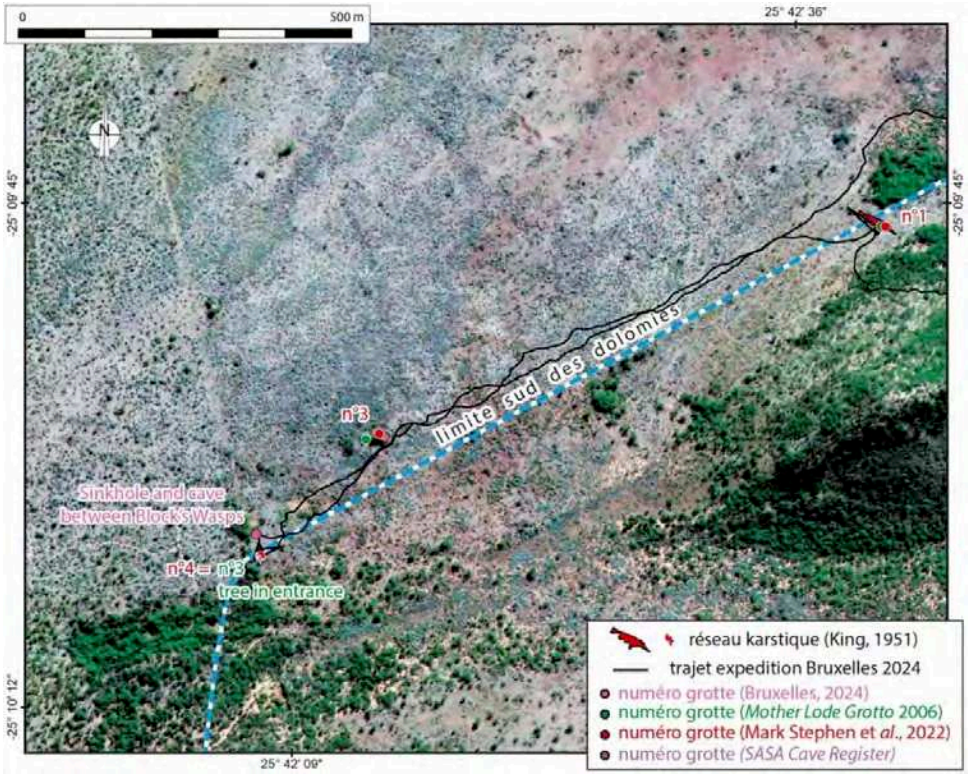


Figure 944 Localisation des cavités (n°1, 3 et 4) de Lobatse, sur une image satellite (Bing). Le trajet de prospection est indiqué en noir.



Figure 945 Détail de la figure précédente. La localisation des cavités au pied des figuiers montre que chaque zone boisée peut être une cavité.

5.5.2.3. Description succincte des cavités de Lobatse

11. Cavité de Lobatse n°1

25°09,771' ; 25°42,680'

Cette cavité a pu être prospectée lors de la mission de juin 2024 par Laurent Bruxelles et son équipe. Le puits d'entrée, d'une vingtaine de mètres, nécessite l'utilisation des techniques de spéléologie pour la descente et la remontée (Figure 947).

À l'intérieur de la cavité, à l'aplomb du puits, se trouve une épaisse accumulation actuelle de sédiments et de branches d'arbres, formant un cône d'éboulis (Figure 948). C'est un bon analogue des remplissages anciens indurés que nous étudions dans les grottes, comme celui où a été retrouvé *Little Foot* dans la grotte de Sterkfontein.

Dans la salle du puits, on retrouve en abondance, du sol (Figure 951) jusque contre les parois du puits (Figure 951) une brèche rouge, peu indurée, qui contient des claste de chert (Figure 949 et).

Elle ne contient malheureusement pas de fossiles et elle est a priori récente par rapport à nos problématiques de recherche.

Cette brèche, venant de la surface topographique au-dessus, est venue combler presque l'entièreté de la cavité en remplacement du fantôme de roche telle que le montre la photographie de la Figure 952. Aujourd'hui, cette brèche est en partie éliminée par soutirage. Des épisodes de calcite (Figure 950) il y a environ 27 000 ans et à -51 000 ans (Holmgren *et al.*, 1994, 1999) sont venus combler certaines vides.

Il y a un arrêt de la croissance de la calcite à 35 000 ans (Braun *et al.*, 2019).



Figure 946 Aven d'entrée de la grotte n°1 (Source : Bruxelles L.).

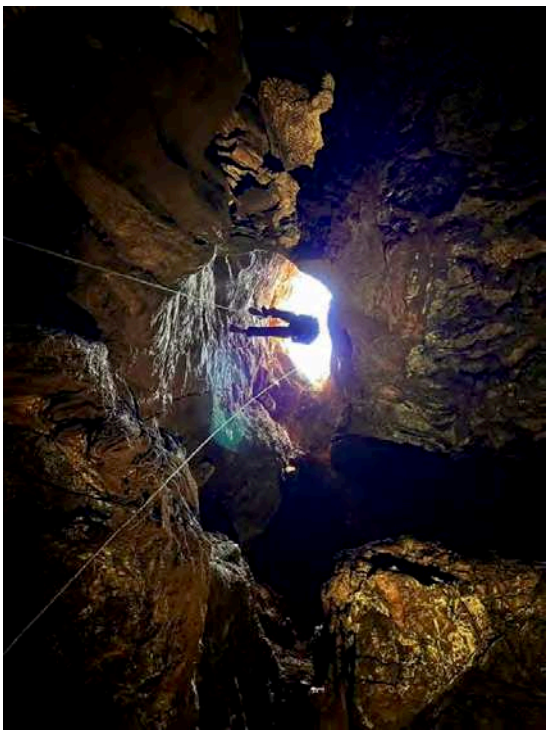


Figure 947 Le puits d'accès de la cavité n°1. (Source : Laurent Bruxelles).



Figure 948 L'accumulation actuelle en-bas du puits d'entrée de la cavité, en particulier sa géométrie, est un bon analogue des remplissages karstiques fossilifères que nous étudions (Source : Laurent Bruxelles).

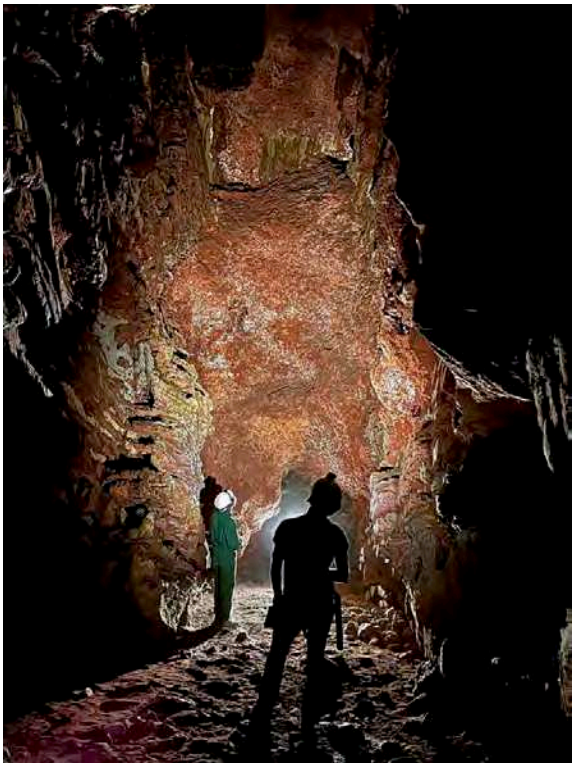


Figure 949 Brèches rouges dans la cavité. (Source : Laurent Bruxelles).



Figure 950 Corrosion des spéléothèmes et des remplissages.



Figure 951 Important remplissage bréchifiée rouge dans la grotte de Lobatse n°1. (Source : Laurent Bruxelles).



Figure 952 Le remplissage rouge est venu combler les anciennes parties fantômisées dans les dolomies, soulignées par des flèches blanches. La fantômisation du banc de dolomies est interrompue par l'interbanc de cherts. Nous avons indiqué deux interbancs de chert par des flèches rouges. (Source : Laurent Bruxelles).

12. Cavité de Lobatse n°2

Nos investigations dans ces deux secteurs, distant de 200 m (cf. Figure 941), ne nous a malheureusement pas permis de recouvrer cette grotte. La topographie de cette cavité indique qu'elle se développe sur trois étages de galeries (Figure 953) et qu'il y a un puits de 18 m.

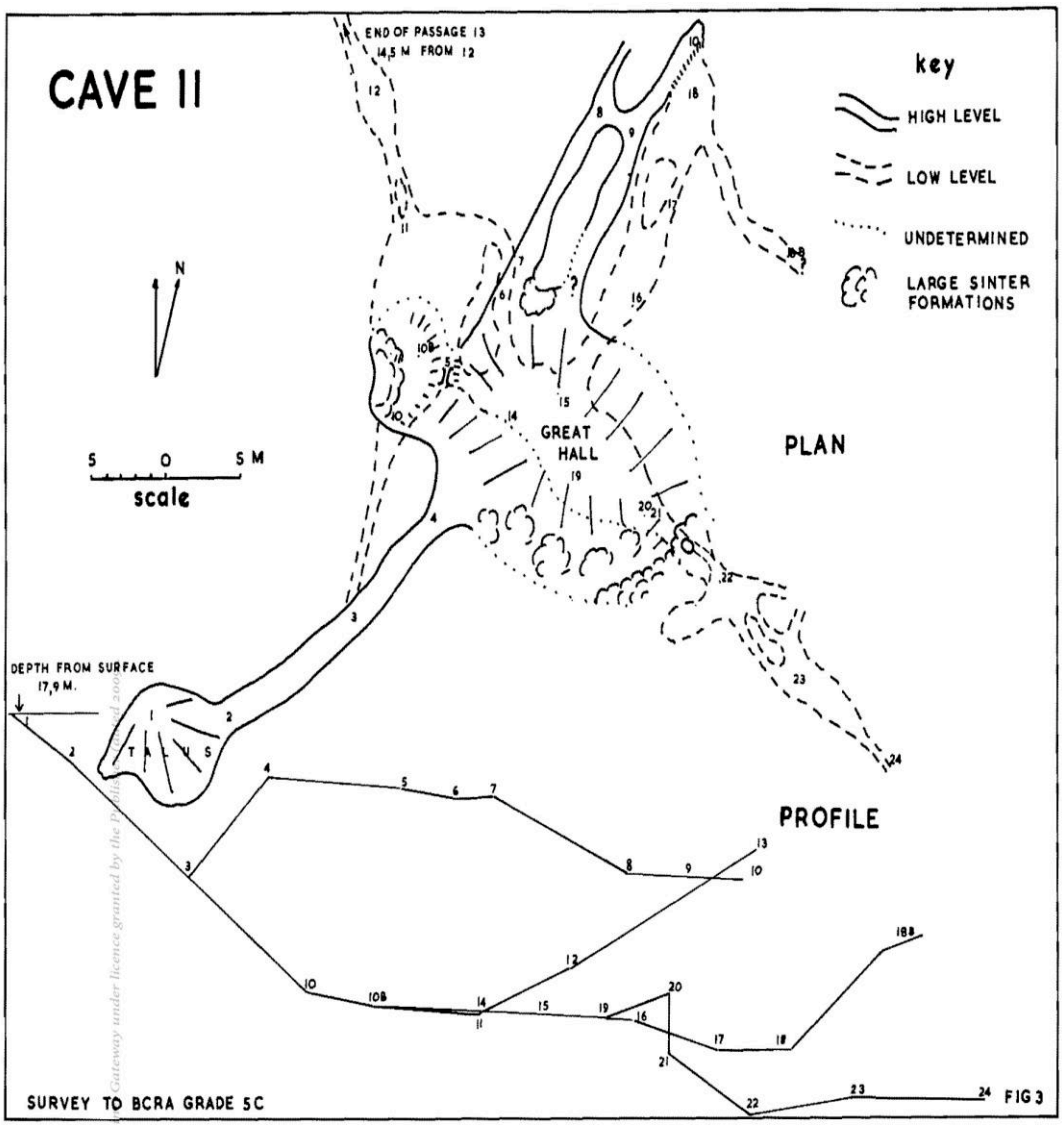


Figure 953 Plan topographique de la grotte de Lobatse n°2 par Cooke (1975).

Braun (*et al.,* 2019, Table 1) fournit les coordonnées suivantes pour la cavité n°2 (-25,21° et 25,68°, altitude : 1200 m). Stephens (*et al.,* 2022) recopie les mêmes coordonnées (25°07,751' ; 25°43,537') dans sa publication. En fait, cette coordonnée correspond à la position de la ville de Lobatse. Le SASA Cave Register indique des coordonnées différentes, situées à 260 m au sud-ouest, dans un vallon (-25.13117222 ; 25.72423611 ; 1223 m) et indique la bibliographie associée : The Free Caver 1979-06 no3 p13-16| The Free Caver 1980-11 no7 p2-4| The Free Caver 1983-10 no15 p15-21| SASA Record of the Transvaal 1994 No.27 p2-4). Tandis que Baillieul (1973) indique cette cavité n°2 plus au sud sur sa carte (Figure 938). Nous avons indiqué cette cavité n°2 par un point bleu sur la Figure 941 et la Figure 943.

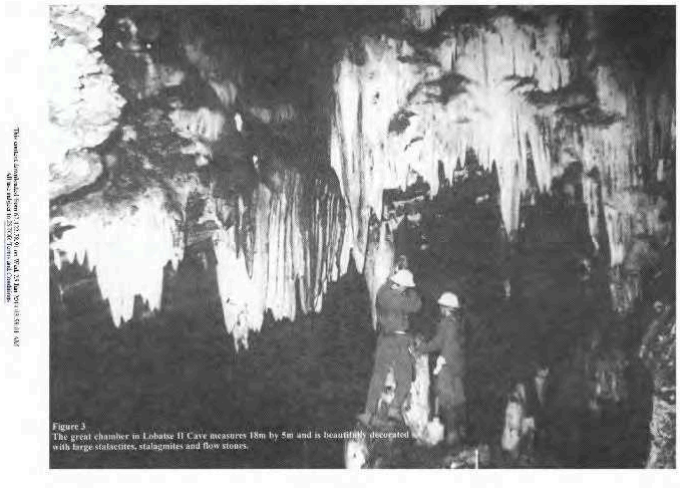


Figure 954 Photographie de la grotte de Lobatse 2 (des phases de concrétionnements vers 197 000 ans et 21 000 BP (Holmgren et Shaw, 1999, p.78).

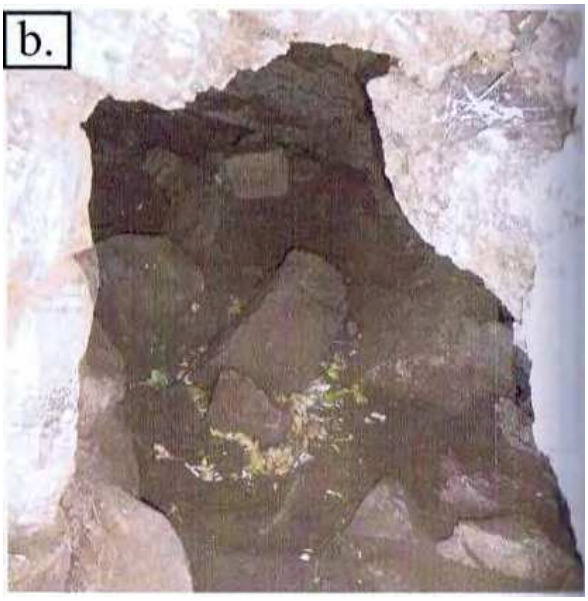


Figure 955 Photographie de l'entrée de la grotte n°2 (Source : Stephens et al., 2022, p.252).

13. Cavité de Lobatse n°3

25°09,956' ; 25°42,228'

Cette cavité n'a pu être prospectée lors de la mission de juin 2024 par Laurent Bruxelles et son équipe du fait de la présence de nids de guêpes dans l'entrée. C'est une dépression d'une dizaine de mètres de diamètre qui se prolonge par une fissure verticale étroite. C'est la seule grotte dans laquelle Mark Stephens est descendu (comm. perso.) et en utilisant des cordes.

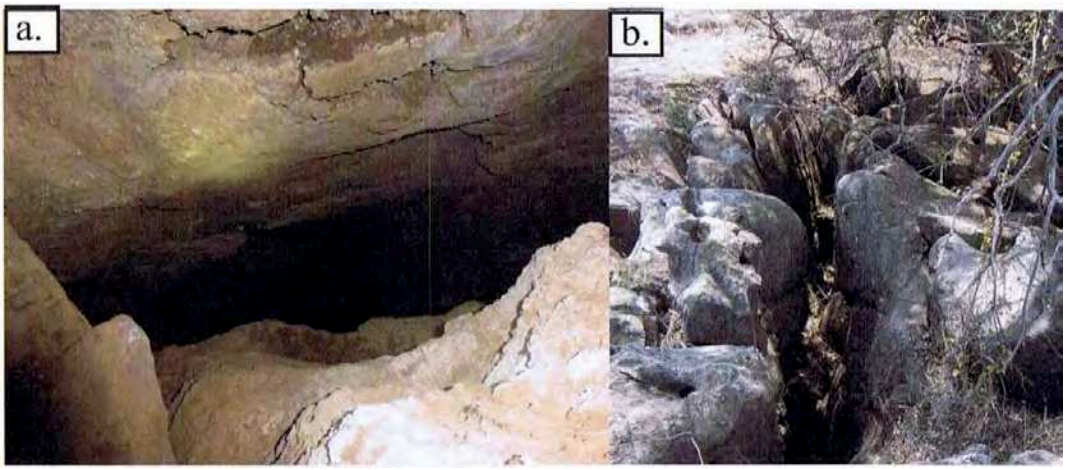


Figure 956 Photographie de la grotte n°3 (Source : Stephens et al., 2022, p.252).

14. Cavité de Lobatse n°4 (Mohu)

(25°10,065 ; 25°42,122')

Il y a aussi des nids de guêpes à l'entrée de cette petite cavité (Figure 957 et Figure 958) mais la cavité a pu être prospectée lors de la mission de juin 2024.



(Source : https://www.chilembwe.com/botswana/reports.html)

Figure 957 Entrée de la grotte de Lobatse n°4 en 2006.



Figure 958 Entrée de la grotte en 2024 (Source : Laurent Bruxelles).



Figure 959 Topographie de cette petite cavité (Source : https://www.chilembwe.com/botswana/reports.html).

15. Dépression à côté de la grotte n°4 avec des nids de guêpes.

Il y a une autre dépression à côté de la grotte n°4, mais la présence de nombreux nids de guêpes â côté de l'entrée étroite n'a pas permis de rentrer dans la cavité.

5.5.2.4. Intérêt de la grotte d'Abjaterskop

La grotte d'Abjaterskop est située vers Lobatse dans les dolomies. Elle est inventoriée sous le numéro n°0064 dans le *SASA Cave Register*. On dispose d'un plan topographique. Elle est située au sommet d'une colline dolomitique, comme Sterkfontein, Swartkrans, Kromdraai, Cooper.

Cette grotte est intéressante car elle montre une accumulation récente d'ossements de babouins qui serait liée à des accidents d'escalade (Kavalieris et Martini, 1975). Cette cavité serait un bon analogue pour comprendre la présence de fossiles d'Hominines dans les grottes du *Cradle of Humankind*.

> *« La grotte d'Abjaterskop est un grand gouffre d'effondrement situé sur la ferme Abjaterskop, au nord de Zeerust, dans l'ouest du Transvaal. Elle a une forme approximativement rectangulaire, contrôlée par deux directions de joint dominantes. Elle coupe la surface sur une pente rocheuse abrupte avec la formation d'une entrée relativement petite en forme de fenêtre dans la colline, le long du plan d'inclinaison de la dolomite. Cette grotte est essentiellement une chambre unique formée entièrement par effondrement ; le niveau phréatique est à une profondeur inconnue sous le sol des décombres et n'est pas accessible. La chambre contient des formations carbonatées à l'exception de quelques vieux rocs morts. Il est particulièrement intéressant de noter que la grotte contient un dépôt de nitrate, une croûte recouvrant des parties du sol, d'environ 50 cm d'épaisseur, formée de guano de chauve-souris dans un environnement très aride. Le nitrate était autrefois extrait, peut-être pour des explosifs, car il s'agit de nitrate de potassium presque pur. Dans la grotte, les chauves-souris sont toujours présentes et il y a une très forte odeur d'ammoniaque qui est la raison de la formation de nitrate. Les babouins fréquentent la grotte, grimpant le long des parois presque verticales. De nombreuses carcasses de babouins desséchées au fond témoignent d'accidents fréquents » (Kavalieris & Martini, 1975, Bulletin SASA n°15. Pp-27-32).*

5.5.3. Karst de Ramotswa (Selaolo, 1985) (Secteur J de la Figure 915 p.910)

À 20 km au nord, de Lobatse, il y a aussi une zone karstique au niveau de la ville de Ramotswa (Selaolo, 1985 *in* I.H. 1986, Fig.1, p.14) mais pour laquelle nous n'avons pas de connaissance de l'existence de grottes. La partie ouest est très peuplée, ce qui rendrait difficile la prospection tandis que l'est, peu peuplé, est plus propice et en plus, il y a la présence d'une petite vallée comme celle de Sterkfontein. Dietvorst (1988, Fig.8, p.648) propose une carte géologique de ce secteur et il distingue plusieurs formations carbonatées qui sont des équivalents des dolomies de Malmani. On dispose aussi d'une cartographie des dykes (IWMI, 2018, Fig.8). Ce secteur a été bien étudié d'un point de vue hydrogéologie et nous fournit des informations importantes sur ce karst comme la présence de vallées sèches cartographiées par Selaolo (1985).

5.5.4. Karst d'Ottoshoop (secteur D de la Figure 915 p.910)

Dans la région d'Ottoshoop, au sud de Zeerust, Martini a cartographié des éléments correspondant à une karstification par crypto-altération et fantômisation des dolomies, comme des formations de brèches (*Giant Chert* et *Pologround*) que nous trouvons dans le *Cradle of Humankind*.

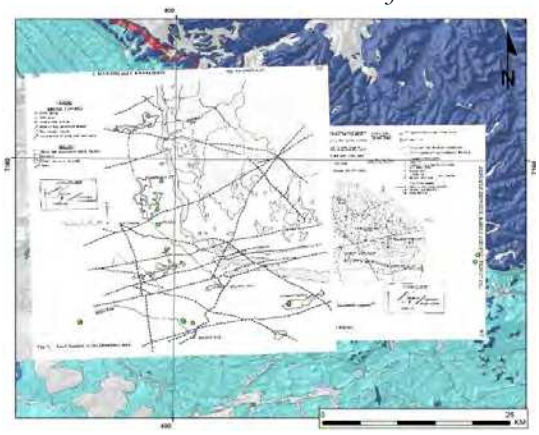


Figure 960 Géoréférencement des cartes de Martini et Kavaleries (1976, p.234-235). Voir aussi Martini (1976a, Fig.3, p.628).

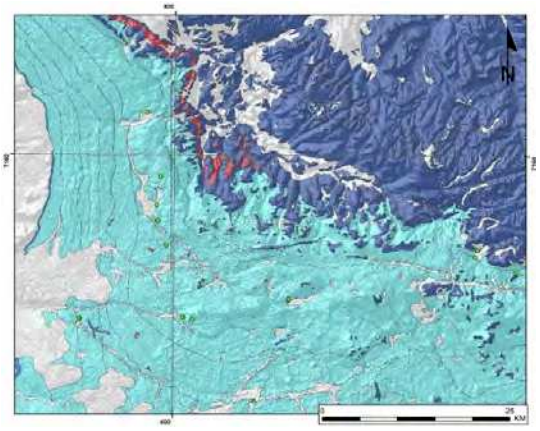


Figure 961 Carte géologique simplifiée du karst d'Ottoshoop.

Des cavités sont connues dans cette région (Martini J.,1977, Bulletin SASA n°19,p.6), comme par exemple : Bat ***Wondergat (SASA Cave Register n°0004)*** et Wonderfontein 2 cave ***(SASA Cave Register n°0008)***. La grotte de Wonderfontein serait la plus grande d'Afrique du Sud (Du Preez *et al.* 2016, Fig.1, p.653) (Figure 962).



Figure 962 Report en surface de la grotte de Wonderfontein (Du Preez et al. 2016, Fig.1, p.653).

D'autres cavités sont décrites dans les bulletins spéléologiques comme *Herbst's cave* ***(SASA Cave Register n°0003)*** (Martini J.,1977, Bulletin SASA n°19,p.5), *Bobbejan gat* ***(SASA Cave Register n°0115 et n°0118)***.

5.5.4.1. Identification de couloirs fantômisés

L'image satellite montre à l'affleurement, au sud-ouest de la ville Ottoshoop (S25°45'11.6864" ; E25°56'52.5646"), ce qui pourrait correspondre à une karstification par crypto-altération, il serait intéressant de prospecter ce secteur pour rechercher des brèches fossilifères.

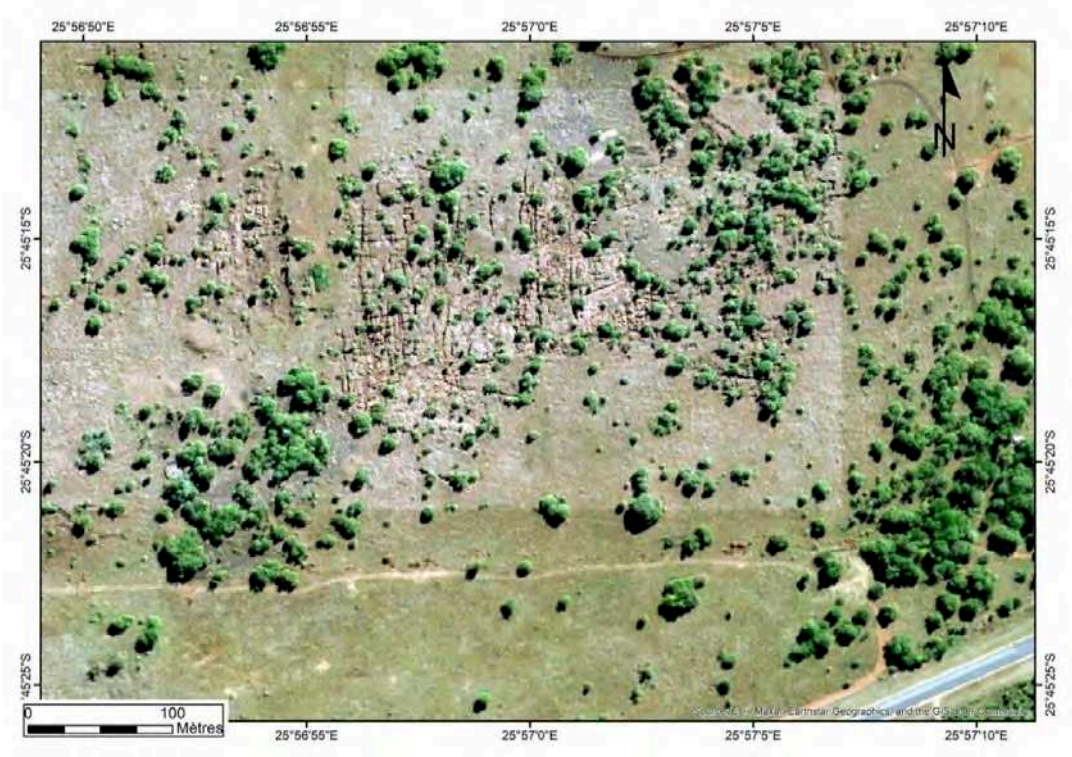


Figure 963 Crypto-karst d'Ottoshoop.

5.5.5. Karst de Kaapsekoor (Secteur E et F de la Figure 915 p.910)

Les altitudes du karst de Kaapsekoor sont similaires à celles du *Cradle of Humankind* et de Makapansgat. Nous n'avons pas trouvé d'information concernant des brèches ou des fossiles au niveau des grottes de ce secteur. Il serait très intéressant de le prospecter.

Sur la carte hypsométrique, ci-dessous, Figure 964, nous avons indiqué la limite des affleurements carbonatés (d'après la carte géologique Figure 965) où peuvent se situer d'autres grottes. Plusieurs grottes sont indiquées dans l'inventaire *SASA*, comme les très grandes grottes de Berlin (n°156, 157) (Martini, 1985, 1987).

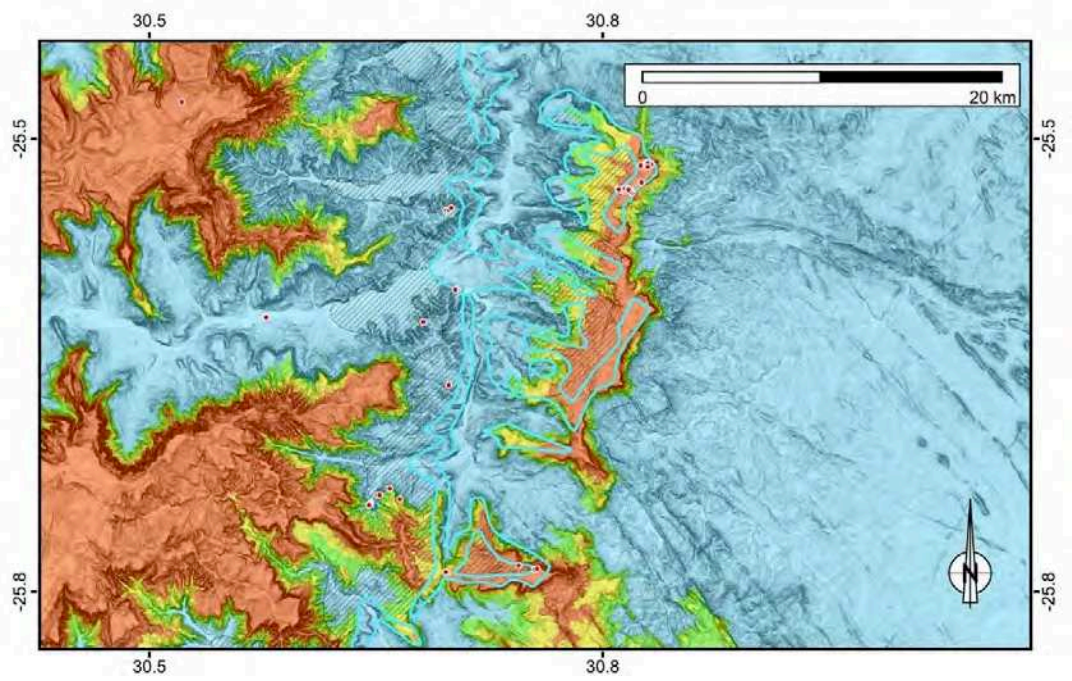


Figure 964 localisation des grottes connues du karst de Kaapsekor.

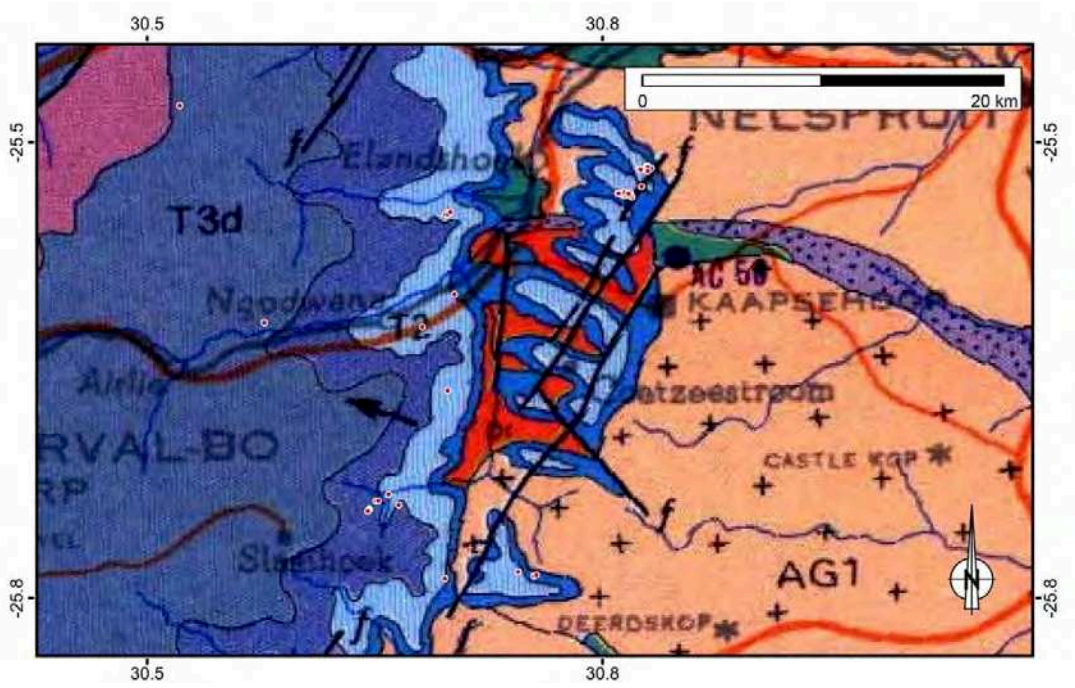


Figure 965 Carte géologique de Kaapsekor.

5.5.6. Karst de *Pilgrim's Rest* (Secteur G de la Figure 915 p.910)

La carte hypsométrique, ci-dessous, Figure 966, montre la position des cavités connues du karst de *Pilgrim'rest* qui culminent aux mêmes gammes d'altitude que le *Cradle of Humankind*, ce qui fait de ces grottes des cibles potentielles pour la recherche de brèches et de fossiles plio-pléistocènes. Plusieurs grottes sont indiquées dans l'inventaire *SASA* : *Wet Tiger Creek Cave* (n°156, 157), *Dusty Cave* (n°222), etc.

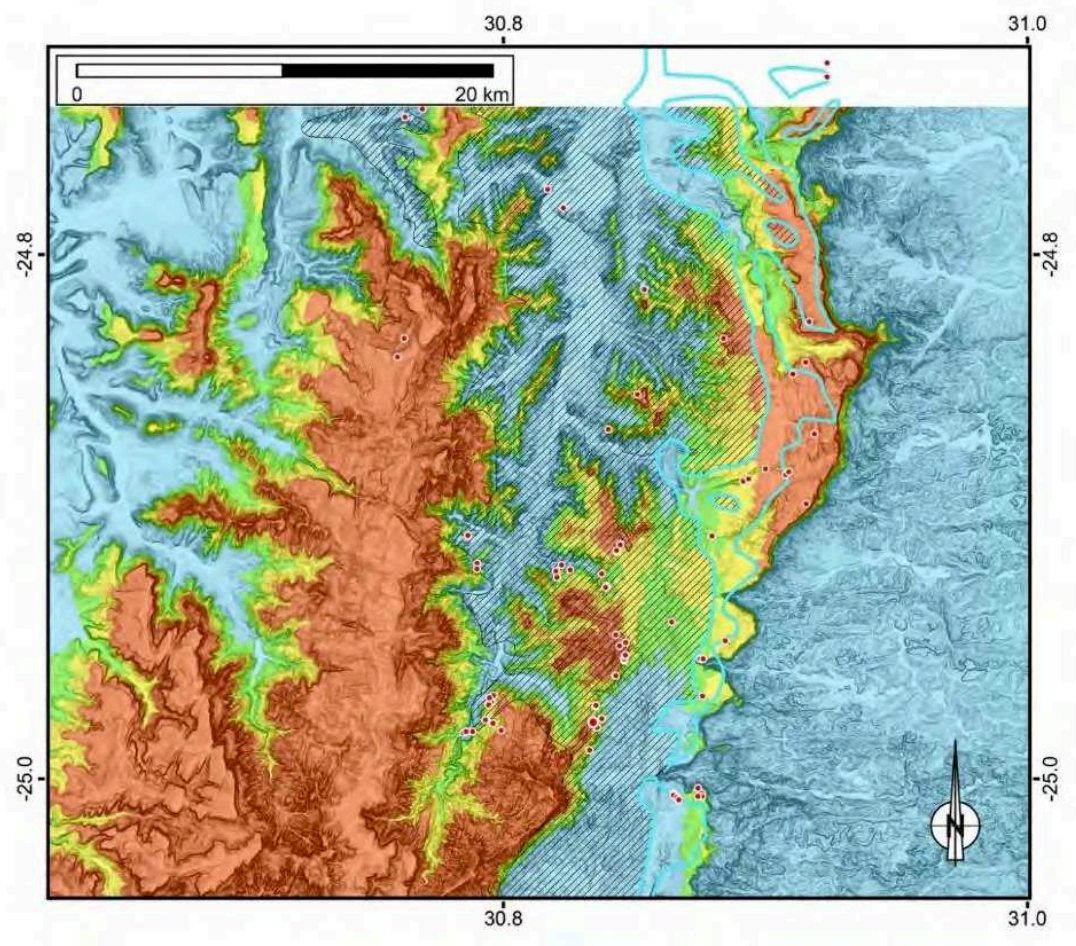


Figure 966 carte hypsométrique des cavités du karst de Pilgrim'rest.

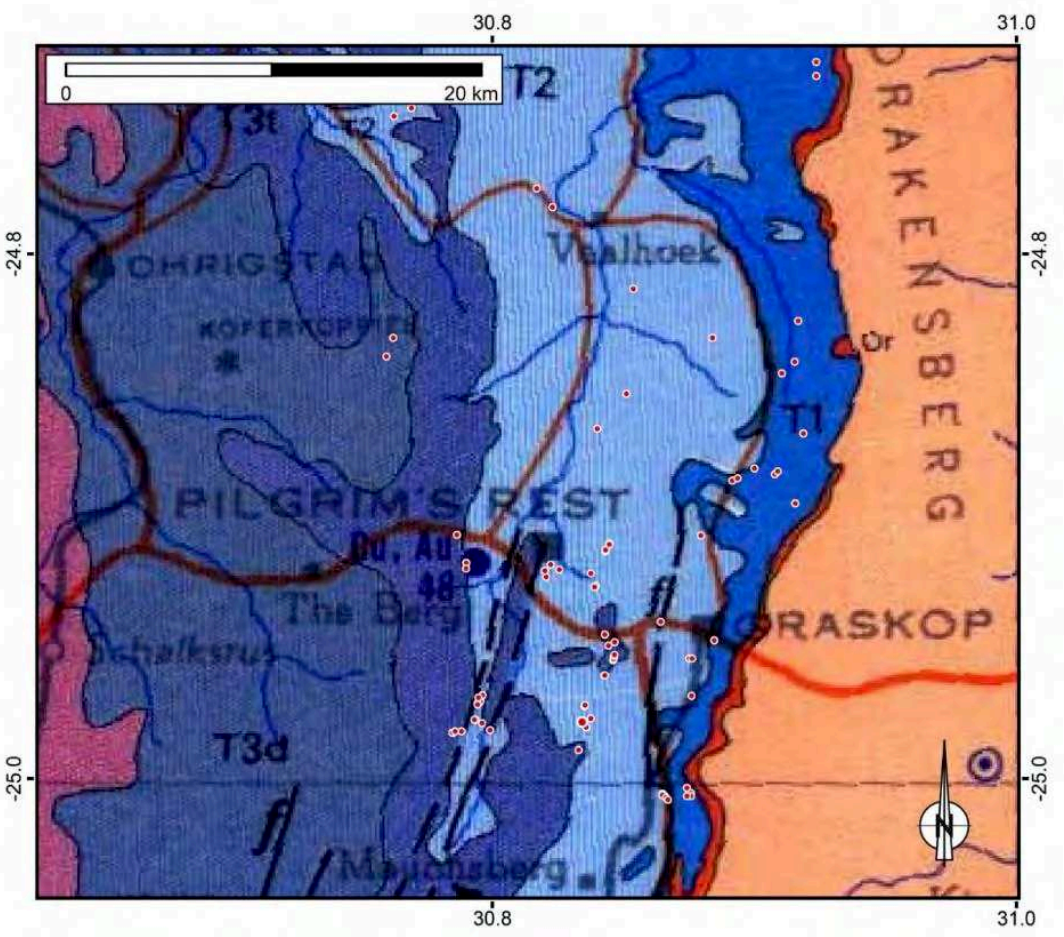


Figure 967 Carte géologique de Pilgrim'rest.

5.5.7. Karst de Wolkberg (Secteur H de la Figure 915 p.910)

Plusieurs cavités du karst de Wolkberg ont été topographiées et sont répertoriées dans l'inventaire *SASA*, parmi lesquelles figurent les grottes suivantes :

- Beatrice Cave (n°133) ;
- Hoogenoeg Cave (n°135) ;
- Donkerkloof Cave (n°140) ;
- Mithlapitsi Cave (n°153) ;
- *Abyss Pot* (n°198) ;
- Portugal Cave (n°199).

5.5.8. Karst de Makapansgat, en Afrique du Sud (Secteur A de la Figure 915 p.910)

Nous avons présenté brièvement ce karst dans le 1 (p.243). Rappelons qu'il est situé dans le Bassin du Transvaal et dans les dolomies protérozoïques (dolomies de Ramotswa, de Maholobota et de Magopane, équivalentes aux dolomies de Malmani du *Cradle of Humankind* (Eriksson *et al.*, 1993), (Mc Nabb et Sinclair, 2009, Fig. 3.7, p.35, Fig.3.11, p.44) (Latam et Herries, 2004, Fig.9, p.336).

Ici, les quartzites de Pretoria ont été profondément altérés et érodés (Figure 972). La vallée Mogalakwena, creusée dans les quartzites, à une altitude inférieure à 1200 m. Dans le *Cradle of Humankind* ces quartzites forment d'imposants reliefs (Magaliesberg, Witwatersberg), qui culminent à plus de 1600 m alors que la vallée de la Bloubank coule sur les dolomies vers 1450 m (cf. Chapitre n°2).

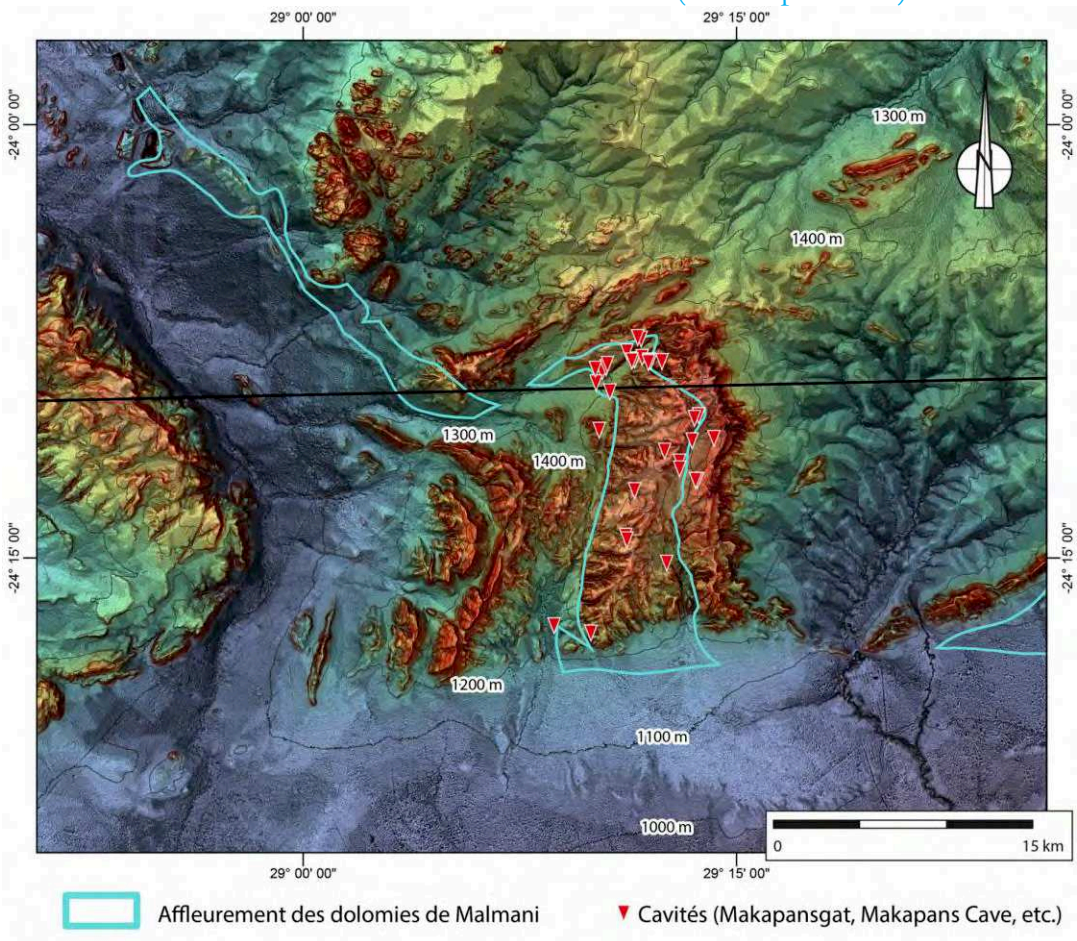


Figure 968 Hypsométrie RRIM de la région de Makapansgat et position de la coupe (trait noir ouest-est).

Dans la région de Makapansgat (Figure 969, Figure 970), on identifie une vaste surface d'aplanissement à 1200 m d'altitude (en vert) et des paléo-poljés à 1400 m (en bleu) et 1670 m (en orange) d'altitude où s'ouvrent les cavités fossilifères.

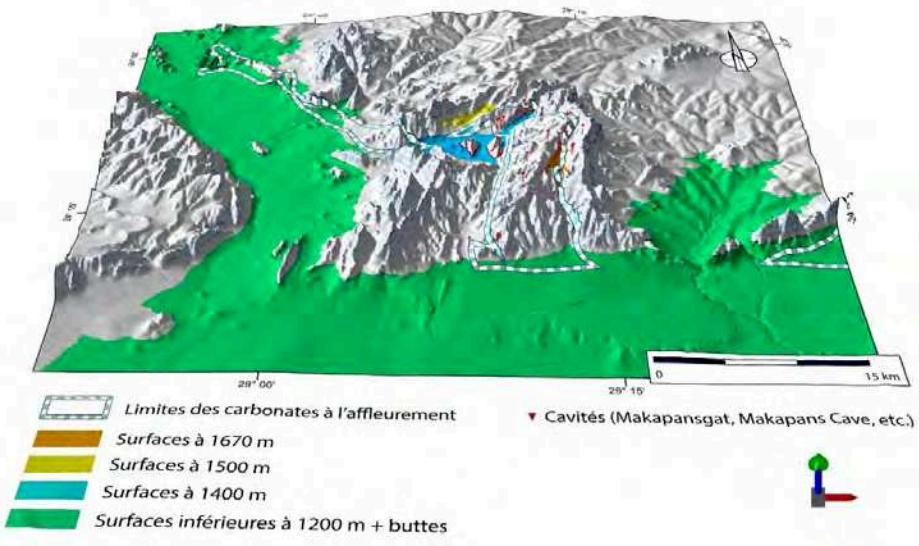


Figure 969 Analyse morphokarstique de la région de Makapansgat.

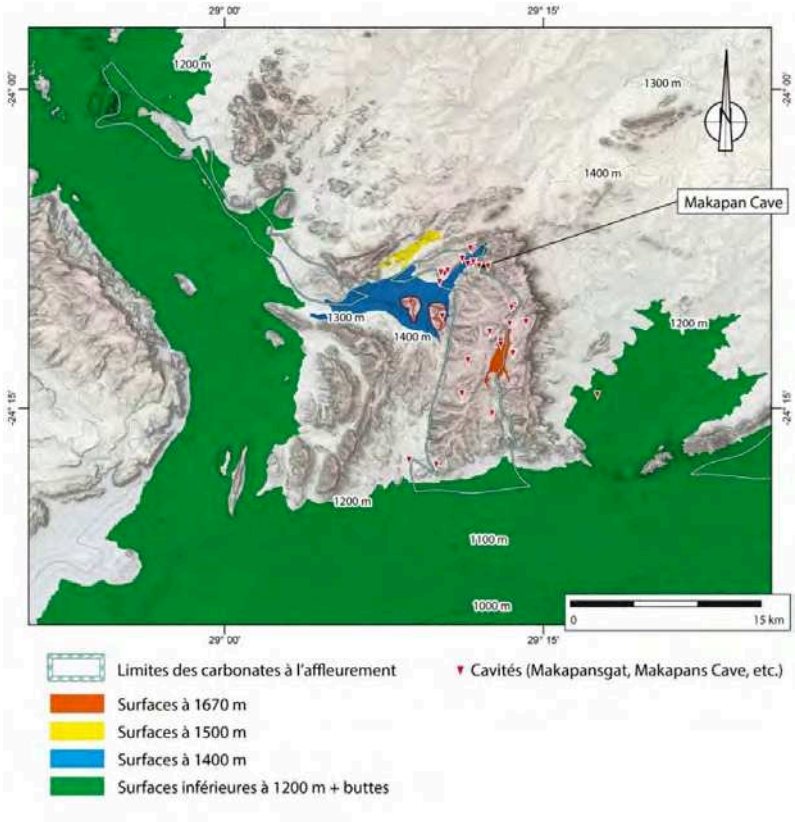


Figure 970 Analyse morphokarstique de la région de Makapansgat.

Une carte géologique précise est proposée par Brink et Partridge (1965, Fig. 2, p.16) et Kinnaird *et al.* (2005, Fig.2) et Hutchinson et al. (2013, Fig. 1). Cette dernière localise des dolomies métamorphisées par le **Complexe du Bushveld** avec la présence de gisements de platine (*Platreef*).

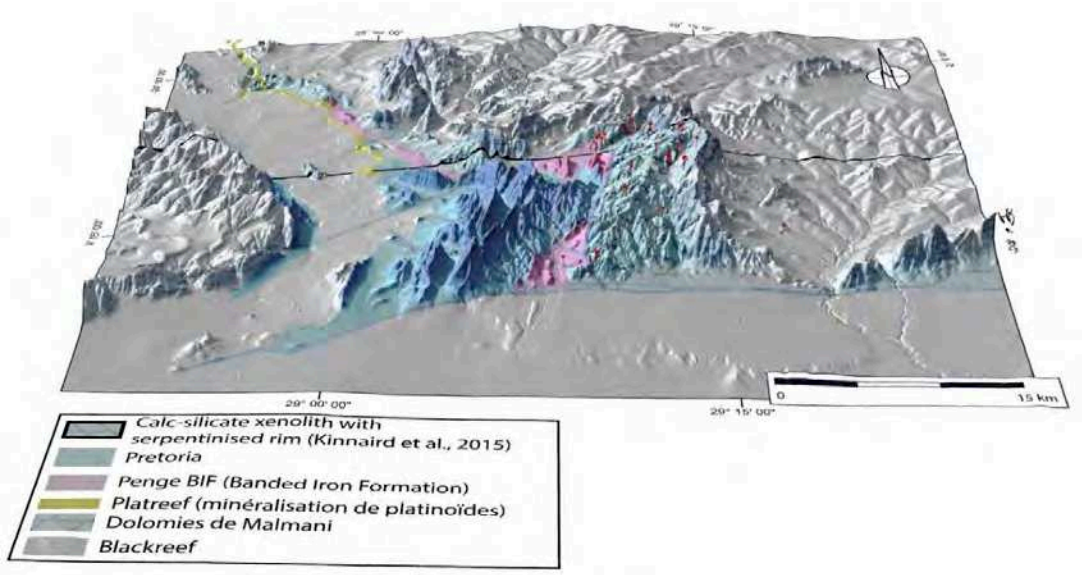


Figure 971 Géologie de Makapansgat.

Dans ce secteur, il faudra vérifier où affleure la formation altérée de la Duitschland (Bekker et al., 2001) et la Penge qui est située stratigraphiquement en-dessous des dolomies selon Frauenstein (2005). Il faudra aussi vérifier où passe les failles, notamment le grand accident de Thabazimbi et étudier le rejeu possible des structures comme indiqué par les cartes de Bailey *et al.* (2011), Basson et Keogelenberg (2016) et Basson (2018). La coupe stratigraphique proposée par Kinnaird *et al.* (2005), suggère qu'il existe de grands blocs de carbonates altérés, minéralisés (*calc-silicate xenolith with serpentinised rim*) et métamorphisés lors de la mise en place du Complexe du Bushveld.

Effectivement, au nord de la vallée de Makapansgat, cartographiée en orange, ci-dessous, sur la Figure 972, on trouve un important gisement de platine, le *Platreef*.

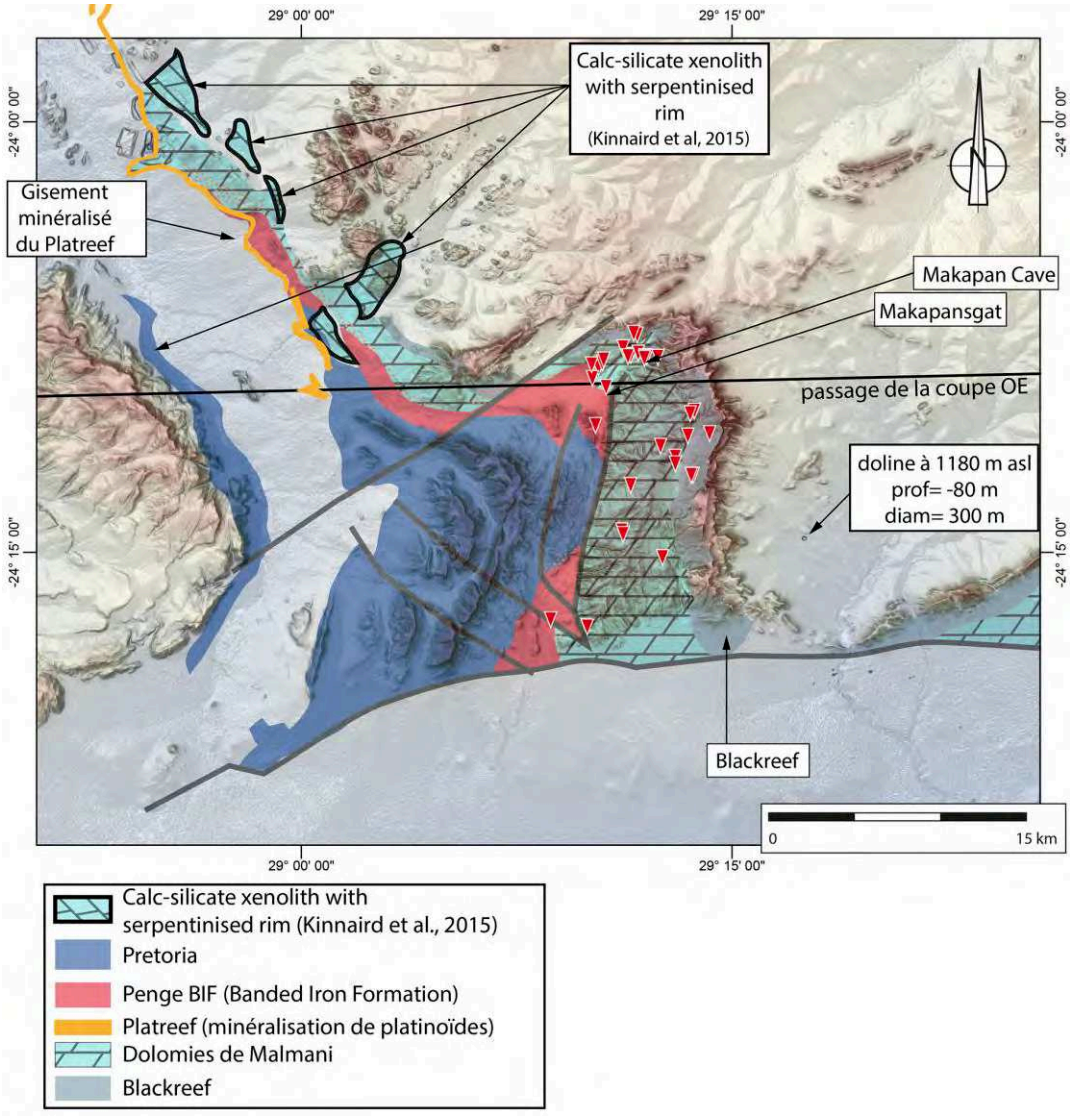
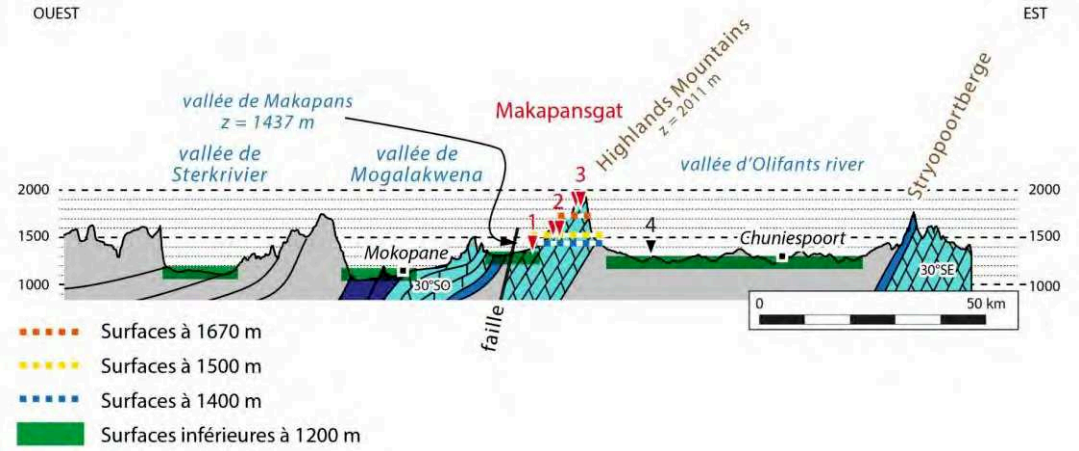


Figure 972 Géologie de la région de Makapansgat adaptée de Kinnaird et al., 2005, Fig. 2 et Hutchinson et al., 2013 (Fig. 1).

Sur la coupe géologique de la région de Makapansgat, ci-dessous (Figure 973), trois ensembles de cavités sont identifiés en fonction de leurs altitudes respectives : (1) au-dessous de 1300 m d'altitude, (2) de 1400 à 1500 m et (3) au-dessus de 1600m. On note la présence des dolomies de Malmani dans la vallée de Mokopane.



1 : Van Zyl (1231 m), Little Ngolo Lagwacha (1274 m), Ngolo Lagwacha (1280 m)

2 : Makapan (1493 m), Cave of Hearts (1520 m), Cold Air (1399 m), Ficus (1426 m), Katzenjammer (1402 m), Peppercorn I (1402 m), Buffalo (1417 m), Limeworks Makapansgat (1478 m), Bat (1478 m), Porcupine (1493 m), De Hoop (1524 m), Kraal (1395 m), Zwartkrans II (1463 m), Zwartkrans III (1469 m), Zwartkrans IV (1469 m), Gutentight, Murzel's

3 : Abyss Pot (1706 m), Lusitania (1819 m), Lost World (1737 m), Swallow Hole (1688 m), Swallow Hole II (1688 m), Swallow Hole III (1685 m), Swallow Hole IV (1691 m), Perseverance Pot (1706 m), Mine Pit (1554 m), Mulumogoto (1768 m - tuff), Ken Pot (1712 m), Snake Pit Hole (1687 m), Glen Hole (1812 m), Van Zyl's Pot (1875 m), Mogoto System (1760 m), Little Mohoto (1830 m - Black Reef quartzite), Uppermost Mogoto (1782 m - Black Reef quartzite)

4 : Marsfontein Mine (Kimberlite, ancienne mine de diamants, jusqu' à -80 m) (1104 m).

Figure 973 Coupe géologique, orientée ouest-est de la région de Makapansgat, à travers les vallées de Sterkrivier, Mogalakkwena (Mokopan) et de la vallée d'Olifants river (Chuniespoort). En gras, le nom des cavités fossilifères. La mine de Marsfontein est indiquée en noir.

5.5.9. Karst de Thabazimbi (Secteur I de la Figure 915 p.910)

La grotte de Gatkop (24°37'5,2 »S, 27°39'8,4 »E) a livré des remplissages ossifères et fossilifères prometteurs (Almond, 2012, 2014).

5.5.10. Karst de Marble Hall (Secteur 3 de la Figure 915 p.910)

Dans la région dolomitique de *Marble Hall*, une grotte est connue des spéléologues et de plus nous avons identifié des dolines (Figure 974), localisées dans le cadre noir et blanc de la Figure 974.
Par ailleurs, les analyses RRIM (Figure 976), décrites dans le Chapitre n°1 (p.76), permettent de visualiser des reliefs karstiques. La coupe géologique entre ce karst et le karst fossilifère de Makapansgat montre que le *Marble Hall Fragment* est situé à une altitude nettement plus basse (Figure 975). Cela pourrait suggérer que les grottes se sont ouvertes plus récemment. Cependant la comparaison est compliquée car les contextes hydrologiques y sont totalement différents. La corrélation des paléosurfaces depuis le *CoH* ou Makapansgat ne peut pas être établie avec certitude.

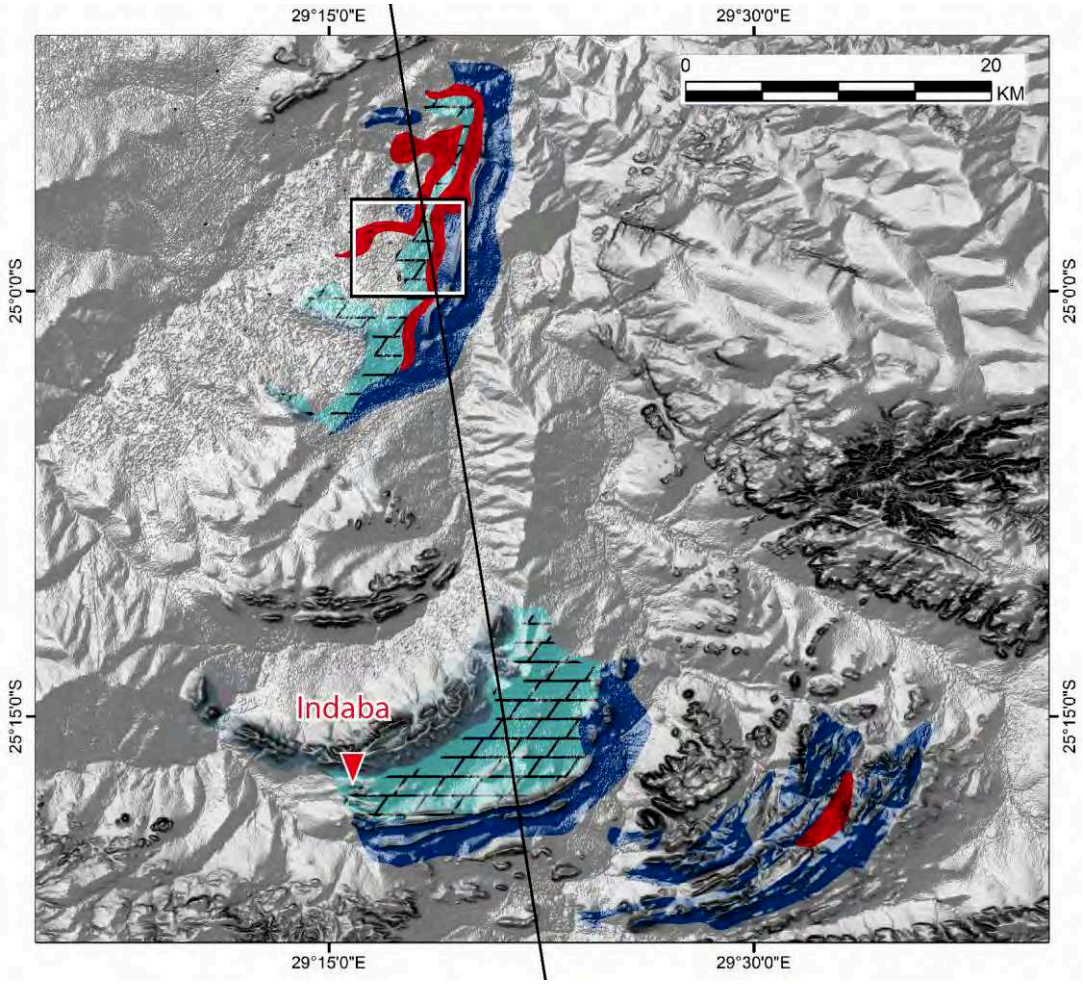


Figure 974 Carte géologique des dolomies de Malmani (bleu ciel) et du groupe de Pretoria (bleu foncé) du Marble Hall Fragment.

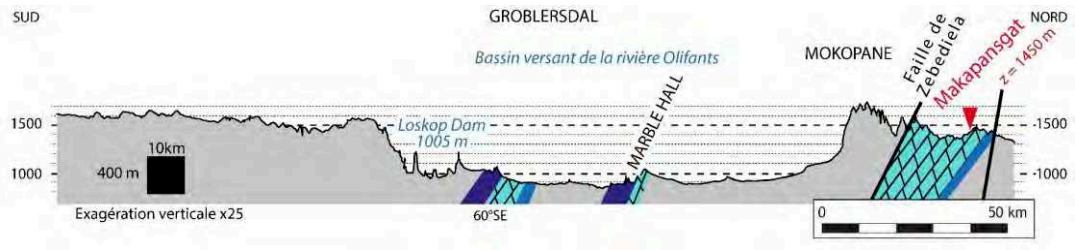


Figure 975 Coupe géologique entre le karst de Marble Hall Fragment et le karst fossilifère de Makapansgat. La position de cette coupe est indiquée sur la Figure 914 (p.910).

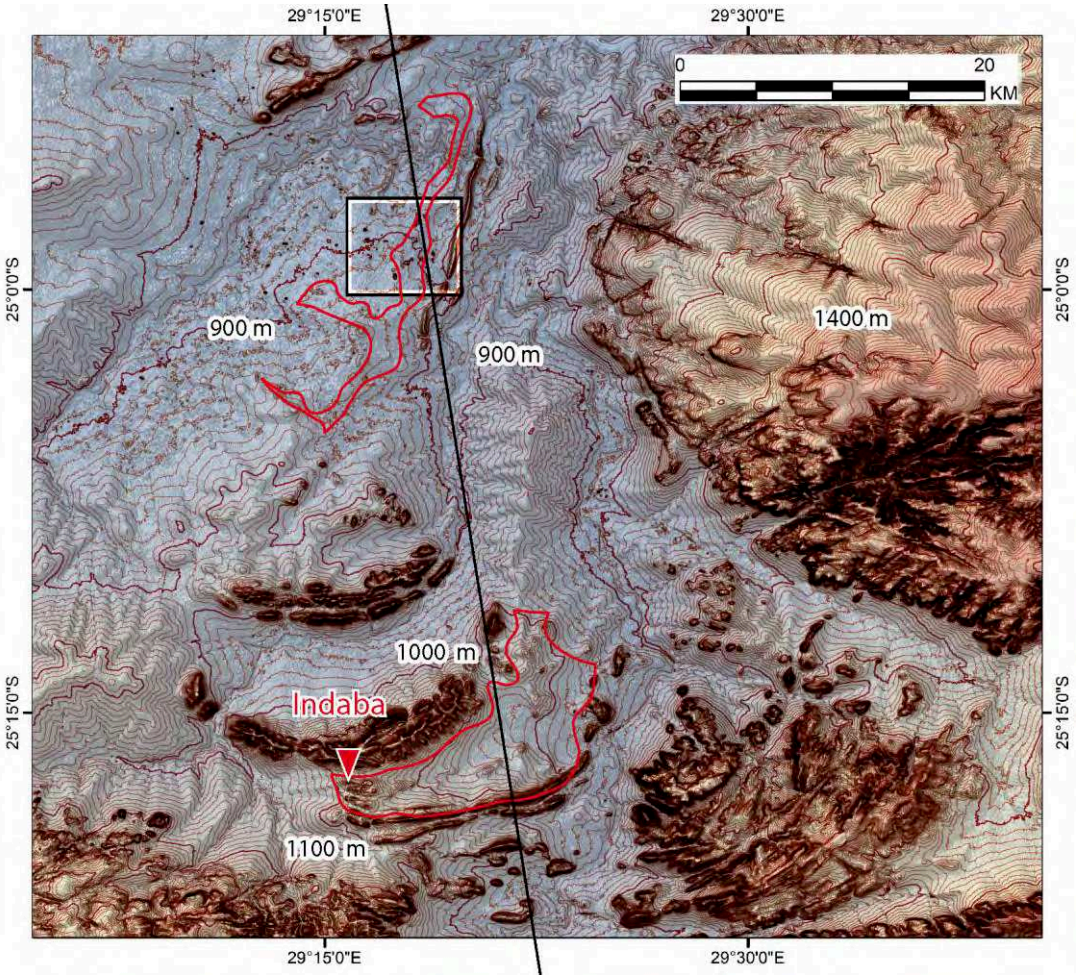


Figure 976 Les analyses RRIM, décrites page 76, permettent de mieux visualiser les reliefs karstiques du Marble Hall Fragment. Les dolomies sont délimitées en rouge.

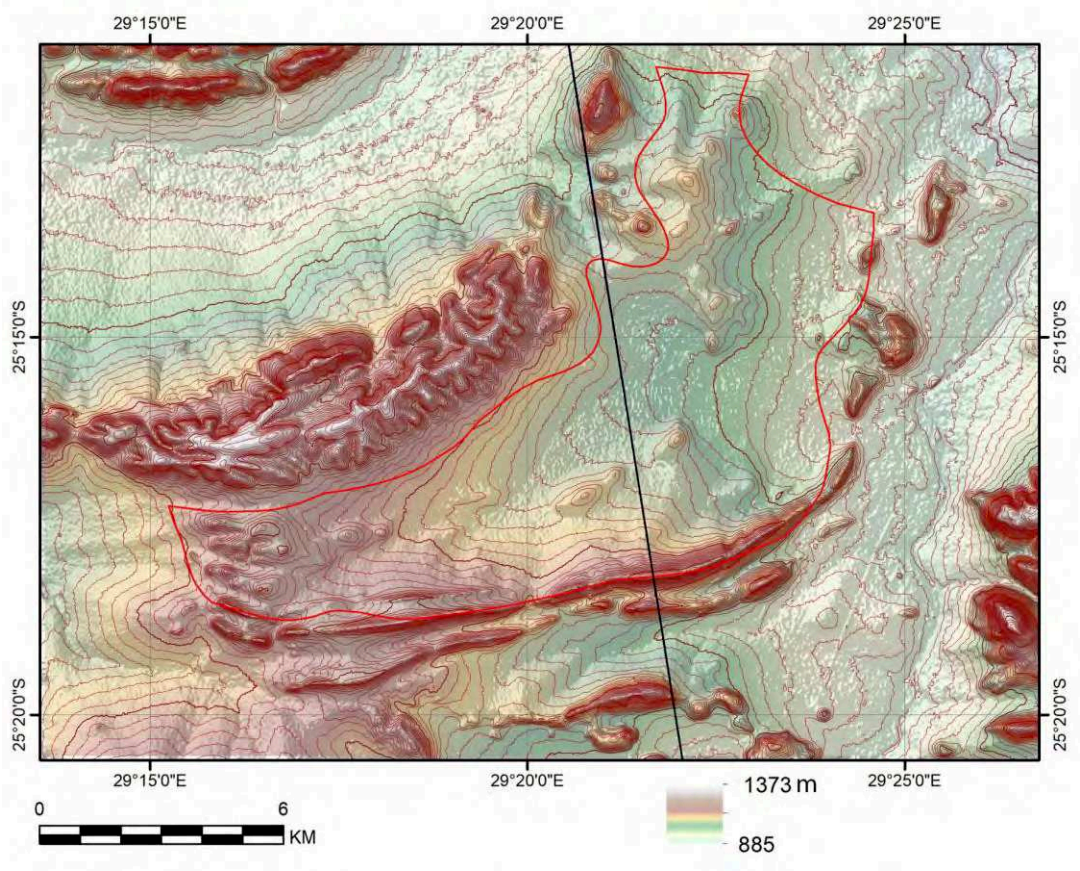


Figure 977 Hypsométrie, modèle ombré et carte de pentes des carbonates du Marble Hall Fragment.

Mise en évidence de dolines. Elles font une vingtaine de mètres de profondeur et certaines mesurent plus de 500 m de longueur.

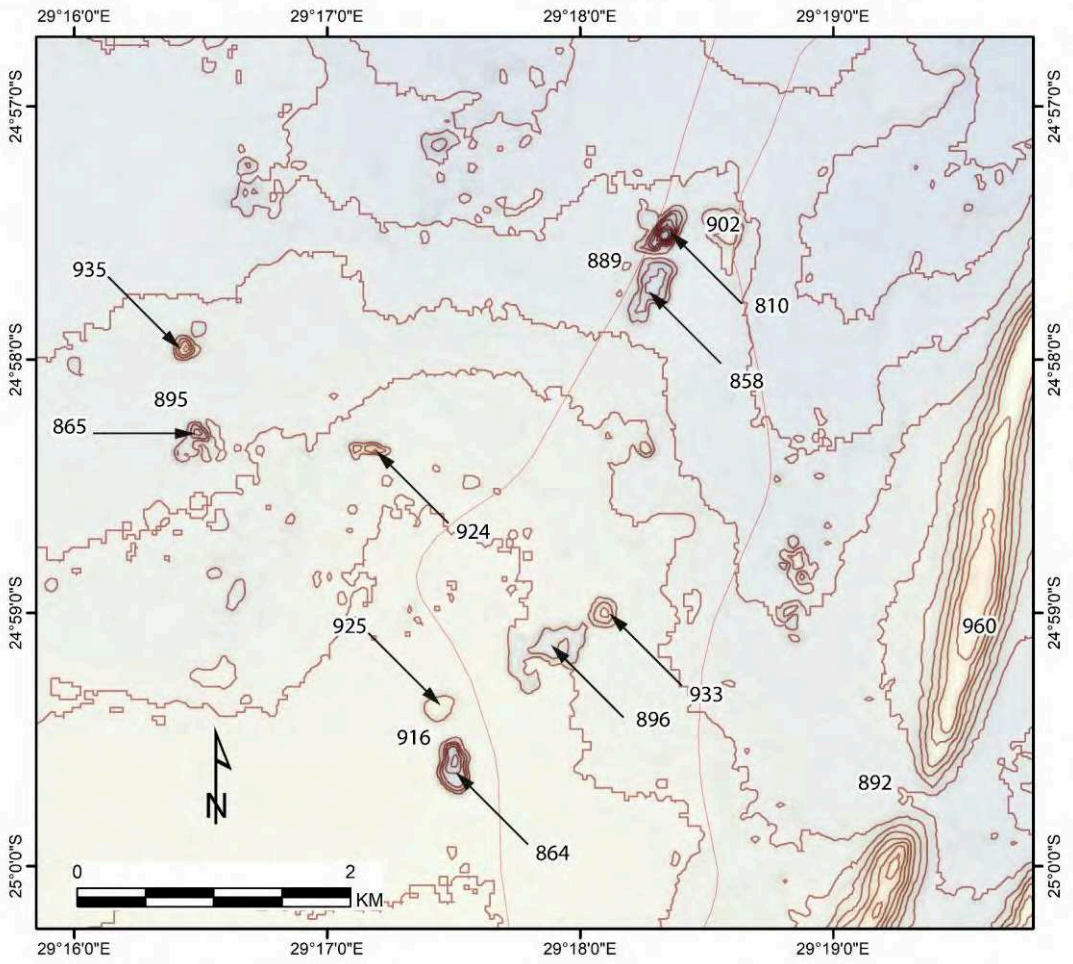


Figure 978 Identification de dolines et de buttes à Marble Hall. Les altitudes indiquées ont été mesurées sur le MNT produit par la JAXA. Les dolines sont estimées à une vingtaine de mètres et les buttes à une vingtaine de mètres. Certaines dépressions mesurent 500 m de longueur. L'affleurement de carbonates, orienté NS, est limité par les deux traits rouges. La localisation de cette carte est indiquée sur la Figure 974.

5.5.11. Région carbonatée d'Assen (Krokodil River Fragment) (Secteur 2 de la Figure 915 p.910)

Le secteur du *Krokodil River Fragment* est localisé au centre du bassin du Transvaal près de la ville d'Assen (Figure 914 p.910). Le terme *fragment* désigne « une masse de sédiments du Supergroupe du Transvaal totalement enveloppée par le Complexe du Bushveld et n'ayant pas été « digérée » lors de la mise en place de ses phases plutoniques » (Lageat, 1989, p.281).

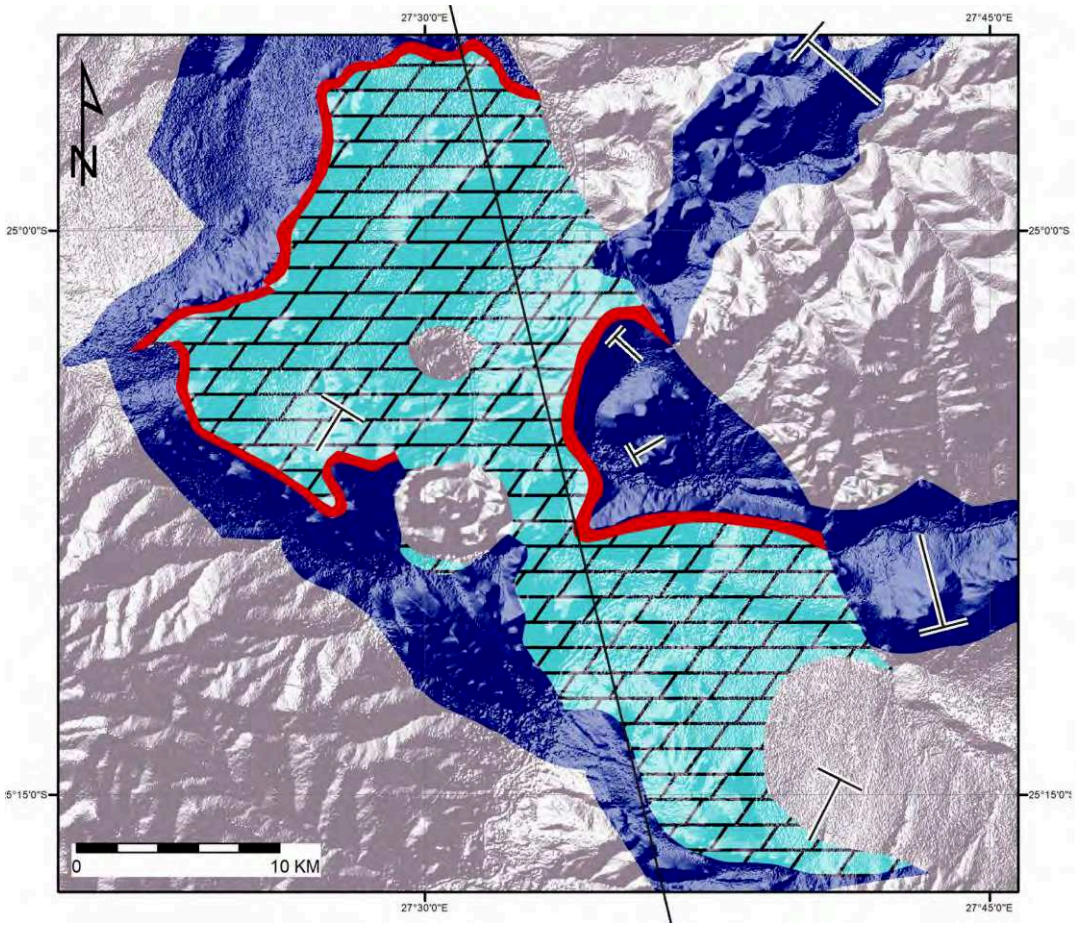


Figure 979 Dolomies de Malmani (en bleu clair) et le groupe de Pretoria (en bleu foncé) du Krokodil River Fragment. Les formations altérées (fer) et oxydées de la Penge (en rouge), les pendages des formations et la position de la coupe (trait noir) sont indiqués.

Ici, les dolomies de Malmani ne sont pas entièrement érodées, et la formation de Frisco est encore en place, contrairement au *Cradle of Humankind,* où elle a été altérée et/ou érodée. Elles forment un replat vers 1000 m d'altitude (Figure 979) délimité par des sommets culminant à 1272 m (Elandsberg), à 1300 m (Ga-Ramoloreng) et vers 1430 m (*Swartwitpensbokfonteinbergs*).

Ces reliefs délimitent l'affleurement carbonaté (en rouge sur la Figure 981) qui pourrait être un poljé situé vers 1000 m d'altitude. Le pendage est de 35° vers le sud d'après la carte au 1/1 000 000 de 2019.

Une carte géologique plus précise ainsi qu'une coupe géologique sont fournies par Hartzer (1989, Fig.2).

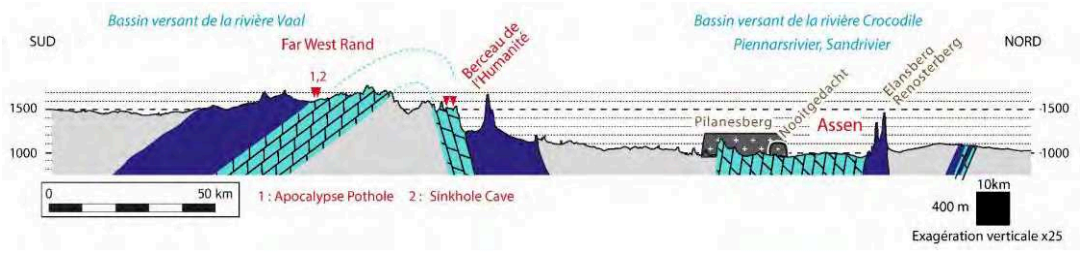


Figure 980 Coupe géologique NS des dolomies de Malmani et du groupe de Pretoria qui les recouvre, au niveau du Krokodil River Fragment, près de la ville d'Assen, au milieu du Bassin du Transvaal.

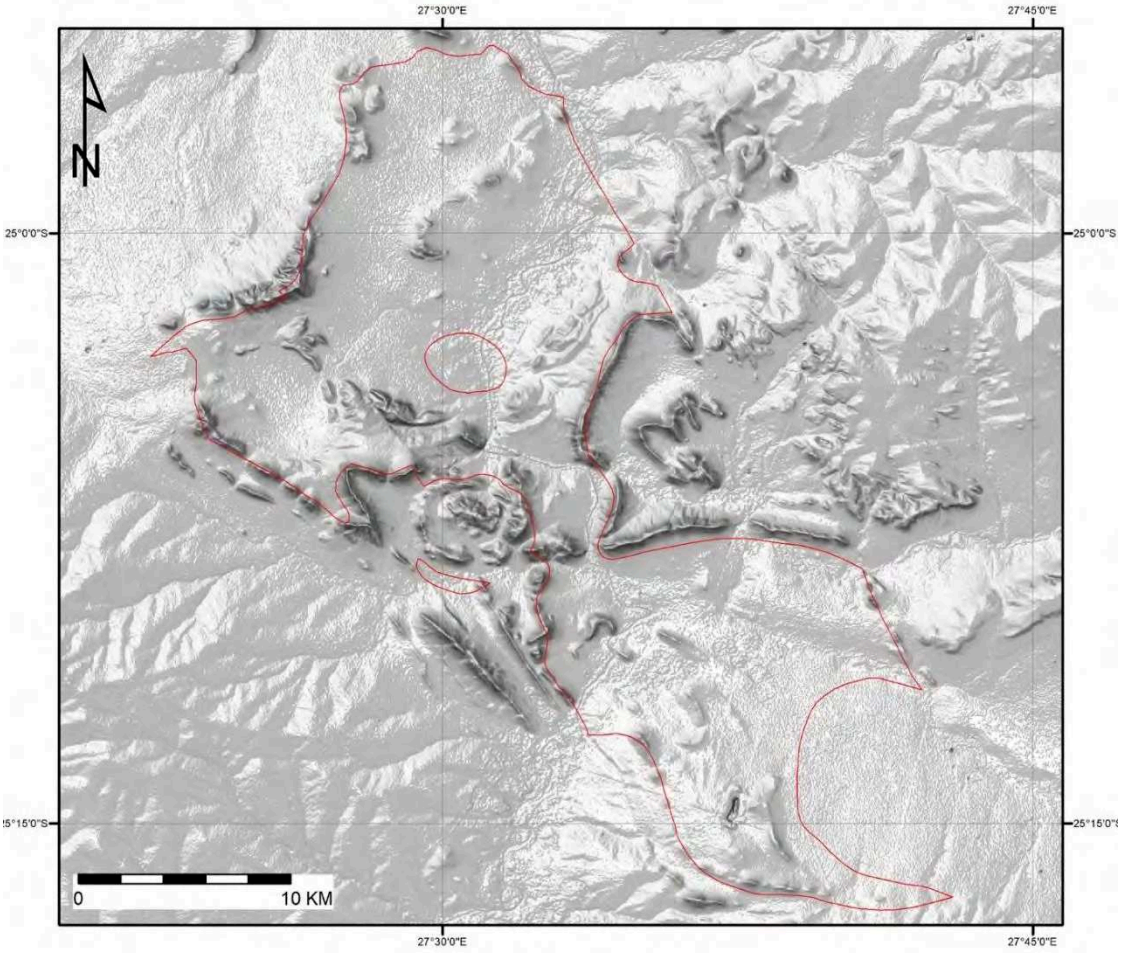


Figure 981 Analyses hypsométriques et géomorphologiques de la région de Krokodil River Fragment. Les dolomies à l'affleurement sont délimitées en rouge.

5.6. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS DANS LES DOLOMIES PALEOPROTEROZOÏQUES EN DEHORS DU BASSIN GEOLOGIQUE DU TRANSVAAL

Après avoir décrit les karsts et les cibles potentielles situées dans le Bassin géologique du Transvaal, étudions les sites localisés en-dehors du bassin.

5.6.1. Plateau de Ghaap

Le plateau de Ghaap, présenté en introduction (*cf.* p.248), est situé au Sud du *Cradle of Humankind*.
Il est constitué des dolomies de *Campbell rand,* l'équivalent stratigraphique des dolomies de Malmani dans le Bassin géologique du Transvaal. Elles sont représentées en bleu clair sur la (Figure 180 p.248) et le groupe de Pretoria en bleu foncé. En rouge, sont indiquées les formations oxydées et altérées du plateau qui sont corrélées entre elles (Beukes *et al.*, 2016) (Figure 989, p.975) ou bien avec d'autres formations altérées et oxydées :

- dans d'autres bassins comme celui de Prisa par Warke (2016) et Warke *al.* (2018) ;
- et au niveau de la faille de Thabazimbi (Gutzmer *et al.*, 2001, Fig.2, p.1081) ;
- et synthétisé par Da Silva (2011 ; par exemple Fig.2.13, p.31 ; Fig. 5.5 p.90).

Frauenstein (2005) discute de la formation oxydée de Rooinekke (photographie de la Figure 982) et de celle de Lucknow (voir la carte p.971). Notons la présence de dolomies non altérées, stratigraphiquement au-dessus de formations oxydées et altérées : la formation Duitschland (*cf.* Frauenstein 2005, p.52) (Figure 983).

Le plateau de Ghaap, culminant à 1700 m, est partiellement recouvert par les sables du Kalahari (en jaune sur notre carte géologique simplifiée (page 248 et p.971) et sur la carte de Frauenstein (2005, Abbildung 19, p.47). La coupe géologique KBF03A (Figure 985) de Tinker *et al.*, 2002 montre que les dolomies affleurent à faible profondeur sous les sables du Kalahari, entre 65 km et 85 km du point à l'est de la coupe.

Il existe de nombreuses cavités sur ce plateau karstique notamment une cinquantaine au niveau de la carrière *Buxton Norlim* (BSK 2003 in *DACEL*, 1998, Figure/ Map n°5a et 8 p.727 et 729) (voir cartes p.246) d'où provient le crâne d'un Australopithèque : l'Enfant de Taung, découvert par Dart (1925b) et daté de -2.58 Ma (Thackeray et Dyke, 2023). Ce crâne n'a pas été découvert dans une cavité mais il a été piégé dans des travertins. Du Toit (1954) parle des travertins de Ghaap et il localise d'autres secteurs à travertins, dans le chapitre sur le Tertiaire, qu'il serait intéressant de prospecter.

Des analyses géomorphologiques sont nécessaires pour déterminer si les dolomies y sont karstifiées et si les sables sont soutirés par le karst.

On note que la cavité de Wonderwerk a aussi livré de vieilles industries lithiques dont l'âge est discuté (>-1.78 Ma) (Chazan *et al.*, 2012 *in* Murszewski *et al.*, 2019 ; Goldberg *et al.*, 2015). D'autres artefacts ont aussi été découverts dans le secteur (Mlilo, 2017 ; Fig.26, p.55).



Figure 982 Formation oxydée de Rooinekke (Source : Frauenstein 2005, Abbildung 12 p.40).



Figure 983 Formation Duitschland qui sont des dolomies non altérées qui sont situées stratigraphiquement au-dessus de dolomies altérées. (Source : Frauenstein 2005, Abbildung 19 p.47).

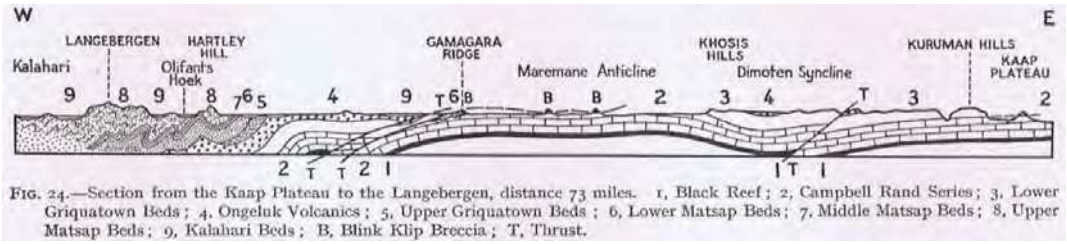


FIG. 24.—Section from the Kaap Plateau to the Langebergen, distance 73 miles. 1, Black Reef; 2, Campbell Rand Series; 3, Lower Griquatown Beds; 4, Ongeluk Volcanics; 5, Upper Griquatown Beds; 6, Lower Matsap Beds; 7, Middle Matsap Beds; 8, Upper Matsap Beds; 9, Kalahari Beds; B, Blink Klip Breccia; T, Thrust.

*Figure 984 Coupe géologique de **Du Toit (1954)** montrant le plateau de Ghaap à l'est (Kaap plateau).*

La coupe géologique KBF03A (Figure 985) (Source : Tinker *et al.*, 2002, p.112-113) montre que les dolomies affleurent à faible profondeur sous les sables du Kalahari, entre 65 km et 85 km du point Est de la coupe. Cette coupe est localisée sur la Figure 990, ci-dessous.

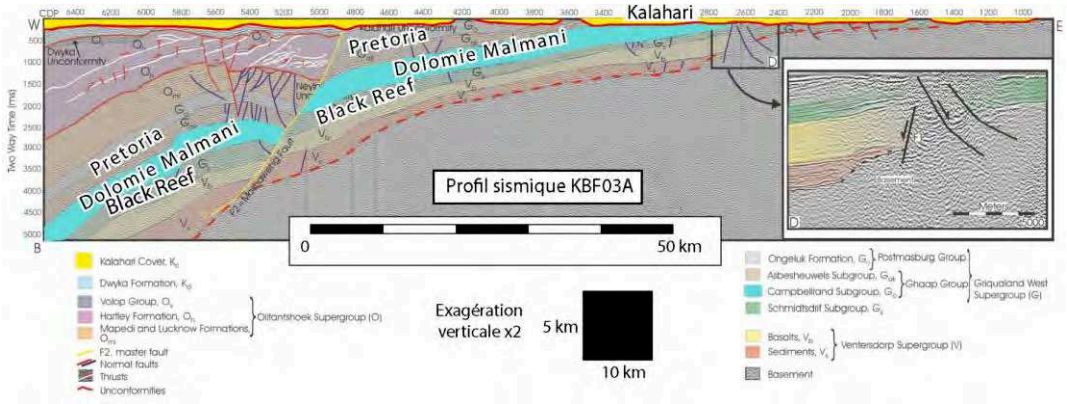


Figure 985 Profil sismique interprété à travers le bassin sédimentaire montrant les dolomies (Source : Tinker et al., 2002, p.112-113, modifié). Longueur de la coupe : 160 km.

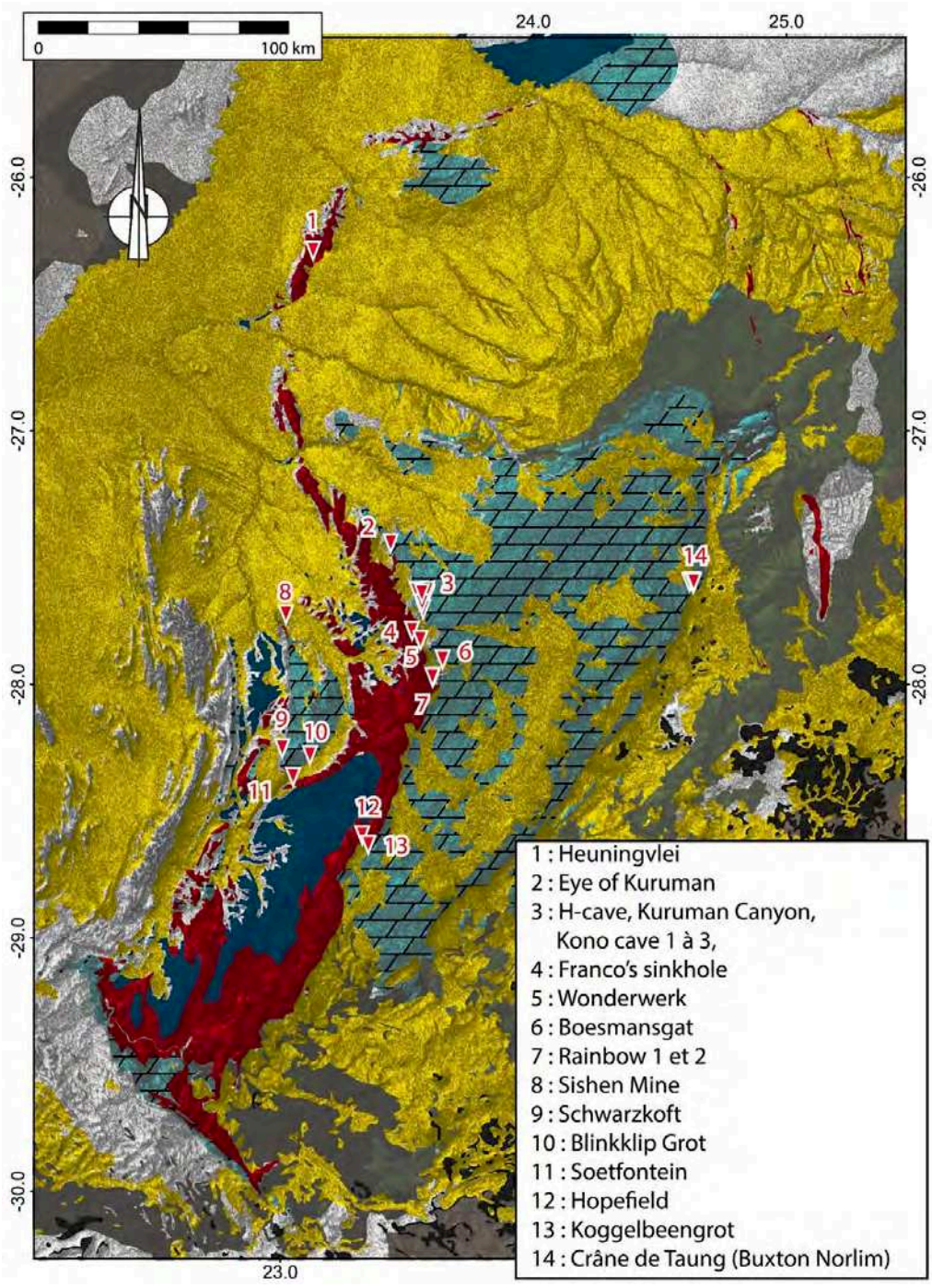


Figure 986 Carte géologique simplifiée (produite avec les données numériques CGS_RSA1M Geological polygon au 1/1 000 000 du Council of Geoscience) et proche de celle de d'Altermann et Nelson (1998, Fig.1, p.228)) du plateau de Ghaap où se situe la carrière de Buxton Norlim (n°14 sur la carte) d'où provient le crâne de l'Australopithèque de Taung (Dart, 1925b ; DACEL, 1998). Les autres points indiqués sont des cavités connues issues du SASA Cave Register. *La légende est disponible page 248.*

Dans ce secteur, il est indiqué que la présence de deux failles de chaque côté de la région crée une vallée de rift, ce graben est mis en évidence par des analyses géomorphologiques (Bailey *et al.*, 2011, Fig.9-10, p.267-268).

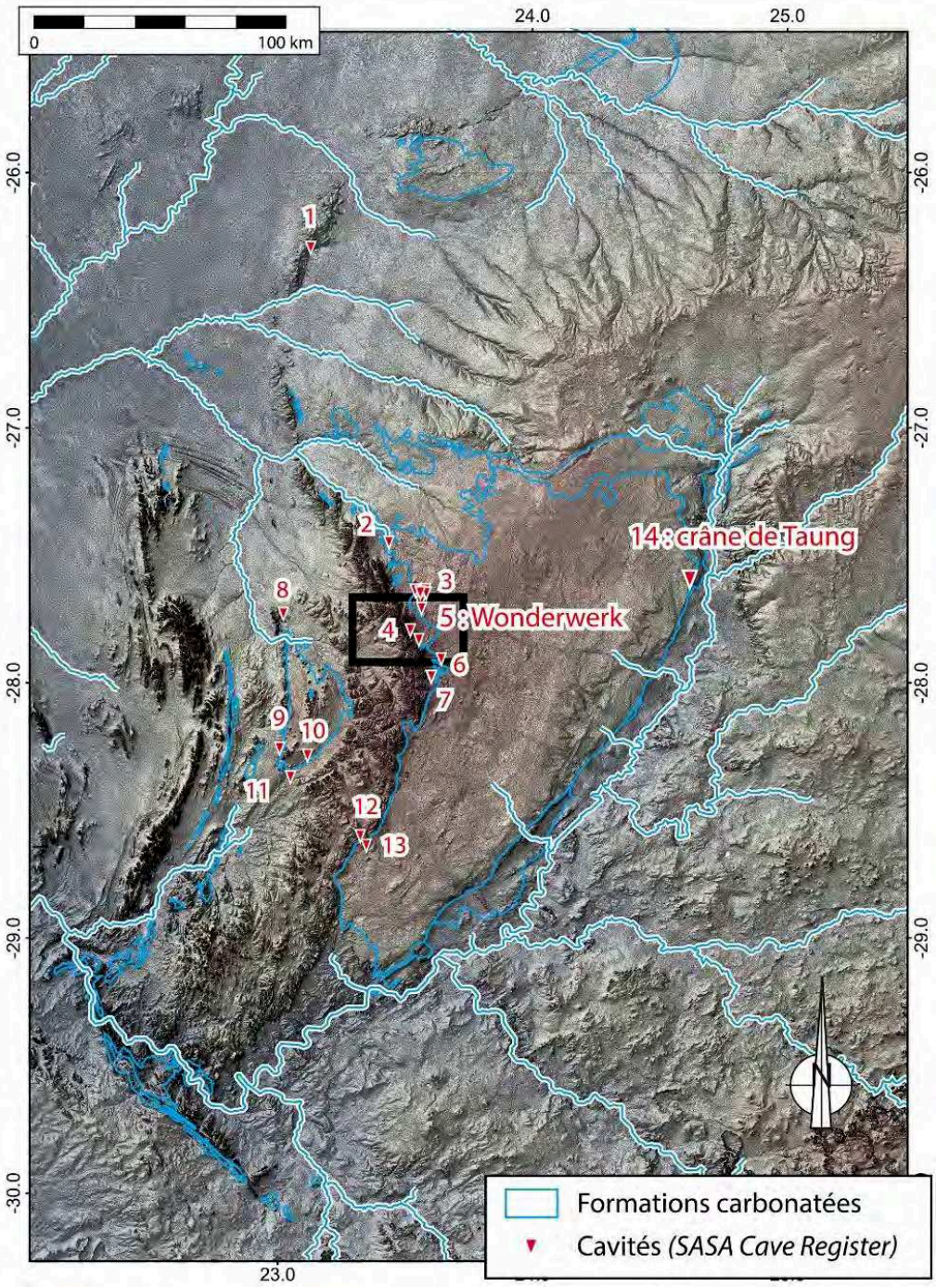


Figure 987 Carte hypsométrique et hydrologique du Plateau karstique de Ghaap. Notons l'emplacement de la figure suivante (Figure 988). A comparer avec la p.248

N°	Nom des grottes
1	*Heuningvlei*
2	*Eye of Kuruman*
3	*H-cave, Kono Cave 1 à 3, Koning grotte, Slagyster Gat, eye Sinkhole*
4	*Franco's sinkhole*
5	*Wonderwerk cave*
6	*Boesmansgat*
7	*Rainbow 1 et 2*
8	*Sishen Mine*
9	*Schwarzkoft*
10	*Blinkklip Grot*
11	*Soetfontein*
12	*Hopefield*
13	*Koggelbeengrot*

Tableau 52 Cavités de la carte précédente.

Le traitement d'analyse RRIM (Red Relief Image Map), décrit dans le 1 (p.76) permet de mettre en évidence de grandes fracturations conjuguées. Le point n°8 est une grotte qui a été ouverte par la mine en 1994 (*SASA Cave Register*).

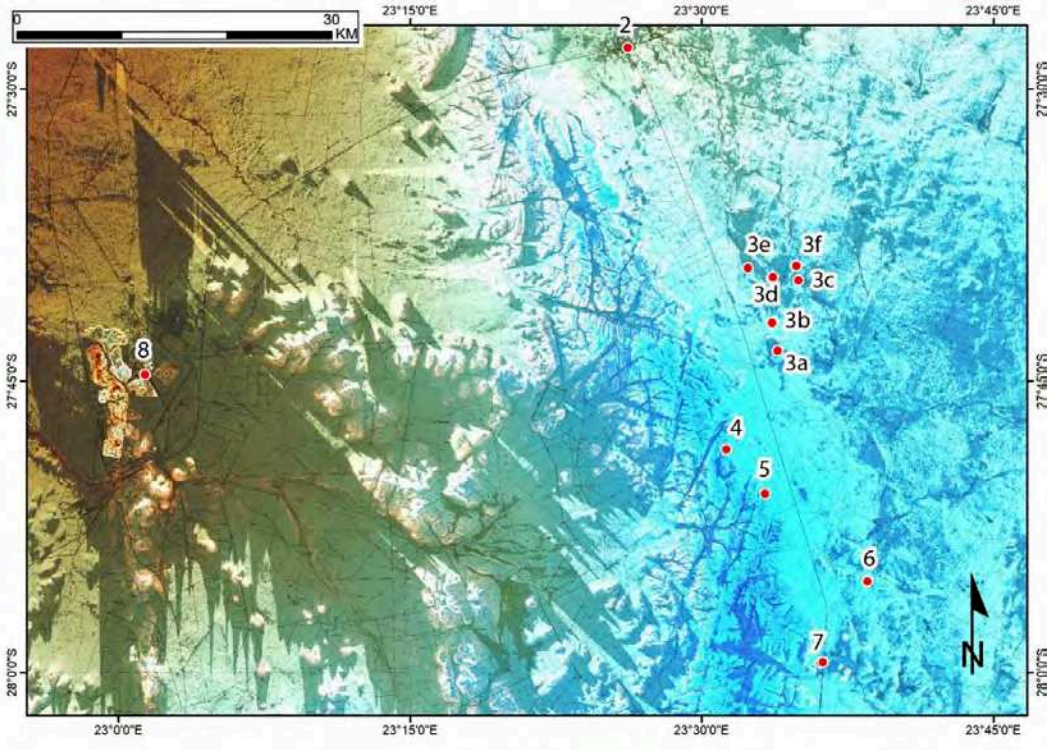


Figure 988 Détail sur le karst du bord du Plateau de Ghaap. L'emplacement de cette carte est indiqué sur la carte précédente.

Numéro sur la carte	Nom des cavités	Numéro inventaire *SASA Cave Register*
2	Eye of Kuruman	
3 a	Kuruman Canyon	1468
3 b	Kono Cave n°2	1470
3 c	Preekstoel	1476
3 d	Kono Cave n°1 et n°3	1469 et n°1471
	H-Cave	1478
3 e	Slagyster Gat	1475
3 f	Eye Sinkhole	1477
4	*Franco's sinkhole*	*1501*
5	*Wonderwerk*	*778*
6	*Boesmansgat*	*286*
7	*Rainbow 1 et 2*	*1466 et 1467*
8	*Sishen Mine Cave*	*1016*

Tableau 53 Cavités en bordure du Plateau de Ghaap.

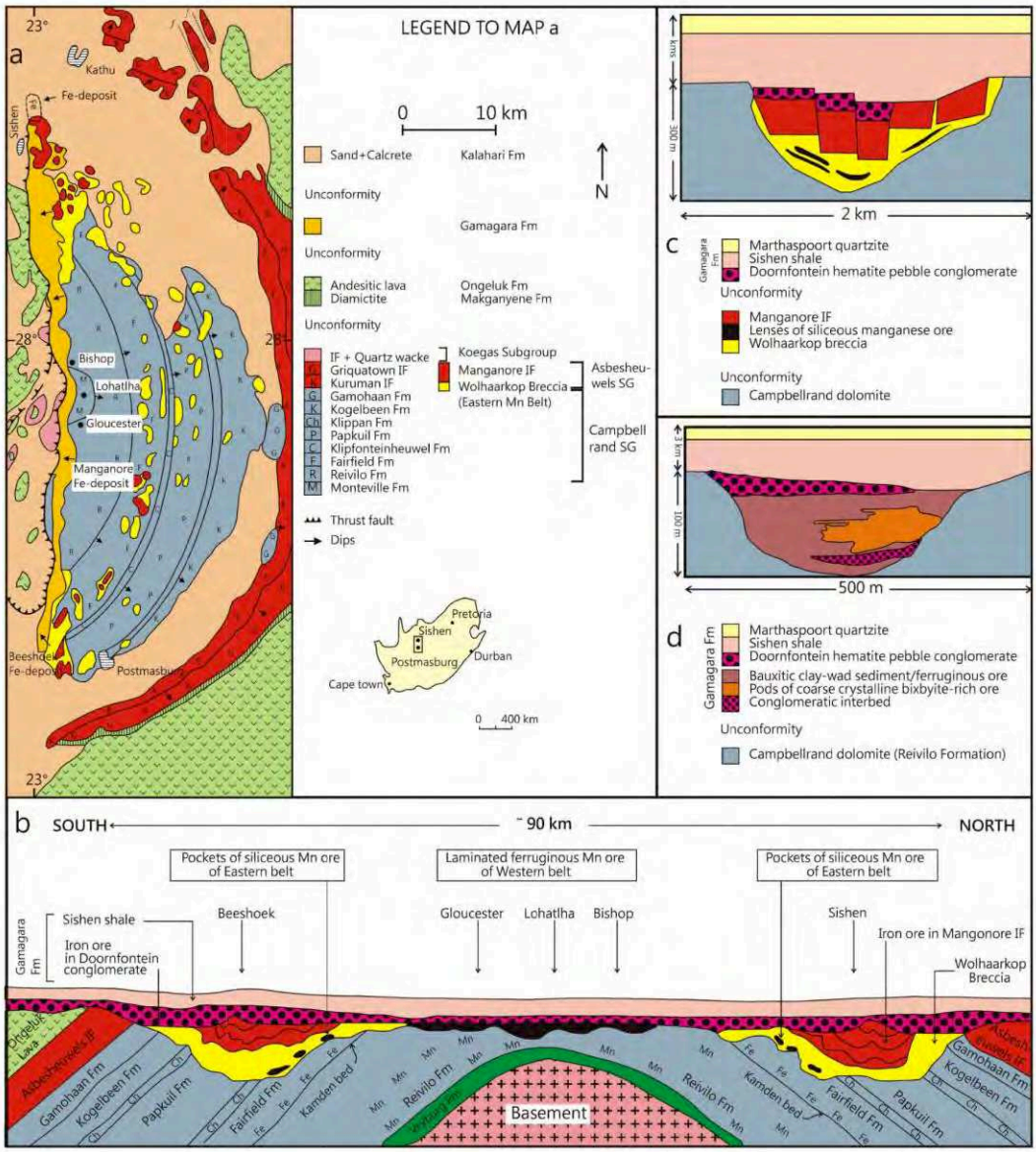


Figure 989 Carte géologique et colonne stratigraphique du Plateau de Ghaap selon Beukes (Beukes et al., 2016).

5.6.2. Kroonstad

À Kroonstad, les coupes géologiques OB et AG de Tinker *et al.* 2002 (fig.11 et 12 p.125), indiquées sur la coupe n°6 de la Figure 990 ci-dessous, permettent d'identifier des dolomies à faible profondeur sous la formation Ecca au sud de la ville de Kroonstad (Figure 993). D'après la carte géologique de Kroonstad n°2726 au 1/250 000 de 2000, ils affleurent à 70 km au nord, au sud-ouest de l'astroblème de Vredefort, et sont incisés par la rivière Renosterivier.

La Coupe OB montre, qu'au NO, les dolomies de Malmani affleurent presque en surface sous la formation d'Ecca au NO. Il sera intéressant d'y rechercher des reliefs karstiques ou des soutirages. La coupe OB montre la discordance de la formation Beaufort (Karoo volcanique) sur la formation d'Ecca, datée de -350 Ma, elle-même en discordance sur le groupe Pretoria, plus précisément sur la Hekpoort formation. Un grand chevauchement, vers le NNE des formations de Malmani et de Pretoria, d'une dizaine de kilomètres, est mis en évidence sur cette coupe (Figure 993) de Tinker *et al.*, (2002**)**.

Nous avons indiqué d'autres coupes qui montrent la géologie des bassins. La coupe NS du Bassin du Transvaal (Figure 991) de Kruger, 2005 *in* Parker *et al.*, 2013 la coupe de Reimold *et al.* (2014) et celles de KBF01 et KBF03A (Figure 993) de Tinker *et al.* 2002 (fig.11 et 12 p.125) à travers le Plateau de Ghaap.

Nous avons enlevé la couverture de la formation du Kalahari pour le Botswana. Nous ne l'avons pas fait pour l'Afrique du Sud, car nous ne sommes pas sûrs de ce qu'il y a sous les sables cependant nous avons indiqué où devaient affleurer les dolomies. Les dolomies sont présentes à faible profondeur sous la formation Ecca (coupe OB) du fait d'un chevauchement (point n°5, sur la carte). Dans ce secteur il est intéressant de vérifier si on ne voit pas de couvertures soutirées ou de buttes calcaires affleurées.

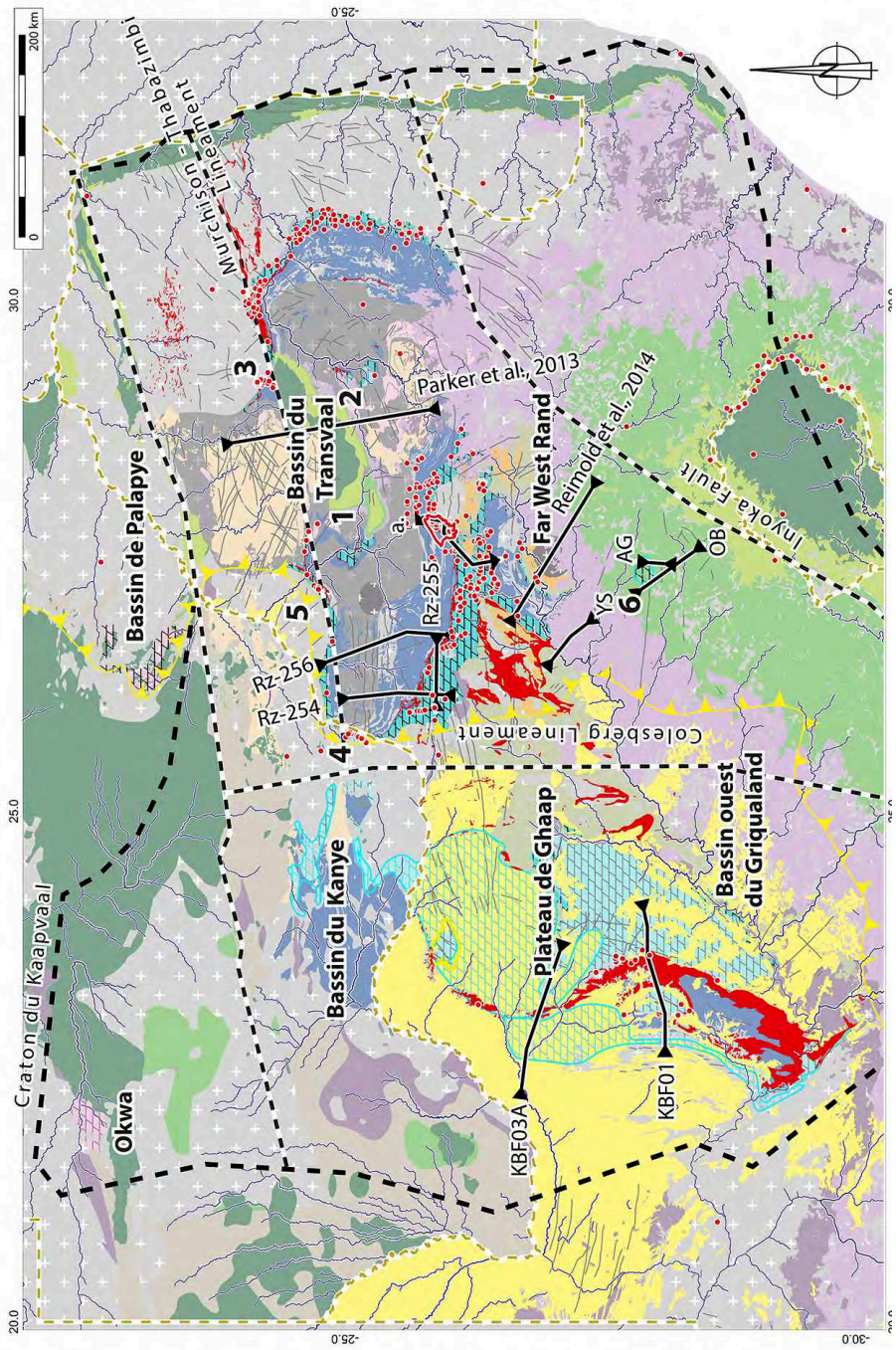


Figure 990 Localisation des coupes géologiques et des affleurements des équivalents des dolomies de Malmani du Bassin du Transvaal (en bleu clair) et des cavités (cercles rouges). Légende (p.199

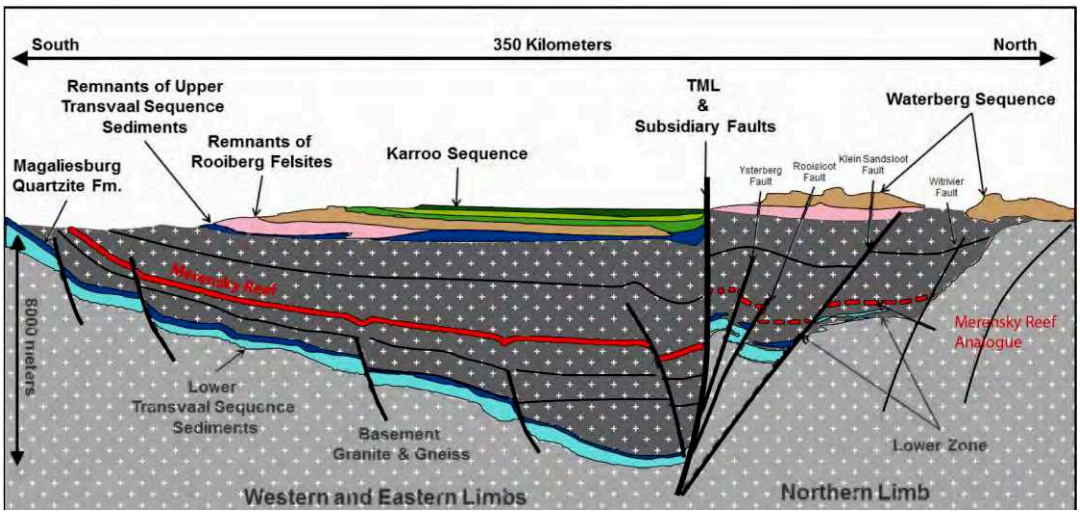


Figure 991 Coupe géologique NS du Bassin du Transvaal (Kruger, 2005 in PARKER et al., 2013, modifié).

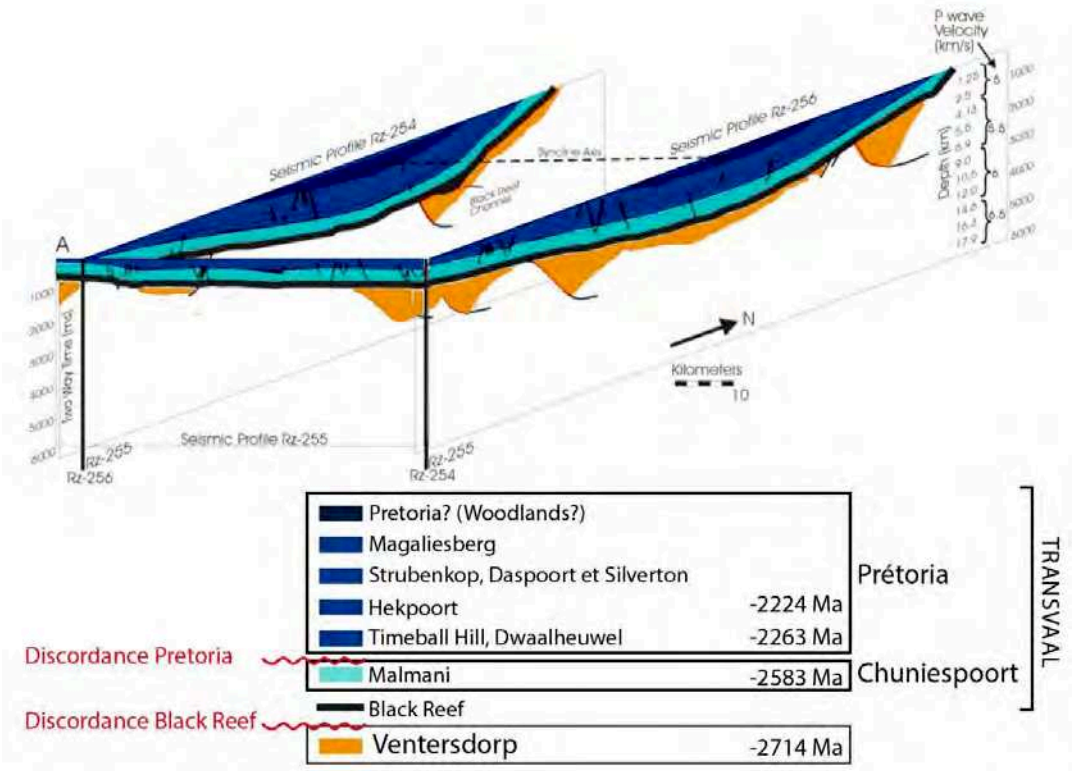


Figure 992 Bloc géométrique des coupes Rz-254, 255 et 256 montrant la géométrie des dolomies de Malmani dans l'ouest du Bassin du Transvaal (Tinker et al., 2002, modifié).

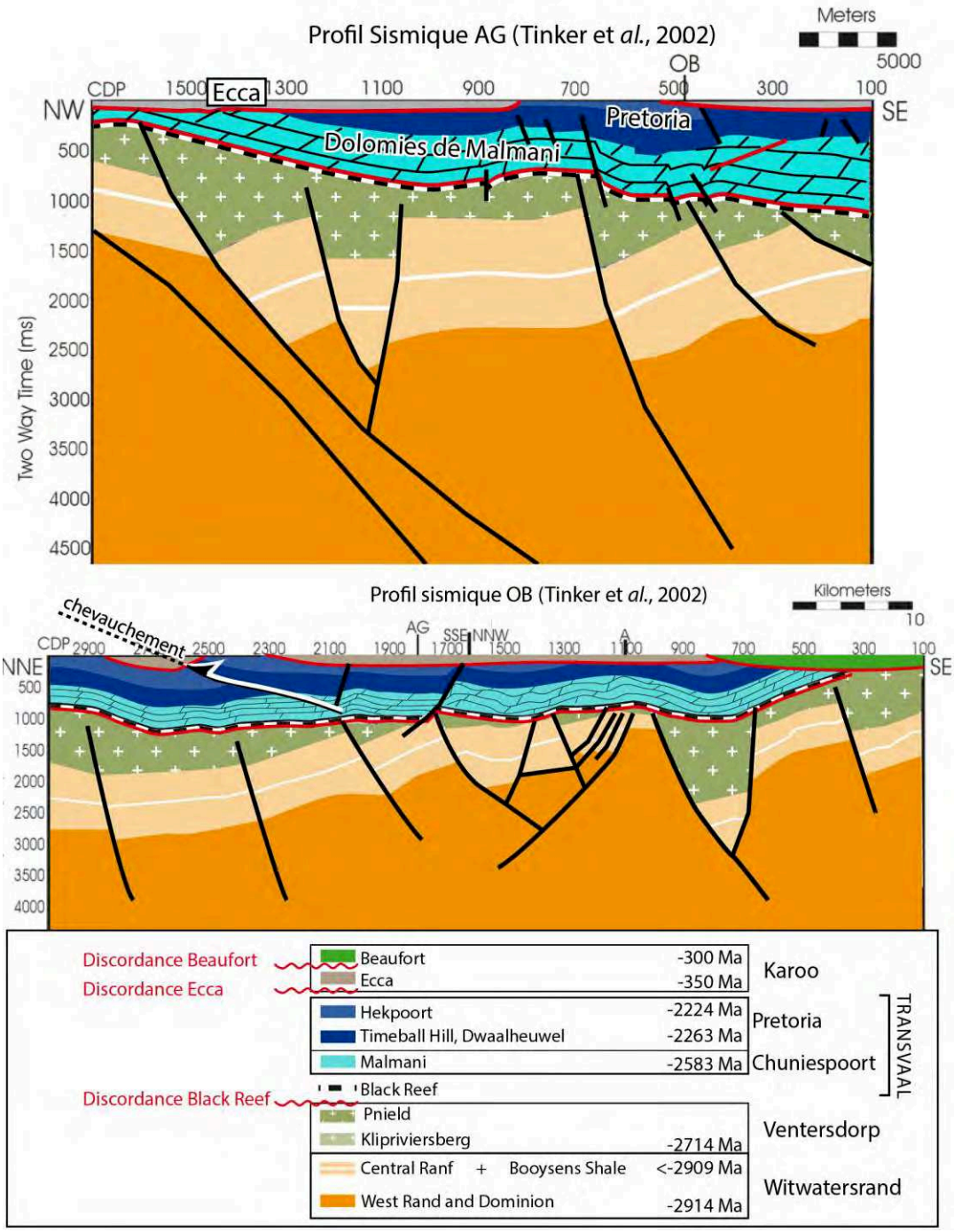


Figure 993 Coupes géologiques AG et OB de Tinker et al. 2002 (fig.11 et 12 p.125, modifié).

5.7. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS EN NAMIBIE

Plusieurs formations potentiellement karstifiées et des karsts existent en Namibie. Nous avons pu prospecter et étudier le karst d'Otavi, qui s'est formé par fantômisation. Cette région est en lien avec les paléoniveaux de base de l'Atlantique et du lac d'Etosha.

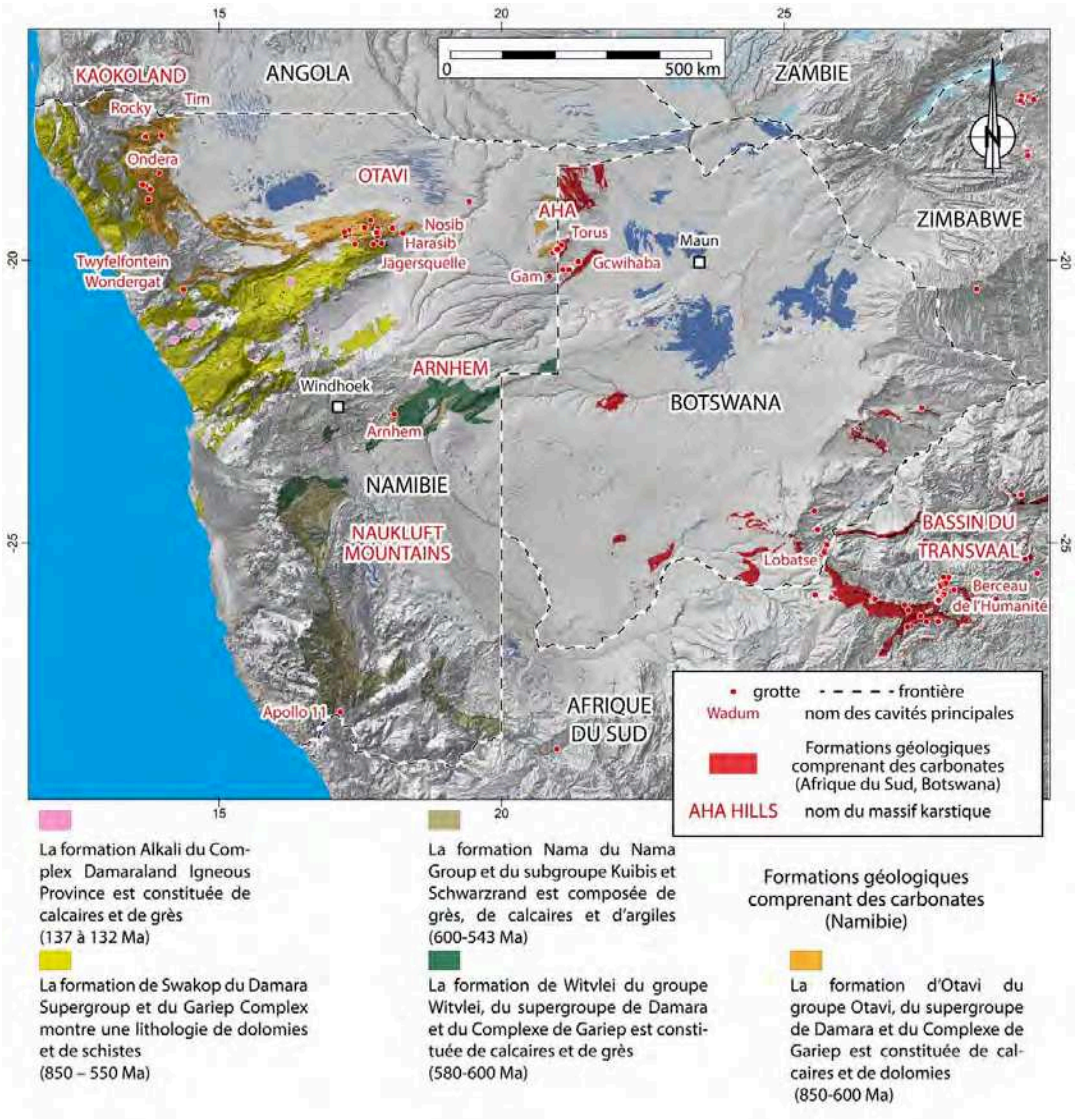


Figure 994 Cartographie des formations carbonatées de l'Afrique du Sud et de la Namibie et du Botswana où elles sont différenciées. On localise dans le coin sud-est le Bassin carbonaté du Transvaal avec le karst du Cradle of Humankind et le karst de Lobatse.

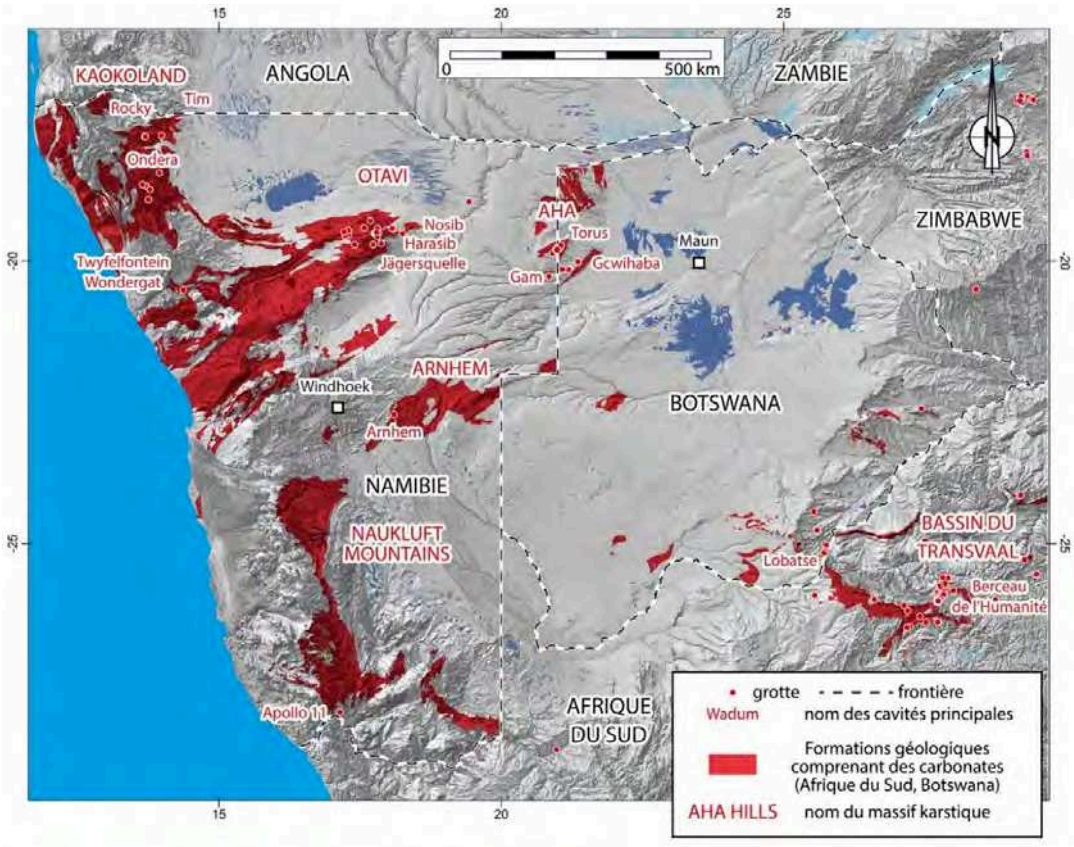


Figure 995 Cartographie des formations carbonatées de la Namibie, du Botswana et de l'Afrique du Sud. On localise dans le coin sud-est le Bassin carbonaté du Transvaal avec le karst du Cradle of Humankind et le karst de Lobatse.

5.7.1. Harasib et Otavi

Dans la mine de Berg Aukas (coupe verticale du gisement Pickford et Senut, 2010, Fig. 17, 18 et 19, p.26) de la région d'Otavi (le numéro n°3 sur la Figure 109), a été découvert un primate miocène *(Otavipithecus)* daté de -13 Ma (Conroy *et al.*, 1992). Cette découverte montre l'intérêt du karst dans son aptitude à piéger des fossiles anciens.

De nombreuses missions ont été menées dans cette région pour rechercher des fossiles (Pickford et Senut, 2010 ; Pickford *et al.*, 2014 ; Pickford, 2019) et notamment les missions HON (*Human Origins in Namibia*) dirigées par Laurent Bruxelles en 2015, 2016, 2017 et deux missions en 2018 (liste p.100).

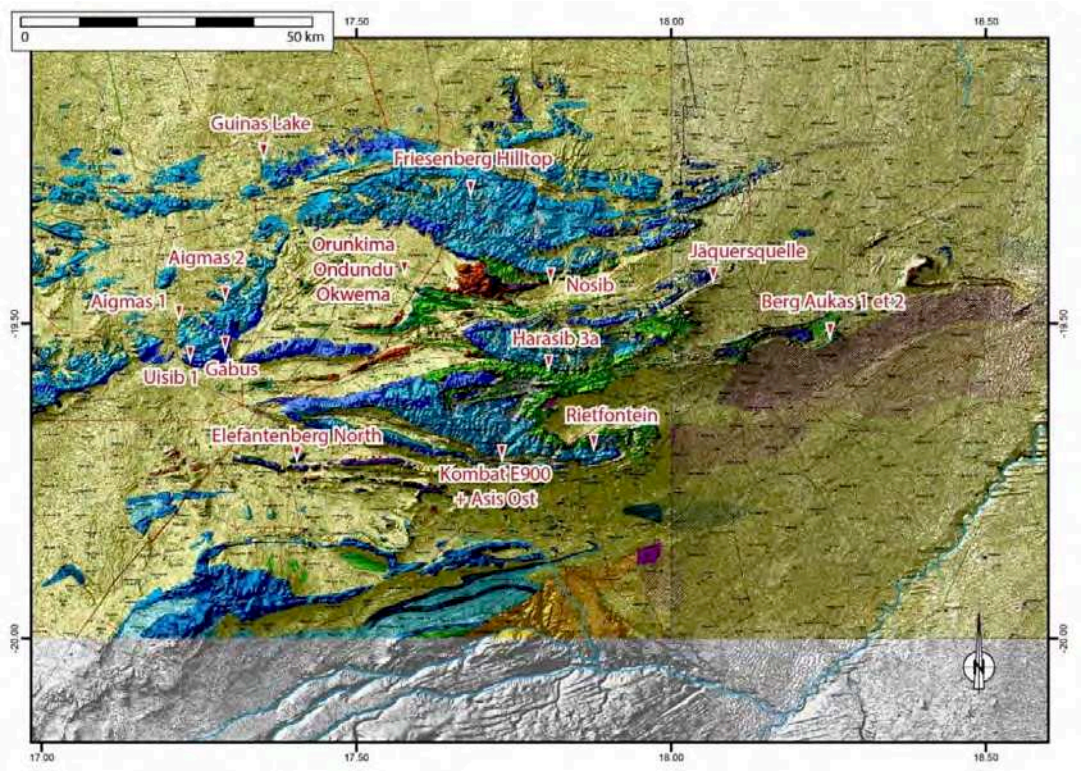


Figure 996 Carte géologique en relief des cavités dans la région d'Otavi en Namibie.

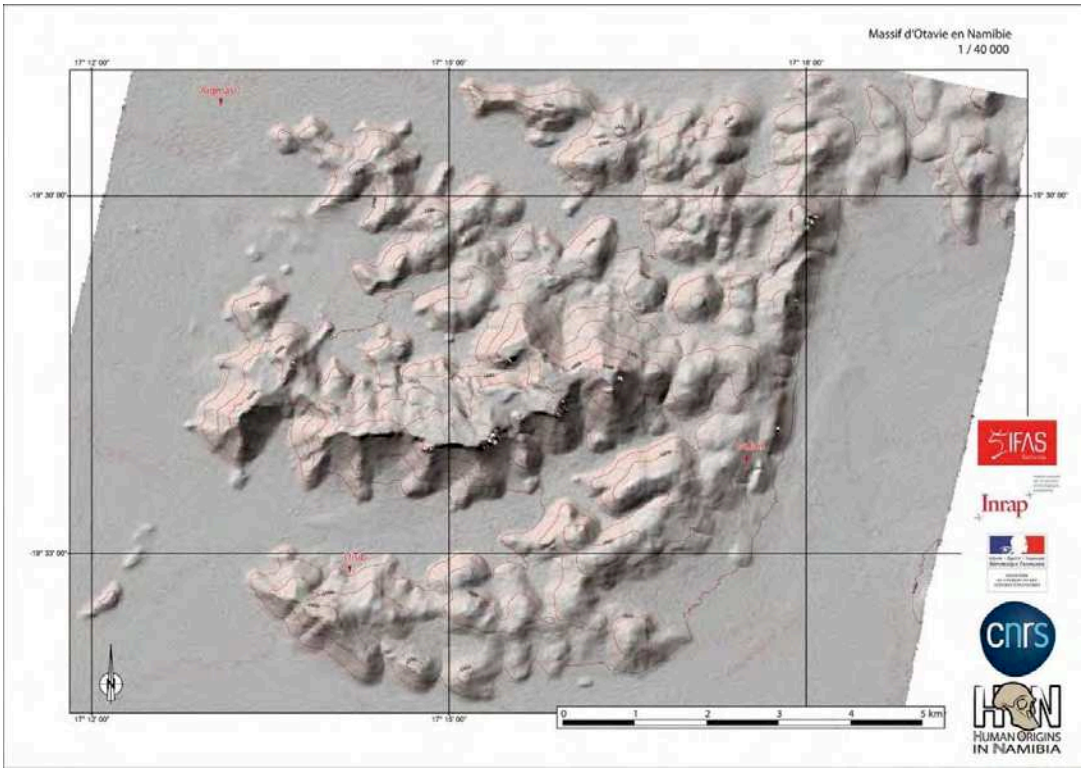


Figure 997 Visualisation en relief du karst d'Harasib en utilisant les données de relief Tandem-x, présentées dans la 1 (p.45) et traités par Benjamin Lans (Bruxelles et al., 2015, 2016).

5.8. BASSIN CARBONATE DU KANYE (BOTSWANA)

Localisé sur la Figure 913 (p.909), le Bassin de Kanye est constitué de formations carbonatées paléoprotérozoïques potentiellement karstifiées.
Le Bassin sédimentaire du Kanye se situe à l'ouest du Bassin du Transvaal et du karst de Lobatse. Une partie de ce bassin est recouverte par les sables du Kalahari, qui ne sont pas représentés sur la carte ci-dessous (Figure 998). Un âge moyen $^{207}Pb/^{206}Pb$ d'environ 1600 Ma a été calculé à partir de zircons extraits de tufs près du sommet du groupe de Palapye au Botswana (Mapeo *et al.*, 2000 in Haddon, 2005, p.41).

Une formation bréchifiée (Formation de Kgwakgwe) est localisée au toit des dolomies de la formation de Ramonnedi, équivalente des dolomies de Malmani dans le bassin géologique du Transvaal selon Ekosse et Vink (1998), Ekosse (2004) et Eriksson, Altermann & Hartzer (2006). Des brèches à ciment manganifère (Modosi, 1994, 1995) comme dans le *Cradle of Humankind*, indiqueraient une karstification par crypto-altération et fantômisation décrite dans le Chapitre n°2 (p.214).

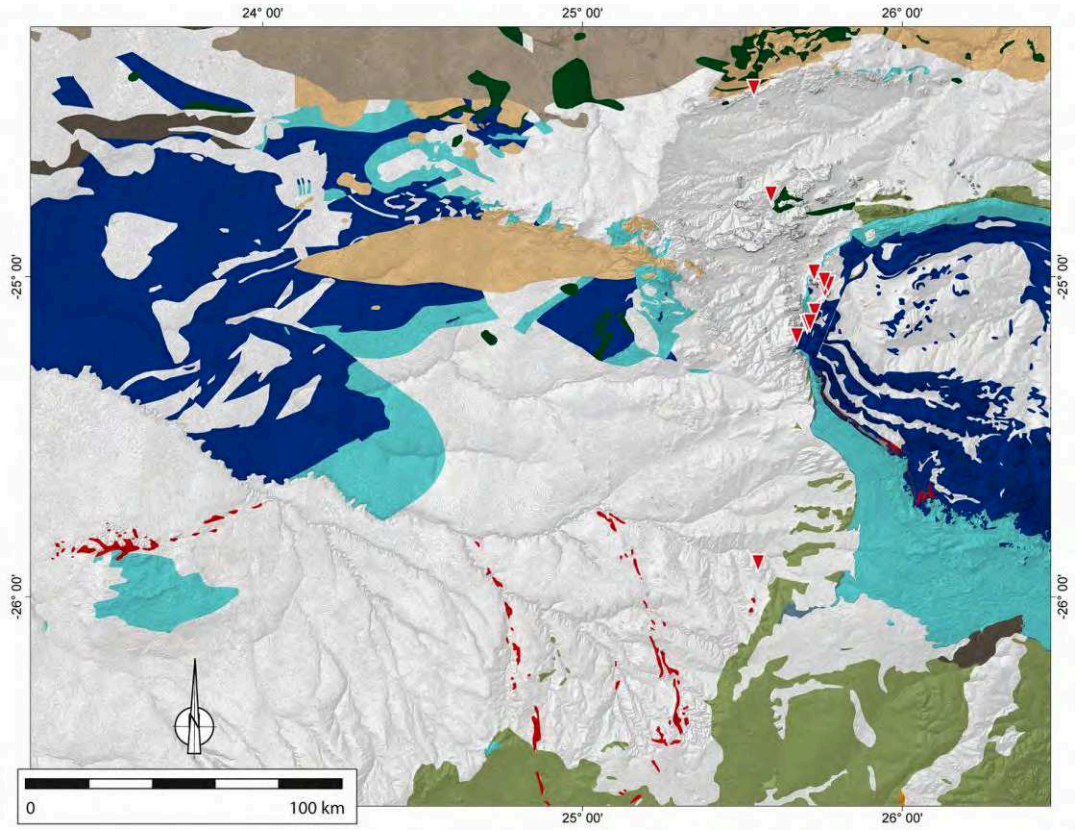


Figure 998 Carte géologique du Bassin de Kanye

5.9. Bassin carbonate de Palapye (Botswana)

Visible sur la Figure 913 (p.909), le Bassin de Palapye forme un plateau culminant à 1300 m d'altitude. Il est constitué de formations carbonatées paléoprotérozoïques et des grottes pourraient s'y trouver. Stephens et De Wit (2022) mentionne une grotte à Palapye *(Cave in Phalta Ye e Sebilo Gorge ; longitude : 27,4375833 ; latitude : -22,6112667, altitude : 1000 m)* dans les roches siliceuses du groupe géologique de Waterberg, au niveau des *Tswapong Hills*. Il est également pertinent de se demander si les calcaires situés à 5 km au sud des *Tswapong Hills* ne seraient pas karstifiés.

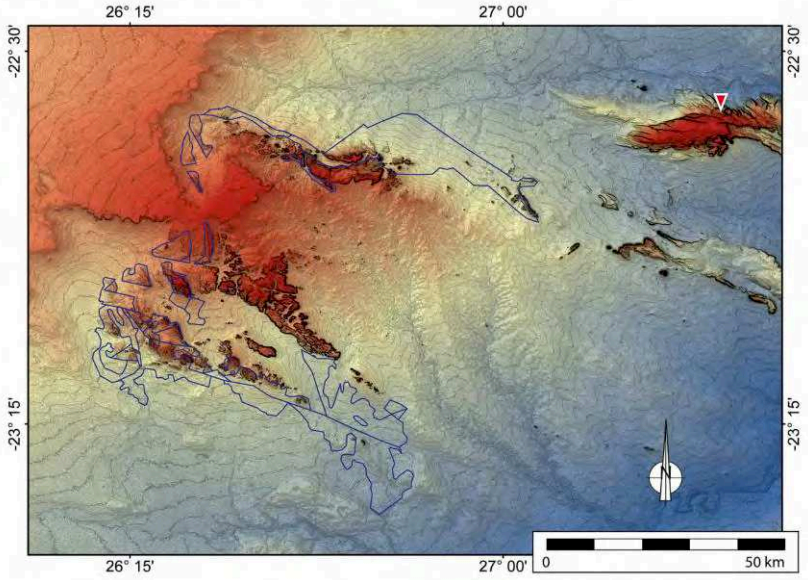


Figure 999 Carte des reliefs de Palapye (hypsométrie), indication des formations carbonatées à l'affleurement par le contour bleu.

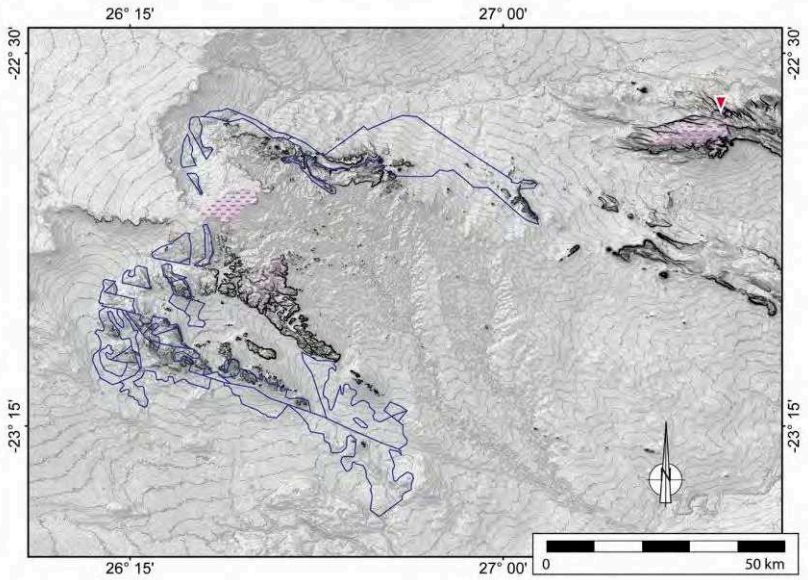


Figure 1000 Carte des reliefs de Palapye (modèle ombré), indication des formations carbonatées à l'affleurement par le contour bleu.

5.10. BASSIN CARBONATE D'OKWA (BOTSWANA)

Visible sur la Figure 913 (p.909), le Bassin d'Okwa est constitué de calcaires néoprotérozoïques qui affleurent sur une faible surface (0.3 km²) à Tshwane dans le district de Ghazi au Botswana (-22.423470, 21.829835; lien). Ils sont entaillés par la rivière Okwa.

La carte géologique du Botswana (1998) indique que ces calcaires affleurent sous les sables du Kalahari sur une surface de 1200 km² et pourraient correspondre à une autre zone potentiellement karstique comme c'est le cas des karsts au nord-ouest du Botswana étudiés dans le Chapitre n°4. Des outils lithiques ont été trouvés dans cette région et des prospections sont menées par Mooketsi C. et Michalec G. (https://uwr.edu.pl/en/archaeological-research-in-africa/).

La formation sédimentaire d'Okwa est constituée de felsites, de quartzites, de silts, de roches volcaniques sédimentaires, d'arénites, de grès, de boues carbonatées et de calcaires. Cet ensemble est daté de 1000 à 500 Ma et repose sur le Complexe Métamorphique d'Okwa, daté entre 2500 à 1600 Ma (Haddon, 2005, p.64-65). Nous avons identifié des buttes et des dolines sur la formation « Ngako pan ».

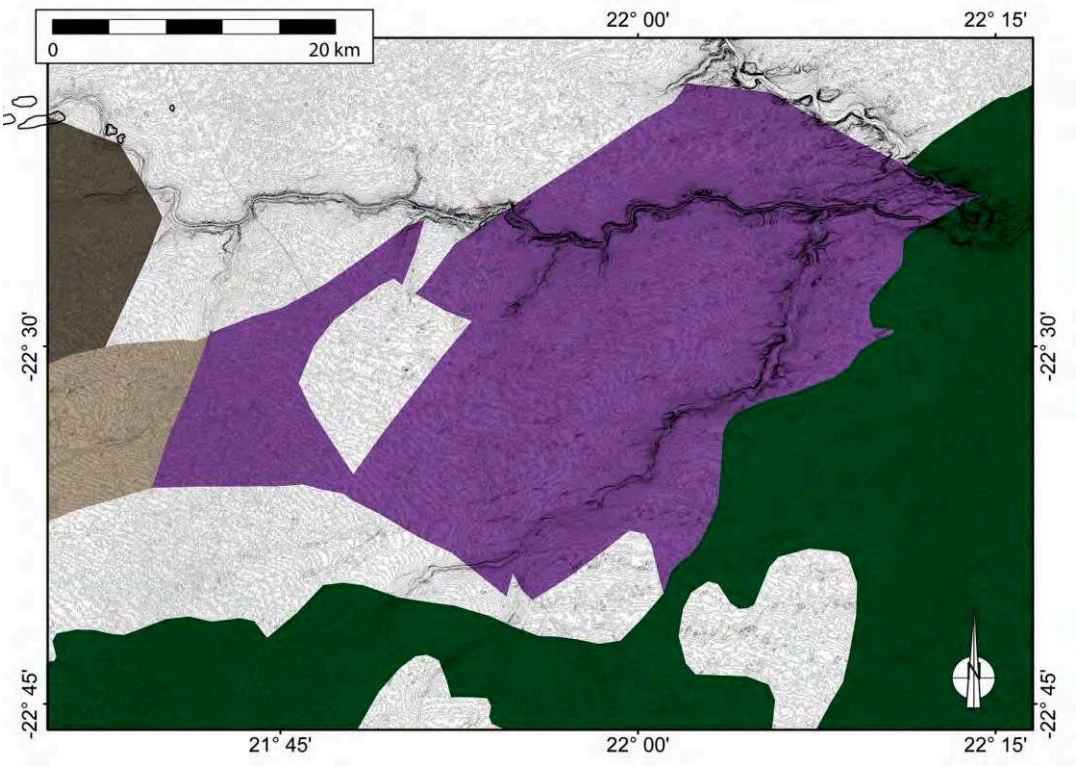


Figure 1001 Modèle ombré du secteur carbonaté, en violet, d'Okwa.

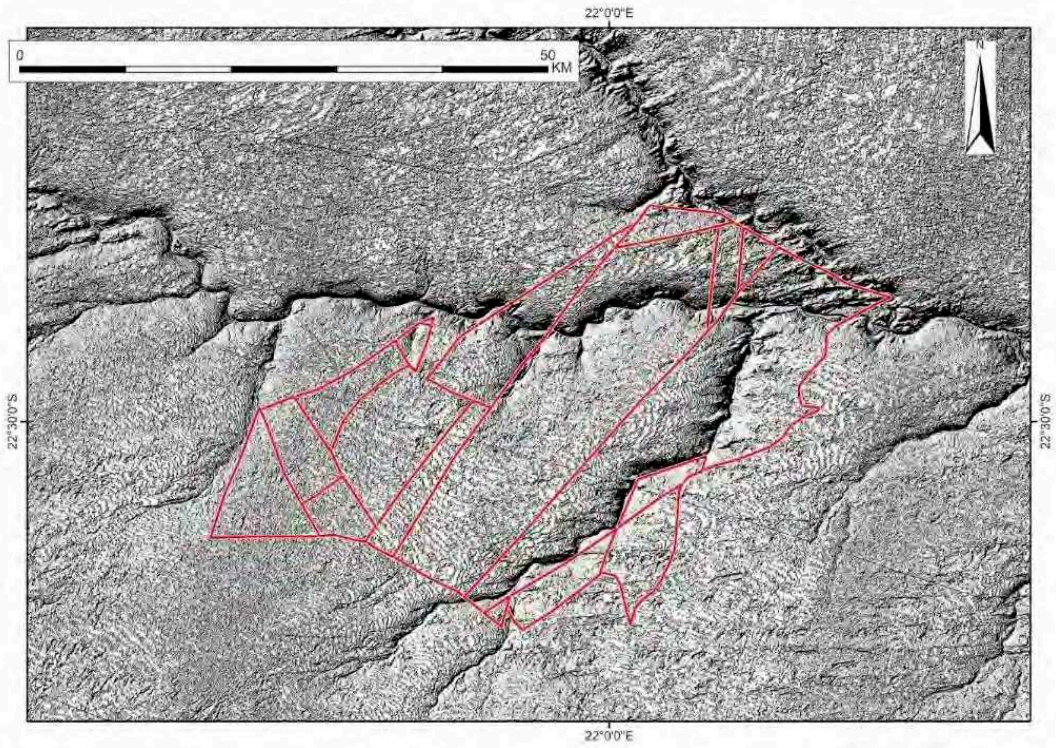


Figure 1002 Modèle ombré du secteur d'Okwa.

5.11. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS AU ZIMBABWE

Les karsts et karsts potentiels sont indiqués ci-dessous (Figure 1003). Plusieurs expéditions spéléologiques ont prospecté les montagnes Chimanimani en 1992 et 1993 et le karst de Chinhoyi de 1992 à 1994 et aussi récemment, notamment des plongées spéléologiques.

Plusieurs missions d'HOMININKARST ont eu pour but de prospecter ces régions : à Lomagundi en mai 2022, à Sanyati en août 2023, à Chimanimani septembre 2023 et nous avons découvert un karst inédit à Pitao au Mozambique lors de la mission d'octobre 2022 (p.1021).

La plupart des coordonnées pour ces régions sont imprécises dans les bases de données consultées et il a été difficile de retrouver l'entrée de certaines cavités. Les positions GPS des cavités retrouvées ont été indiquées en annexe (Tableau 59 p.1090).

Les principaux karsts sont situés à :

- **Lomagundi**. Ce sont des dolomies, indiquées marbres sur les cartes géologiques, datées du Protérozoïque inférieur et présentant 300 m de puissance. On y trouve les grottes suivantes : *Kauka Cave, Chinhoyi Caves, Highlands Cave*.

Sinoia ou Chinoya ou Chinhoyi cave : https://rhodesianheritage.blogspot.com/2011/06/sinoia-caves.html https://www.flickr.com/photos/raine9471/1547816541/in/photostream/

- Le **Plateau Mafungabusi**, située à 90 km à l'Ouest de Kadoma ;

- La montagne de **Chimanimani**.

Plusieurs expéditions ont permis d'explorer cette montagne notamment en 1992 et 1993.
Selon Laumanns (2017), les grottes de Chimanimani : Pomongwe cave, White Rhino Shelter, Silozwane Cave, Nswatugi Cave, Bambata Cave sont situées dans les granites. Effectivement les différentes cartes et plans topographiques des cavités consultées (Laumanns, 2017 ; Cotterill, 2001 ; Timberlake *et al.*, 2016, p.92 ; Bulletin SASA 1989 n°30 (p.3-7) ; Bulletin SASA 1993 n°33 (p.38-65) ; Bulletin SASA 1994 n°36 ; Bulletin SASA 2017 n°42 (p.10-27) et Bulletin SASA 2005 n°38 (41-73) indiquent qu'il ne s'agit pas de roches carbonatées, mais plutôt de fissures s'ouvrant le long de diaclases.

À Chimanimani affleurent les quartzites d'Umkondo, de 90 m d'épaisseur, qui sont des équivalents du groupe Waterberg d'Afrique du Sud et d'âge paléozoïque inférieur (Du Toit, 1939, p.193 *in* Swift 1952, p.348). Ils recouvrent les granites et les gneiss précambriens, intrudés par les dolérites. Ils sont recouverts par le Karoo. On les trouve vers Chishanya (ils mesurent 10 m d'épaisseur), vers Cashel.

- ***Rushinga Hills*** : au Nord-est du Mount Darwindolomies du Protérozoïque supérieur ;

- Karst de **Sanyati** : *Badze Cave, Magweto Caverns, Chimsoro Cave, Bashungwe Cave.*

Remarques :

Notons qu'il est question de grottes à chauve-souris près de Redcliff qui n'ont pas été détruites par les travaux miniers (Monadjem, 2001).

D'après Anhaeusser *et al.* (2016), il existe une grotte nommée N'doro's Beetle (51 m profondeur).

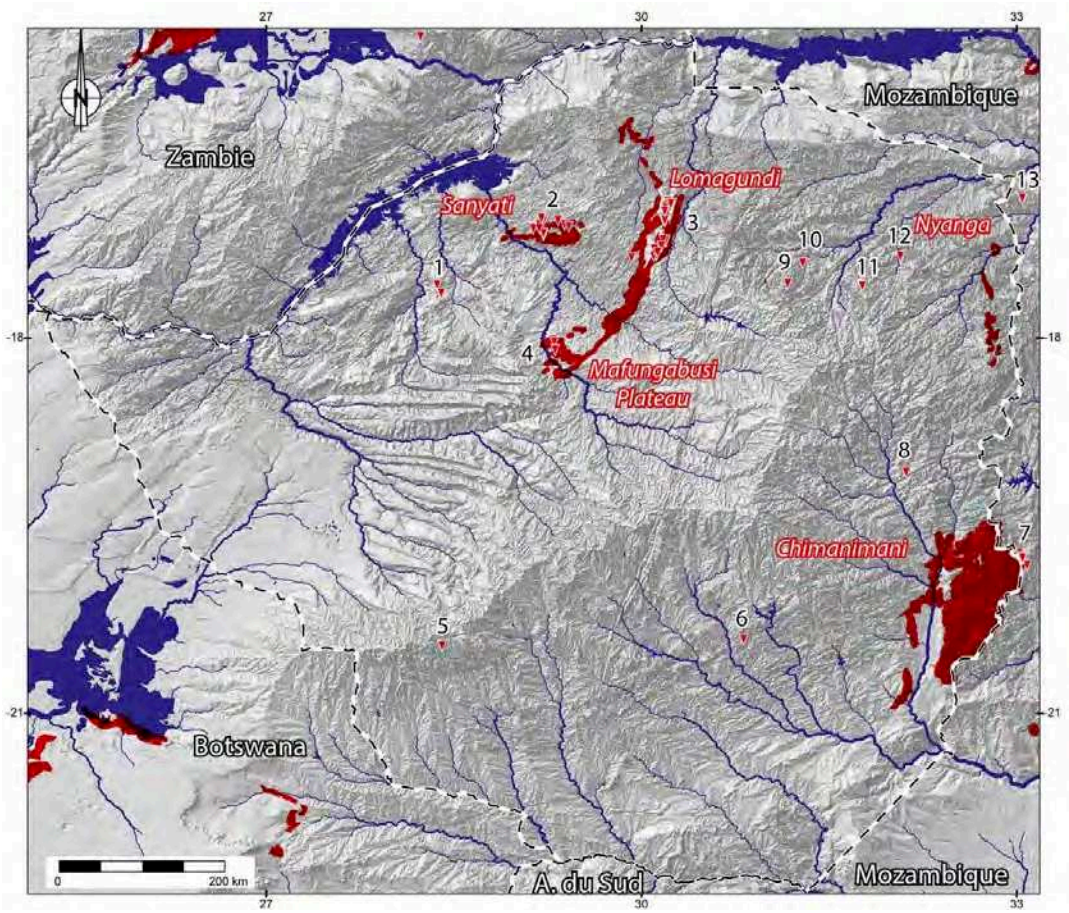


Figure 1003 Karsts connus et karsts potentiels (en rouge) au Zimbabwe.

Noms des cavités :

1 : *Chirisa Cave*, Chitita ?

2 : Karst de Sanyati (nom du fleuve) : *Badze Cave*, *Bashungwe Cave, Magweto Caverns, Kenyungu Pot, Msukwe, Dhusvi Pot, Chinyavada, Rengwe, Mutandacharimo Mot (M'charimo)), Mujenge, Chikosoro, Zvarayi caves, Mahwada Pot, Mutambaramwe, Dzimhaiwe Pot (Mutambaeamwa)).*

3 : Karst de Lomagundi : *Kauka Cave, Chinhoyi caves, Highlands Cave.*

4 : Plateau de Mafungabusi : *Chimsoro, Mabura 1 (Rhino Cave 2), Baobab Pot, Bowling hole, Rhino ranch Cave 1.*

5 : *Bamata Caves.*

6 : *Garden Cave.*

7 : Karst de Chimanimani: *Mawenge Mwena (Mayenne Mwena), Black Crystal Abyss, Bounding Pot, Big End chasm, Ndoro's Beetle, Resurgence, Zee-in-Zee Middle, Jungle Pot, Paradise Cave, Peterhouse cave (cascade), Terry's cave, Digby's cave, Redwall cave.*

8 : *Tsungwesi Cave.*

9 : *Domboshawa Caves.*

10 : *Chikupo Cave* (plutôt un abri-sous-roche).

11 : *Murehwa Cave paintings* (plutôt un abri-sous-roche).

12 : *Manhemba Caves.*

13 : Paléokarst de Pitao (au Mozambique) que nous avons découvert lors de notre mission en 2022 (p.1021).

5.11.1. Lomagundi

Nous avons localisé le karst de Lomagundi sur la carte ci-dessous (Figure 1004).

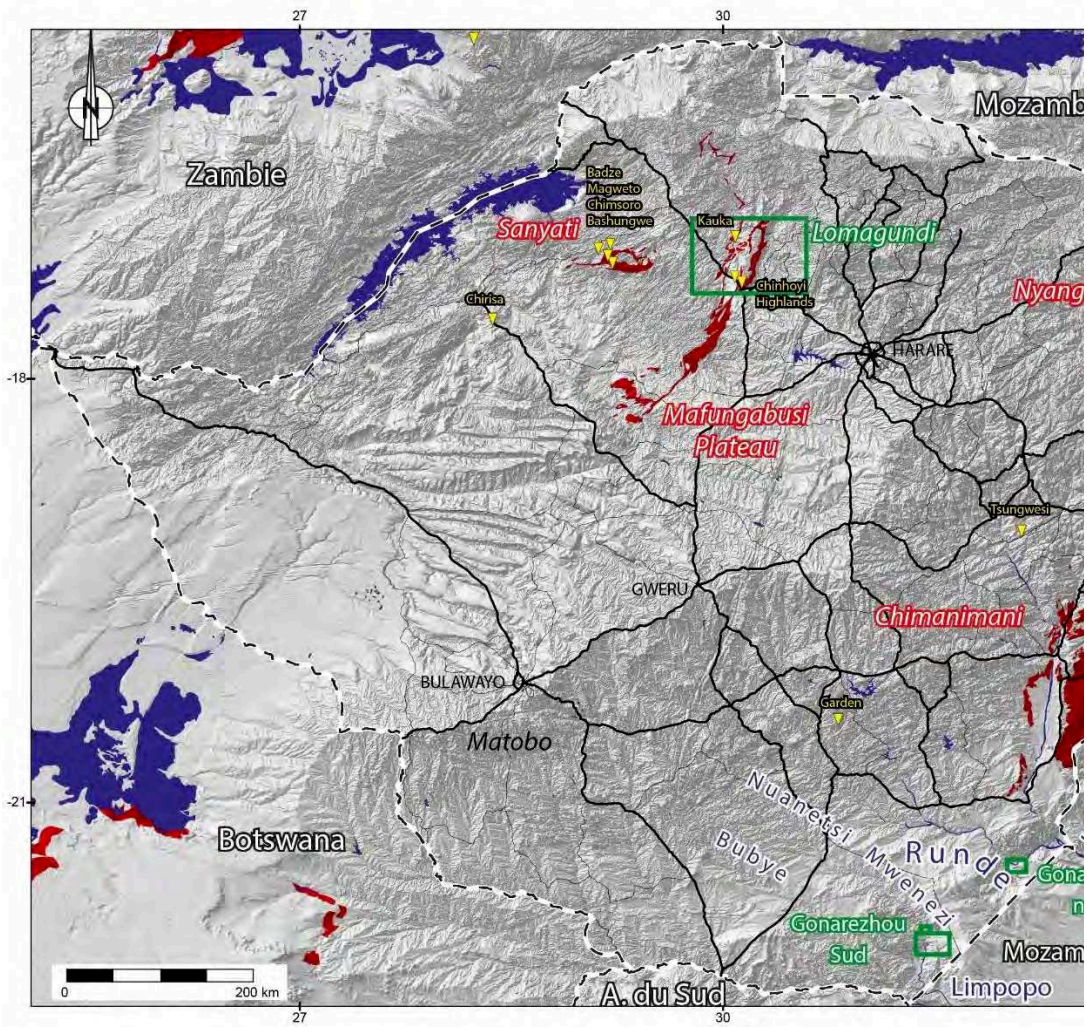


Figure 1004 Localisation du karst de Lomagundi.

Remarque :

Les secteurs de Gonarezhou ont également été indiqués sur cette carte, car des recherches de fossiles en plein-air y ont été menées.

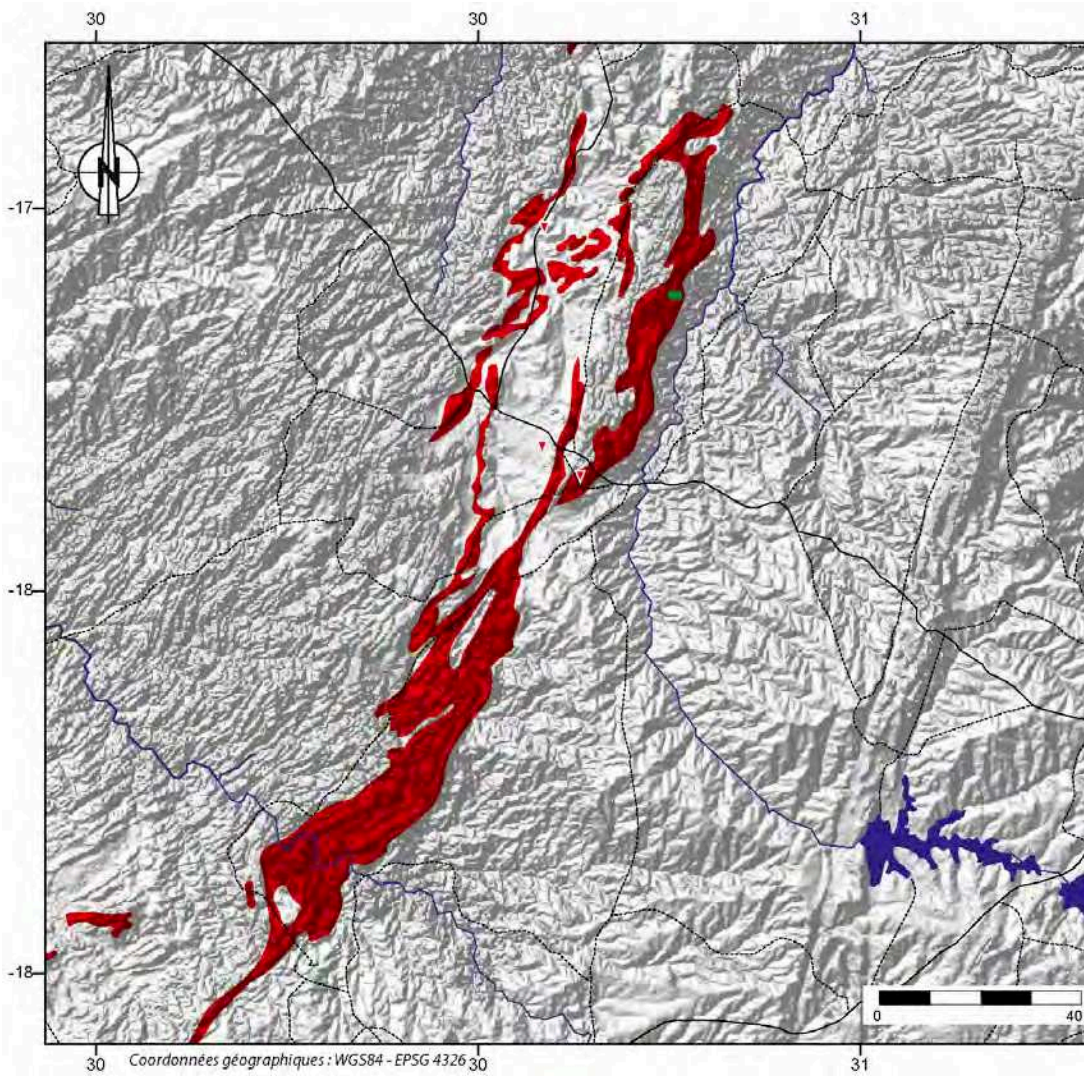


Figure 1005 Localisation des formations carbonatées à Lomagundi où potentiellement des grottes peuvent se trouver.

5.11.2. Chimanimani

Cette région a été prospectée en septembre 2023 par la mission HOPE.Z, à laquelle a participé Laurent Bruxelles. Cette mission a révélé qu'il n'existe pas de formations carbonatées sur ce massif et donc pas de karsts potentiels. En revanche, des grottes ont été décrites et explorées par les spéléologues sud-africains du *SASA* (1994). Cependant, l'analyse des images satellites, du relief et des plans rapportés par ces derniers montre qu'il s'agit de grandes fractures qui s'ouvrent au sommet du massif de quartzites. Si des ossements s'y sont trouvés, ils n'ont probablement pas pu être conservés.

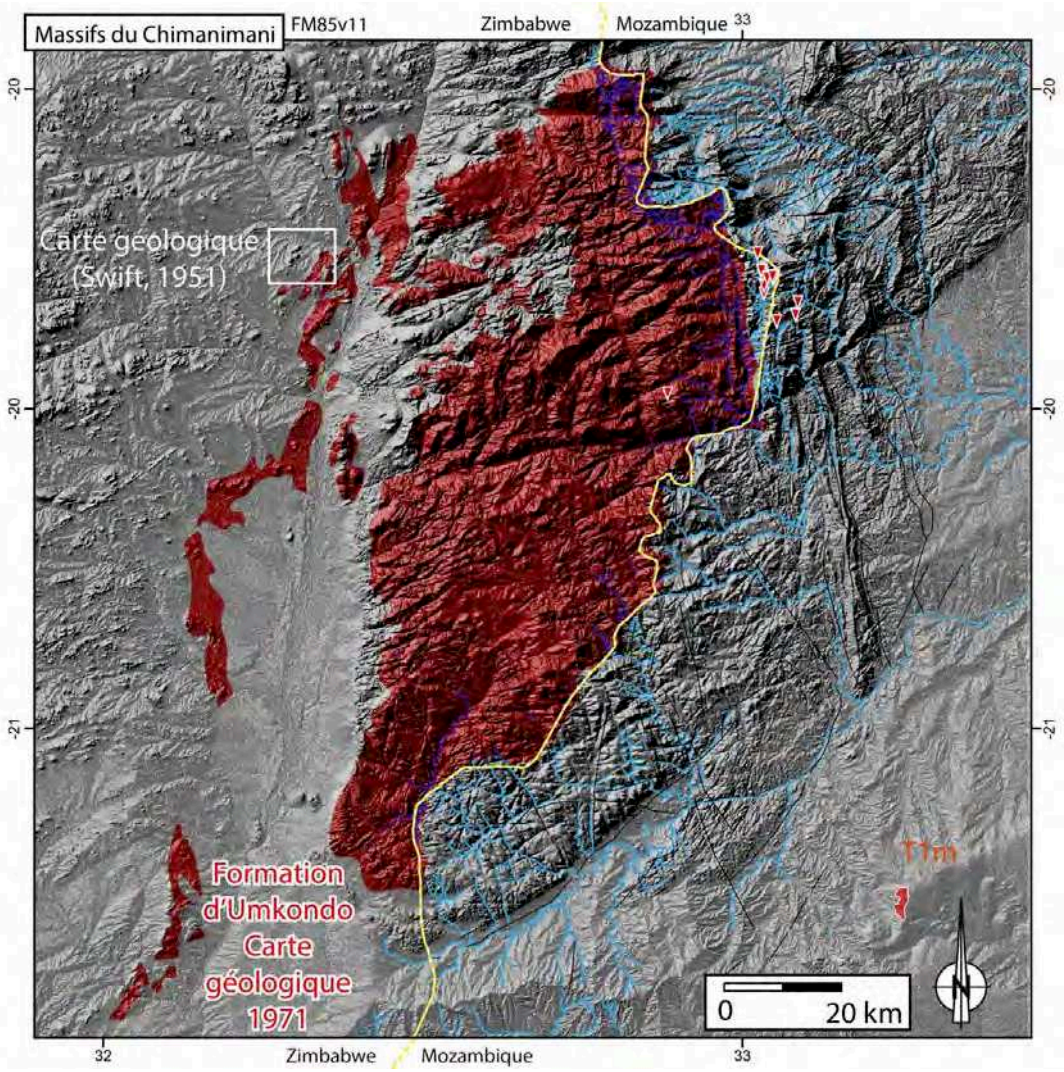


Figure 1006 Cartographie des quartzites de Chimanimani et localisation de "grottes" identifiées par les spéléologues du SASA (1994).

5.12. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS EN ZAMBIE

Les quatre cartes hydrogéologiques, au 1/250 000, du BGR (Geosciences and Natural Resources) 2018 :

- Kafue Flats & Southern Tributaries (SouthKafue);
- Northern Kariba Lake & Kafue Gorge (NorthKarib);
- Southern Kariba Lake & Kalomo (SouthKarib);
- Mwembeshi & Chongwe.

Et la carte de *Lusitu Catchment* au 1/100 000 de Lusaka.
(Cf. cartes et logs Broughton, 2014).

Les calcaires affleurent sur une grande surface, en rouge sur la carte ci-dessous (Figure 1007), ce qui suggère une forte probabilité de présence de nombreuses grottes. De plus, la zone est située en altitude, où l'érosion a été limitée, permettant aux vallées de conserver leur configuration presque inchangée depuis l'époque où les Hominines y circulaient.

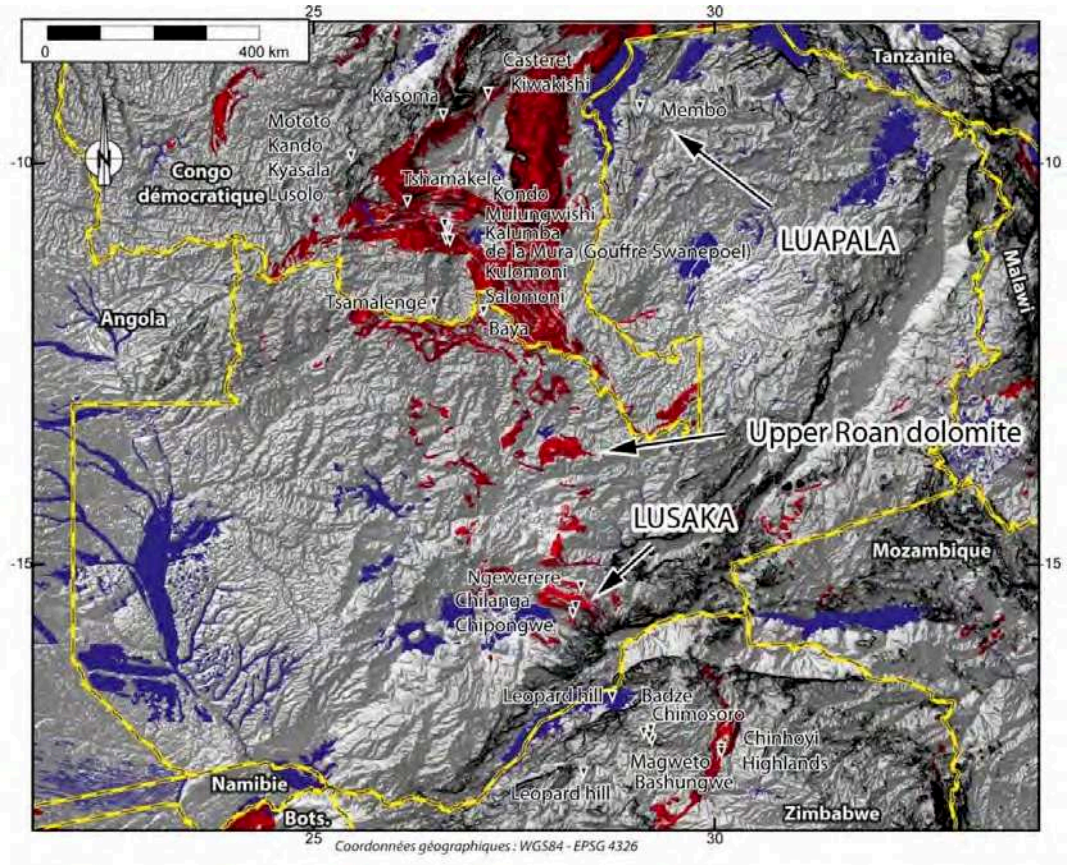


Figure 1007 Massifs karstiques de la Zambie.

Pays	Régions	Massifs karstiques	Noms des grottes	Longitude	Latitude	z	Dévelop.	Prof.	Auteur
Zambia		Mpongwe	Lake Inampamba						Laumanns
Zambia		Mpongwe	Lake Kasiba						Laumanns
Zambia		Mpongwe	Lake Ishiku						Laumanns
Zambia		Mpongwe	Lake Chilengwa						Laumanns
Zambia		Mpongwe	Bilimia River Cave						Laumanns
Zambia	the southern margin of the M	Mpongwe	Mukalowatmpa					-8	Laumanns
Zambia	Leopard's Hill		Leopard's hill	E028°43'20"	516°40'15"		298		Laumanns
Zambia		Lusaka	Ngewerere Cave	28°20'0.00"E	15°18'0.00"S				Laumanns + Grottocente
Zambia		Lusaka	Chilanga Caves	28°15'60.00"E	15°33'0.00"S				Laumanns + Grottocente
Zambia		Lusaka	Chipongwe Caves	28°14'0.00"E	15°37'60.00"S				Grottocenter
Zambia	at Kafue River gorge	Lusaka	Kapongo Cave (Freeman's Guano Cave)						Laumanns
Zambia	Kafue river gorge, Shimabala	Lusaka	Kapongo	~~E028°20'58,6"~~	~~S19°46'17,3"~~	1309	245		Laumanns
Zambia		Luapala	Membo Cave						Laumanns
Zambia		Luapala	Nsalu Cave						Laumanns
Zambia	Membo hill, Kilwa island Nch	Luapala	Membo	E029°04'04,5"	S09°19'00,8"	931	730		Laumanns + Grottocente
Zambia		Kabwe District	Broken Hill Cave						Laumanns
Zambia	Central Zambia	Mumbwa	Mumbwa Caves						Laumanns + Lawrence S. Barham 1995
Zambia	karst plateau between Chisas	Solwezi	Shankenge cave (insignifiant chamber)						Laumanns
Zambia			Baya	27° 7'0.00"E	11°52'0.00"S				Grottocenter

Tableau 54 Cavités de la Zambie.

5.12.1. Au niveau du bassin versant du Zambèze

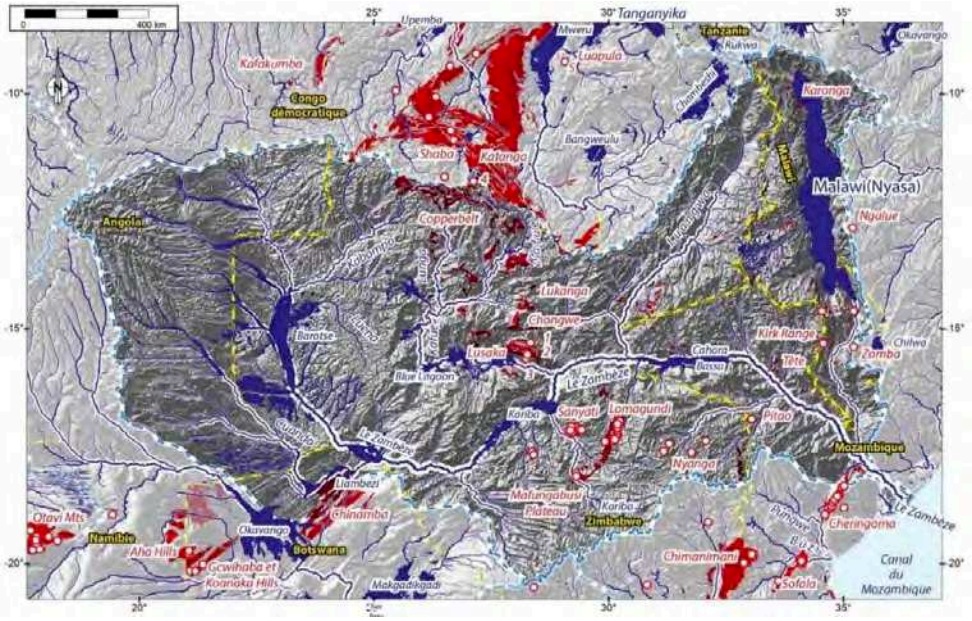


Figure 1008 Massifs karstiques dans le bassin versant du Zambèze.

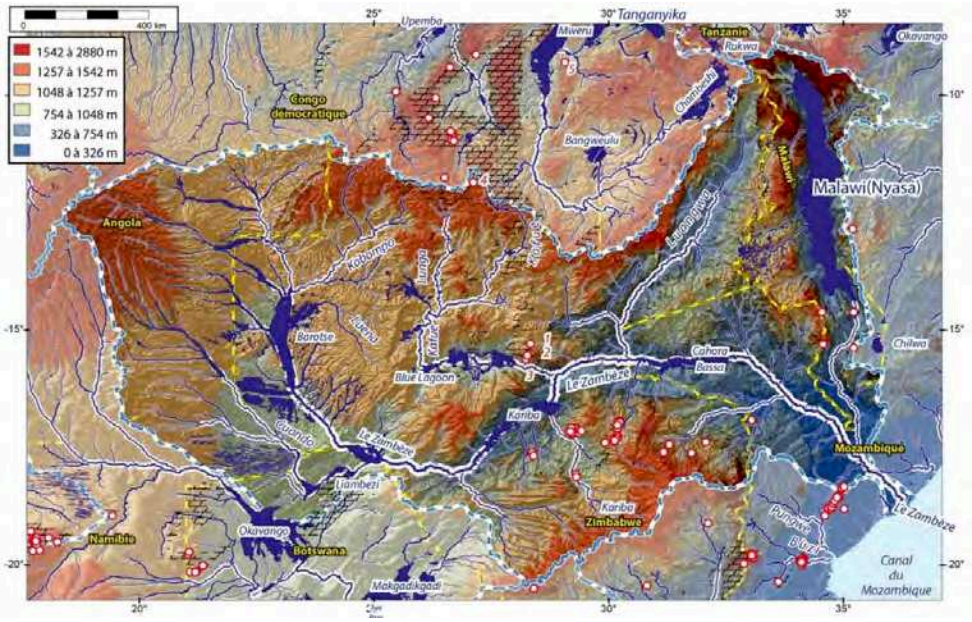


Figure 1009 Hypsométrie, classement des altitudes et carbonates (en trame noire) du bassin versant du Zambèze.

Noms des cavités en Zambie :

1 Ngewerere Cave (altitude MNT : 1164 m) ;
2 Chilanga Cave (altitude MNT : 1236 m) ;
3 Chipongwe Cave (altitude MNT : 1128 m) ;
4 Baya (région de Katanga, Congo démocratique) (altitude MNT : 1326 m) ;
5 Membo (région de Luapula, Congo démocratique) (altitude MNT : 1086 m).

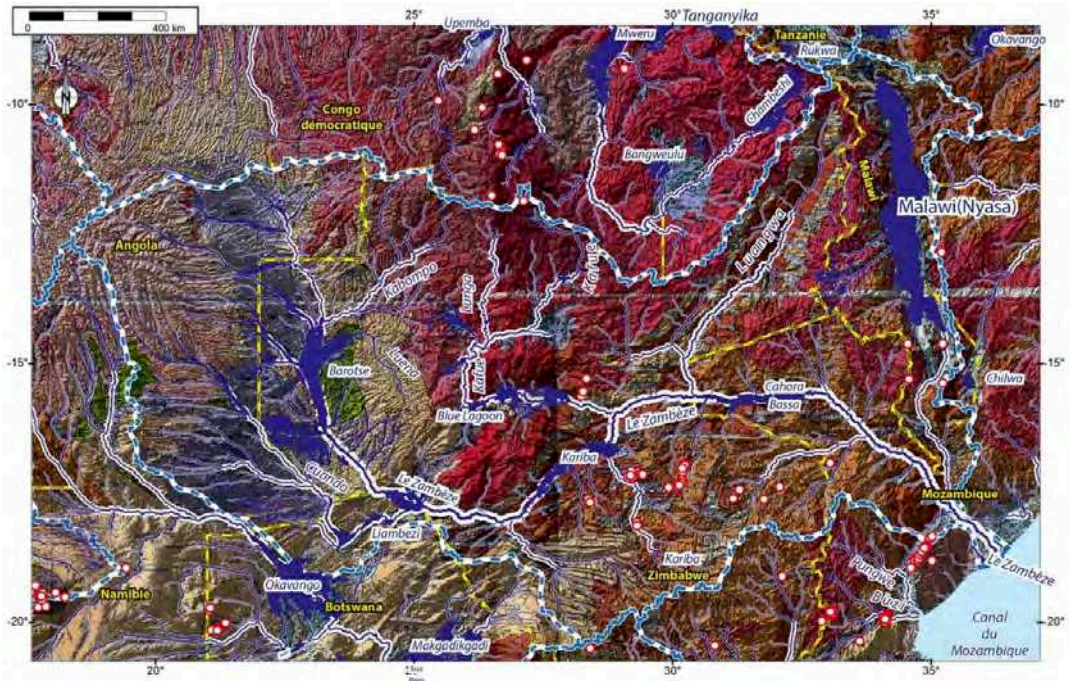


Figure 1010 Carte des sols (Unesco, 1977) avec modèle ombré.

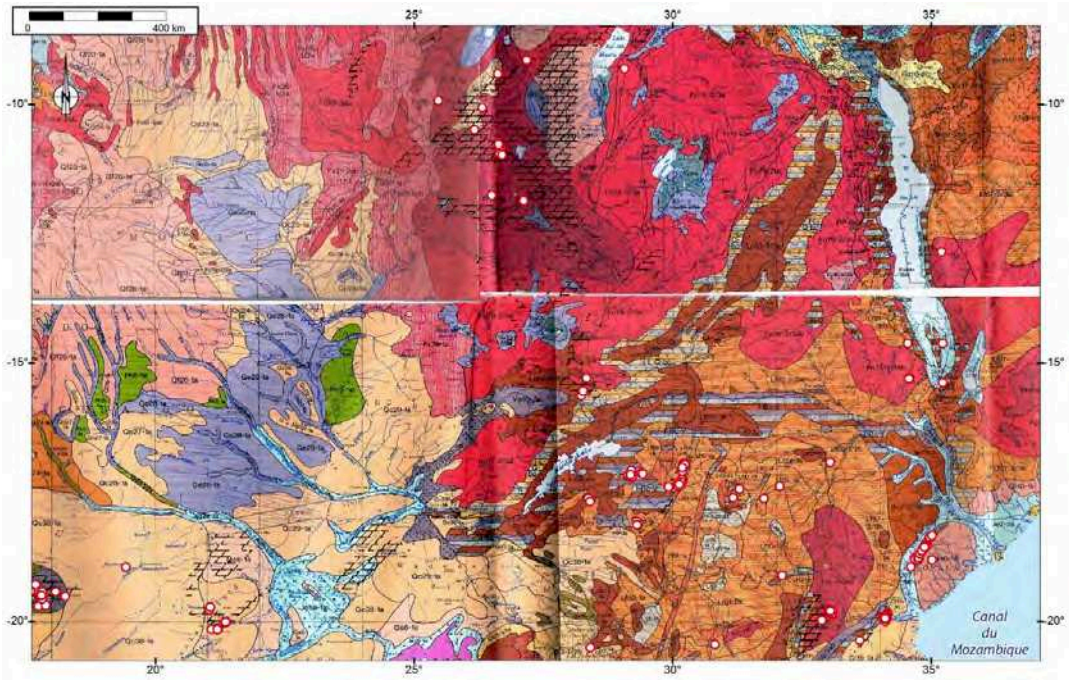


Figure 1011 Carte des sols (Unesco, 1977) sans modèle ombré.

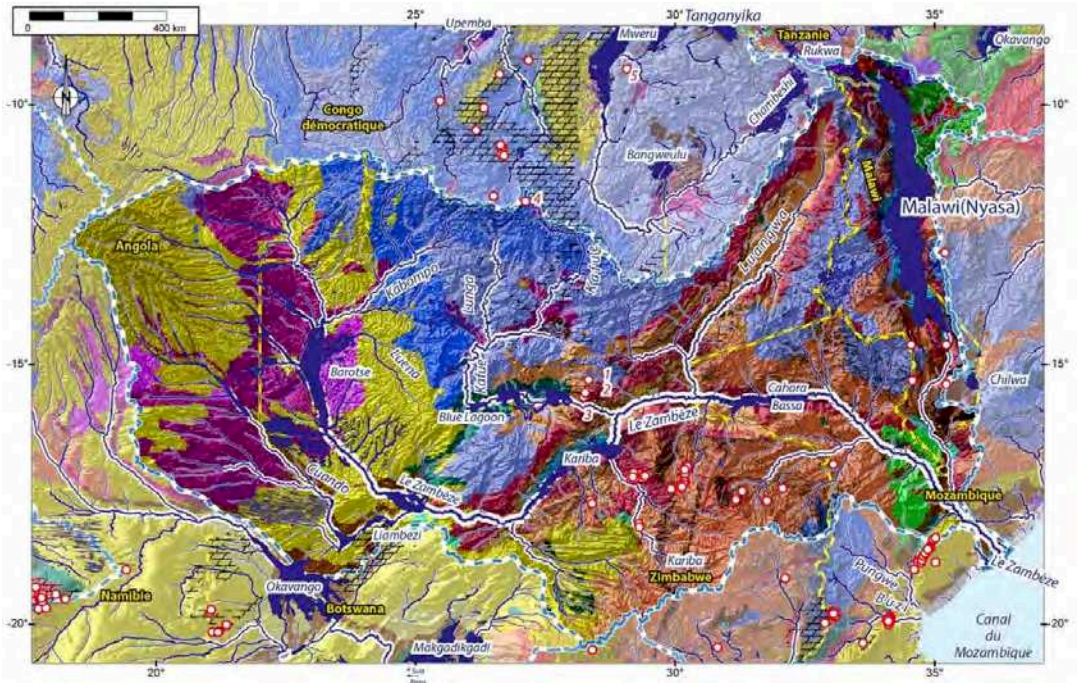


Figure 1012 Carte des sols (Unesco, 1991).

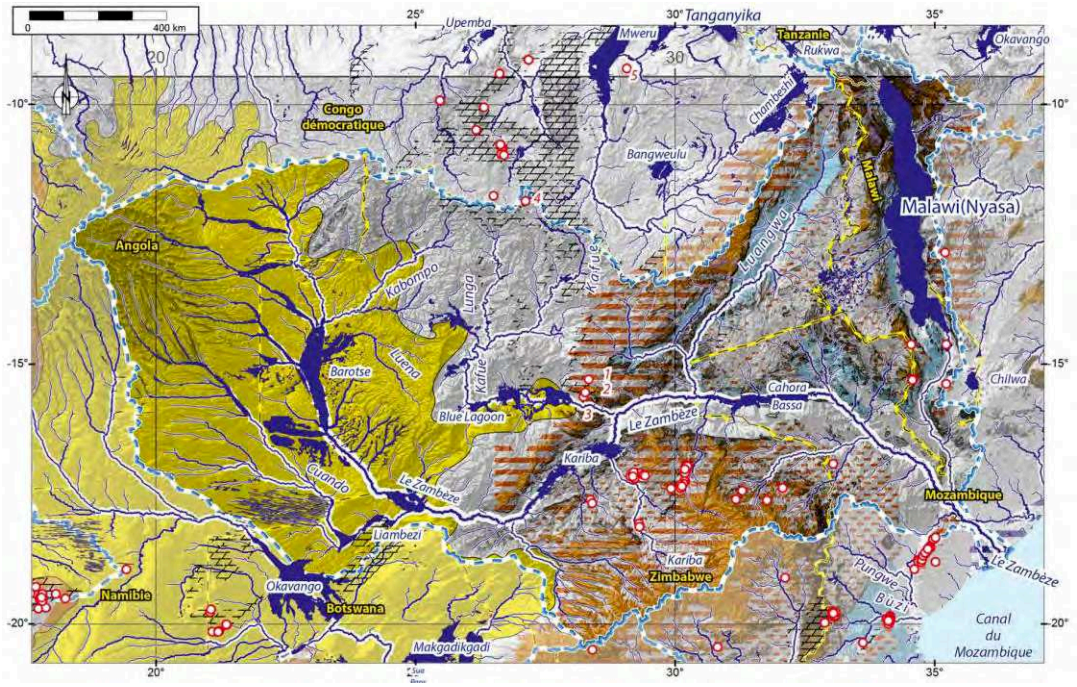


Figure 1013 Carte des surfaces. Légende Figure 121 p.175.

5.12.2. Région karstique de Lusaka

Trois cavités sont connues dans la région de Lusaka, d'après les inventaires de Laumanns (2017b), compilés dans Grottocenter (https://grottocenter.org) et l'inventaire de Cotterill (2001). Les altitudes mesurées sur le MNT JAXA (p.36) donnent pour les grottes de :

- Ngewerere: 1164 m ;
- Chilanga : 1236 m ;
- Chipongwe: 1128 m.

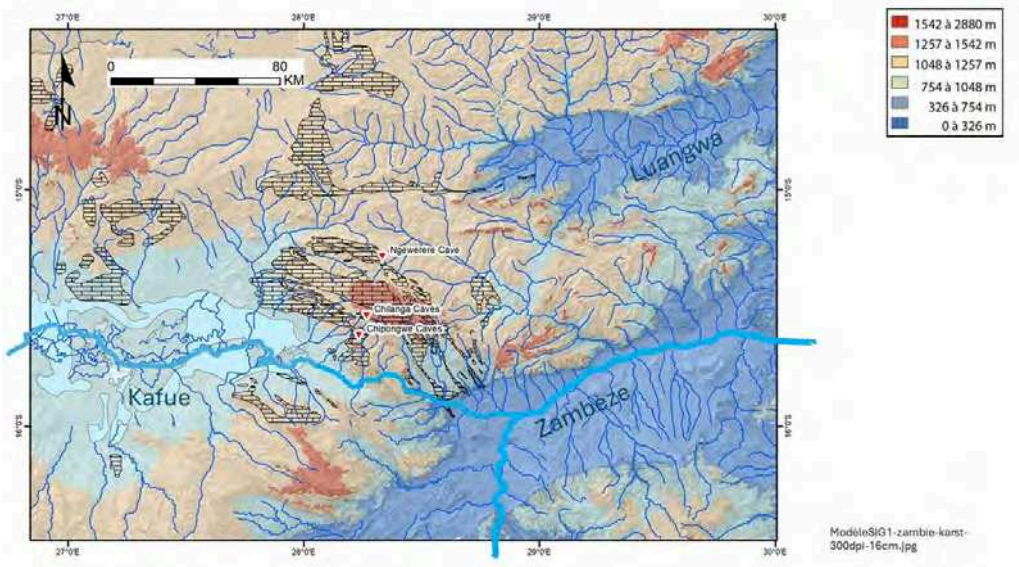


Figure 1014 Carte hypsométrique de la région karstique de Lusaka.

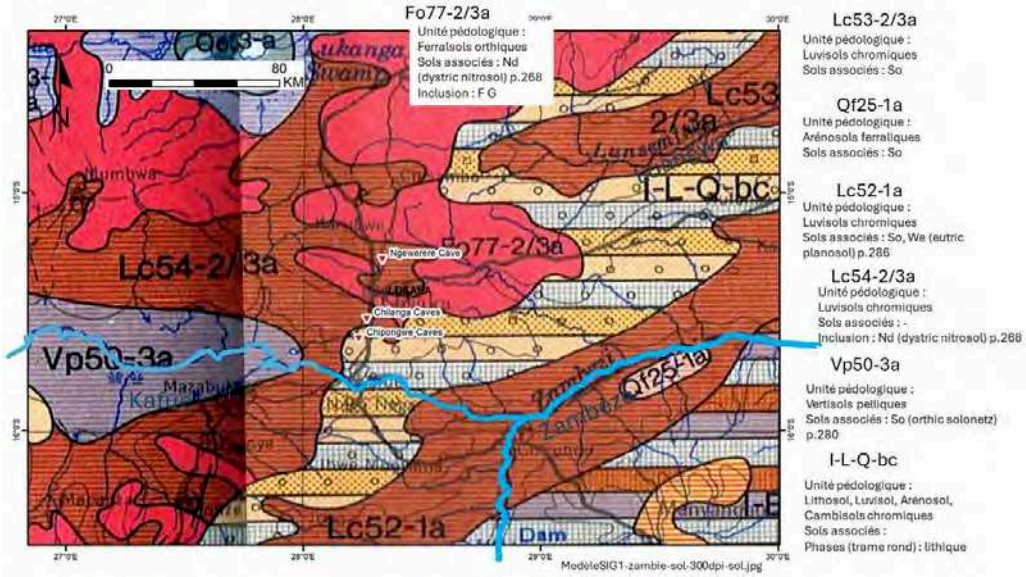


Figure 1015 Carte des sols (Unesco, 1991).

5.12.3. Karst de Chipongwe

Broken Hill, Twin Rivers et Chipongwe sont les grottes de Zambie (indiquées sur les cartes précédentes) dans lesquelles il y a eu de découvertes archéologiques en 1921 (Woodward, 1921; Boule, 1923, pp404-408 ; Oakley, 1953, Avery, 2001 ; Clark, 2001 ; Grün *et al.*, 2020; Barham *et al.*, 2002, 2023). Les datations Uranium des brèches donnent un âge de 300 000 ans (Clark, 2001).

5.13. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS AU MOZAMBIQUE

Nous avons eu l'opportunité d'effectuer une mission de prospection au Mozambique et au Malawi, du 30 août au 20 septembre 2022. Pour préparer cette mission, nous avons appliqué la méthode que nous avons mise au point et décrite dans le 1 (p.23), qui repose sur les étapes suivantes :

(1) Identifier des formations carbonatées à l'affleurement, à partir des cartes géologiques au 1/250 000, puis les vectoriser ;

(2) Analyser l'état de karstification en surface de ces formations en utilisant les MNT fournis par le satellite japonais DAICHI ALOS (JAXA), en repérant des formes karstiques typiques (canyons, poljés, buttes karstiques, etc.) ;

(3) Contraindre l'évolution des paysages, c'est-à-dire **rechercher des grottes sur les paléosurfaces** anciennes (Plio-Pléistocène), généralement conservées en altitude ;

(4) Réaliser une recherche bibliographique sur la géologie et sur les cavités déjà documentées.

Nous avons présenté l'intérêt de cette méthodologie innovante de cartographie qui permet de mieux localiser les cibles à prospecter (p.153). En appliquant cette méthode, les analyses préliminaires ont permis d'identifier plusieurs cibles à prospecter lors de la mission. Ces cibles sont classées en cibles principales et cibles secondaires, en fonction de leur potentiel à contenir des grottes et de leurs difficultés d'accès.

Un autre objectif de cette mission est de rencontrer les paléontologues allemands au Malawi, pour visiter les sites fossilifères à Hominines de Malema et Urema afin de comprendre le contexte géologique de leurs découvertes.

Le karst de Buchane qui avait déjà fait l'objet de missions de prospections antérieures en 1998 et 1999 et 2015 (Laumanns, 2017c) a été une de nos premières cibles, du fait que nous disposons d'informations de localisation précises et sûres pour prospecter des grottes. Une mission HOMINI'KARST dirigée par Bruxelles a prospecté les grottes du secteur de Buzy-Sofala et de Cheringoma en novembre 2019 (voir liste p.100) (Beaudet et Fourvel, 2019; Fourvel *et al.*, 2022), éliminant donc ces deux karsts pour cette mission de 2022.

Nos recherches bibliographiques ont permis d'identifier la région de *Kirk Range*, située à la frontière du Mozambique et du Malawi, culminant à une altitude élevée (1500 m) et où affleurent des formations carbonatées. Cette région réunit donc tous les critères favorables pour y découvrir des grottes à prospecter, d'autant que des grottes avaient déjà été mentionnées dans des bulletins coloniaux britanniques (Dunstan, 1908, 1909, 1911) et signalées sur une carte géologique (Bloomfield, Mason, Habgood, 1966) , comme nous l'a indiqué Thomas Fullgraf (BRGM), actuellement impliqué dans la révision des cartes géologiques du Malawi. Nous présenterons cette région plus tard (p.1035).

Remarque : À *Ngalue Cave* sur la côte est du lac Malawi, au Mozambique, la grotte a livré une industrie du *Middle Stone Age*, datée de 105 000 à 40 000 ans (Mercader *et al.*, 2009).

5.13.1. Présentation de la mission

Après avoir établi les cibles à prospecter (Figure 1016), il faut définir un itinéraire cohérent et un plan d'action. Pour cela, il faut réaliser des cartes et étudier les axes de circulation.

5.13.1.1. Cartographie des cibles

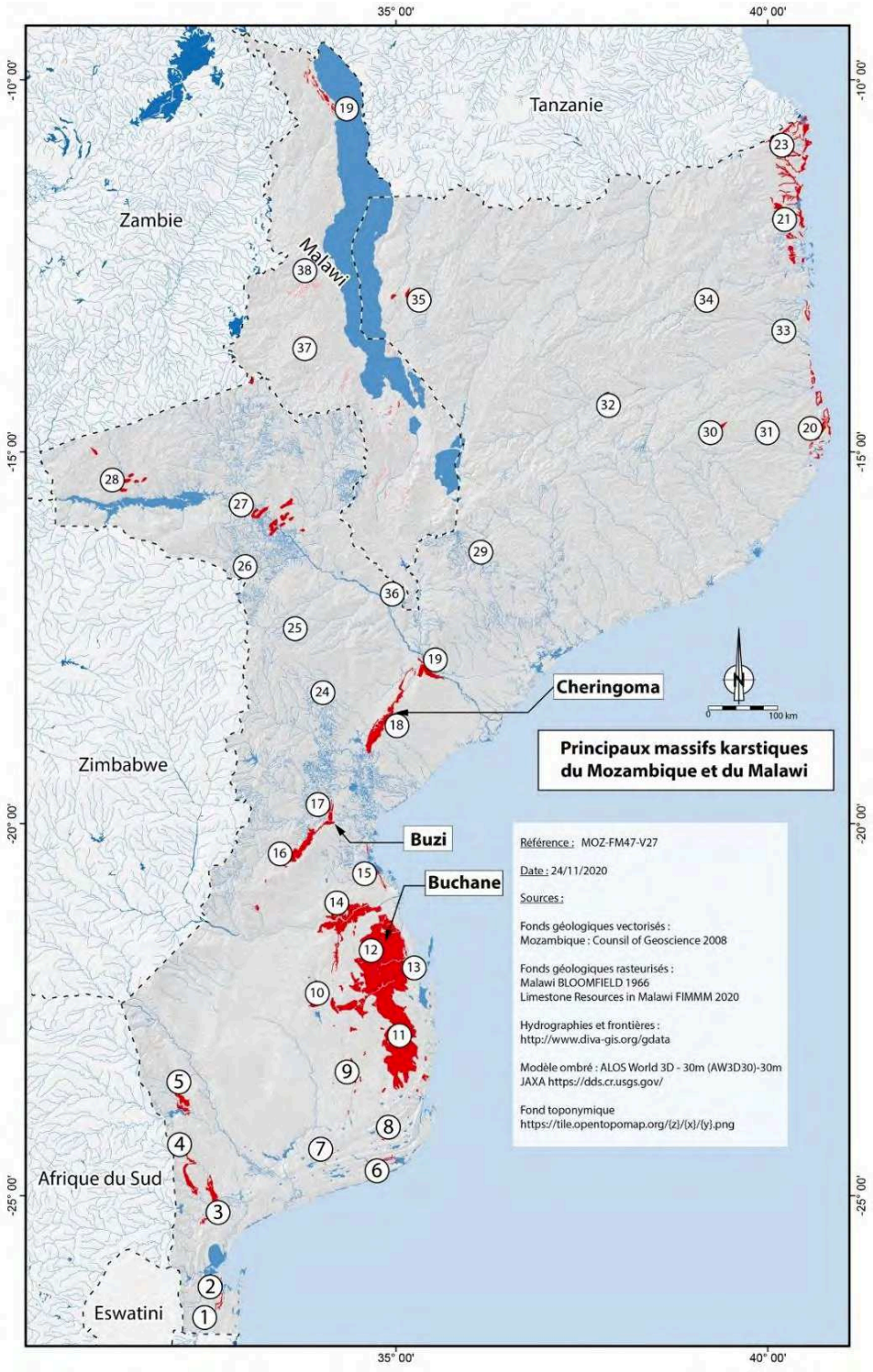


Figure 1016 Cibles potentiels déterminées par l''étude et l'analyse des formations carbonatées à l'affleurement.

5.13.1.2. Itinéraire envisagé pour prospecter les cibles

La route de l'aller et du retour devrait être à peu près les mêmes.
Départ **Maputo** direction Chimoio puis Tete : 3 jours de route - 1535 km
On longe la côte sur la route EN1

- Xai-xai
- Chidenguele
- Zavala
- Morrumbene
- Massinga
- Maphinhane

On traverse les carbonates tertiaires de Buchane (en jaune) et le fleuve Savé.
On prospecte les grottes de Buchane.
On quitte la côte et on prend la route EN7 direction de Chimoio.
On traverse les carbonates de Sofala (en orange) et le fleuve Buzy. A priori nous ne devrions pas prospecter ce secteur qui a déjà été prospecté en 2019.
Premier itinéraire BIS : vers Dacata), peut se faire au retour aussi
Arrivée à Chimoio (depuis Maputo 1150 km)

- Catandica
- Changara

Tete (depuis Chimoio 385 km)
On prend la route M1

- Ulongwe
- Cibwata
- Lilongwe
- Kasungu

Tete vers Fingoe (279 km)
Tete vers Katongoa (depuis Tete 930 km).

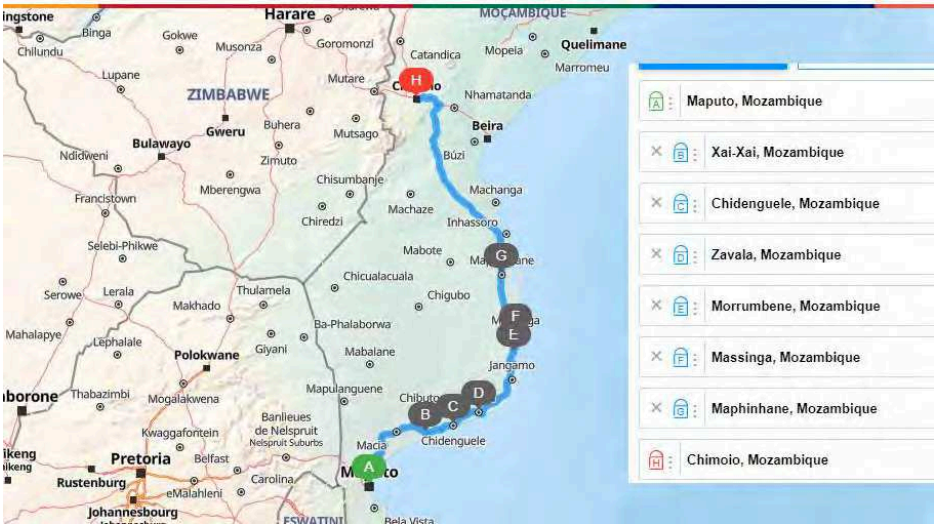


Figure 1017 Exemple d'itinéraire et estimation des temps de trajet pour le début de la mission.

5.13.1.3. Calendrier envisagé

30 août	Arrivée à Johannesbourg 10h, vol en direction de Maputo à13h55 et arrivée à Matupo à 14h55 (nuit à Matupo)
31 août	Départ tôt le matin en direction de Tete (3 jours de voyage – 1535 km)
1 septembre	en direction de Tete
2 septembre	en direction de Tete
3 septembre	Arrivée vers Tete, partir en direction de Fingoe (272 km)
4 septembre	Arrivée vers Fingoe et prospection des carbonates au nord (à 80 km)
5 septembre	suite de la prospection des carbonates (sud ? +60 km) retour à Fingoe
6 septembre	retour à Tete et départ vers Kirk Range, frontière Malawi, prospection des 3 cavités
7 septembre	Suite de la prospection et partir vers le nord pour Mzuzu
8 septembre	14h arrivée du groupe de Francfort à Lilongwe puis direction Muzuz pour la nuit, Mzuzu dernier créneau pour les rejoindre
9 septembre	Direction le nord, au passage on visite Uraha, Maléma. Arrivée à Karonga dans la soirée
10 septembre	Visite du site de Malema et des formations géologiques de Chiwondo et du musée de Karonga (station de recherche sur l'eau à Chilmuba)
11 septembre	Prospection paléontologique avec
12 septembre	Prospection paléontologique avec les Allemands
13 septembre	Prospection paléontologique avec les Allemands
14 septembre	Départ de Laurent à Lilongwe
15 septembre	Kirk Range si on n'y est pas allé à l'aller, etc.
16 septembre	Suite Kirk Range
17 septembre	voyage vers Maputo, avoir passé Tete.
18 septembre	voyage vers Matupo

5.13.1.4. Cibles principales envisagées

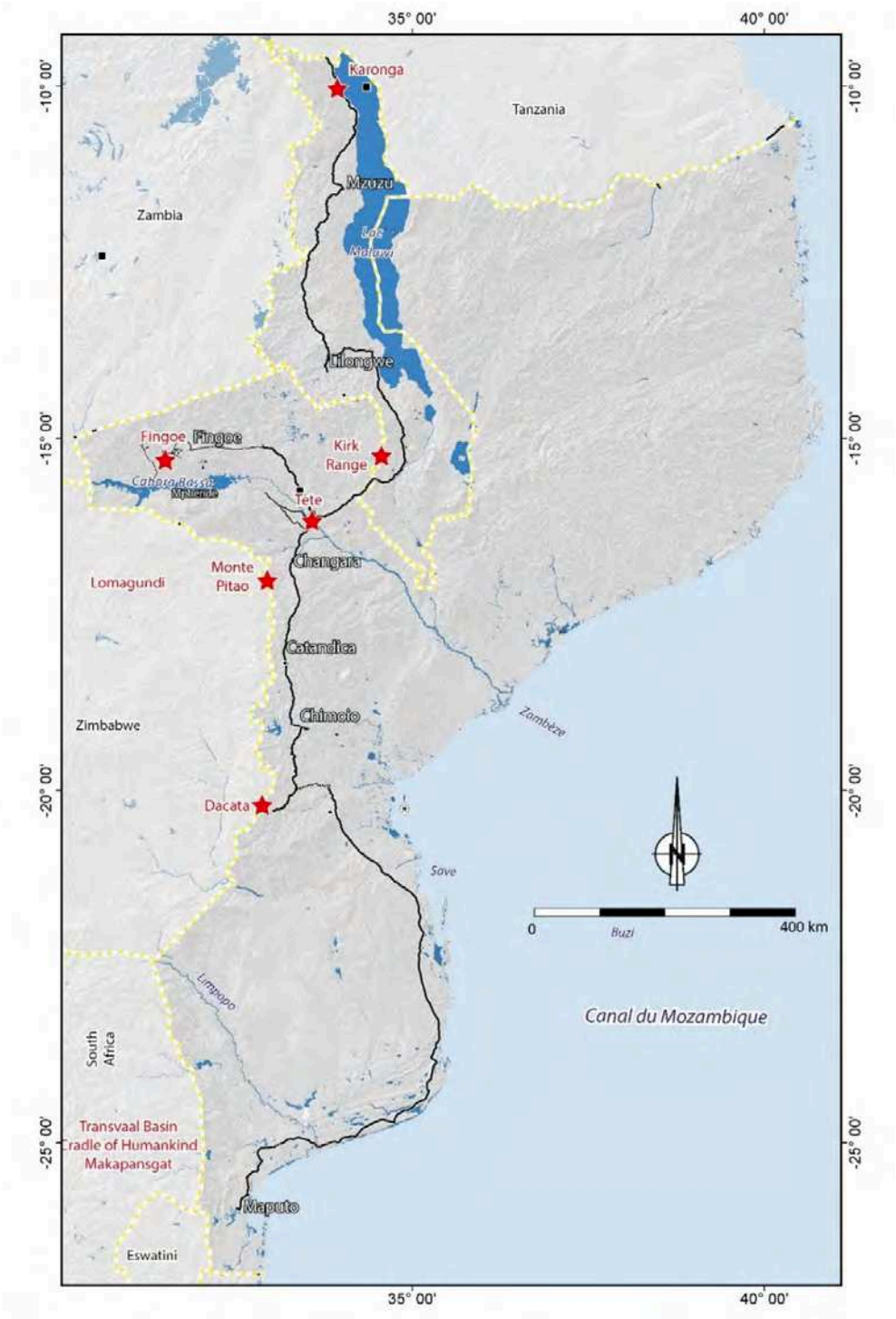


Figure 1018 Cibles à prospecter (en rouge) et trajets de prospection (en noir) envisagés avant la mission et issue du travail de préparation de la mission.

5.13.2. Cibles principales

Nos études préliminaires nous ont permis de sélectionner des zones de karsts potentiels. Nous présentons ces secteurs cibles ainsi que les résultats obtenus lors de nos prospections.

5.13.2.1. Région de Buchane

Cette région a été explorée en 1952 (Bettencourt - Dias, 1952 in Laumanns, 1995) puis par Laumanns en 1995 (Laumanns, 1995). Les analyses de pentes calculées à partir du MNT JAXA montrent de nombreuses dépressions dont la profondeur est estimée à une trentaine de mètres. Il s'avère après les avoir prospectées sur le terrain que ces dépressions existaient bien, mais elles n'avaient qu'une très faible profondeur, de l'ordre du mètre. Nous avons évoqué ce secteur lors de l'évaluation des données altimétriques mesurées par satellite (p.49 et p.1031). Aucune entrée de cavité n'a été trouvée lors de nos prospections. Nous présenterons les résultats de la prospection de ce secteur plus tard (p.1009).

5.13.2.2. Région de Tete, secteur de Fingoe

Au Mozambique ; à l'est de la ville de Fingoe dans la région de Tete, 3 formations carbonatées potentiellement karstifiées ont été étudiées. Nous avons repéré des dépressions (dolines ?) et des buttes (karstiques ?) dans la formation de Musamba (P2ZBm). Une photographie de la formation géologique de Monte Messuco (P2FSm) montre un faciès similaire aux dolomies karstiques de Malmani du *Cradle of Humankind* d'Afrique du Sud. Tete est situé à 1535 km de Maputo (via EN1 et EN6). Fingoe est situé à 272 km de Tete (via EN9). Les massifs plus au sud sont atteignables par des pistes (d'ordre tertiaire) de 40 km. Les carbonates affleurent sur 65 km de longueur et à 26 km de Fingoe. Cette région est malheureusement trop loin par rapport à l'itinéraire que nous nous étions fixés donc nous n'avons pas pu la prospecter. Nous indiquons cependant les cartes produites (Figure 1019).

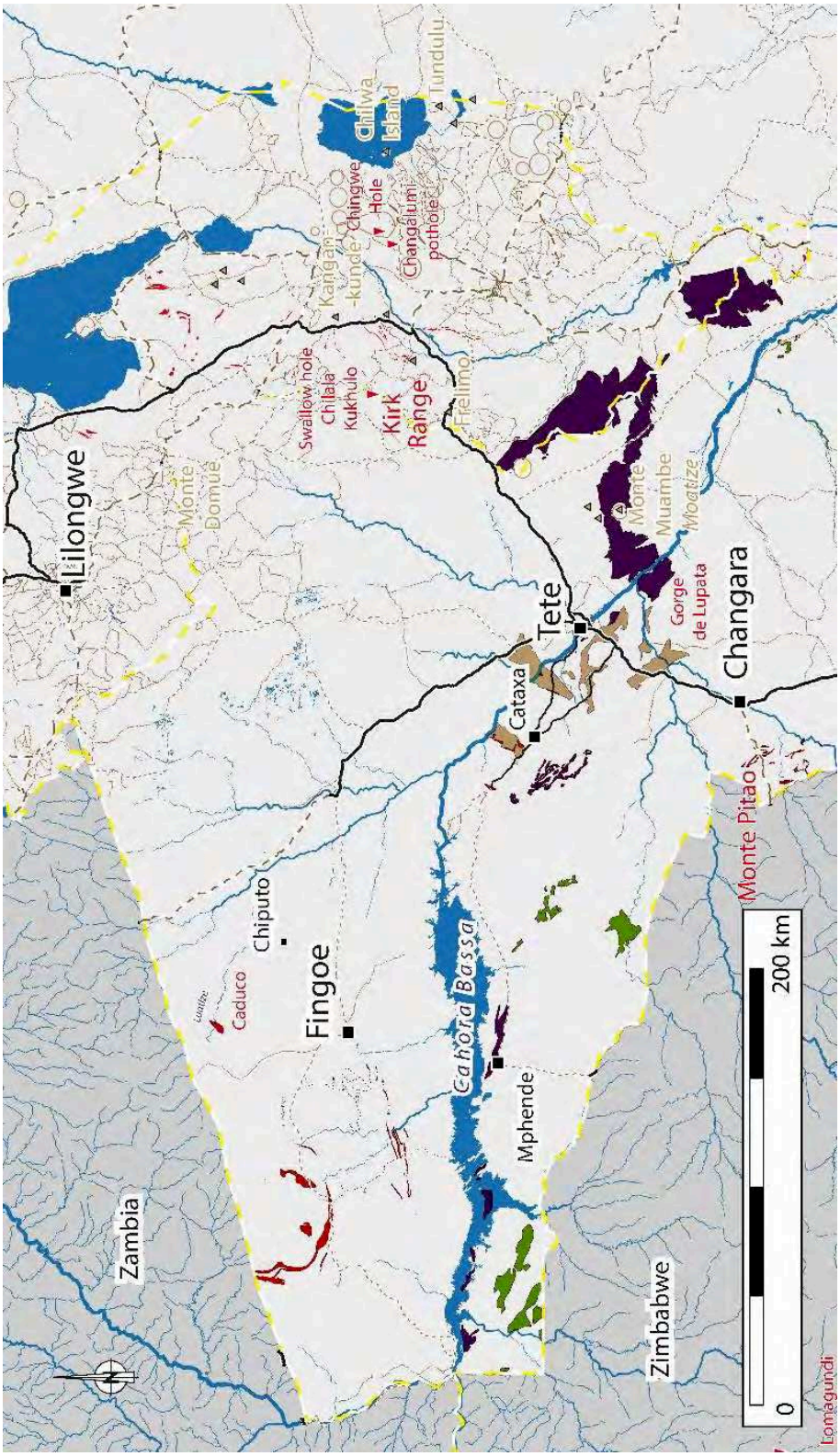


Figure 1019 Karsts potentiels de la région de Tete (Légende : Figure 1021 p.1012).

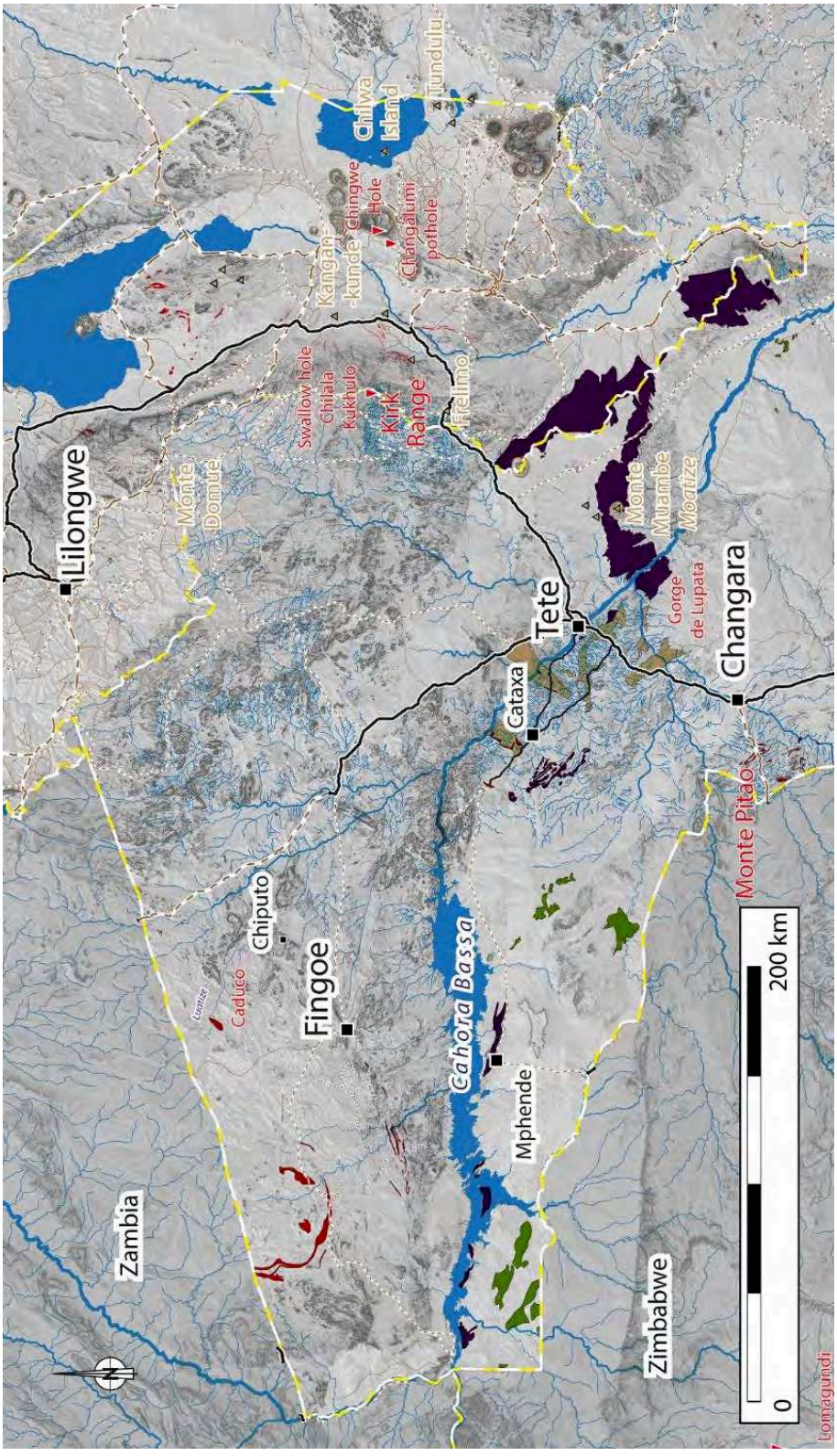


Figure 1020 Karsts potentiels de la région de Tete (Légende : Figure 1021 p.1012).

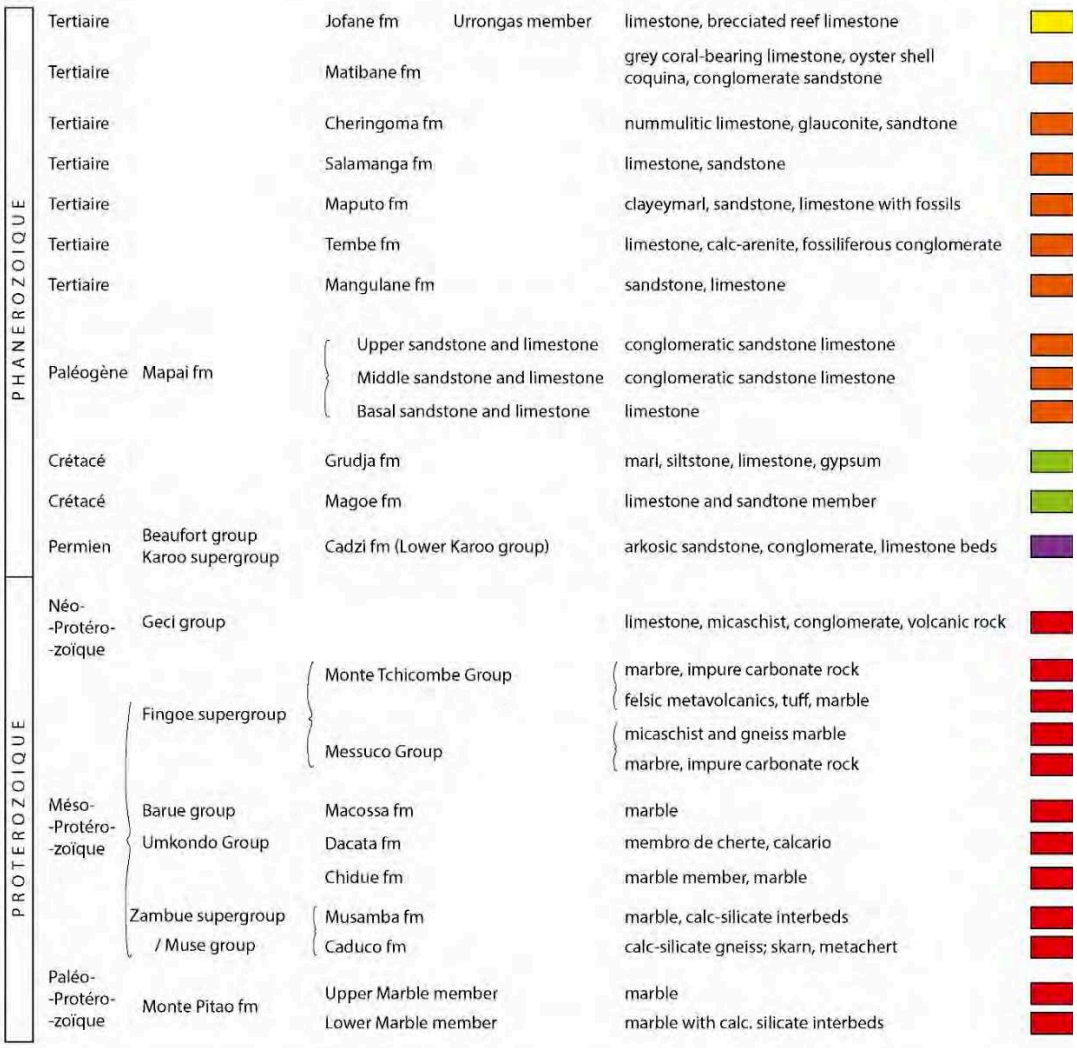


Figure 1021 Log stratigraphique synthétique du Mozambique récapitulant les formations carbonatées.

5.13.2.2.1. Secteur de Fingeo

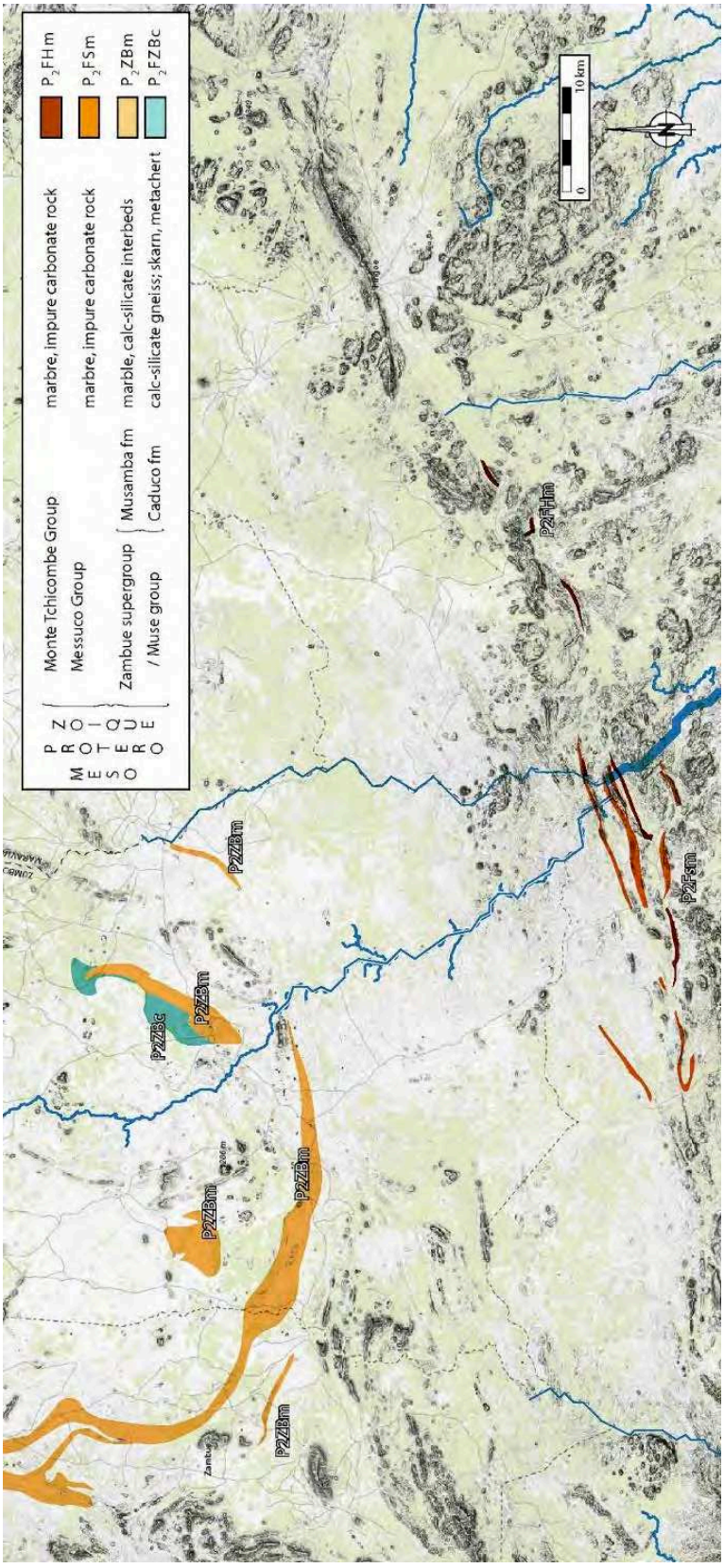


Figure 1022 Karsts potentiels de la région de Fingeo.

La carte géologique (au 1 / 250 000 n°1530-1531) et la coupe géologique ci-dessous montre la région de Fingeo. Nous avons extrait de cette carte les formations carbonatées potentiellement karstifiées des cartes précédentes (Figure 1019 à Figure 1022). Notamment les formations carbonatées du Mésoprotérozoïque sont des marbres dolomitiques qui appartiennent aux formation suivantes (Figure 1026) : Formation Messuco (Monte Tchicombe) P2FHM, formation Mont Messuco P2FSm et un membre du supergroupe de Zahue : le P2ZBC. Sur certaines cartes au 1/250 000 ce sont les formations P2FHv et P2FSc qui peuvent contenir des marbres et peuvent donc être karstifiées. Elles sont en orange sur la coupe géologique (Figure 1024).

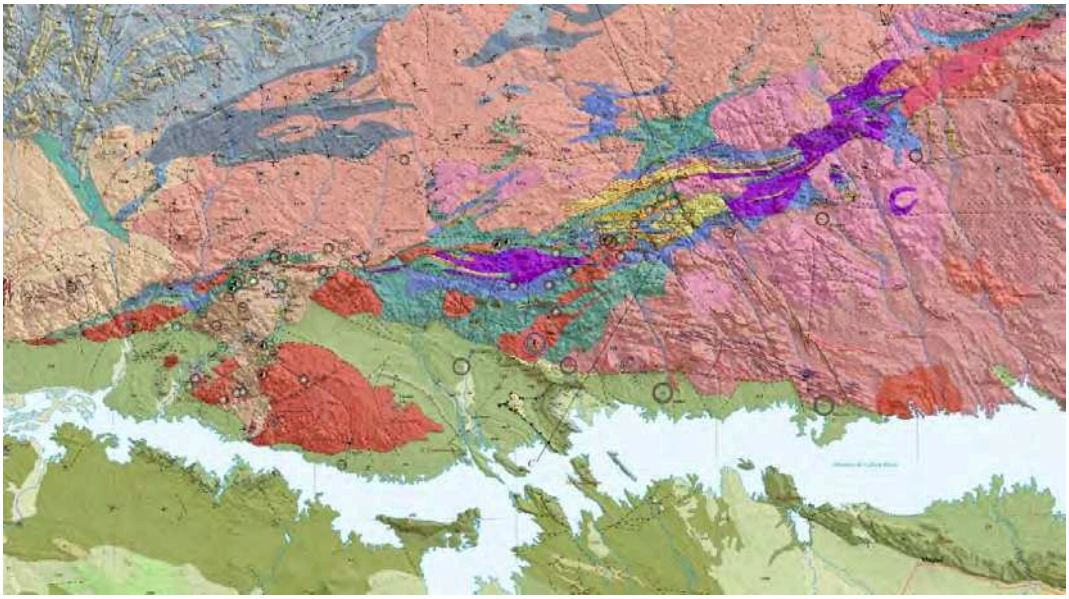


Figure 1023 extrait de la carte géologique de la région de Fingeo au Mozambique (Source : carte 1 / 250 000 n°1530-1531, GTK Consortium, 2006.

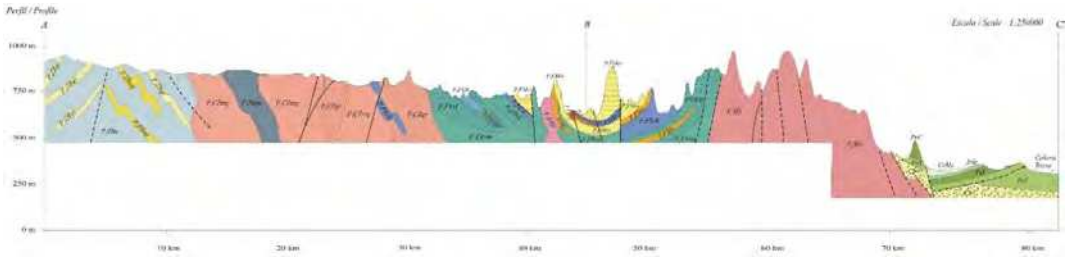


Figure 1024 Coupe géologique de la région de Fingeo au Mozambique (Source : carte 1 / 250 000 n°1530-1531, GTK Consortium, 2006).

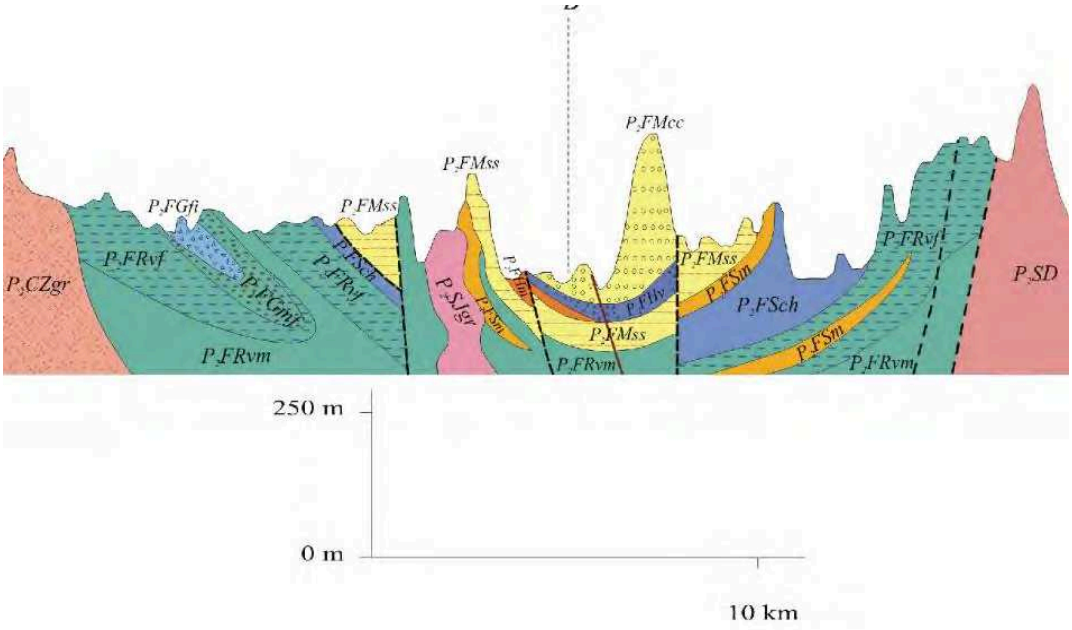


Figure 1025 Détail de la coupe géologique montrant les formations carbonatées, en orange, susceptible d'être karstifiées (Source : GTK Consortium, 2006).

Code	Group	Formation*	Main lithology
P_2FPmc	Monte Tchicombe	Monte Puéque	Calc-silicate mica schist
P_2FPcc	Monte Tchicombe	Monte Puéque	Calc-silicate gneiss and schist
P_2FMco	Monte Tchicombe	Rio Mucanba	Polymictic conglomerate
P_2FMss	Monte Tchicombe	Rio Mucanba	Metasandstone, quartz-feldspar schist
P_2FMqz	Monte Tchicombe	Rio Mucanba	Quartzite
P_2FHm	Monte Tchicombe		Marble, impure carbonate rock
P_2FHv	Monte Tchicombe		Felsic metavolcanic rock, metatuff, agglomerate
P_2FGb	Monte Messuco	Monte Muinga	Volcanic breccia, agglomerate
P_2FGmf	Monte Messuco	Monte Muinga	Mafic amygdaloidal, and felsic metavolcanic rock
P_2FGvi	Monte Messuco	Monte Muinga	Mafic to intermediate metavolcanic rock
P_2FGfi	Monte Messuco	Monte Muinga	Felsic metavolcanic rock, ignimbrite, volcanic breccia
P_2FSch	Monte Messuco		Mica schist, mica gneiss, biotite-plagioclase gneiss
P_2FSm	Monte Messuco		Marble, impure carbonate rock
P_2FRch	Monte Messuco	Monte Rupanjaze	Metachert
P_2FRvf	Monte Messuco	Monte Rupanjaze	Mafic pyroclastic rock and mica schist, ironstone
P_2FRvfe	Monte Messuco	Monte Rupanjaze	Banded ironstone
P_2FRvm	Monte Messuco	Monte Rupanjaze	Mafic and ultramafic metavolcanic rock

Figure 1026 Formations géologiques de la coupe géologique précédente (Source : GTK Consortium, 2006).

5.13.3. Cibles secondaires

D'autres cibles, potentiellement moins prometteuses, ont été définies comme cibles secondaires, soit parce qu'aucune forme karstique en surface n'a été repérée, soit parce qu'elles étaient trop éloignées du trajet prévu.

5.13.3.1. Grotte de Ngalue à Nyassa (rive est du lac Malawi)

Deux petits pointements de calcaire, mesurant 3 km x 3 km (cartographiés sur la carte géologique au 1/250 000 du Mozambique, n°1234-1235, de 2006 du GTK Consortium). La position de la grotte de Ngalue est 12°30'54"S 35°7'8.4"E ou 35°11'54,12"E 12°51'31,02"S (Mercader *et al.*, 2009). Les fouilles ont donné du matériel récent MSA, de 50 000 ans (Mercader, 2009). En 2017, Laurent Bruxelles a prospecté ce secteur (Bruxelles, 2017), plus particulièrement le site de Mvuvu, fouillé par Bennett (2011). Nous avons indiqué ce site comme étant une cible secondaire car il était trop loin de la route que nous devions prendre lors de cette mission pour aller sur les sites fossilifères à Hominine d'Urema et Malema.

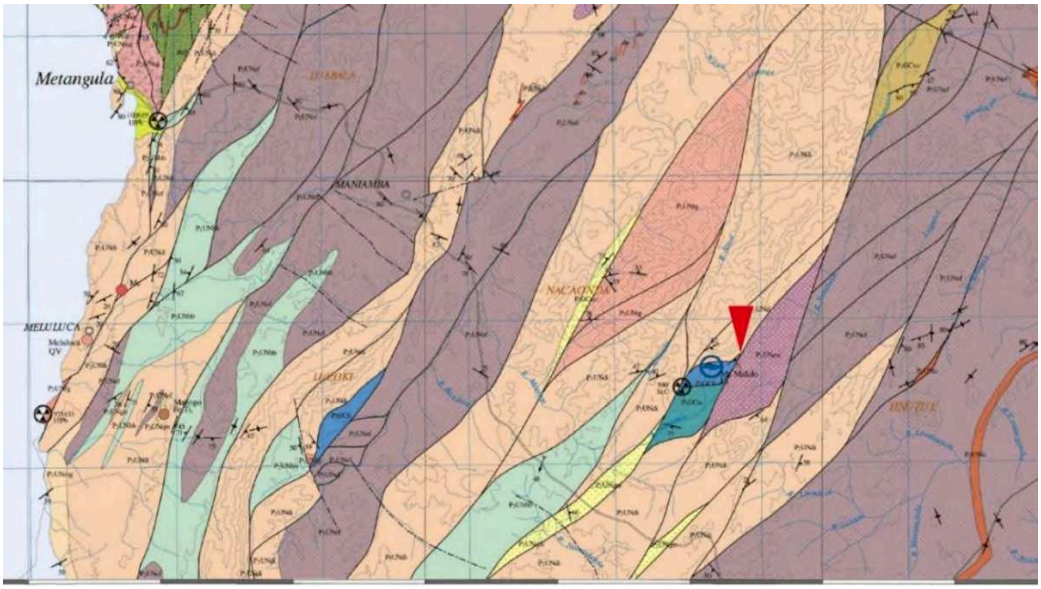


Figure 1027 Localisation des formations carbonatées en bleu, et de la grotte de Ngalue en rouge (Source : GTK Consortium, 2006).

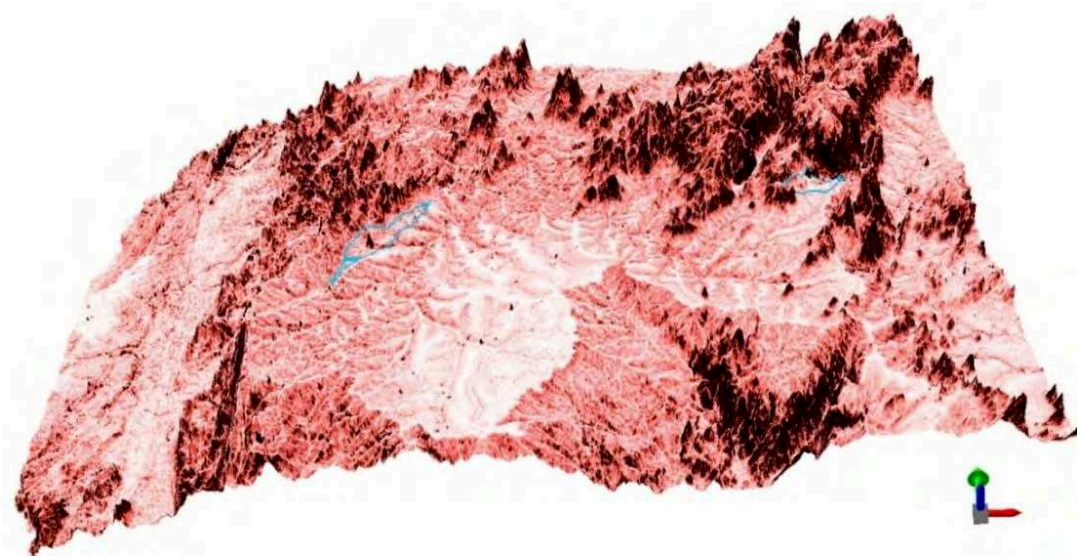


Figure 1028 Vue 2.5 D des pentes en relief du secteur de la grotte de Ngalue et délimitation des formations carbonatées par le contour bleu. La grotte est située à droite.

5.13.3.2. Cataxa (près de Tete - Mozambique)

Près de Tete, dans la région de Cataxa où affleure le **Complexe de Suite Tete** on trouve des calcaires paléoprotérozoïques (P1CHm) de la formation Chidue. On distingue trois structures morphologiques caractérisées par des surfaces emboitées planes délimitées par des reliefs calcaires qui pourraient être des bordures de corrosion, ce qui pourrait faire de ces structures de vastes poljés, alimentés notamment par le Zambèze proche. La structure située à l'est, la plus proche de Tete, est délimitée au nord par des carbonatites (carbonates liés au volcanisme et généralement sans grottes). Plus précisément ce sont des cataclasites, mylonites et blastomyloines (GTK Consortium, 2006, p187 du volume 4). Apparemment ces dômes seraient des résidus bréchiques d'une grande nappe de charriage.

5.13.3.3. Mphende et la butte témoin de Jurassique (Serra do Combio)

Cette butte témoin jurassique, la *Serra do Combio*, montre des replats intéressants à son sommet et permettrait de donner un âge aux aplanissements de la région. Des formations carbonatées affleurent dans le secteur avec la formation de Grudja (CrG).

5.13.3.4. Bassins houillers permiens près de Tete – Mozambique

Dans le secteur de Moatize, on trouve des formations carbonatées (formation notée PeC) riches en charbon qui ne sont pas karstifiées comme le montrent les nombreux documents géologiques consultés (cartes géologiques, notices, logs stratigraphiques et diverses photographies) (Lloyd, 2016) (Figure 1029).

Situées au Mozambique et au Malawi, elles sont à cheval sur la frontière, à l'est de Tete. Elles ne sont pas très épaisses à l'ouest, à peine 1,50 m d'épaisseur (Bosse, 1996). Elles sont cartographiées en violet sur la carte et il est indiqué que ce sont des grès arkosiques, avec calcaires subhorizontaux et conglomérats (formation de Cadzi) du Permien (Feuille n°1631-1632) et des marbres de la formation Chidue (P1Rpma et P1RPml).

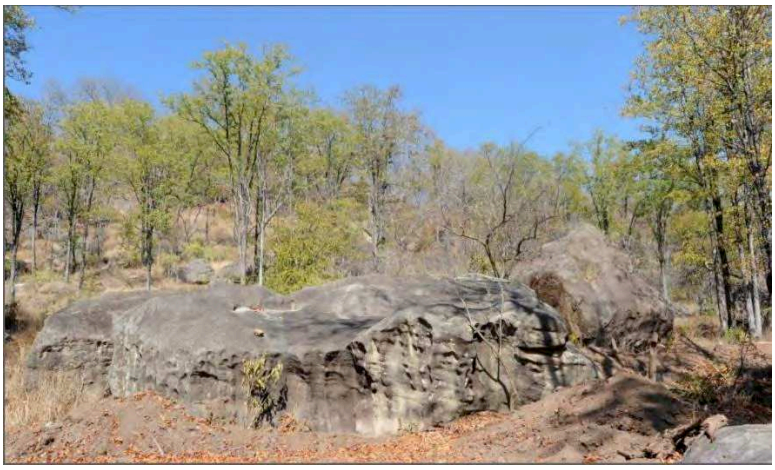


Figure 1029 Formation carbonatée de Tete (Source : Lloyd, 2016).

5.13.3.5. Monte Pitao (entre Chimoio et Tete – frontière Zimbabwe)

Entre Chimoio et Tete, on trouve le Monte Pitao, qui est constitué de marbres du Paléoprotérozoïque (formation Monte Pita, P1Rpma et P1RPml) (Figure 1030).

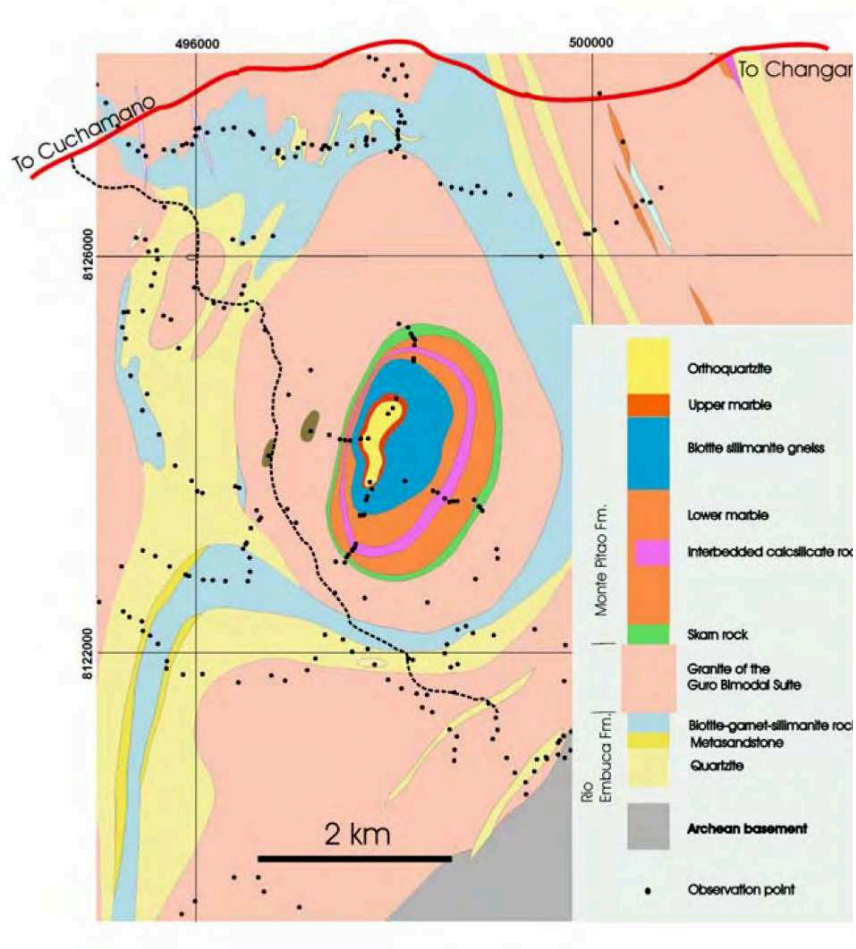


Figure 1030 Carte géologique du Monte Pitao((Source : GTK Consortium, 2006).

5.13.3.6. Dacata (frontière Zimbabwe – entre Maphinhane et Chimoio)

C'est la continuité des montagnes de Chimanimani du Zimbabwe, qui s'abaissent de ce côté-ci de la frontière, vers 700 m au lieu des 1600m du côté du Zimbabwe. Dacata est situé sur la route entre Maphinhane et Chimoio (Figure 1031). Il y a des calcaires à silex (formation Dacata du groupe Umkondo - Mésoprotérozoïque - carte n°2032-2033) potentiellement karstifiés.

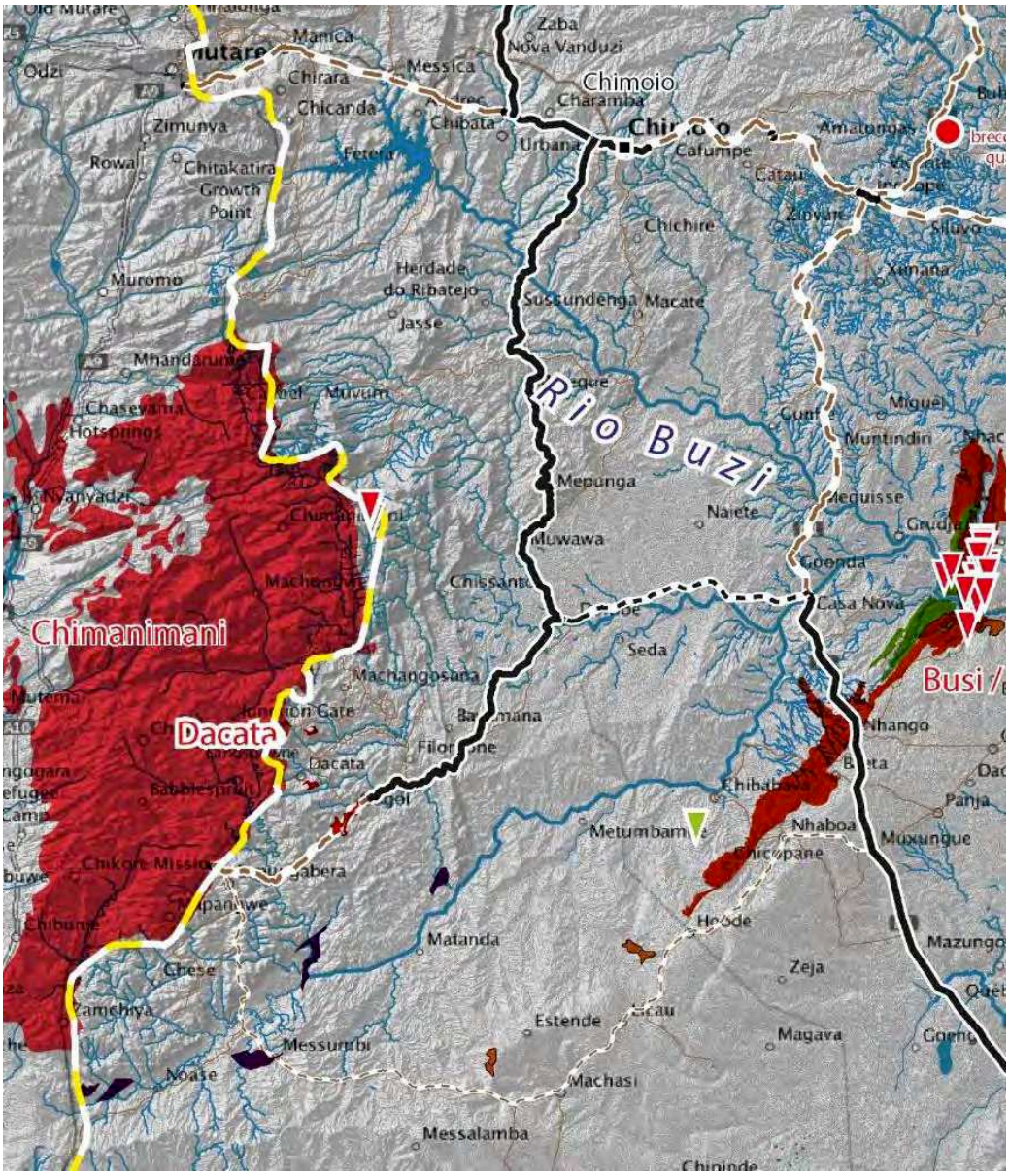


Figure 1031 Localisation des formations carbonatées de Dacata.

5.13.4. Résultats de la mission au Mozambique

Présentons à présent les apports de cette mission à la découverte de nouveaux karsts au Mozambique. Ces résultats seront synthétisés *infra* (p.1049).

5.13.4.1. Découverte du paléokarst de Pitao

La route traverse des formations carbonatées à Pitao, où nous avons observé la présence d'un paléokarst à bauxites (comm. orale, Bande Cardoso, géologue) et à calcites automorphes (Figure 1034 à Figure 1039), tronqué par la surface topographique plane. Cette découverte est importante et nous a permis d'identifier une vaste surface karstique qui n'a toujours pas été prospectée (sur la Figure 1032, ci-dessous) (Lien Google Maps).

Longitude	Latitude	Altitude
33.044140	-16.9254550	556 m



Figure 1032 La position du paléokarst est indiquée en rouge. L'image satellite permet d'identifier les formations carbonatées plissées.



Figure 1033 Localisation du paléokarst en rouge. Il a été recoupé par le talus de la route On repère des bancs calcaires au nord (cf. Figure 1036).



Figure 1034 Paléokarst à bauxite (bx) raboté par la surface topographique et tronqué par le talus de la route.



Figure 1035 Identification de la bauxite (de couleur blanche).



Figure 1036 Bancs calcaires arasés et karstifiés plus au nord sur le plateau.



Figure 1037 Remplissages de bauxite du paléokarst tronqué par la route.



Figure 1038 Affleurement aplani des calcaires plus au nord. L'axe rouge indique la position d'une fissure remplie de calcite et est indiqué sur la Figure 1036.



Figure 1039 Détail de la calcite automorphe.

5.13.4.2. Résultats de la prospection au Mozambique

La mission d'octobre 2022 a permis de prospecter le karst de Buchane, et de découvrir le potentiel du karst de Pitao. Pour cette mission, nous avions ciblé la région de *Kirk Range*, située à la frontière du Mozambique et du Malawi, qui culmine à des altitudes élevées où les formations carbonatées étaient présentes. Cette région réunissait donc tous les critères pour y découvrir de nouvelles grottes alors que deux grottes avaient été mentionnées dans des bulletins coloniaux anglais (Dunstan, 1908, 1909, 1911) et signalées sur les cartes géologiques (Bloomfield, Mason, Habgood, 1966), comme nous l'a indiqué Thomas Fullgraf du BRGM qui est en train de refaire les cartes. Les nombreux documents géologiques consultés sur les calcaires permiens, riches en charbon, de la région de Tete, ne semblent pas indiquer la présence de karsts ni de cavités. La région du nord du lac de Cahora Bassa est prometteuse, car des formations carbonatées y affleurent. Toutefois, nous n'avons pas pu la prospecter en raison de l'absence de routes praticables : il faut plusieurs jours pour y accéder.

5.13.4.2.1. Concernant les brèches pédologiques de Buchane

La répartition des différents types de remplissages dans la grotte de Buchane (Figure 1043), que nous avons établie lors de la prospection de la cavité, montre que les fractures sont remplies d'une brèche rosâtre. Ce même type de brèches recouvre toute la surface au-dessus et à l'extérieur de la cavité sur le plateau (Figure 1040) : il s'agit donc de brèches pédologiques comblant les fissures de la cavité. La probabilité d'y trouver des os conservés dans ce type de brèche est faible. Nous avons proposé un schéma de mise en place des brèches pédologiques dans le Chapitre n°4 (Figure 496 p.527) à partir des observations faites ici à Buchane mais aussi au niveau des karsts du nord-ouest du Botswana en général (Chapitre n°4).

16. Observations des brèches pédologiques comblant les fissures de la grotte de Buchane

La répartition des différents types de remplissages dans la grotte de Buchane montre que les fractures, orientées N45° sont remplies d'une brèche rosâtre (en orange sur la Figure 1043 ci-dessous).

17. Brèches pédologiques aussi en surface

Ces brèches rosâtres sont également présentes en grande quantité en surface (Figure 1040), sur le plateau au-dessus de la cavité. Elles présentent un faciès similaire à celui des brèches observées dans les fissures de la cavité (Figure 1041). Les fissures dans les roches carbonatées (Figure 1042) ont permis à la brèche pédologique de s'infiltrer depuis la surface jusqu'à l'intérieur de la grotte.



Figure 1040 Brèches pédologiques trouvées en surface (de nuit).

Figure 1041 Détails des brèches pédologiques dans les fissures de la grotte.





Figure 1042 Fissure remplies de brèches pédologiques dans la grotte de Buchane.

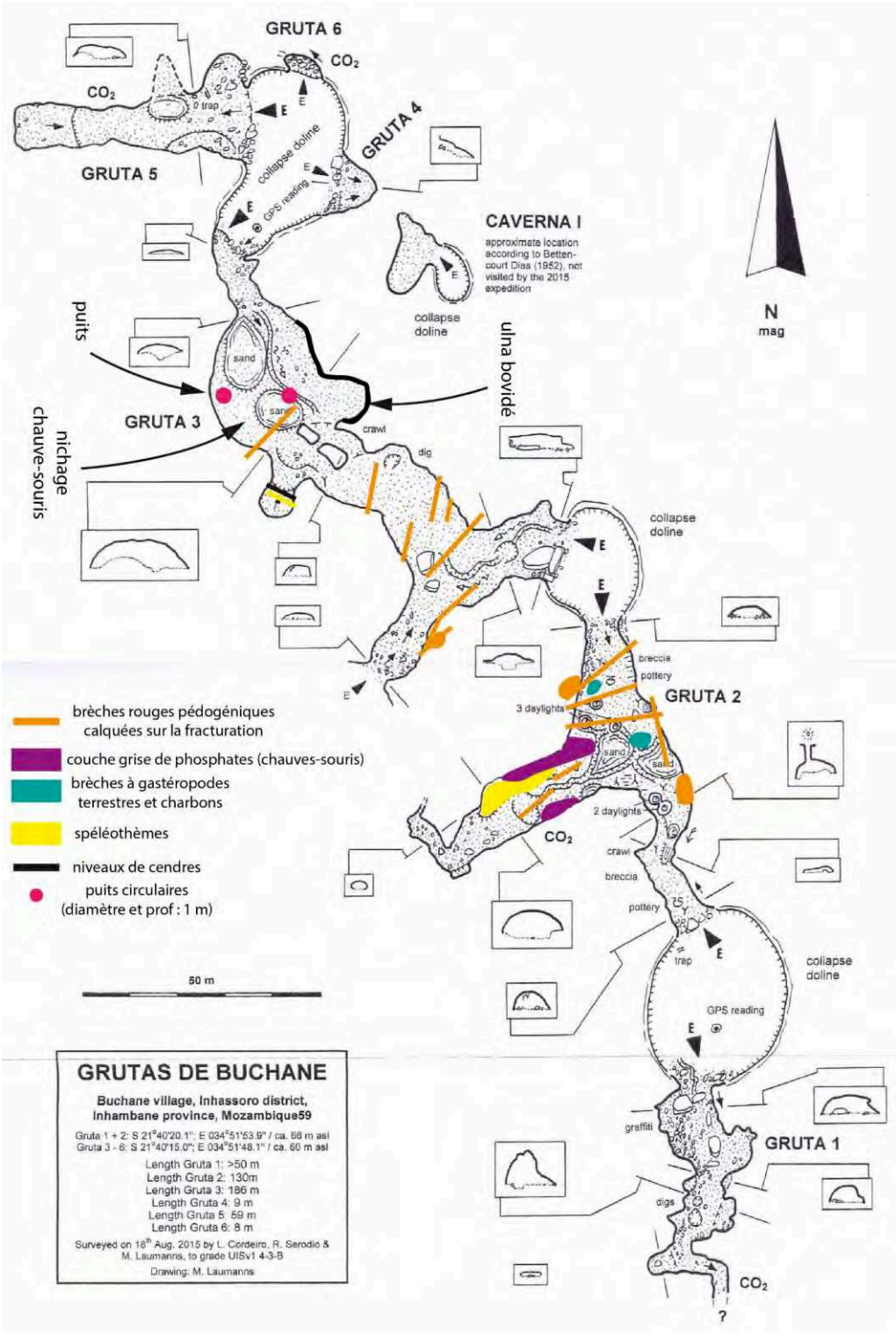


Figure 1043 Typologie et localisation des remplissages de la grotte de Buchane (Topographie de Laumanss, 1998, p.125).

5.13.4.2.2. Mauvaise localisation de la grotte d'Inhaluele dans l'inventaire de Laumanns (1998, p.112)

Sur cette carte de notre itinéraire à Buchane (Figure 1044), en violet, on observe en vert le secteur où nous avons cherché l'entrée de la grotte d'Inhaluele, pendant une heure, telle qu'elle est indiquée dans l'inventaire de Laumanns, 1998 (p.112). Aucune cavité n'a été trouvée dans ce secteur et la position s'avère incorrecte. La grotte serait plutôt située à l'ouest du village d'Inhaluele comme l'indique une autre carte de Laumanns (1998, p.94) Figure 1045, ci-dessous.

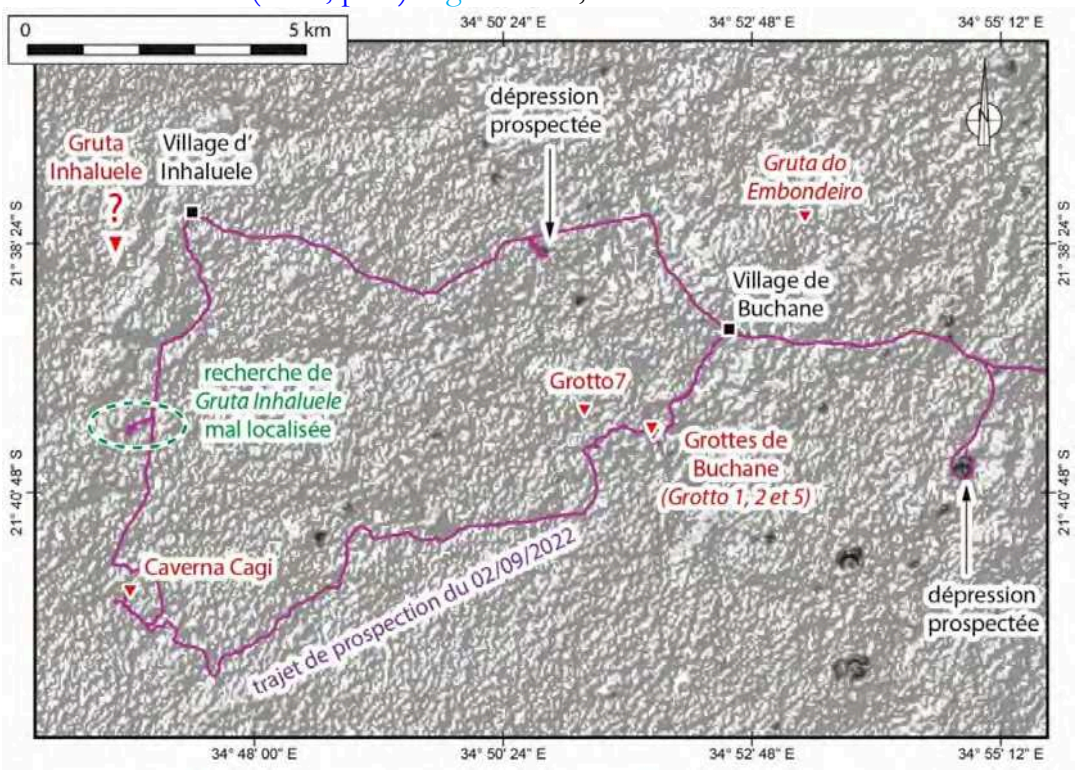


Figure 1044 Prospection des grottes et des 2 dépressions de Buchane au Mozambique

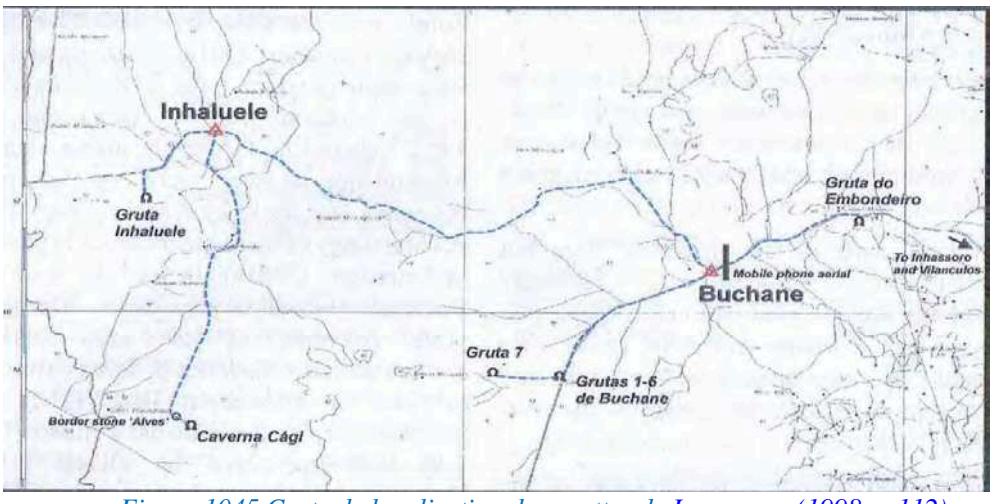


Figure 1045 Carte de localisation des grottes de Laumanns (1998, p.112).

5.13.4.2.3. Visite de la Caverna Cagi

Sur le terrain, nous avions les positions GPS des cavités de l'expédition de Laumanns (1995, p.112) que nous avions converti. Ces données apparaissent dans le tableau des cavités d'Afrique que nous avons réalisé (Tableau 59 p.1090).

Dans le tableau de l'inventaire de Laumanns (Laumanns, 1995, p.112), il semblerait qu'il y ait eu une inversion des positions des entrées de grotte entre *Gruta Inhaluele* et *Caverna Cagi*. Nous avons recherché l'entrée de la grotte d'*Inhaluele* que nous n'avons pas trouvé (en vert sur la Figure 1044).

Sur la carte de Laumanns (Laumanns, 1995, p.94) la *Gruta Inhaluele* est située au nord et *Caverna Cagi* au sud. De plus, la photographie de l'entrée de *Caverna Cagi* (Laumanns, 1995, p.114) (Figure 1046) correspond à la grotte que nous avons visitée sur le terrain. La topographie de *Caverna Cagi* (Cilex 1989 *in* Laumanns, 1995, p.96) (Figure 1047) correspond aussi.

La prospection de la *Caverna Cagi*, bien que limitée à une dizaine de minutes en raison du monoxyde de carbone, a néanmoins permis d'identifier la présence de brèches pédologiques que nous avons décrites précédemment où ce type de brèches comble également l'ensemble des fissures et recouvre la totalité de la surface des grottes de la région de Buchane.



Figure 1046 Photographie de l'entrée de Caverna Cagi par Laumanns (Source : Laumanns, 1998, p.114).

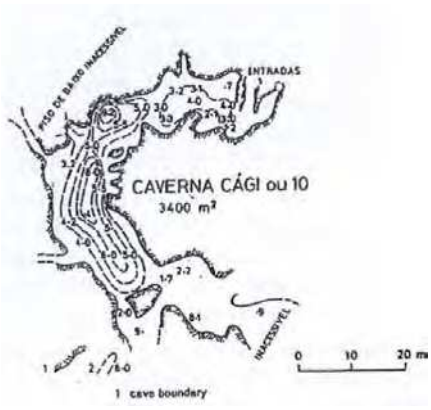


Figure 1047 Topographie de la Caverna Cagi d'après Cilex, 1989 in Laumanns, 1998 (p.96).



Figure 1048 Entrée de la Caverna Cagi, prospectée le 02/09/2022 (Source : Bruxelles L.).



Figure 1049 Identification d'un remplissage bréchique pédogénique.

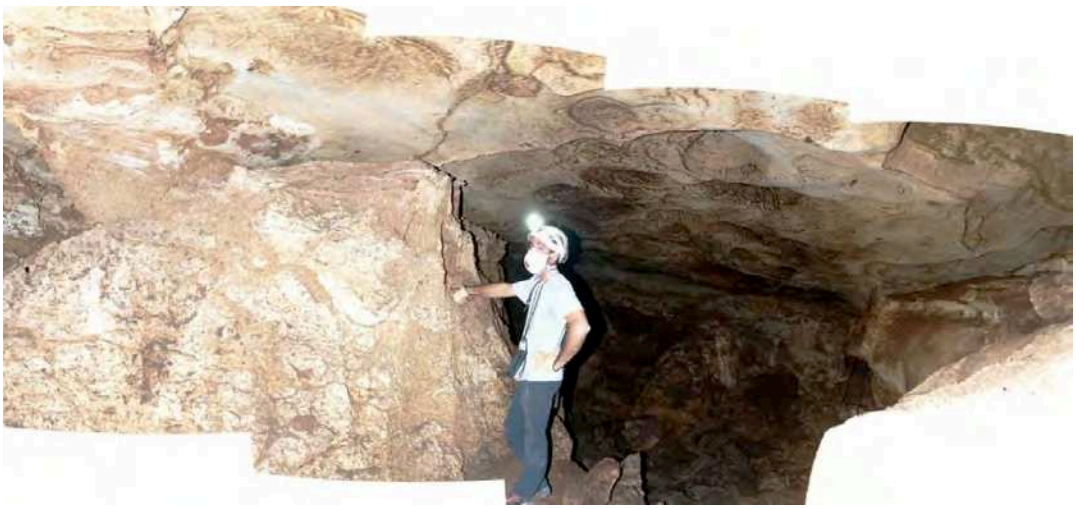


Figure 1050 Localisation des brèches. On observe aussi de nombreuses biocoupoles au plafond.

5.13.4.2.4. Surestimation de la profondeur des dépressions sur le MNT Jaxa

La détection de dépression au niveau du karst de Buchane au Mozambique (Figure 1044 et Figure 26), et plus particulièrement la mesure de leurs profondeurs avec le MNT Jaxa, indiquaient des profondeurs d'une trentaine de mètres. Les observations réalisées sur le terrain ont montré qu'il existait bien des dépressions à l'emplacement indiqué par la carte des pentes calculée à partir du MNT. Toutefois, celles-ci ne présentaient qu'une profondeur d'à peine deux mètres. Des erreurs dans les mesures d'altitude sont donc possibles concernant le MNT du satellite JAXA. Les autres satellites (SRTM, Copernic 30), d'une résolution inférieure, ne montrent aucune dépression dans ce secteur.

Nous avons fait des comparaisons avec des dolines pour lesquelles nous connaissions leurs profondeurs et nous n'avons pas trouvé d'erreur, par exemple avec le gouffre de Padirac dans le Lot. Peut-être que le satellite JAXA manquait de points de repère secondaires pour se caler en altitude (absence de cartes topographiques par exemple).

Au Botswana, à Gcwihaba, nous avions détecté une doline au sein d'une dune de sable, la prospection a confirmé la présence de cette doline, où la profondeur de 8 m a été bien estimée par le MNT Jaxa.

Nous avons discuté dans le Chapitre n°1 (p.49) de ces surestimations de la profondeur de dépressions visibles sur le MNT.

5.14. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS AU MALAWI

Nous avons présenté précédemment la mission qui nous a permis de prospecter le Mozambique et le Malawi(p.1003). Au Malawi, nous souhaitons avant tout rencontrer les paléontologistes allemands (Schrenk *et al.*, 1993) qui ont découvert des fossiles d'Hominines à Malema et Uraha dans la région de Karonga au nord (Figure 1051). Ces gisements à Hominines sont les plus méridionaux au débouché du Rift est-africain (cf. p.1). L'autre intérêt de la région est la présence de formations carbonatées potentiellement karstifiées.

5.14.1. Carte des cibles

Du nord au sud, plusieurs cibles de prospection ont été identifiées et cartographiées sur la carte suivante (Figure 1051) :

- Dans la région de Karonga ont été découverts des gisements fossilifères plio-pléistocènes (Desmond *et al.*,1966 ; Schrenk et *al.* (1993). Il y a aussi des formations carbonatées (karsts potentiels) indiquées par la carte géologique de Dixey (1956) ;
- Lake shore (gisement d'Uraha) ;
- Grotte de Ngalue (Mercader *et al.*, 2009) (au Mozambique) que nous avons traité (p.1016) ;
- Formation carbonatée de Dedza ;
- Karst prospecté de *Kirk Range* ;
- *Middle Shire* ;
- Karst de de Zomba : la grotte de *Changalumi Pothole* est décrite dans le compte-rendu géologique de 1962. Une autre grotte, *Chingwe's Hole*, est décrite au sommet du plateau mais elle n'est pas située dans des roches carbonatées (potentiel de fossiles faible) ;
- Région carbonatée de Tete (au Mozambique) que nous avons traité (p.1009) ;
- Formation carbonatée de Nsanje.

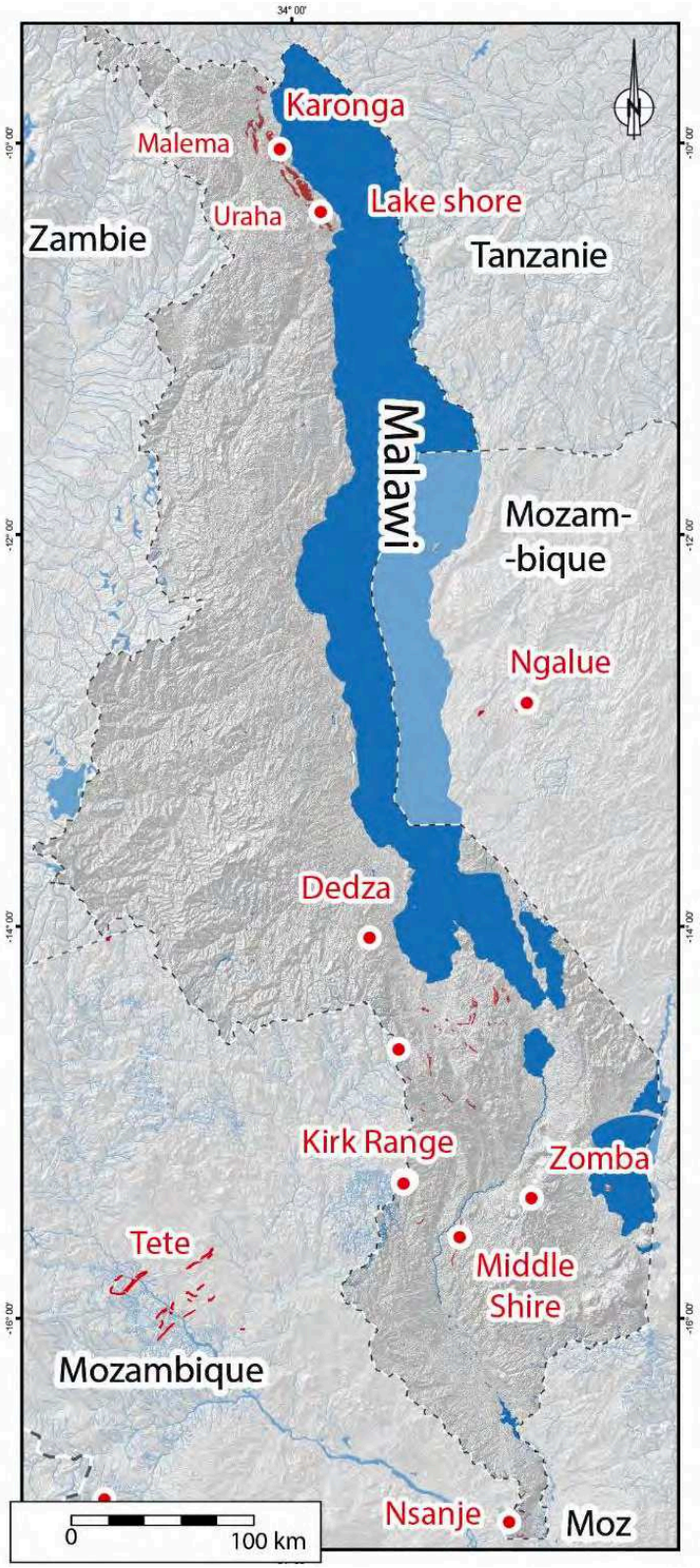


Figure 1051 Karsts (points rouges) et karsts potentiels (surfaces rouges) au Malawi

5.14.2. Cibles principales

Le travail préparatoire à la mission a permis d'identifier plusieurs karsts potentiels à prospecter.

5.14.2.1. Région de Kirk Range (à la frontière entre le Mozambique et le Malawi)

La région de *Kirk Range* (Vallée de Lisungwe), située à cheval sur la frontière entre le Mozambique et le Malawi, présente plusieurs points d'intérêt pour la recherche de grottes et de fossiles.
Premièrement, il s'agit d'une région située en altitude, vers 1500 m. L'étude du *Cradle of Humankind* et du karst fossilifère de Makapansgat a montré que l'altitude est un critère important pour trouver de vieux paysages conservés et potentiellement des remplissages anciens dans les grottes, si celles-ci existent.
Deuxièmement, plusieurs cavités y ont été identifiées dans la littérature, notamment dans les comptes-rendus coloniaux britanniques des explorations minières menées entre 1906 et 1909 par les explorateurs Arthur R. Andrew et T.E.G Bailey que l'on trouve mentionnés dans les synthèses de Dunstan (1908, 1909 et 1911).
Des grottes sont également mentionnées dans la notice (n°17) et sur la carte géologique, au 1/100 000 de 1966 (Bloomfield, Mason, Habgood, 1966), où une cavité est signalée sous le nom de « *Shallow Hole* », au niveau de la formation géologique constituée de marbres et de granulites calco-silicatées d'âge précambrien (Figure 1052).
Troisièmement, l'observation des reliefs, par traitement des MNT (1, p.56) et les images satellites montrent de nombreux reliefs affleurants qui pourraient être des buttes karstiques, cartographiées en bleu sur la Figure 1053 et Figure 1054), comme celles dans le *Cradle of Humankind* ou au nord-ouest du Botswana qui sont karstifiées et fossilifères.
Des recherches complémentaires nous ont permis d'entrer en contact avec Daniel Kloser, un ingénieur hydrologue et spéléologue de Blantyre, qui a confirmé la présence de plusieurs grottes qu'il a visitées en 2010 et dont il a pu nous fournir des indications de localisation en GPS (Figure 1056) :

Kukhulo cave près du village de **Chinjovi**
Chilala cave près du village de **Nseula** ;
Nindi *Drainhole – Sinkhole* (dépression large de 10 m puis profonde de 5 m)

« Une des deux grottes fait de 5 à 10 m et l'autre jusqu'à 100 m de développement. ».

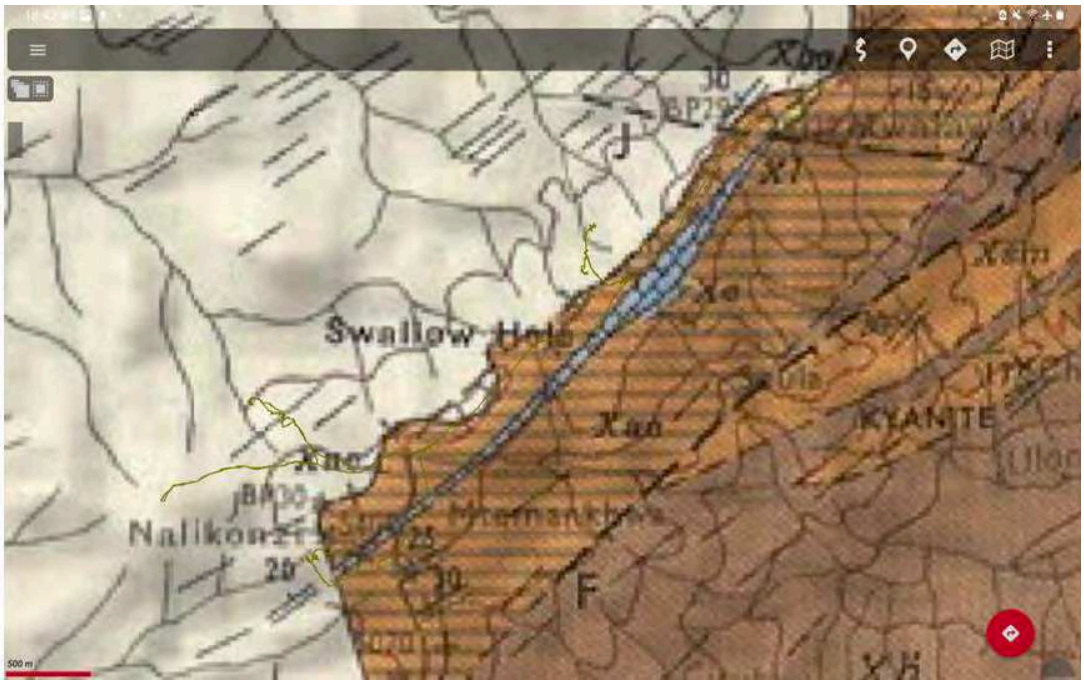


Figure 1052 Extrait de la carte géologique de Bloomfield et al. (1966) montrant les formations carbonatées (en bleu) et l'indication "Shallow Hole". Nous avons indiqué notre trajet de prospection.

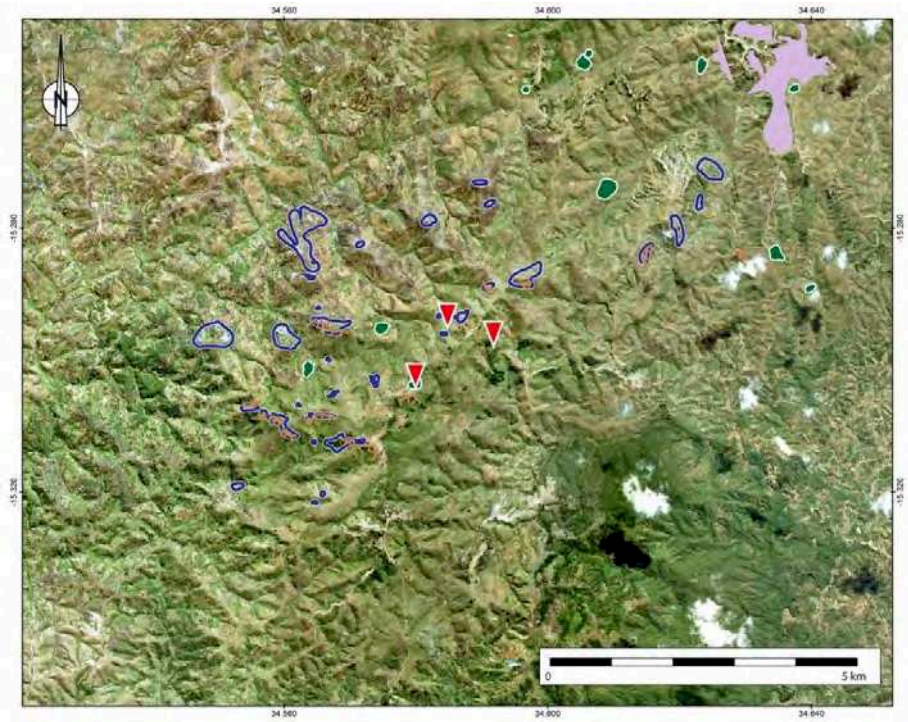


Figure 1053 Image satellite de la région de Kirk Range, sur laquelle des reliefs potentiellement karstiques ont été identifiés et délimités en bleu, les replats en violet, les forêts en vert et les escarpements en marron.

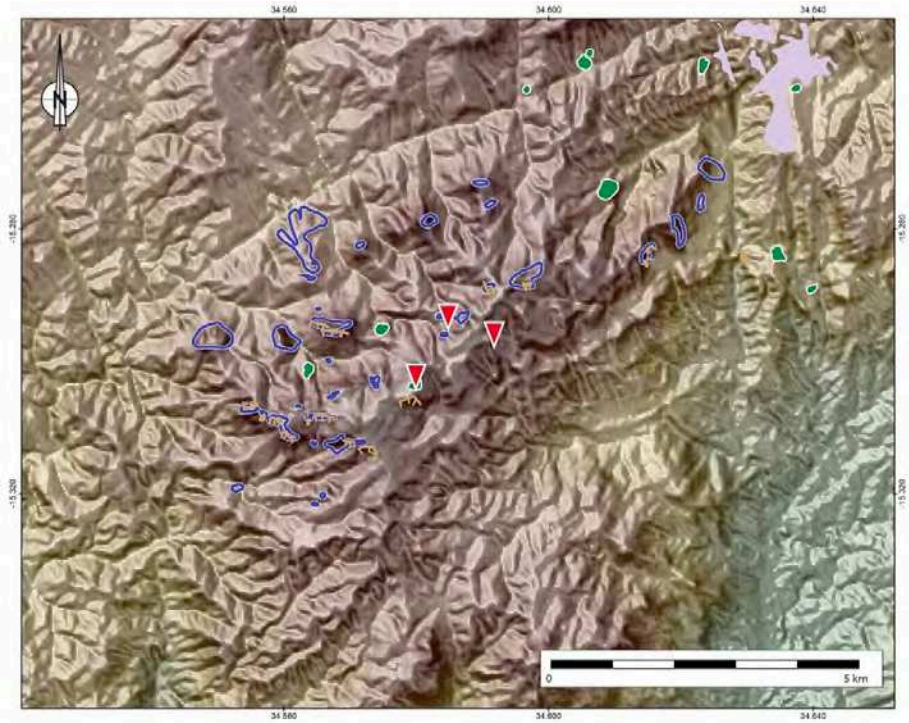


Figure 1054 Traitement géomatique, comme expliqué dans le Chapitre n°1 (p.56) des reliefs pour identifier des buttes karstiques.

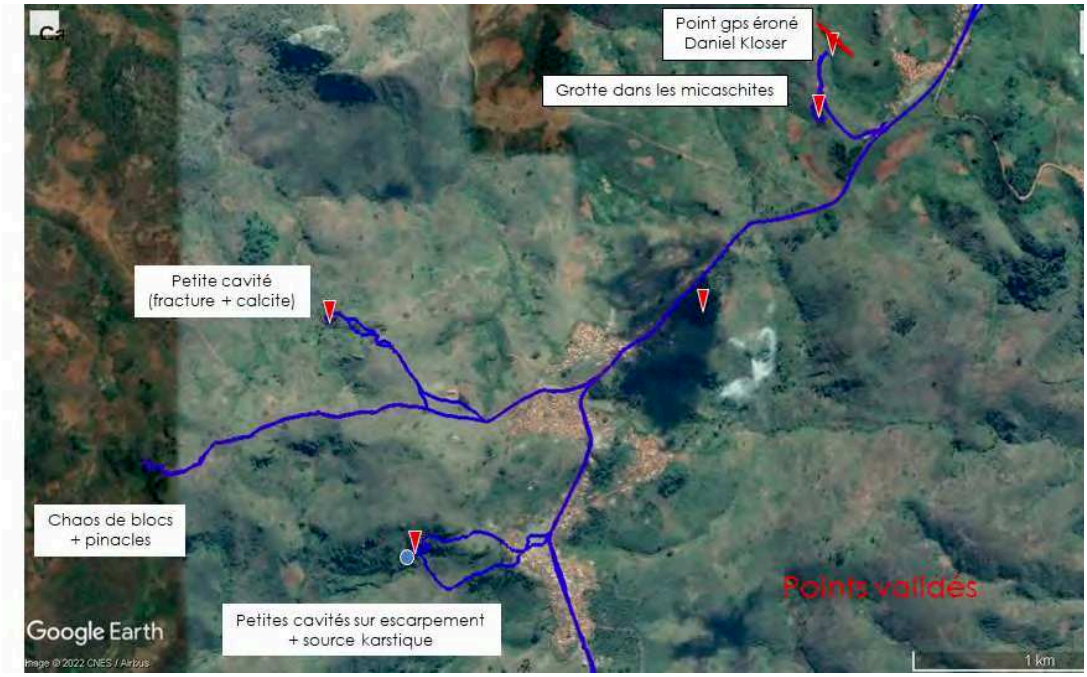
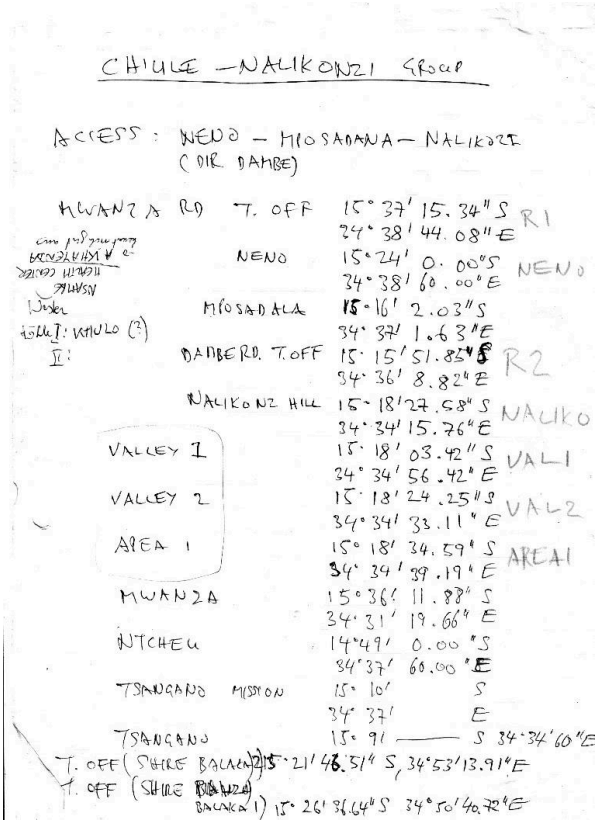


Figure 1055 Trajet de prospection du karst de Kirk Range et identification des cavités par des triangles rouges.



CHIULE – NALIKONZI Group

ACCESS : NENO – MPOSADALA – NALIKONZI (DIR. DAMBE)

MWANZA RD T. OFF	15° 37' 15.34" S 34° 38' 44.08" E	R1
NENO	15° 24' 0.00" S 34° 38' 60.00" E	NENO
MPOSADALA	15° 16' 2.03" S 34° 37' 1.63" E	
DAMBE RD. T. OFF	15° 15' 51.85" S 34° 36' 8.82" E	R2
NALIKONZ HILL	15° 18' 27.58" S 34° 34' 15.76" E	NALIKO
VALLEY 1	15° 18' 03.42" S 34° 34' 56.42" E	VAL1
VALLEY 2	15° 18' 24.25" S 34° 34' 33.11" E	VAL2
AREA 1	15° 18' 34.59" S 34° 34' 39.19" E	AREA1
MWANZA	15° 36' 11.88" S 34° 31' 19.66" E	
NTCHEU	14° 49' 0.00" S 34° 37' 60.00" E	
TSANGANO MISSION	15° 10' S 34° 37' E	
TSANGANO	15° 9' —— S	34°34'60"E
T. OFF (SHIRE BALAKA)	15° 21' 46.31" S,	34°53'13.91"E
T. OFF (SHIRE BALAKA 1)	15° 26' 36.64" S	34° 50' 40.72" E

Figure 1056 Coordonnées GPS fournis par David Kloser pour rejoindre les grottes.

5.14.2.2. Région de Karonga (au nord du Malawi)

La région de Karonga au nord du Malawi, dans le Rift (Betzler et Ring, 1995) présente plusieurs zones d'intérêt notamment deux sites paléontologiques majeurs, localisés sur la Figure 1051 :

- **Urema** qui a livré un Homo rudolfensis (Uraha, UR 501) (Bromage *et al.*, 1995 ; Zanolli *et al.*, 2019) ;

- **Malema** qui a livré un *Paranthropus boisei* (Malema, RC 911) (Kullmer *et al.*, 1999), et des fossiles de Cercopithecidae du Pliocène (Frost et Kullmer, 2008).

Le *Hominind Corridor Research Project* est décrit sur ce lien internet :
http://paleobiomics.org/hcrp.html

On y trouve aussi des formations carbonatées à l'affleurement (cartographiées par Dixey, 1956) où l'on pourrait découvrir des grottes et des remplissages fossilifères. Ils sont situés entre une quinzaine et une trentaine de kilomètres des gisements fossilifères cités ci-dessus. C'est au sein des formations pliocènes dans les *Chiwondo beds* (Frost et Kullmer, 2008) qu'ont été découverts des fossiles de *Cercopithecidae* datés du Pliocène. 145 gisements de fossiles ont été indiqués par Sandrock *et al.* (1998).

5.14.2.3. Région de Zomba et grotte de Changalumi

Dans la carrière de calcaire de Changalumi (Garson, 1955 ; Charsley, 1972) une grotte est connue. Les coupes topographiques de *Changalumi Pothole* indiquent la présence de fossiles calcifiés dans la grotte (Figure 1057) (Bloomfield, 1965). La prospection de cette grotte n'a pas été possible du fait de la présence de baraquement militaire.

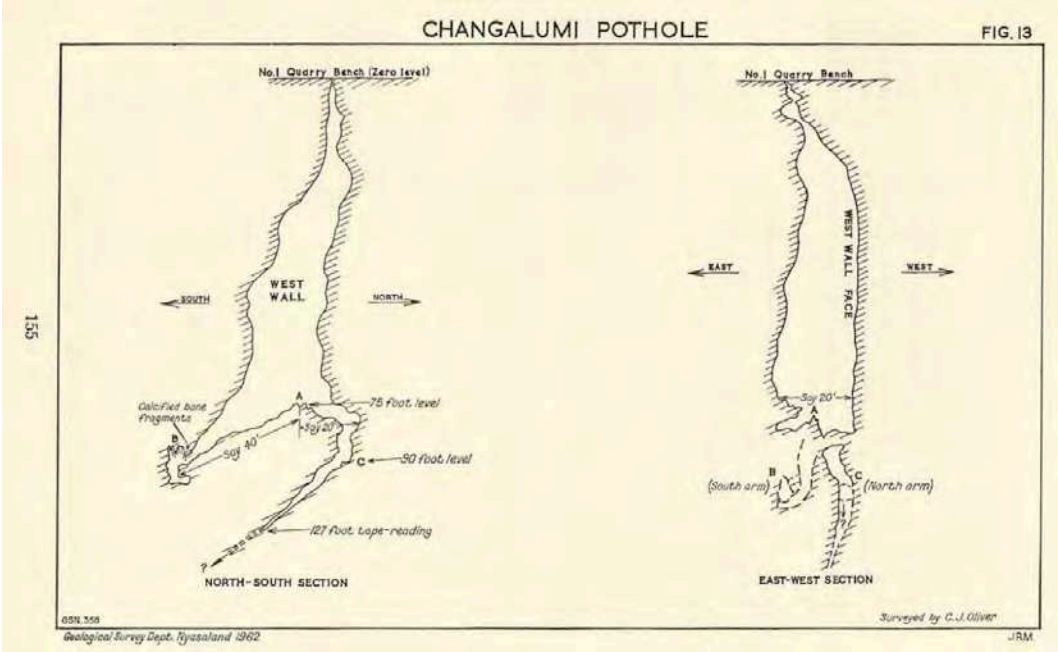


Figure 1057 Coupes topographiques de Changalumi Pothole(Bloomfield, 1965, p.155).

(m) Caves and cave deposits

Quarrying operations at Changalumi disclosed the presence of a deep narrow cave or pothole in the marble leading vertically downwards from the crest of the hill. The position of this is shown on Plate XVI. With a very narrow and sinuous opening at the surface the pothole opens out rapidly to a point 75 feet beneath the present quarry bench where it bifurcates to form two narrow passages. Cross-sections, surveyed by Mr. C. J. Oliver, are given in Fig. 13.

Spectacular stalactites and curtains of travertine hang down the pothole walls and, in the roof of one of the passages, near its apparent closure, fragmented bones were found, almost entirely replaced by secondary calcite. As yet, insufficient of this bone has been removed for any positive identification to be made but at first sight it appears to be that of some form of antelope. A careful search may reveal more interesting finds.

This pothole, and a similar smaller one which was destroyed in blasting operations, probably results from the solution of the marble along fractures by circulating groundwater and it must be assumed that this water finds egress lower down the hill.

Figure 1058 Description de la grotte (Bloomfield, 1965, p.156).

5.14.3. Cibles secondaires

Certains sites, bien que de moindre importance pour la recherche de fossiles, nécessitent d'être mentionnés, soit parce qu'ils apportent des informations utiles, soit afin de justifier leur exclusion de notre zone de prospection.

5.14.3.1. Ngalue au Mozambique

Ngalue Cave sur la côte est du lac Malawi, la grotte a livré une industrie du *Middle Stone Age* datée de -105 à 40 ka (Mercader *et al.*, 2009).

5.14.3.2. Chingwe Hole du Mont Zomba

Chingwe's Hole est situé au sommet du Mont Zomba. Cette cavité ne se développe pas dans des roches carbonatées, mais dans des syénites, où le potentiel de conservation des os est très faible. Il s'agit d'un joint de 15 à 20 m de profondeur et de 3 à 5 m de largeur (Comm. orale Fullgraf).

5.14.3.3. Cavité du Mont Mulanje

La cavité du Mont Mulanje ne se trouve pas non plus dans les calcaires, donc, si elle a piégé des ossements, ceux-ci ne sont probablement pas conservés. Cette grotte présenterait néanmoins une largeur d'environ 200 m.

5.14.4. Intérêt du secteur de Karonga

La prospection de la région de Karonga a apporté des informations importantes concernant les petits bassins de rift qui piègent des sédiments anciens.

5.14.4.1. Itinéraire de la mission au Malawi dans la région de Karonga

Nous avons découvert des choppers sur le parking de l'hôtel, indiqué sur la Figure 1059, où ils avaient déposé des matériaux venant de la carrière de Mpatha. La prospection de cette carrière a permis d'identifier d'autres choppers. Thomas *et al.* (2023) en a découvert d'autres dans le secteur (cercles bleu sur la Figure 1059).

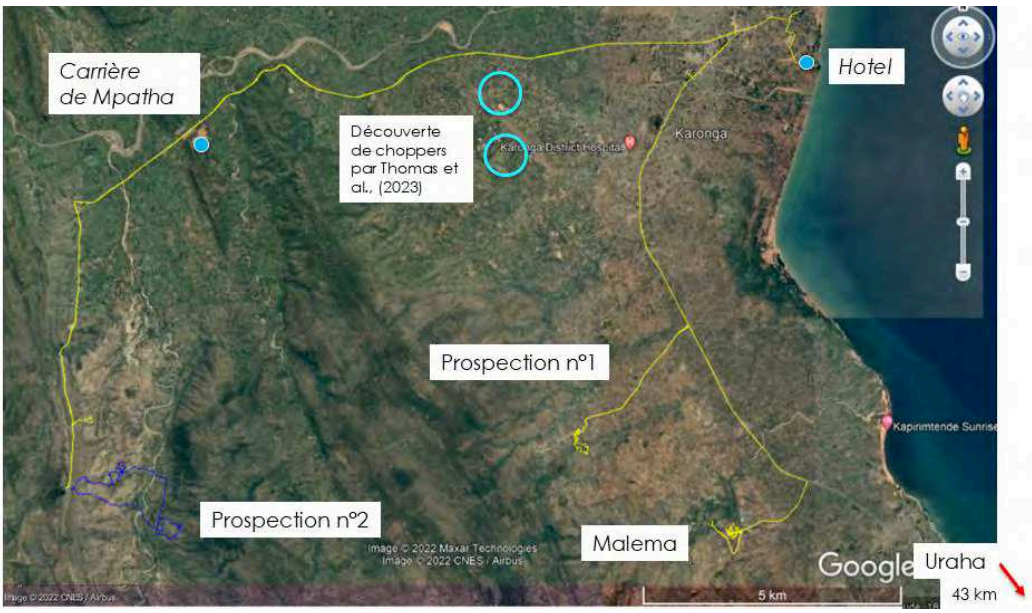


Figure 1059 Localisation des sites prospectés à Karonga.

5.14.4.2. Analyse des sites paléontologiques à Hominines de Karonga et prospection de la région

Dans la région de Karonga, un petit bassin de rift carbonaté s'est installé au Permien puis a été érodé et on trouve en discordance stratigraphique des dépôts fluviatiles pliocènes (*Chiwongo beds et Chitimwe beds* (Figure 1065)) à fossiles et à outils lithiques (Clarke, Stephens et Cornudon, 1966 ; Thomson *et al.*, 2023).

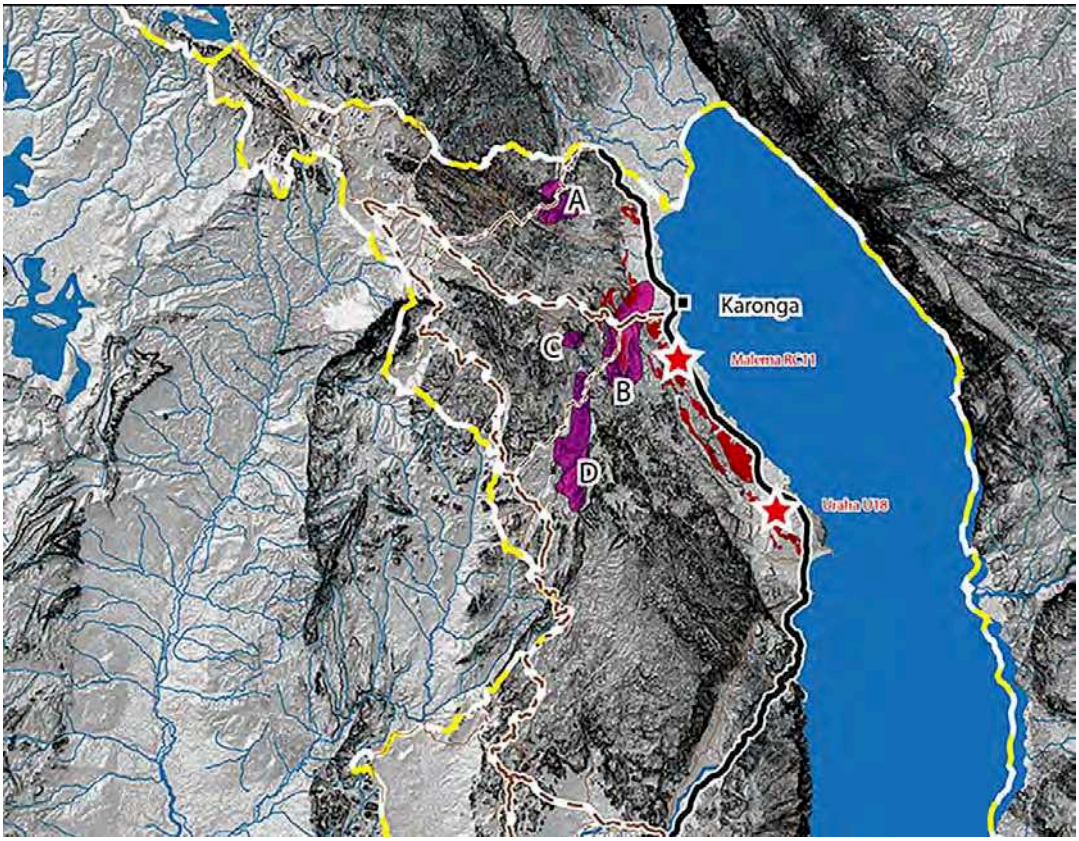


Figure 1060 Report de la carte géologique d'Andrew et al., (1910, fig.3, p.202) et localisation des formations carbonatées (en violet) de Karonga, notées A, B à F. En rouge, les formations des Chiwongo beds et des Chitimwe beds.

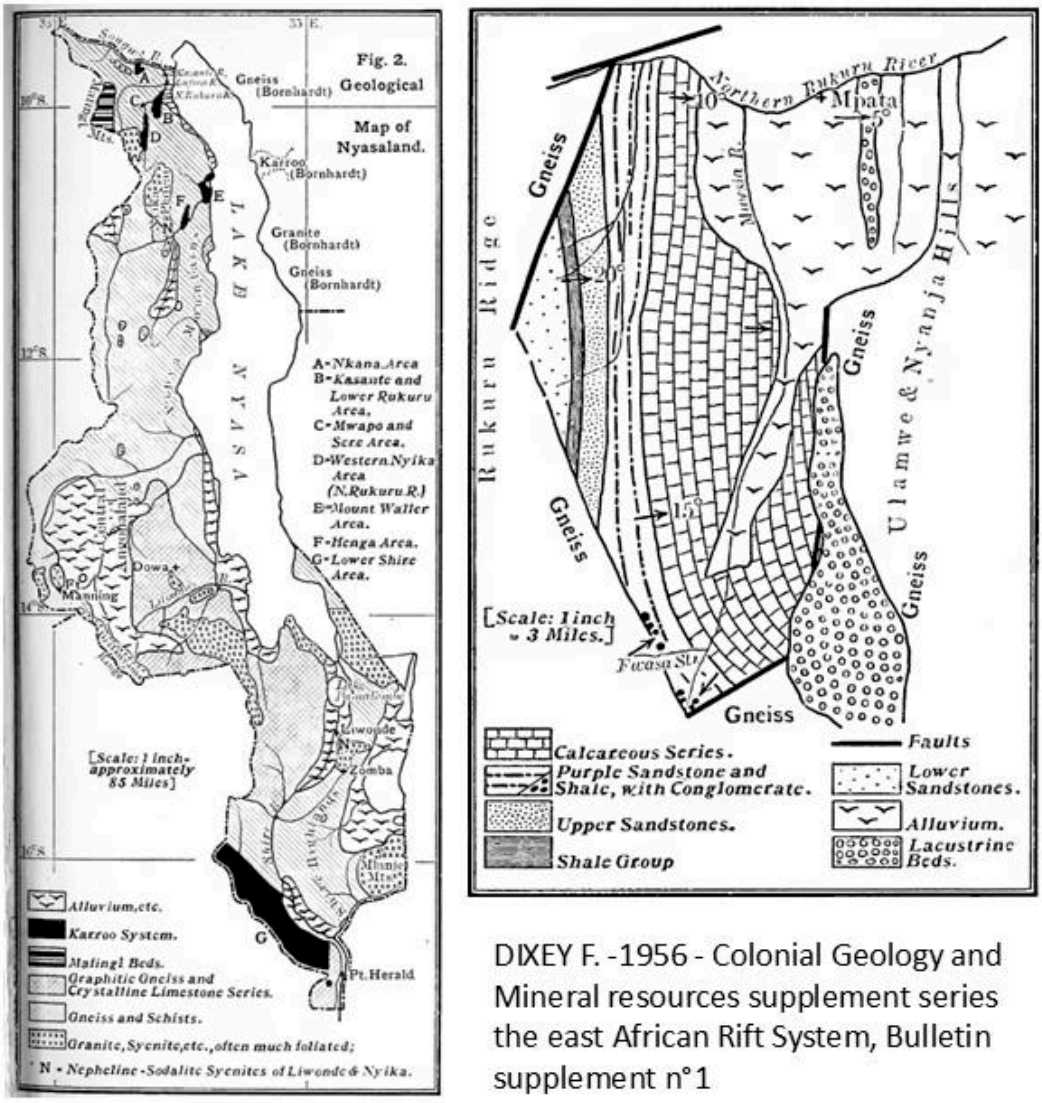
5.14.4.2.1. Bassin permien carbonaté lacustre non karstifié

Ce site correspond à la prospection n°2 sur la Figure 1059. Au Malawi, à Karonga, on remarque en arrière-plan de la photographie panorama (Figure 1061) la plaine carbonatée du Permien, où est extrait actuellement du charbon (équivalent de la formation Ecca d'Afrique du Sud). Une butte résiduelle de carbonates est visible au centre. Son sommet a été tronqué et érodé par une rivière qui a ensuite déposé des alluvions, facilement identifiables par leur couleur rouge. Nous avons trouvé sur cette terrasse des *choppers* (photographiés Figure 1063). Cette discordance est indiquée par un trait rouge continue sur la Figure 1061. On remarque plusieurs replats correspondant à cette érosion fluviatile et aux dépôts alluviaux, indiqués par le trait rouge en pointillé.

Cette plaine carbonatée permienne cartographiée sur les cartes géologiques (Andrew *et al.*, 1910, fig.3, p.202) (Figure 1060) correspondait à une des cibles dont nous devions déterminer le potentiel karstique. Les buttes sont très nettement visibles sur les données satellitaires qui mesurent les reliefs (MNT Jaxa) et les images satellites montrent très nettement les contrastes de couleur entre les alluvions rouges et les carbonates blancs. La prospection au sol a été nécessaire pour déterminer l'histoire géologique de ces buttes et montrer l'absence de karst dans le secteur. La non-présence de grotte ne veut pas dire absence de fossiles car la présence d'une dent de porc plio-pléistocène (Comm. Orale sur le terrain de Kullmer O.) et la présence de *choppers* montrent qu'ici ces alluvions sont fossilifères et correspondent aux âges qui nous intéressent, ils seront donc une cible de recherche importante.



Figure 1061 Plaine constituée des formations du Permien à Karonga au nord du Malawi.



DIXEY F. -1956 - Colonial Geology and Mineral resources supplement series the east African Rift System, Bulletin supplement n°1

Figure 1062 Carte géologique du lac Malawi et détail du bassin de Mpata (Source Andrew et al., 1910, fig.3, p.202).



Figure 1063 Photographie du bassin de Mpata et des choppers trouvés au sommet des collines au milieu du bassin.

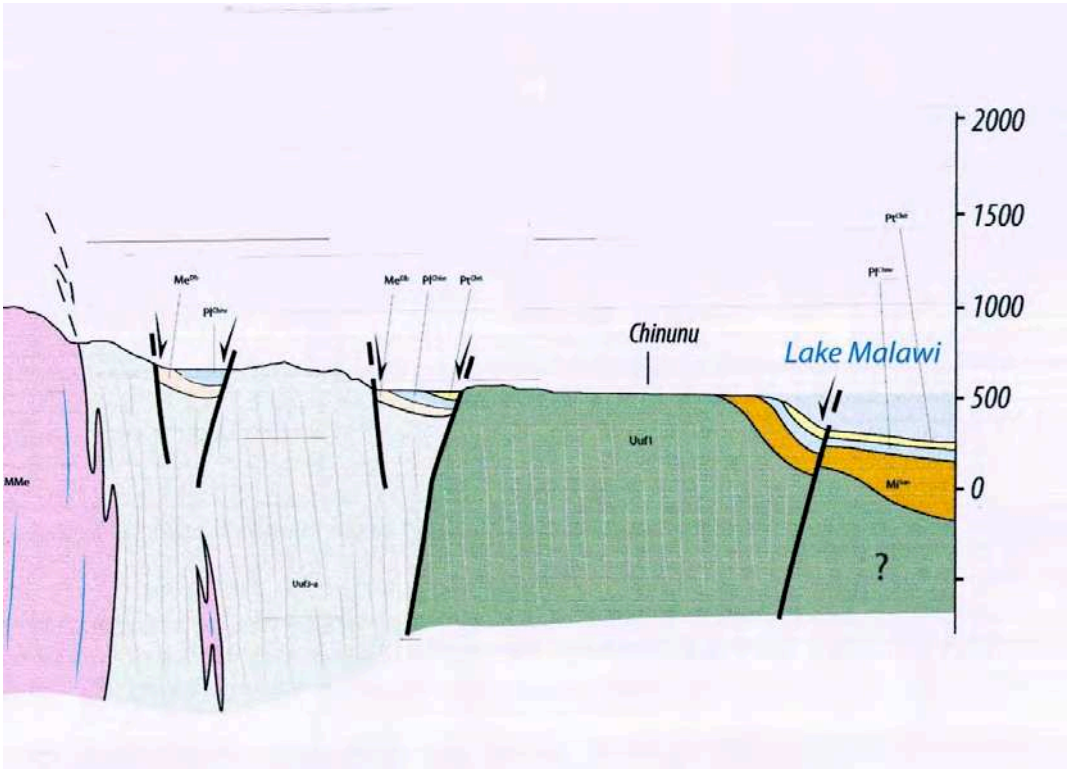


Figure 1064 extrait de la coupe géologique montrant la structure en rift de la zone de Karonga (Source : GENMAP BRGM GFK CGS, 2021).

5.14.4.2.2. Site de Malema : discordance des dépôts fossilifères pliocènes

Ce site est indiqué sur la Figure 1059. Le log stratigraphique ci-dessous (Figure 1065) indique les niveaux où a été trouvé l'hominine HCRP-U18-501 (Schrenk *et al.*, 1993 ; Sandrock *et al.*, 1998) découvert en-dessous de la discordance des niveaux fluviatiles de *Chitimwe beds* sur les niveaux lacustres de *Chiwondo beds* au niveau du gisement de Malema (Figure 1066).

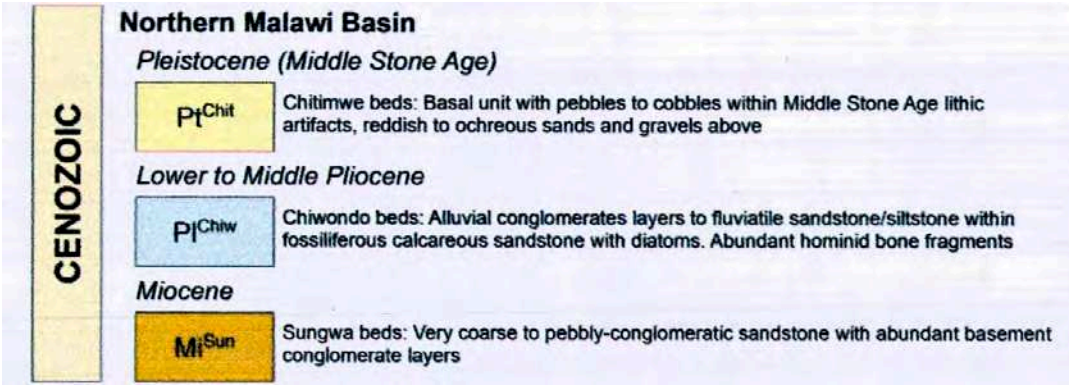


Figure 1065 Extrait de la carte géologique de Karonga (Source : GENMAP BRGM GFK CGS, 2021).



Figure 1066 Contexte stratigraphique de la mandibule d'Hominines de Malema. La discordance des niveaux fluviatiles de Chitimwe beds sur les niveaux lacustres de Chiwondo beds est indiquée en rouge.

5.14.4.2.3. Les Chiwongo beds en discordance sur les calcaires permiens

La notice de la carte géologique indique que les *Chiwongo beds*, notés (Me Dd), sont datés du Crétacé inférieur à supérieur à Aptien -Campanien. Ces formations géologiques sont appelées : bancs à dinosaures. Elles sont décrites comme des dépôts lacustres et fluviatiles.
L'unité 5, désignée comme formation de Chitimwe, est constituée de dépôts issus d'un ancien piémont alluvial. L'âge des Chiwondo beds est déterminé par comparaison faunistique avec des unités biostratigraphiques datées par radiométrie en Afrique de l'Est (formation de Koobi Fora et Schungura au Kenya et en Éthiopie) et est estimé entre 4 et 1.6 Ma.



Sur le terrain, nous avons trouvé des lumachelles à gastéropodes (Figure 1067) dans les *Chiwongo beds*. Ils sont signalés dans la publication de Schrenk (1995).

Figure 1067 Lumachelle pliocène.

5.14.4.2.4. Carrière de Mpatha (brèche et choppers).

Près de Mwawembe, au niveau de la carrière de Mpatha, localisée sur la Figure 1059, nous avons retrouvé les choppers en place et observé des roches bréchifiées (Figure 1068). Rappelons que des industries lithiques préhistoriques ont été trouvées dans la région, comme par Thomson *et al.*, (2023) (Figure 1059).



Figure 1068 Carrière de Mpatha (Mwawembe) (Longitude : 9.95268292°S; 33.83641541°E; Altitude : 80 m).

5.14.5. Résultats des prospections au Mozambique et Malawi

Par rapport à l'itinéraire initialement prévu et aux cibles que nous avions envisagées de prospecter, la mission n'a finalement permis d'en explorer qu'un faible nombre. Cela s'explique d'une part par les longues distances à parcourir en voiture, souvent sur des routes en mauvais état et d'autre part par la nécessité de respecter nos rendez-vous au Malawi avec les paléontologues allemands, pour la visite des sites fossilifères à Hominines de Malema et Urema. En outre, certaines cibles se trouvaient à une grande distance de notre itinéraire principal, comme par exemple Fingoe. La prospection de *Kirk Range* nous a également fortement éloigné de la route principale.

5.14.5.1. Calendrier de la mission

Voici, brièvement, le compte-rendu du calendrier de la mission au Mozambique et Malawi. Il est à comparer avec celui que nous avions initialement envisagé (p.1006).

30 août 2022	Johannesburg, Maputo (arrivée 15h)
31 août	Départ de Maputo, on dort à Praia de Barra
1 septembre	Arrivée au village de Buchane à la nuit et prise de contact avec Alfeu Alexandre Muabsa dans le village de Buchane, on retourne dormir à Inhassoro
2 septembre	Cérémonie d'accueil avec les villageois de Buchane et visite des cavités, on dort à Inhassoro
3 septembre	Départ d'Inhassoro, on dort à Tete
4 septembre	Départ de Tete
5 septembre	On passe le Buzy, on attaque les reliefs
6 septembre	
7 septembre	
8 septembre	Nkata bay, au Malawi
9 septembre	On trouve des choppers à Katanga et on prospecte la carrière de Mpala d'où ils proviennent
10 septembre	Journée de terrain : on prospecte les carbonates permiens de la carte géologique de Andrew *et al.*, (1910, fig.3, p.202) (Point D sur la Figure 1060)
11 septembre	On retourne au même endroit qu'hier mais avec l'équipe de paléontologues allemands, c'est le site de Malema où ils ont trouvé de la faune plio-pléistocène
12 septembre	Prospection paléontologique avec les Allemands
13 septembre	Prospection paléontologique avec les Allemands

14 septembre	Départ de Laurent à Lilongwe, on prend la route du retour vers Maputo
15 septembre	
16 septembre	Départ de Tete vers Chimoio
17 septembre	Départ de Chimoio arrivée à Inhassoro
18 septembre	Départ d'Inhassoro, repas à Chicoque, arrivée à Chinguende
19 septembre	Route de Chindenguele vers Maputo, visite du musée de Géologie, on dort à Maputo
20 septembre	Vol vers Johannesburg
21 septembre	Vol vers Amsterdam et la France

5.14.5.2. Sur la karstification au Mozambique et au Malawi

Nos prospections de terrain suggèrent que les formations carbonatées aplanies sont plus susceptibles de contenir des paléokarsts et des cavités que les formations carbonatées en relief, souvent constituées de marbres durs à éroder et peu karstifiés. Effectivement, les karsts au Mozambique et au Malawi sont en général situés au niveau de carbonates complètement arasés comme c'est le cas des karsts de Buchane, de Cheringoma, de Sofala/Buzi et de Pitao que nous avons découverts.

5.14.5.3. Apports du gisement fossilifère plio-pléistocène de Malema (surface d'érosion) pour comprendre le modèle de bassin de rift où s'installe le lac Malawi

Nous verrons que cet ancien bassin marin permien s'est structurellement réactivé au Tertiaire lors de la formation du Rift et du lac Malawi. Nous verrons que c'est un modèle identique à celui de l'Okavango au Botswana, traité au Chapitre n°4 (p.473).
Le gisement fossilifère plio-pléistocène de Malema est situé au-dessus d'une discordance stratigraphique (surface d'érosion) qui a érodé les carbonates marins du Permien. Aujourd'hui, ce bassin de rift forme des petites collines constituées à la base des carbonates permiens, puis après une grande discordance on trouve les dépôts plio-pléistocènes constitués par des alluvions de quartz, parmi lesquels ont été trouvés des fossiles plio-pléistocènes (du suidé).
Comparaison entre les :

- carbonates lacustres du bassin permien prospectés (résultats : pas de karst) ;
- les éléments de couleur blanche sur les images satellites ;
- et les cartes géologiques qui indiquaient des formations carbonatées (Andrew *et al.*, 1910, fig.3, p.202) (Figure 1062, p.1045).

5.14.5.4. Visite du Service géologique du Malawi à Zomba

N'ayant pas les cartes géologiques récentes du Malawi avant la mission, nous sommes allés les acheter au Service Géologique du Malawi à Zomba. C'est dans cette ville que nous voulions aussi visiter la grotte de Chimalanga.

5.15. KARSTS ET KARSTS POTENTIELS DANS LA REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO

En juillet 2025, dans le cadre d'une demande de projet de prospection en République démocratique du Congo par Raphaël Hanon et Kim Genuite, nous avons réalisé des cartes des karsts de ce pays (Figure 1069).

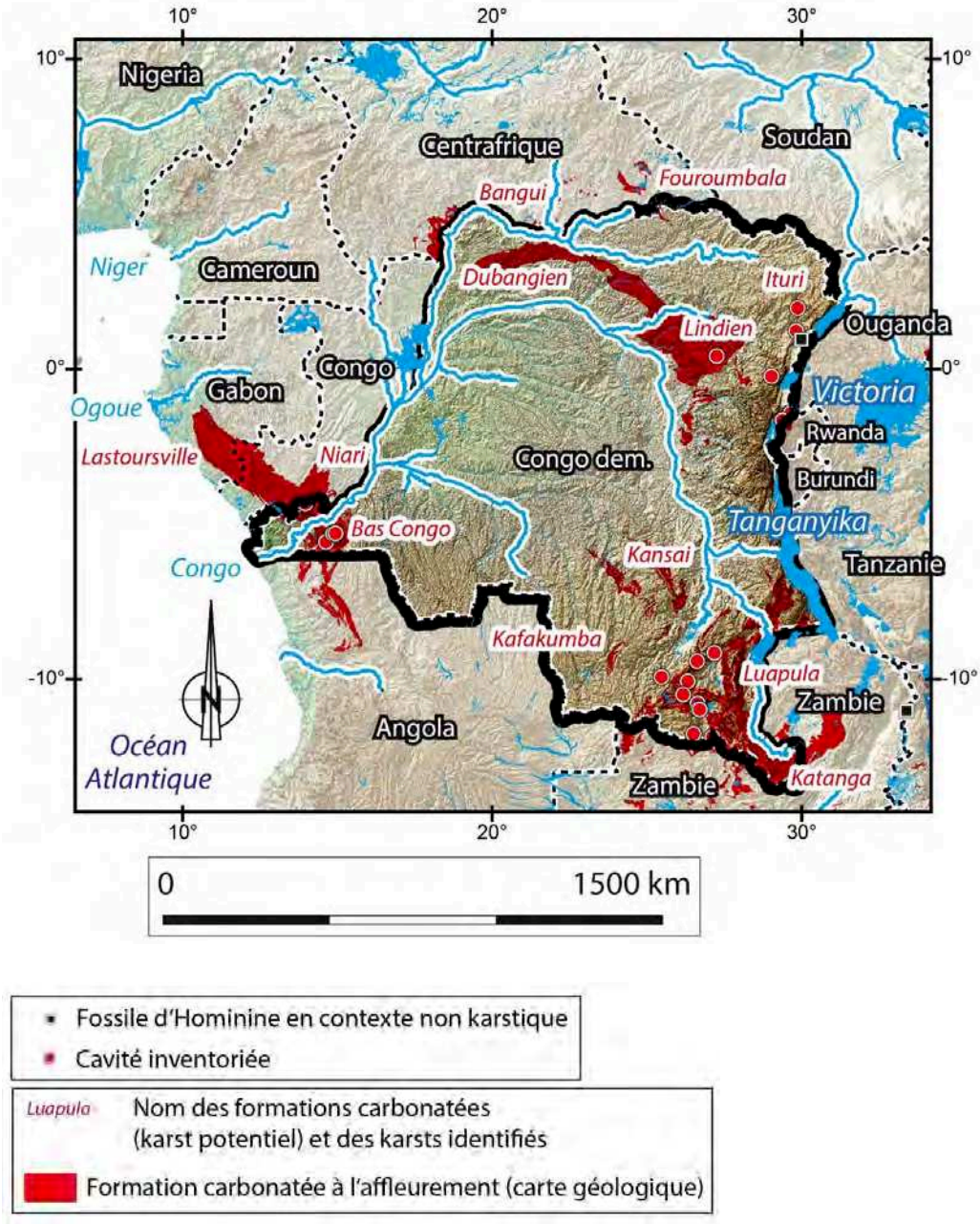


Figure 1069 Karsts potentiels et karsts connus de la République démocratique du Congo et contexte oro-hydrographique.

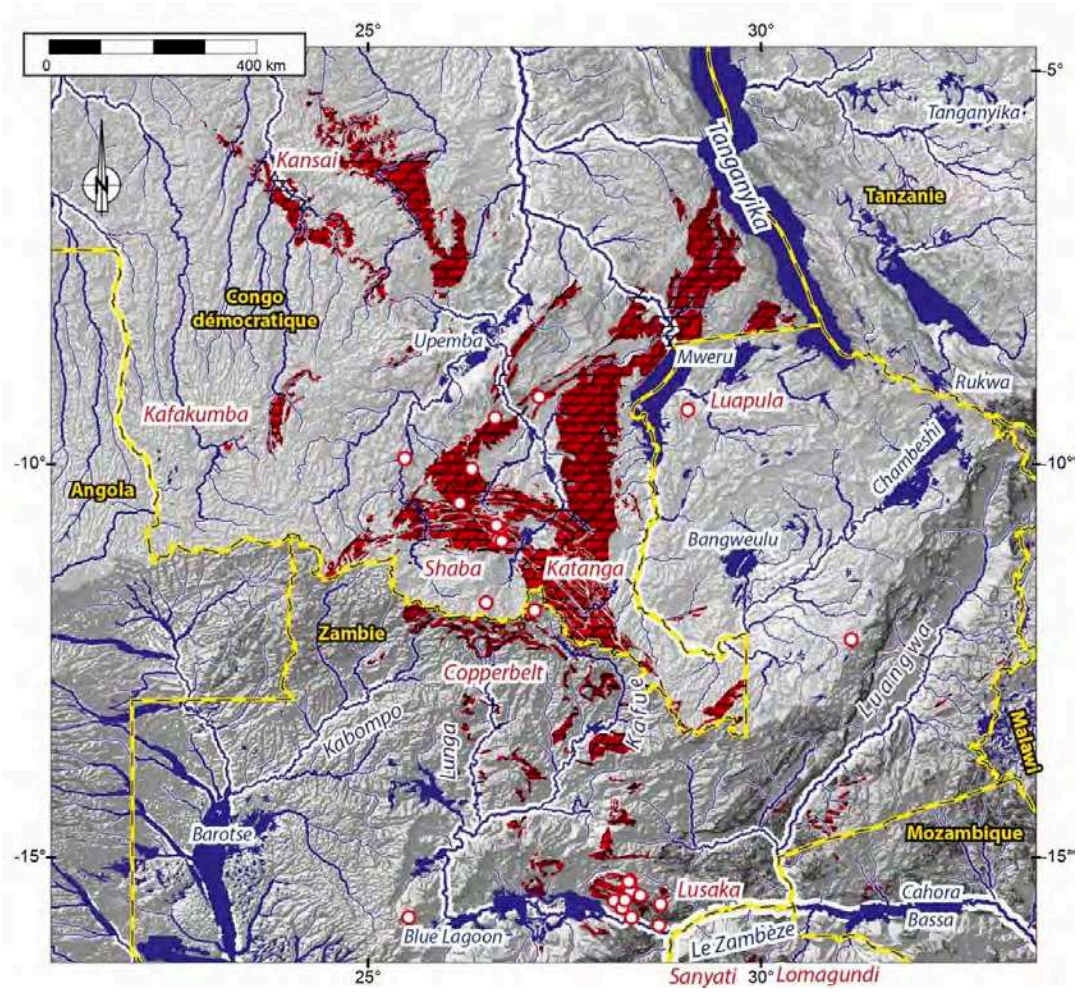


Figure 1070 Cartographie des karsts du sud de la République démocratique du Congo.

Nom des karsts ou des karsts potentiels
Katanga
Luapula
Kansai
Kafakumba
Bas Congo (Ex-Zaïre)
Niari
Dubangien
Ituri
Lindien

Tableau 55 Karst ou karst potentiel de la République démocratique du Congo.

Inventaire des grottes (source : Grottocenter)

Nom des grottes	Latitude	Longitude
Kiwakishi (Grotte de)	-9.147777777777799	27.175555555556
Casteret (Grotte)	-9.148833254757399	27.171335220337
Ndimba Dimba (Grotte de) [B13, Grotte Tondeur]	-5.2711359671442	14.904327392578
Ngovo (Grotte de)	-5.301903582524099	14.937286376953
Mbuzi (Grotte de)	-5.3131419268576	14.86111164093
Ziaka (Émergence de)	-5.5810485204138	14.630870819092
Matata Cave	1.9666666666666668	29.866666666666674
Kasuo-Kibwe Cave	-0.23333333333333334	29.01666666666665
Kulomoni (Grotte)	-10.983333333333333	26.700000000000045
Pempéré (Grotte de) [Pempere]	-10.966666666666667	26.649999999999977
Mulungwishi (Grottes de)	-10.783333333333333	26.633333333333326
Kulumbu (Grottes de)	-10.833333333333334	26.649999999999977
Kondo (Grotte de)	-10.783333333333333	26.600000000000023
Tshamakele (Grotte)	-10.5	26.16666666666663
Tsamalenge (Grotte)	-11.766666666666667	26.5
Matupi (Grotte de)	1.23	29.82

Tableau 56 Inventaire des cavités de la République démocratique du Congo (Source : Grottocenter).

5.15.1. Bibliographie

Pour Katanga : Dom Adalber Anciaux De Faveaux (1955).

Pour le Bas-Congo (Zaïre) : Quinif (1985, 1986, 1989).

5.15.2. Source des cartes géologiques

Nous pouvons consulter l'ouvrage de Bosse et al. (1996) et notamment le chapitre sur le Zaïre.

couverture raster/vecteur	République démocratique du Congo DRC v
nom	Carte géologique de la République démocratique du Congo
source	https://vdocuments.mx/download/carte-geologique-republique-democratique-du-congo https://geocatalogue.africamuseum.be/geonetwork/srv/api/records/BE-RMCA-EARTHS-013955
auteur	J. Lepersonne, 1974 Musée royal de l'Afrique centrale
échelle	1/2 500 000
année	2005

Tableau 57 Données de la carte géologique utilisée.

6. CONCLUSION : PERSPECTIVES DE RECHERCHES DE KARSTS AUTOUR DU RIFT EST-AFRICAIN

Cette conclusion est en deux parties :

- une partie technique concernant les résultats de la cartographie SIG qui a permis la zonéographie des karsts potentiels ;
- et une partie sur les apports à la connaissance scientifique de ces potentialités.

Nous terminerons par les perspectives à donner à ce travail.

6.1. RECAPITULATIF DES RESULTATS TECHNIQUES DU SIG

Les résultats techniques du SIG concernent, en premier abord, l'ensemble des cartes et des atlas inédits produits pendant la thèse.

6.1.1. Liste des résultats techniques

Ce travail a notamment permis une meilleure identification des zones de karsts potentiels à partir d'une nouvelle compilation de cartes géologiques répertoriées et mises à jour. Ce travail permet une **meilleure zonéographie des karsts potentiels**, indispensable pour améliorer les prospections sur le terrain, comme nous l'avons décrit pour la mission au Mozambique (p.153).
Nous avons mis en place un protocole d'identification des critères morphokarstiques permettant d'identifier les karsts (formes karstiques) et la Surface Africaine (surface plane) sur les MNT satellitaires (modèle numérique de terrain).
Nous avons élaboré un protocole d'importation des données SIG sur les tablettes et les téléphones pour les missions de terrain.
Nous avons élaboré une interchangeabilité des données sans l'utilisation d'un SIG, ou sans avoir le besoin de télécharger de lourdes données numériques via l'utilisation de *Google Earth Engine*, qui fournit, en étant connecté à internet, plusieurs types de traitement des MNT satellitaires comme les modèles ombrés, le calcul des pentes, des hypsométries et le RRIM que nous avons décrits au Chapitre n°1 (p.78). Cette interface rend directement accessibles les images satellites haute résolution de Google Satellite et les cartes toponymiques vectorisées de Google Maps auxquelles nous avons intégré les données issues de notre travail géomatique (karsts et karsts potentiels, bases de données des cavités, cartes géologiques synthétiques, carte des surfaces, etc.) (Figure 1071 à Figure 1075).

Lien vers l'interface : https://karstesien.fr/gee.html

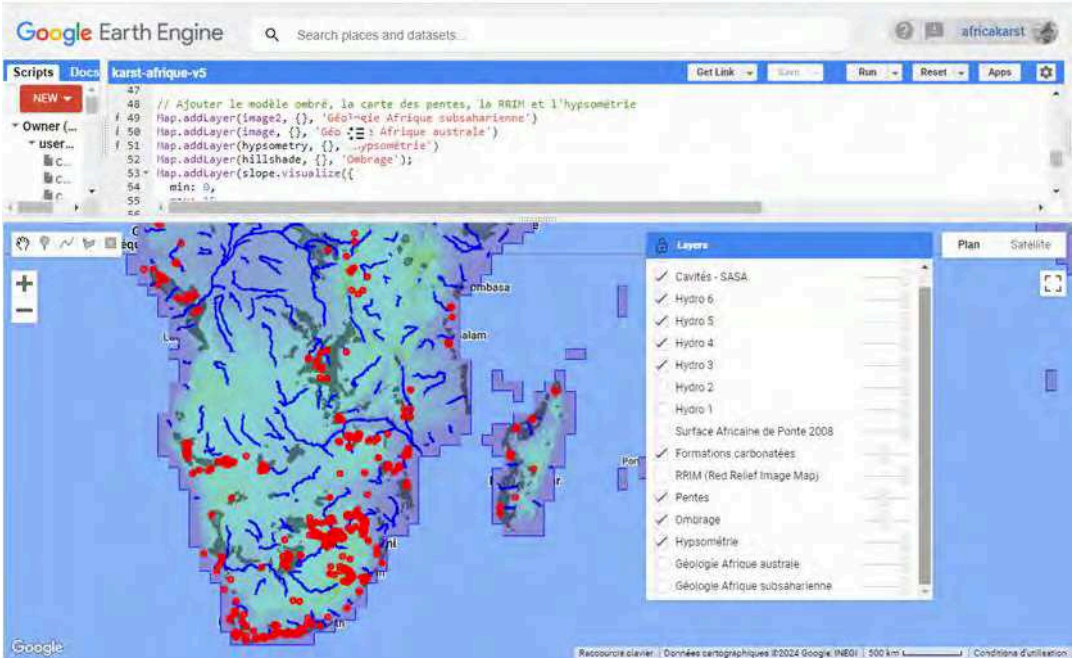


Figure 1071 Interface du modèle SIG des karsts d'Afrique australe sous Google Earth Engine.

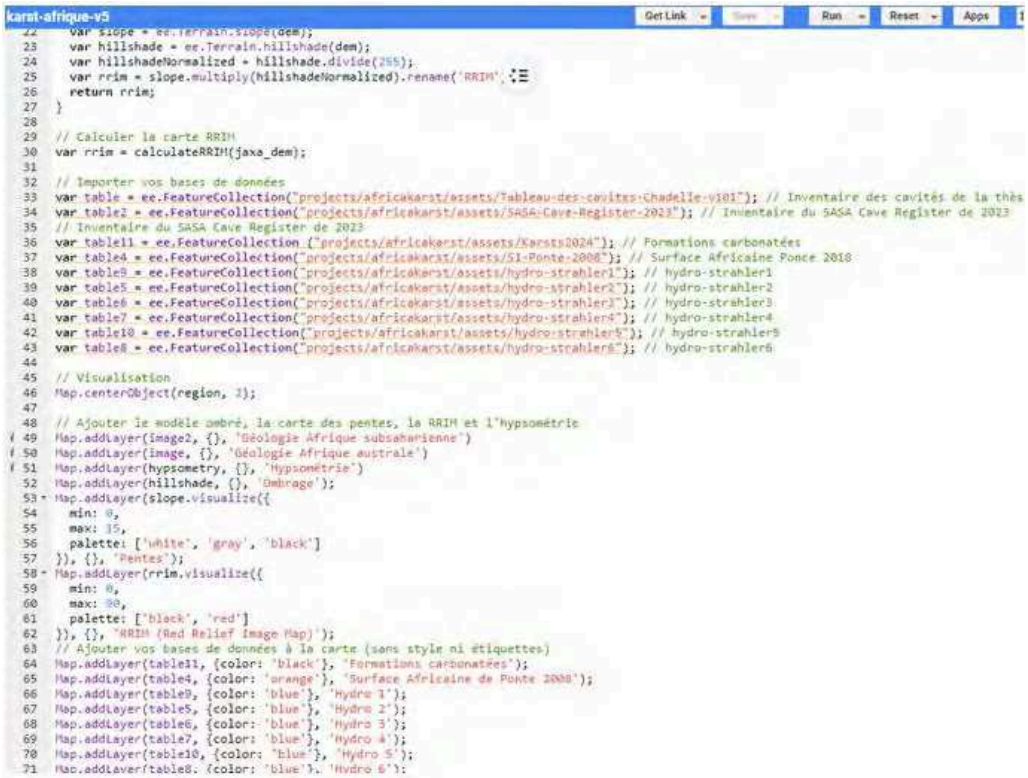


Figure 1072 Interface du code que nous avons réalisé du modèle SIG.

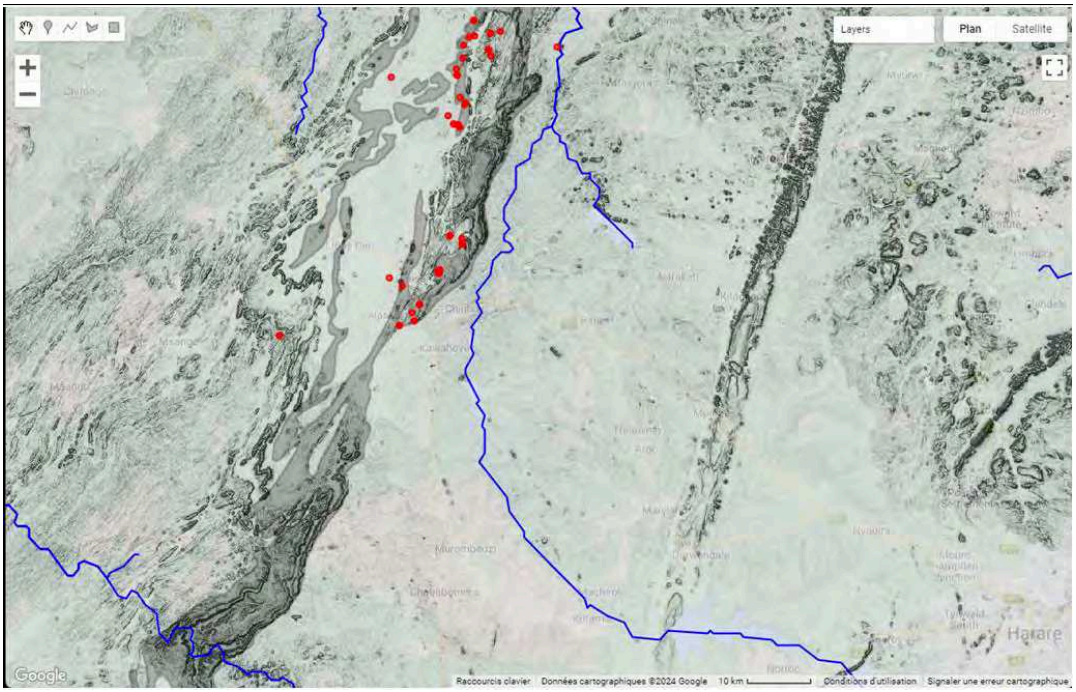


Figure 1073 Exemple de l'interface.



Figure 1074 Zoom.

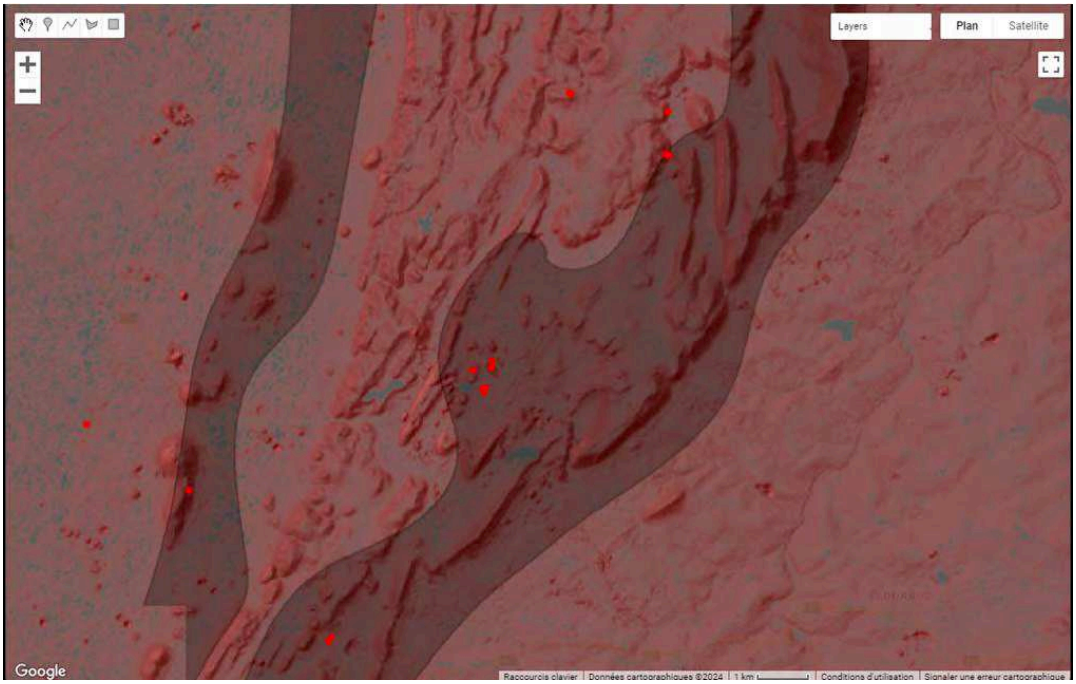


Figure 1075 Traitement RRIM des reliefs directement accessible sur l'interface.

6.2. RESULTATS SCIENTIFIQUES

Les résultats scientifiques de cette thèse comprennent les missions de terrain que nous avons eu l'opportunité de réaliser (trois mois dans le *Cradle of Humankind* en Afrique du Sud, quatre missions d'un mois au Botswana et quatre semaines au Mozambique/Malawi), ainsi que les données acquises par Laurent Bruxelles, pour lesquelles nous avons réalisé des cartes de prospection (Zimbabwe, Zambie, Gabon, Congo). L'ensemble de ces données a été intégré au SIG.

6.2.1. À l'issue des cartographies SIG des Premiers résultats scientifiques :

Premier résultat : une carte localisant la conservation de la Surface Africaine, généralement localisée sur les interfluves des grands bassins hydrographiques. Ces données croisées avec les karsts potentiels définissent où peuvent alors se situer des gisements archéologiques et/ou paléontologiques potentiels.

Deuxième résultat : identification de morphologies spécifiques : replats karstologiques, dolines, bordures de corrosion, etc., correspondant aux formes karstiques de surface, révélatrices d'un karst en profondeur. Ces données ont été intégrées dans les cartes et le SIG. Cela nous a permis de proposer des modèles d'étagements et d'emboîtements, c'est-à-dire de modèles d'évolution, en chronologie relative, notamment des surfaces d'incision des vallées, des canyons et des surfaces de paléo-poljés. Le deuxième intérêt est d'établir des corrélations entre ces formes et les variations du niveau de base pour comprendre quand le fantôme se vidange.

Troisième résultat : Identification du processus de spéléogenèse par fantômisation (p.214) (Bruxelles, 2019, 2022) à partir des plans topographiques des grottes comme Sterkfontein en Afrique du Sud (Atlas Figure 1192, p.1219) ou de certaines grottes du Mozambique (Figure 1374 p.1413) comme *Codzo River Cave* (Laumanns, 2017c) (Figure 1375 p.1414), Dimba n°2 (Laumanns, 2017b, p.232) ou Ninga Miriango (Laumanns, 2017c) (Figure 1376 p.1415).

6.2.2. Résultats de terrain

Les missions sur le terrain ont permis de vérifier les données issues du modèle, ainsi que les cartes réalisées à distance et de les améliorer en y ajoutant de nouvelles observations. Par exemple, nous avons pris en compte les formations de calcaire coquillier reconnues au pied des collines de *Koanaka Hills* et *Gcwihaba Hills*, au nord-ouest du Botswana, pour réfléchir à ce qu'elles signifient en termes de paléoenvironnements et pour mieux comprendre les paysages et les karsts étudiés.

Les prospections sur les différents terrains ont également permis de mieux comprendre la localisation des cavités, notamment à la limite des couvertures sédimentaires et des formations carbonatées exhumées. Dans le *Cradle of Humankind*, les missions de terrain ont permis de mieux caractériser les paléosurfaces et de mieux comprendre la formation de la vallée de la Bloubank, où se situent les grottes fossilifères, ainsi que l'impact du *knickpoint* du Swartkop et du blocage de l'érosion régressive. Cela a permis de développer de véritables modèles morphodynamiques des karsts étudiés, que nous allons décrire maintenant.

6.2.2.1. Cradle Of Humankind : un modèle morphodynamique exoréique avec des knickpoints et des vagues d'érosion régressive

Comme nous l'avons expliqué dans le Chapitre n°3, le *Cradle of Humankind* se situe en altitude, vers 1500 m. Cette position en hauteur le protège de l'érosion exercée par les fleuves Limpopo (Figure 1077) et Vaal, car elle est précisément située sur l'interfluve de ces deux fleuves (Figure 1076) où est conservée la Surface Africaine.

Dans le *Cradle of Humankind*, plusieurs *knickpoints* ont été identifiés, comme le relief de Swartkop. Ce sont des reliefs que la rivière a dû éroder pour que l'érosion régressive puisse se poursuivre en amont. Ces *knickpoints* ont eu pour effet de ralentir l'érosion régressive des vallées et **de décorréler les vagues d'érosion régressive et les niveaux eustatiques de l'Océan Indien.**

Nous avons montré dans le Chapitre n°3 que la karstification du *Cradle of Humankind* résulte du décolmatage des fantômes de roche, induit par l'érosion régressive du bassin hydrographique du Limpopo (via la rivière *Crocodil*) au nord.

Il s'agit d'un **modèle morphodynamique exoréique**.

Définition d'exoréisme : [du grec *exô*, en dehors, et *rhein*, couler] Fait pour une région, d'avoir un écoulement des eaux vers une mer ouverte.

On aura des périodes de formation des vides (cavités) pendant les périodes d'inondation des vallées et la mise en charge des réservoirs carbonatés fantômisés en théorie corrélées avec les hauts niveaux marins de l'Océan Indien, mais qui peuvent aussi être décorrélées à cause des *knickpoints*. Par ailleurs, on aura des phases de concrétionnement dans les cavités pendant les phases climatiques humides.

Le sud étant érodé par le bassin hydrographique de l'Orange (via la rivière Vaal), les grottes appartenant à ce bassin ont donc une histoire différente et diachronique par rapport aux grottes du *Cradle of Humankind*. Les cavités appartenant au bassin de l'Orange sont listées ci-dessous et sont indiquées sur la carte (p.316) :

2 : *Armageddon cave* (n°725) et *Stinkhole cave* (n°764) ;
3 : *Apocalype pothole* ;
4 : *Limequarry cave (Goldfields)* ;
5 : *Hut caves (Deelkraal / Lepalong caves)* ;
6 : *Jaws cave*, *Chaos cave* (n°65) ;
7 : *Skilpad cave* (n°97) ;
8 : *Porcupine - Boons cave* (n°51) et *Owl cave* (n°218).

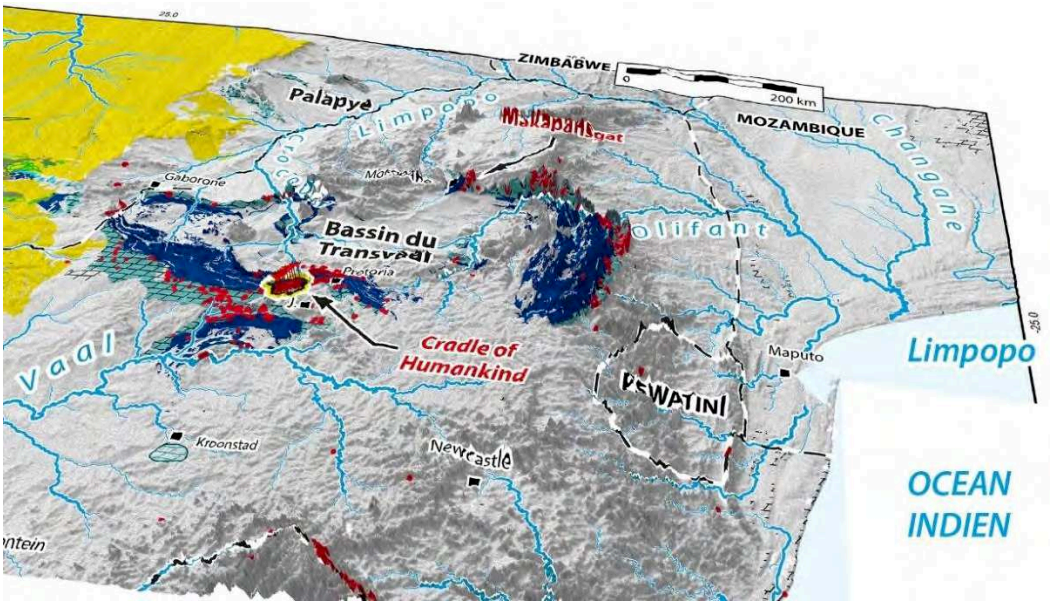


Figure 1076 Le Cradle of Humankind, situé dans le Bassin du Transvaal, est érodé par la Crocodil, un affluent du Limpopo qui se jette dans l'Océan Indien.



Figure 1077 Le bassin d'érosion du fleuve Limpopo atteint le nord du Cradle of Humankind via la rivière Crocodil, tandis que le sud est érodé par la Vaal.

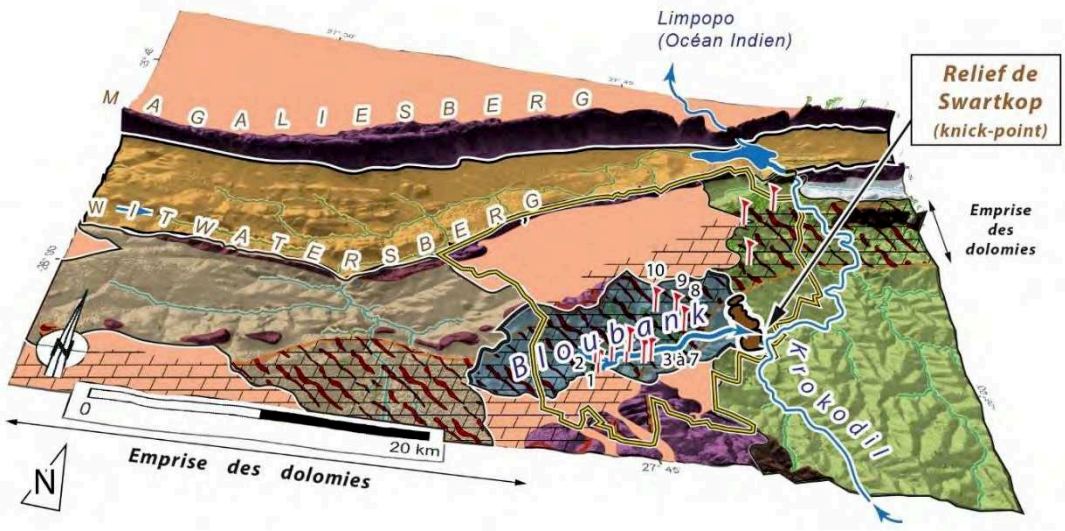


Figure 1078 Vague d'érosion régressive dans la vallée de la Bloubank un affluent du Krokodil, initiée par l'érosion du knickpoint.

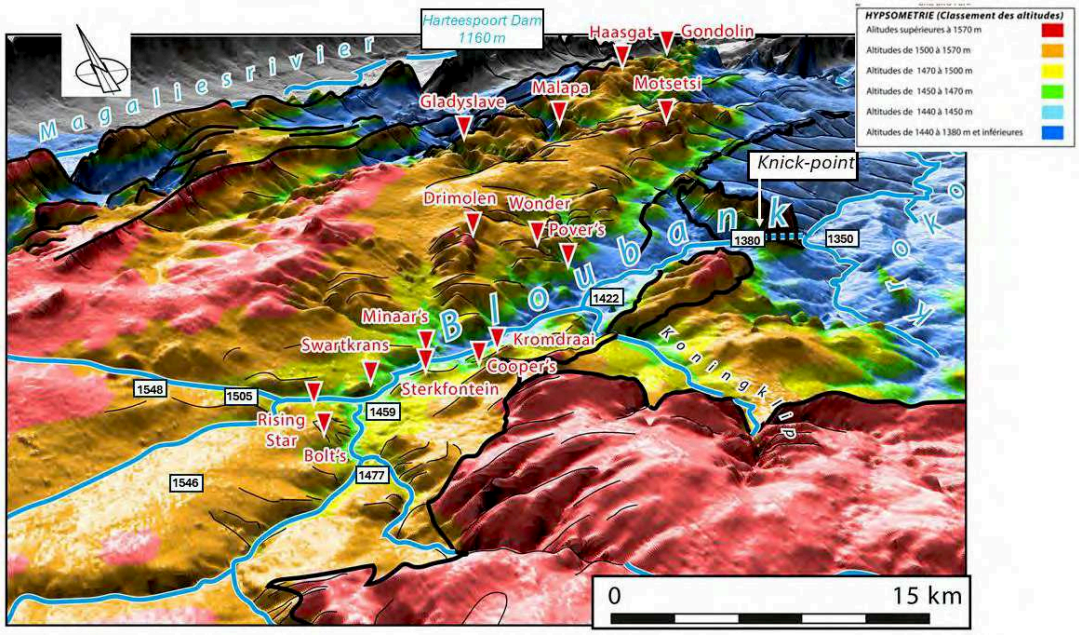


Figure 1079 Erosion de la vallée de la Bloubank et localisation des cavités sur un fond hypsométrique (Voir Figure 369 p.412).

6.2.2.2. Okavango : un modèle morphodynamique endoréique avec la présence de paléolacs, sans lien avec les niveaux de base des océans

Les niveaux de base de la bordure occidentale de l'Okavango sont contrôlés par les paléoniveaux des paléolacs (Deception, Makgadikgadi, etc.) qui eux-mêmes sont contrôlés par les phases climatiques humides (la forte pluviosité inonde le Rift) et/ou la tectonique du Rift, comme nous l'avons expliqué dans le 4. Un arrêt de la subsidence du rift provoque un blocage des écoulements et une inondation des vallées et donc une augmentation du niveau de base dans les réservoirs carbonatés fantômisées pouvant être à l'origine de création de vides (grottes).

Le modèle des karsts du nord-ouest de l'Okavango est donc différent du modèle exoréique du *Cradle of Humankind*, car les variations du niveau eustatique des océans n'interviennent pas dans ce modèle. Il n'y a pas de lien entre le niveau de base des océans et les niveaux de base dans les réservoirs. C'est un **modèle morphodynamique endoréique**.

Définition d'endoréisme : [du grec *endo*, dans, et *rhein*, couler] Fait pour une région, de ne pas avoir d'écoulement des eaux vers une mer ouverte.

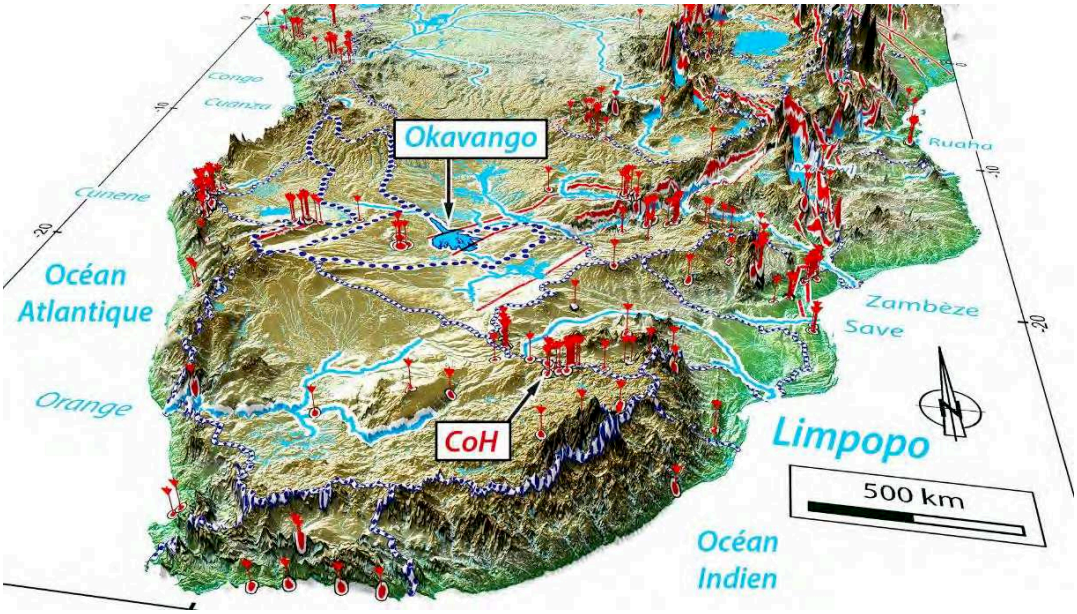


Figure 1080 En Afrique australe, se situe le modèle endoréique de l'Okavango et le modèle exoréique du Cradle of Humankind.

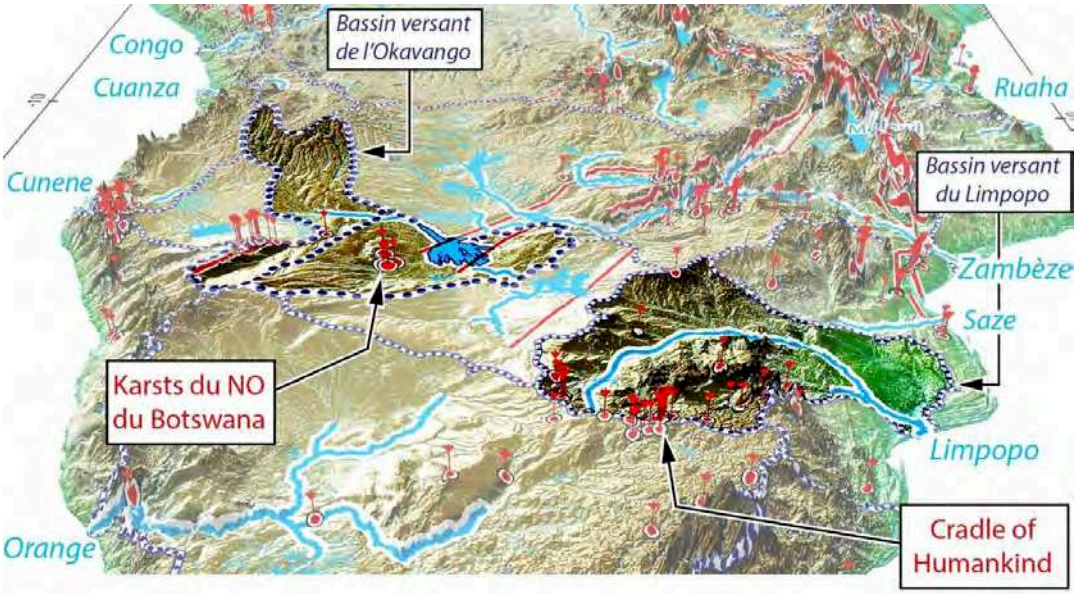


Figure 1081 Détail de la vue précédente montrant les deux modèles.

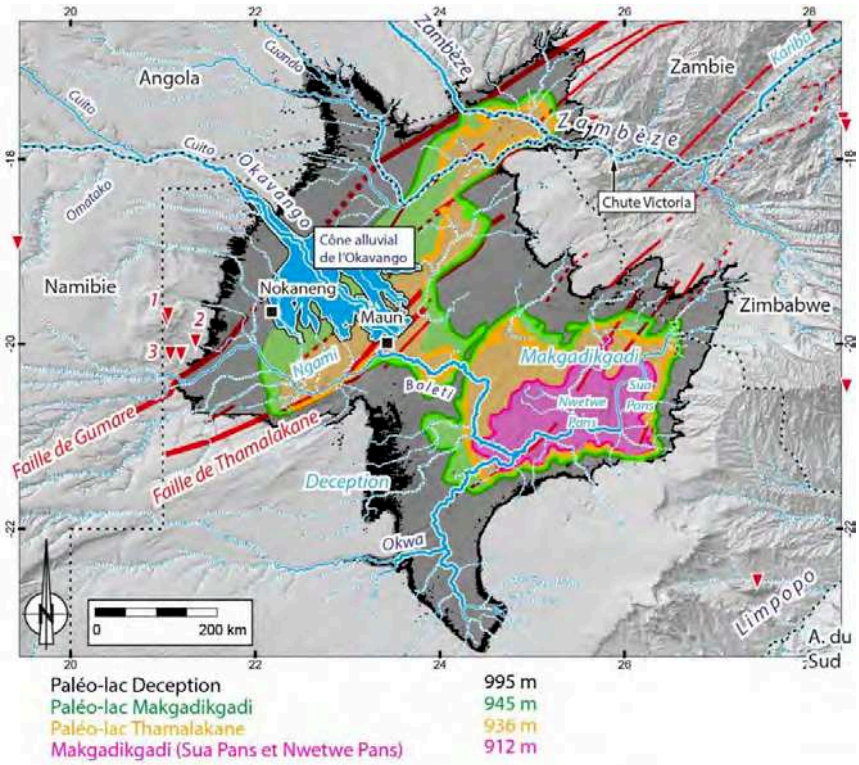
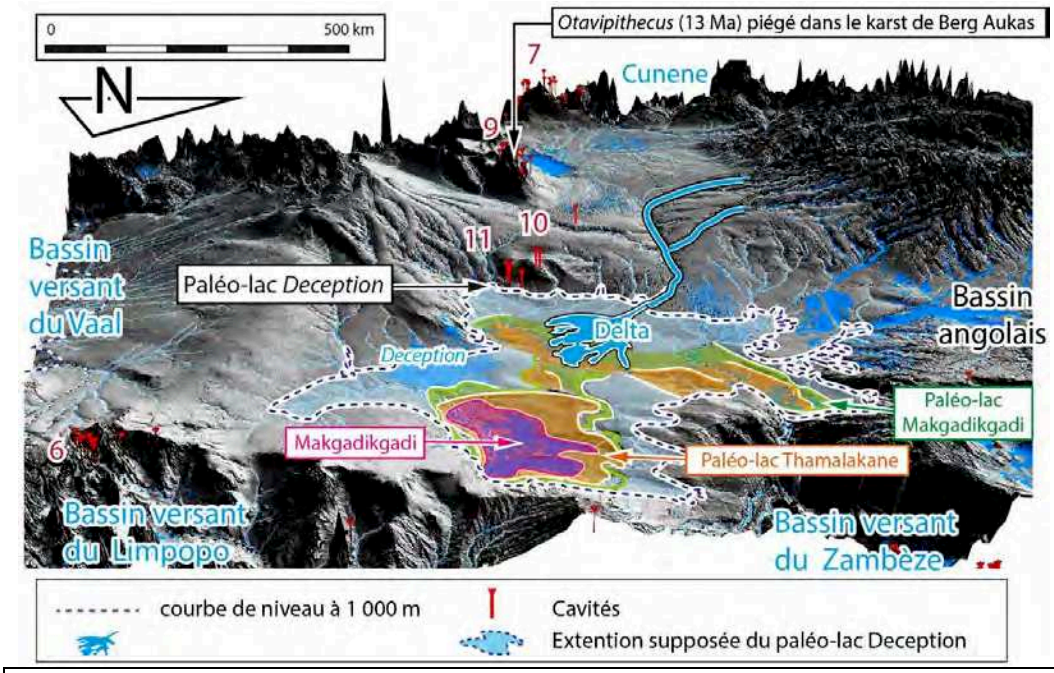


Figure 1082 Modèle endoréique de l'Okavango et extension supposée du Paléolac Deception (à 995 m), du Paléolac Makgadikgadi (à 945 m) et du Paléolac Thamalakane (à 936 m) *(Voir p.824).*



Numéro des karsts : 6 Lobatse ; 7 Kaokoland ; 9 Harasib ; 10 Aha ; 11 Gcwihaba ; 12 Koanaka.

Figure 1083 Extension supposée du paléolac Déception et des autres paléolacs, en relief exagéré 10 fois.

6.2.3. Récapitulation de l'évolution

Première phase : altération du continent et mise en place de la Surface Africaine. Cette première phase très longue se déroule au moins à partir du Crétacé et peut-être avant. C'est aussi la phase de karstification par crypto-altération et fantômisation des carbonates que nous avons décrits (p.214).

Deuxième phase : dénudation des formations carbonatées par érosion des couvertures constituant la Surface Africaine et exhumation des fantômes de roche, mise en place des poljés et des aplanissements karstiques sous contrôle tectonique. D'après les enregistrements détritiques dans les bassins *offshore*, le bassin hydrographique du Limpopo recommence à fonctionner au Miocène (20 Ma) et celui du Zambèze à l'Oligocène (-33 Ma).

Troisième phase : développement de deux réseaux hydrographiques séparés : l'Okavango et le Limpopo au maximum à partir de la mise en place du rift, vers 3.35 Ma (Vainer *et al.*, 2024) (p.476). Il y a un décolmatage important des fantômes de roche sous l'effet de l'érosion régressive des bassins hydrographiques et du franchissement des *knickpoints*.

On obtient donc deux systèmes distincts :

- système *Cradle of Humankind* : les phases de décolmatage des fantômes auront lieu pendant les phases régressives de l'Océan Indien et/ou pendant les phases de surrection tectoniques mais attention aux *knickpoints* ;

- système de l'Okavango dont les phases de décolmatage des fantômes auront lieu pendant les phases humides et/ou pendant des arrêts de la subsidence du rift.

En fonction de la zonéographie définie par les résultats techniques et cartographiques développés dans cette thèse il sera possible de déterminer pour les différentes cibles à quel modèle se référer :

- au Modèle *Cradle of Humankind* (exoréique) : en fait tous les karsts du Bassin du Transvaal : le karst de *Marble Hall*, le karst de Lobatse ;

- au modèle de l'Okavango (endoréique), qui constitue un modèle unique. La région de Karonga, à l'ouest du lac Malawi, est lié au rift du Malawi, mais n'y présente pas de karst, nous avons prospecté les formations carbonatées environnantes (Voir p.1039) ;

- à un autre modèle ou modèle intermédiaire : la présence de poljés nécessite des phases endoréiques. Dans le *Cradle of Humankind*, ces phases sont expliquées par la présence des *knickpoints*. En revanche pour les poljés de Makapansgat ou de Vlaakplats – Hoogland, nous pourrons faire intervenir un modèle intermédiaire aux deux modèles proposés ci-dessus.

Ainsi, il est possible de comparer les âges des concrétions des grottes du *Cradle of Humankind* et celle de Lobatse qui appartiennent au même modèle morphodynamique, quoique les systèmes hydrographiques et les knickpoints soient différents. Mais il n'est pas possible de comparer les âges des cavités ayant deux modèles morphodynamiques différents comme le *Cradle of Humankind* et les grottes au nord-ouest du Botswana.



Figure 1084 Vue 2D ½ de l'érosion du continent de l'Afrique australe par les fleuves du Limpopo et du Zambèze.



Figure 1085 Coupe morphokarstique synthétique des différents karsts étudiés.

6.3. PERSPECTIVES

Nous avons comme perspectives de continuer les prospections au Malawi, notamment au niveau du karst de Changalumi que nous n'avons pas pu visiter lors de notre mission en 2022. Nous souhaitons aussi continuer de prospecter le karst de Pitao qui nous avons identifié la même année au Mozambique mais que nous n'avons pas eu le temps de prospecter.

Comme nous l'avons décrit (p.835) nous devons étudier précisément l'impact de la capture des rivières par le Zambèze au niveau des régions où se situent les karsts du Zimbabwe (Sanyati et Lomagundi) et ceux de Lusaka en Zambie (Broken Hill, Chipongwe) afin de déterminer l'âge des karstifications et où rechercher des fossiles d'Hominines dans les grottes de ces régions (Voir carte p.906). Pour ce faire, il faut étudier en détail les paléosurfaces décrites brièvement dans le Chapitre n°2, notamment celles définies par Ponte (2018) (p.173). L'utilisation du SIG élaboré dans cette thèse sera l'outil adéquat pour effectuer ces recherches en suivant les protocoles mis en place pour le *Cradle of Humankind* (dans le Chapitre n°3) et les karsts du nord-ouest du Botswana (dans le Chapitre n°4).

Il serait très intéressant d'utiliser la méthode indiquée par Gaynac *et al.* (2024), au niveau des dunes de sables du nord-ouest du Botswana afin de mieux les caractériser et réfléchir à leurs origines.

7. ANNEXES DU CHAPITRE N°1

7.1. ANNEXE N°1 DU CHAPITRE N°1 : CODE DE GOOGLE EARTH ENGINE

Nous avons écrit ce code pour faire tourner le modèle SIG des karsts potentiels d'Afrique australe sous Google Earth Engine. Nous avons présenté cette interface (p.150).

Figure 1086 Version du code du modèle SIG des karsts potentiels d'Afrique australe sous Google Earth Engine.

```
//
var jaxa_dem = ee.Image('JAXA/ALOS/AW3D30_V1_1');

// Définir la région d'intérêt initiale (pour centrer la carte)
var region = ee.Geometry.Rectangle([-180, -90, 90, 180]);

// Calculer la carte hypsométrique en utilisant la bande "AVE"
var hypsometry = jaxa_dem.select('AVE').visualize({
  min: 0,
  max: 6000,
  palette: ['0000FF', '00FFFF', '00FF00', 'FFFF00', 'FF0000', '800000']
});

// Calculer le modèle ombré
var hillshade = ee.Terrain.hillshade(jaxa_dem, 315, 30);

// Calculer la carte des pentes
var slope = ee.Terrain.slope(jaxa_dem);
// Définir une fonction pour calculer le RRIM (Red Relief Image Map)
function calculateRRIM(dem) {
  var slope = ee.Terrain.slope(dem);
  var hillshade = ee.Terrain.hillshade(dem);
  var hillshadeNormalized = hillshade.divide(255);
  var rrim = slope.multiply(hillshadeNormalized).rename('RRIM');
  return rrim;
}
// Calculer la carte RRIM
var rrim = calculateRRIM(jaxa_dem);

// Importer vos bases de données
var table = ee.FeatureCollection("projects/africakarst/assets/Tableau-des-cavites-Chadelle-v101"); // Inventaire des cavités de la thèse de Chadelle v101
var table2 = ee.FeatureCollection("projects/africakarst/assets/SASA-Cave-Register-2023"); // Inventaire du SASA Cave Register de 2023
// Inventaire du SASA Cave Register de 2023
var table3 = ee.FeatureCollection ("projects/africakarst/assets/formations-carbonatees-reunion-v8"); // Formations carbonatées
```

```
var table4 = ee.FeatureCollection("projects/africakarst/assets/S1-Ponte-2008"); // Surface Africaine Ponce 2018
var table9 = ee.FeatureCollection("projects/africakarst/assets/hydro-strahler1"); // hydro-strahler1
var table5 = ee.FeatureCollection("projects/africakarst/assets/hydro-strahler2"); // hydro-strahler2
var table6 = ee.FeatureCollection("projects/africakarst/assets/hydro-strahler3"); // hydro-strahler3
var table7 = ee.FeatureCollection("projects/africakarst/assets/hydro-strahler4"); // hydro-strahler4
var table10 = ee.FeatureCollection("projects/africakarst/assets/hydro-strahler5"); // hydro-strahler5
var table8 = ee.FeatureCollection("projects/africakarst/assets/hydro-strahler6"); // hydro-strahler6
// Visualisation
Map.centerObject(region, 2);

// Ajouter le modèle ombré, la carte des pentes, la RRIM et l'hypsométrie
Map.addLayer(image3, {}, 'Géologie Afrique subsaharienne')
Map.addLayer(image5, {}, 'Géologie Afrique australe')
Map.addLayer(hypsometry, {}, 'Hypsométrie')
Map.addLayer(hillshade, {}, 'Ombrage');
Map.addLayer(slope.visualize({
  min: 0,
  max: 15,
  palette: ['white', 'gray', 'black']
}), {}, 'Pentes');
Map.addLayer(rrim.visualize({
  min: 0,
  max: 90,
  palette: ['black', 'red']
}), {}, 'RRIM (Red Relief Image Map)');
// Ajouter vos bases de données à la carte (sans style ni étiquettes)

Map.addLayer(table3, {color: 'red'}, 'Formations carbonatées');
Map.addLayer(table15, {color: 'yellow'}, 'Formations carbonatées sous couverture du Kalahari ou du Karoo');
Map.addLayer(table4, {color: 'orange'}, 'Surface Africaine de Ponte 2008');
Map.addLayer(table9, {color: 'blue'}, 'Hydro 1');
Map.addLayer(table5, {color: 'blue'}, 'Hydro 2');
Map.addLayer(table6, {color: 'blue'}, 'Hydro 3');
Map.addLayer(table7, {color: 'blue'}, 'Hydro 4');
Map.addLayer(table10, {color: 'blue'}, 'Hydro 5');
Map.addLayer(table8, {color: 'blue'}, 'Hydro 6');
Map.addLayer(table2, {color: 'green'}, 'Cavités - SASA');
Map.addLayer(table, {color: 'black'}, 'Cavités - Chadelle');
```

7.2. ANNEXE N°2 DU CHAPITRE N°1 : TABLEAU DES SOURCES DES DONNEES GEOLOGIQUES POUR LOCALISER LES CARBONATES ET LES KARSTS POTENTIELS

couverture	Monde
raster/vecteur	v
nom	World Karst Aquifer Map
source	https://www.whymap.org/whymap/EN/Maps_Data/Wokam/whymap_ed2017_map_25m.pdf;jsessionid=967DCF2E0D86C1791466DB2AA03814C3.2_cid284?__blob=publicationFile&v=3
auteur	WHYMAP
échelle	1/25 000 000
année	2017

couverture	Monde
raster/vecteur	r
nom	Geological Map of World at 1 :35M (revised issue, 3rd edition)
source	https://ccgm.org/
auteur	CCGM-CGMW Bouysse J.
échelle	1/35 000 000
année	2014

couverture	Monde
raster/vecteur	v
nom	Geology of the World
source	https://www.orrbodies.com/resource/geology-world/
auteur	Geological Survey of Canada Orr & Associates
échelle	1/35 000 000
année	nr (non renseigné)

couverture	Afrique
raster/vecteur	v
nom	Geological map of Africa
source	https://www.orrbodies.com/resource/usgs-geology-africa-1500k/
auteur	Geological Survey of Canada Orr & Associates
échelle	1/5 000 000
année	

couverture	Afrique
raster/vecteur	r
nom	Geological map of Africa
source	http://mapsref.brgm.fr/wxs/1GG/IGC35_CGMW_BRGM_Africa_Geology?&SERVICE=WMS&VERSION=1.3.0&REQUEST=GetCapabilities&

auteur	CGMW BRGM
échelle	1/10 000 000
année	1980/2016

couverture	Afrique
raster/vecteur	v
nom	Onegeology
source	http://onegeology-geonetwork.brgm.fr/geonetwork3/srv/eng/catalog.search#/metadata/ac4ea22b73e447d236e550f9cb5e73cfa216daee
auteur	CGMW BRGM
échelle	1/10 000 000
année	2015

couverture	Afrique
raster/vecteur	r
nom	Cartes de bassins (Kingston, Sedimentary basin of Africa (1989)
source	https://data.lynx-info.com/
auteur	Exploration Fabric of Africa
échelle	nr
année	1989

couverture	Afrique
raster/vecteur	r
nom	Surface Geology (UNESCO 1968, USGS 1997), EFA (Purdy)
source	https://data.lynx-info.com/
auteur	Exploration Fabric of Africa
échelle	nr
année	1997

couverture	Afrique
raster/vecteur	r
nom	Tectonic Map of Africa Structural Features (CGMW)
source	https://data.lynx-info.com/
auteur	Exploration Fabric of Africa
échelle	nr
année	nr

couverture	Afrique
raster/vecteur	r
nom	Tectonic map of Africa Isopach (CGMW)
source	https://data.lynx-info.com/
auteur	Exploration Fabric of Africa
échelle	nr
année	nr

couverture	Afrique
raster/vecteur	r
nom	Geological map of Africa
source	https://macrostrat.org/map/#/z=4.0/x=25.6786/y=-15.9044/bedrock/lines/
auteur	Macrostats
échelle	nr
année	nr

couverture	Afrique
raster/vecteur	r
nom	PanAfGeo
source	https://panafgeo.eurogeosurveys.org/
auteur	OAGS, BRGM
échelle	nr
année	nr

couverture	Afrique
raster/vecteur	r
nom	CGIA International Geological Map of Africa (en 6 parties)
source	
auteur	Bureau de cartographie géologique internationale CGMW
projection	Double projection de Mercator transverse
échelle	1/5 000 000
année	1985/1990

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	v
nom	rsa_1m_shape_layer_font_tar
source	http://www.geoscience.org.za/images/Maps/DataFile/rsa_1m_shape_layer_font_tar.zip Autre lien
auteur	Council of Geoscience
échelle	1/1 000 000
année	2019

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	r/v
nom	Chronostratigraphic map of the republic of south africa and the kingdoms of Lesotho and Swaziland
source	https://maps.geoscience.org.za/portal/apps/sites/#/council-for-geoscience-interactive-web-map-1 Données vectorisées SIG
auteur	Council of Geoscience
échelle	1/2 000 000
année	2008

couverture	Afrique du Sud

raster/vecteur	r
nom	Simplified geological map of the republic of south africa and the kingdoms of Lesotho and Swaziland
source	https://www.geoscience.org.za/images/DownloadableMaterial/RSA_Geology.pdf
auteur	Council of Geoscience, Johnson & Wolmarans
échelle	1/2 000 000
année	2008

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	r
nom	Simplified geology, selected mined and mineral deposits South Africa, Lesotho and Swaziland
source	
auteur	Johnson & Wolmarans, 2008
échelle	1/2 000 000
année	nr

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	v
nom	CGS_RSA1M Geological polygon
source	http://geoscience.org.za/cgs/ Données vectorisées SIG
auteur	Council of Geoscience, De Beer
échelle	1/1 000 000
année	2019

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	r
nom	Geological map of the Republic of South Africa and the Kingdoms of Lesotho and Swaziland
source	https://maps.geoscience.org.za/portal/apps/sites/#/council-for-geoscience-interactive-web-map-1/apps/f17eb56408b34add9c43878de5ccd4c2/explore
auteur	
échelle	1/1 000 000
année	2019

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	r
nom	Geological map of the Republic of South Africa and the Kingdoms of Lesotho and Swaziland
source	
auteur	Enslin J.F. et Uys N.J.
échelle	1/1 000 000
année	1970

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	r
nom	Composite map : Geological map of the republic of South Africa and the kingdoms of Lesotho and Swaziland
source	https://maps.geoscience.org.za/portal/apps/sites/#/council-for-geoscience-interactive-web-map-1 https://www.dws.gov.za/Groundwater/DolomiteP.aspx

auteur	Council of Geoscience : Frick C. & Keyser N.
échelle	1/1 000 000
année	1997

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	r
nom	Gauteng, North West, Ghaap Plateau, Dolomite Units Map
source	https://www.dws.gov.za/Groundwater/Documents/Dolomite/National%20Map%20Final_200dpi.png
auteur	Water Geosciences Consulting, Holland
échelle	1/210 000
année	2009

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	r
nom	West Rand Dolomite Compartments
source	https://www.dws.gov.za/Groundwater/Documents/Dolomite/A1%20Tarlton%20Final_200dpi.png
auteur	Water Geosciences Consulting, Holland
échelle	1/85 000
année	2009

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	r
nom	Klipriver/Nataspruit Dolomite Compartments Map
source	https://www.dws.gov.za/Groundwater/Documents/Dolomite/A1%20Klipriver_Natalspruit%20Final_200dpi.png
auteur	Water Geosciences Consulting, Holland
échelle	1/120 000
année	2009

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	r
nom	North West Dolomite Management Units Map
source	https://www.dws.gov.za/Groundwater/Documents/Dolomite/A1%20North%20West%20Final_200dpi.png
auteur	Water Geosciences Consulting, Holland
échelle	1/210 000
année	2009

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	r
nom	Tshwane/Ekurhuleni Dolomite Compartments Map
source	https://www.dws.gov.za/Groundwater/Documents/Dolomite/A1%20Tshwane%20dolomite%20Final_200dpi.png
auteur	Water Geosciences Consulting, Holland
échelle	1/80 000
année	2009

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	r/v
nom	Wesrand (Westrand) n°2626
source	https://maps.geoscience.org.za/download/config_geo_250k_maps.php?id=101 https://maps.geoscience.org.za/portal/apps/sites/#/council-for-geoscience-interactive-web-map-1/maps/a5cf6f95652d446e8dcd7bc7ec11340c Données vectorisées SIG
auteur	Department of mineral and energy affairs, Director General L.Alberts, D. Sc., F. Inst. P., F.S.A.I.M.M; Geological survey, Chief Director P.J.Smit, P.D
échelle	1/250 000
année	1986

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	r/v
nom	East Rand n°2628
source	https://maps.geoscience.org.za/download/config_geo_250k_maps.php?id=63 https://maps.geoscience.org.za/portal/apps/sites/#/council-for-geoscience-interactive-web-map-1/maps/1cfeec1e262646bda13197bd0bd12306
auteur	Department of mineral and energy affairs, Director General L.Alberts, D. Sc., F. Inst. P., F.S.A.I.M.M; Geological survey, Chief Director P.J.Smit, P.D
échelle	1/250 000
année	1986

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	r/v
nom	Pretoria n°2528
source	https://maps.geoscience.org.za/download/config_geo_250k_maps.php?id=85 https://maps.geoscience.org.za/portal/apps/sites/#/council-for-geoscience-interactive-web-map-1/maps/c923448a524142408c0bce0e9cefae89/about Données vectorisées SIGhttps://maps.geoscience.org.za/download/config_geo_250k_shp.php?id=50
auteur	Department of mineral and energy affairs, Director General L.Alberts, D. Sc., F. Inst. P., F.S.A.I.M.M; Geological survey, Chief Director P.J.Smit, P.D
échelle	1/250 000
année	1978

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	r/v
nom	Rustenberg n°2526
source	https://maps.geoscience.org.za/download/config_geochem_250k_maps.php?id=6 https://maps.geoscience.org.za/portal/apps/sites/#/council-for-geoscience-interactive-web-map-1/maps/6f2f752c1acd44659d16f09b4e3b4bb9 notice Données vectorisées SIG
auteur	Department of mineral and energy affairs, Director General L.Alberts, D. Sc., F. Inst. P., F.S.A.I.M.M; Geological survey, Chief Director P.J.Smit, P.D. Coetsee et Cloete (1981).
échelle	1/250 000
année	1981

couverture	Afrique du Sud

raster/vecteur	r
nom	Johannesburg Sheet 52 https://maps.geoscience.org.za/download/config_geo_148k_maps.php?id=5 https://www.geoscience.org.za/ecommerce/index.php/product/the-geology-of-the-country-surrounding-johannesburg-sheet-52-geology-148k-explanation notice
auteur	Rogers A.W., Banks E.H. Union of South Africa. Department of mines and industries – Geological Survey
échelle	1/148 000
année	1921

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	r
nom	Bapong (Wolhuterskop) n°2527DA 50,000 Series
source	https://maps.geoscience.org.za/download/config_geo_50k_maps.php?id=4 notice
auteur	Department of Mines Uys N.J. Geological Survey Enslin J.F. Besaans A.J.
échelle	1/50 000
année	nr

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	r
nom	Brits 2527DB 50,000 Series
source	https://maps.geoscience.org.za/download/config_geo_50k_maps.php?id=15 notice
auteur	Department of Mines Uys N.J. Geological Survey Enslin J.F. Besaans A.J.
échelle	1/50 000
année	nr

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	r
nom	Hekpoort 2527DC 50,000 Series
source	https://maps.geoscience.org.za/download/config_geo_50k_maps.php?id=49 notice
auteur	Department of Mines Uys N.J. Geological Survey Enslin J.F. Besaans A.J.
échelle	1/50 000
année	nr

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	r
nom	Broederstroom 2527DD 50,000 Series
source	https://maps.geoscience.org.za/download/config_geo_50k_maps.php?id=16 notice
auteur	Ingram B.A., Obbes A.M. et van Tonder D.M.
échelle	1/50 000
année	2010

couverture	Afrique du Sud

raster/vecteur	r
nom	Broederstroom 2527DD 50,000 Series
source	
auteur	Department of Mines UYS N.J. Geological Survey Enslin J.F. Besaans A.J.
échelle	1/50 000
année	1973

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	r
nom	250,000 Geological Series
source	https://colecoes.igc.usp.br/colecao/mapoteca?order=ASC&orderby=date&view_mode=grid&perpage=24&paged=1&fetch_only=thumbnail%2Ccreation_date%2Ctitle%2Cdescription&fetch_only_meta=&search=%C3%81frica%20do%20Sul
auteur	
échelle	1/250 000
année	1960

couverture	Mozambique
raster/vecteur	r
nom	
source	
auteur	MINED
échelle	1/6 000 000
année	1986

couverture	Mozambique
Raster/vecteur	v
nom	Mozambique1M_Lithology_v1.MAP
source	https://www.orrbodies.com/resource/geology-mozambique-1987/
auteur	Instituto Nacional de Geologia, BRGM Pinna P., Marteau P.; Becq-Giraudon J. F.
échelle	1/1 000 000
année	1987

couverture	Mozambique
raster/vecteur	r
nom	Carta Geological
source	
auteur	CGS Council of Geoscience ; DNG Direcção Nacional de Geologia, Moçambique ; GDW Gondwana Empreendimentos e Consultoria, Lda., Moçambique. Hartzer F.J.
échelle	1/1 000 000
année	2008

couverture	Mozambique
raster/vecteur	r
nom	GTK_MZ_1832_1833,1834,1835,1932_1933,1934,1935, 2032_2033,2034_2035, all cards in the series

source	https://www.yumpu.com/en/document/read/5167791/gtk-consortium-geological-surveys-in-mozambique-arkistogsffi
auteur	GTK Consortium GTK – ITC – GONDWANA – SGU – GEUS, Direcçao nacional de geologia, Lehtonen M.I., Mäkitie H., Manninen T., Gustafsson B., Eerola T., Koistine T. et Âkerman C.
échelle	1/250 000
année	2006

couverture	Malawi
raster/vecteur	r
nom	Limestone Resources in Malawi
source	https://www.academia.edu/43730410/Limestone_Resources_in_Malawi
auteur	Fimmm G. M.
échelle	nr
année	2020

couverture	Malawi
raster/vecteur	v
nom	
source	http://www.masdap.mw/
auteur	Department of Surveys
échelle	nr
année	nr

couverture	Malawi
raster/vecteur	r
nom	Geology map of Malawi
source	https://nla.gov.au/nla.obj-2053903552/view
auteur	Bloomfield, Mason, Habgood
échelle	1/1 000 000
année	1966

couverture	Malawi
raster/vecteur	r
nom	*Geology map of Malawi GENMAP*
source	*https://www.brgm.fr/fr/actualite/communique-presse/panafgeo-programme-inedit-formation-afrique*
auteur	*BRGM GFK CGS*
échelle	*1/100 000*
année	*2021*

couverture	Botswana
raster/vecteur	v (format ARCGIS : .gdb)
nom	Atlas of Namibia Project Directorate of Environmental Affairs
source	http://geoscienceportal.geosoft.com/Botswana/api/Extraction/Download?folder=3b2e3d05-7f3c-4d78-983a-f0eb001e7e29&file=geol-botswana.zip
auteur	Ministry of Environment and Tourism

échelle	nr
année	2002

couverture	Botswana
raster/vecteur	r
nom	The Pre-Kalahari Geological Map of the Republic of Botswana
source	https://www.bgi.org.bw/sites/default/files/Botswana%20Gelogical%20Map%20Prekalahari%201998.pdf
auteur	Machacha T.P.
échelle	1/1 500 000
année	1997

couverture	Botswana
raster/vecteur	r
nom	The Pre-Kalahari Geophysical Interpretation Northern Botswana
source	https://www.bgi.org.bw/sites/default/files/GEOSCIENCE%20DATA%20CATALOGUE%202022%20Rev%201.pdf
auteur	Botswana Geoscience Institute
échelle	1/1 000 000
année	2022

couverture	Namibie
raster/vecteur	v
nom	SIG_Namibie (Geology, hydrogeology etc)
source	
auteur	nr
échelle	nr
année	2015

couverture	Namibie
raster/vecteur	r
nom	Atlas of Namibia Project
source	http://www.uni-koeln.de/sfb389/e/e1/download/atlas_namibia/e1_download_physical_geography_e.htm
auteur	SF B 389 ACACIA
échelle	1/7 500 000
année	2003

couverture	Madagascar
raster/vecteur	v
nom	Simplified Geology of Madagascar
source	https://databasin.org/maps/
auteur	Conservation Biology Institute (Besairie,1964)
échelle	1/1 000 000
année	2010

couverture	Angola

raster/vecteur	r
nom	Carta geologica de Angola
source	http://info.igme.es/carto/r.asp?Id_Pais=17437
auteur	Republica popular de Angola
échelle	1/1 000 000
année	1988

couverture	République démocratique du Congo DRC
raster/vecteur	v
nom	Carte géologique de la République démocratique du congo
source	https://vdocuments.mx/download/carte-geologique-republique-democratique-du-congo https://geocatalogue.africamuseum.be/geonetwork/srv/api/records/BE-RMCA-EARTHS-013955
auteur	Lepersonne J. (1974) Musée royal de l'Afrique centrale
échelle	1/2 500 000
année	2005

couverture	Afrique du Sud
raster/vecteur	
nom	cartes géologiques du Waterberg et du Middelburg - bassin Cullinan-Middelburg
source	
auteur	Coertze, Jansen et Walraven (1977)
échelle	
année	

couverture	*Zambie*
raster/vecteur	*r*
nom	*Hydrogeological map of Zambia*
source	*https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/TZ/Zambia/map_hygeo_zambia.pdf?__blob=publicationFile&v=3*
auteur	*BRG Bäumie El-Fahem, Karen WARMA*
échelle	*1/1 500 000*
année	*2018*

couverture	Zambie
raster/vecteur	r
nom	Hydrogeological map of Kaflue Flats & southern Tributaries
source	
auteur	1ere Edition BRG
échelle	1/250 000
année	2007

couverture	Zambie
raster/vecteur	r
nom	Hydrogeological map of Kariba Lake and Kafue Gorge
source	

auteur	
échelle	1/250 000
année	2007

couverture	Zambie
raster/vecteur	r
nom	Hydrogeological map of Kariba Lake and Kalomo
source	
auteur	1ere Edition BRG
échelle	1/250 000
année	2007

couverture	Zambie
raster/vecteur	r
nom	Hydrogeological map of Mwembeshi et Chongwe
source	
auteur	1ere Edition BRG
échelle	1/250 000
année	2012

couverture	Zambie
raster/vecteur	r
nom	Hydrogeological map of Lusaka and Surroudings
source	
auteur	
échelle	1/75 000
année	2012

couverture	Zambie
raster/vecteur	r
nom	Hydrogeological map of Lusitu Catchment
source	
auteur	BRG Baümie R., Nkhoma J., Silemno O. with contributions by Neukum C.
échelle	1/100 000
année	2017

couverture	Zambie
raster/vecteur	v
nom	Carte hydrogéologique de la Zambie, Province du Sud : Feuille du bassin versant de Lusitu 1:100 000
source	https://www.bgr.bund.de/DE/Home/homepage_node.html
auteur	
échelle	nr
année	nr

couverture	Zambie
raster/vecteur	r
nom	ProterGeo Database Ore Deposit Description Central African Copperbelt Zambian Copperbelt
source	http://www.portergeo.com.au/database/mineinfo.asp?mineid=mn126
auteur	Porter GeoConsultancy Pty Ltd
échelle	nr
année	2015

couverture	Zambie
raster/vecteur	r
nom	Geological map of the Republic of Zambia Edition 1
source	
auteur	Reeve W.H.
échelle	1/1 000 000
année	1961

couverture	Zambie
raster/vecteur	r
nom	Geological map of the Republic of Zambia 1974-1975 Edition 2
source	
auteur	Thieme J.G. & Johnson R.L.
échelle	1/1 000 000
année	1974/1975

couverture	Zambie
raster/vecteur	r
nom	Geological map of the Republic of Zambia Edition 2 with minor amendments
source	
auteur	
échelle	1/1 000 000
année	1981

couverture	Zambie
raster/vecteur	r
nom	Geological and mineral occurrence map
source	
auteur	Sikatali C. ; Legg C.A. (1973)
échelle	1/2 000 000
année	1994

couverture	Tanzanie
raster/vecteur	r
nom	Geology and mineral map of Tanzania East_Africa_1952_Uganda_Kenya_Tanzania
source	

auteur	BRGM
échelle	1/2 000 000
année	2004

couverture	Tanzanie
raster/vecteur	r
nom	12-SW_Oldoinyo [...] 258_Itumba
source	
auteur	
échelle	1/125 000
année	1957

couverture	Tanzanie
raster/vecteur	r
nom	Geological map of Tanganyika Quennell56_Tanzania_Geol_2_Map_GeolSurvTanganyika
source	
auteur	
échelle	1/2 000 000
année	1959

couverture	Tanzanie
raster/vecteur	r
nom	Geological map of East Africa
source	
auteur	
échelle	1/2 000 000
année	1952

couverture	Rwanda
raster/vecteur	r
nom	Carte des Gîtes Minéraux du Rwanda.
source	https://esdac.jrc.ec.europa.eu/images/Eudasm/Africa/images/maps/download/afr_rw3002_ge.jpg
auteur	Baudin B., Zigibabili J., Ziserman A., Petricec V.
échelle	1/250 000
année	1982

Tableau 58 des sources des données géologiques (raster ou vecteur dans la deuxième colonne) pour localiser les carbonates et les karsts potentiels (Nom du fichier : Tableau-des-donnees-v25).

7.3. ANNEXE N°3 DU CHAPITRE N°1 : TABLEAU DES CAVITES RECENSEES

Nous avons dressé l'inventaire des cavités en Afrique sub-saharienne. Les coordonnées des cavités à utiliser sont celles des colonnes n°9 et n°10, appelées respectivement Longitude X3 et Latitude X4. Les autres sont fournies à titre d'indication. Les coordonnées barrées ont été laissées pour information mais sont erronées. Le plus souvent, ce sont des coordonnées des cavités pointées avant l'utilisation des GPS et elles sont donc souvent mal localisées. Ces données incorrectes n'ont pas été converties ni intégrées aux colonnes n°9 et n°10. Attention dans Pickford, 2013, il y a une erreur sur les coordonnées de *Western Codzo cave* dans le tableau n°1. Il est indiqué 31° au lieu de 34°.

Tableau 59 des cavités de l'Afrique subsaharienne.

Noms des grottes	Pays	Régions	Massifs karstiques	Longitude	Latitude	X2	Y2	Longitude X3	Latitude X4	z	Dével	Prof.	Info
Sterkfontein type site	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind	27°44'3.46"E	26° 0'56.36"S			27,7346450000	-26,0156570000	1472	5230	-43	Z membre 4 1483m (Herries 2019)
Sterkfontein entrée touristique	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind							1474			
Lincoln Fault	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind			UTM 35S 573623	UTM 35S 7122428	27,7357406658	-26,0151776907	1464			
Swartkrans	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind	27°43'24,7"E	26°1'1,7"S			27,7235310000	-26,0171390000	1475		7	
Cooper's D	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind	27°44'45.00"E	26° 0'46.00"S			27,7456020000	-26,0132980000	1464			
Kromdraai A	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind							1481			
Kromdraai B	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind	27°45'0.00"E	25°59'60.00"S			27,7500870000	-26,0112090000	1472			
Kromdraai C	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind										
Kromdraai puits	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind			UTM 35S 575034	UTM 35S 7122905	27,7498129744	-26,0107983790	1470			
Porcupine - Bone Cave	Afrique du Sud	Kroomdraai Valley, Krugersdorp, Western T	Cradle of Humankind	27° 7'53.25"E	26° 5'53.04"S			27,1314583333	-26,0980666667	1520	1000	-41	
Rising Star system	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind	27°42'43.00"E	26° 1'13.00"S			27,7127150000	-26,0199450000	1469	4010	-25	z = 1484 m (Herries 2019)
Bolt's cave	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind	27°42'51,4"E	26°1'52,2"S	UTM 35S 571465	UTM 35S 7120670	27,7142750000	-26,0311570000	1503		-56	
Bolt's farm gisement Gomery	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind										
Bolt's farm (Elephant cave)	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind							1509			
Bolt's farm (Cobra cave)	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind							1478			
Bolt's farm (Ave Caves)	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind							1492			
Minnaar's Cave 1 (Van Rooy's cave)	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind	27°44'13"E	26°00'22,1"S			27,7369444444	-26,0061388889	1459			
Minnaar's Cave 2	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind	27°44'15,8"E	26°00'22,5"S			27,7377222222	-26,0062500000	1451			
Old dump-site MVR1	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind	27°44'16,3"E	26°00'24,6"S			27,7378611111	-26,0068333333	1453			
Trench-site MVR 2	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind	27°44'15,8"E	26°00'25,8"S			27,7377222222	-26,0071666667	1457			
Plover's lake	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind	27°46'36.00"E	25°58'39.00"S			27,7767530000	-25,9775680000	1443			
Drimolen	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind	27°45'21,6"E	25°58'8,1"S			27,7559880000	-25,9689090000	1531			
Drimolen Makondo	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind							1543			
Drimolen Main Quarry	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind							1533			
Motsese Cave (Motsesi)	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind	27°49'57.00"E	25°54'30.00"S			27,8309430000	-25,9067230000	1508			
Fault Cave	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind	27°44'8.67"E	26° 0'54.19"S			27,7357416667	-26,0150527778	1472			
Haasgat	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,8338170000	-25,8594220000	1498			
Gondolin	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,8629330000	-25,8307050000	1390			
Wonder Cave (Bat cave)	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind	27°46'17.11"E	25°58'12.69"S			27,7714194444	-25,9701916667	1511	4410	-30	Z = 1511m (Herries 2019)
Malapa	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,8014690000	-25,8949940000	1421			
Gladysvale Cave	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind	27°45'0.00"E	25°53'60.00"S			27,7725160000	-25,8953250000	1433		-37	
Antcave	Afrique du Sud	Cradle of Humankind		27°42'23"E	26°1'37"S			27,7063889000	-26,0269440000	1496		-37	
Horwal Hole	Afrique du Sud	Cradle of Humankind		27°45'5"E	25°58'49"S			27,7513888900	-25,9802777800	1525		-58	
Grobler's North Cave	Afrique du Sud	Transvaal	Cradle of Humankind							1485			
Luleche	Afrique du Sud	Transvaal	Cradle of Humankind					27,8559666660	-25,8331667000	1389			
Gondolin	Afrique du Sud	Transvaal	Cradle of Humankind							1390			
Caracal	Afrique du Sud	Transvaal	Cradle - Hoogland			UTM 35S	UTM 35S						
Vlakplaats Cave 1A	Afrique du Sud	Transvaal	Cradle - Hoogland										
Two Rabbits and an Aloe Cave	Afrique du Sud	Transvaal	Cradle - Hoogland			UTM 35S 600756	UTM 35S 7142991	28,0052854400	-25,8278893000	1515	138	-37	
Hoogland	Afrique du Sud	North of Johannesburg	Cradle - Hoogland			UTM 35S 601071	UTM 35S 7143071	28,0084218196	-25,8271452325	1509			Z = 1493 m (Herries 2019)
Yom Tov	Afrique du Sud	Transvaal	Transvaal	27°42'53,46"E	26°01'14,92"S			27,7148500000	-26,0208111000		748	-107	
Villa Louisa	Afrique du Sud	Cradle of Humankind	Cradle	27°42'43,0"E	26°01'25,5"S			27,7119444444	-26,0237500000				
Makapan cave	Afrique du Sud		Est Transvaal					29,1995777800	-24,1408611100				
~~Makapansgat~~	~~Afrique du Sud~~	~~Transvaal Est~~	~~Est Transvaal~~	~~-29°10'37.00"E~~	~~-24° 9'31.00"S~~	~~29,17694444~~	~~-24,15861111~~						
Mogoto Cave	Afrique du Sud	Est Transvaal	Est Transvaal								1615		
Berlin n°15	Afrique du Sud		Est Transvaal								850		
Bushmen	Afrique du Sud	Free State	Free State	28°26'15,42" E	28°34'28,07" S			28,4376166700	-28,5744638900	1872			
Ettein's Sinkhole	Afrique du Sud	South of Johannesburg Westonria	Transvaal										
Lone Creek Cave	Afrique du Sud	Transvaal	Transvaal								1375	-15	
U Cave	Afrique du Sud	Transvaal	Transvaal								1015	-40	
Makwen's Bathole	Afrique du Sud	Transvaal	Transvaal									-110	
Wonderwerk	Afrique du Sud	Nothern Cape	Nothern Cape	~~-23°33'14.00"E~~	~~-27°50'42.00"S~~								
Wonderwerk	Afrique du Sud	Nothern Cape	Nothern Cape	~~-23°19'53"E~~	~~-27°30'15"S~~								
Wonderwerk	Afrique du Sud	Nothern Cape	Nothern Cape	23°33'14.00"E	27°50'45"S			23,5538888900	-27,8458333300				
Taung	Afrique du Sud	Nothern Cape	Nothern Cape	24°37'59"E	27°37'10"S						1400		malmani dolomite
Slagyster Gat	Afrique du Sud	Nothern Cape	Nothern Cape								241	-16	
Bushmansgat	Afrique du Sud	Nothern Cape	Nothern Cape								1550	-295	
Armageddon Cave	Afrique du Sud	South of Westonaria	Western Transval	27°43'41.41"E	26°23'34.06"S			27,7281694444	-26,3934833333	1698	4093	-259	
Sinkhole cave	Afrique du Sud	South of Westonaria	Western Transval	27°44'33.12"E	26°23'36.54"S			27,7425333333	-26,3934833333	1650			
Nico's I Cave	Afrique du Sud	Western Transval	Western Transval								433	-32	
Nico's II Cave	Afrique du Sud	Western Transval	Western Transval	27°43'22"E	25°59'8"S			27,7227777778	-25,9855555556	1554	2980	-95	
New Cave	Afrique du Sud	Western Transval	Western Transval								1750		
Van Roy's Cave	Afrique du Sud	Western Transval	Western Transval								1585	-27	
Chaos Cave	Afrique du Sud	Carletonville, Far West Rand, Western T	Western Transval								6030	-112	
Wonderfontein	Afrique du Sud	Carletonville, Far West Rand, Western T	Western Transval							1410	9420		
Cristal Cave	Afrique du Sud	Carletonville, Far West Rand, Western T	Western Transval								8025		
Apocalypse pothole	Afrique du Sud	Carletonville, Far West Rand, Western T	Western Transval	27°31'10.72"E	26°23'50.69"S			27,5196444400	-26,3974138900	1692	14000	-85	
Boons Cave	Afrique du Sud	Carletonville, Far West Rand, South We	Western Transval								3350	-41	
NH3 Cave	Afrique du Sud	Western Transvaal	Western Transval								3060	-70	
Westdriefontein	Afrique du Sud	Carletonville, Far West Rand, Western T	Western Transval								5785	-183	
Thabazimbi Cave	Afrique du Sud	Thabazimbi, North Western Transvaal	Western Transval								4480		

Abyss Pot	Afrique du Sud	Northern Transvaal										-96	
Wolkberg	Afrique du Sud	Pietersburg, Nothern Transvaal										-152	
Skilpad grot	Afrique du Sud	Potchefstroom	Noth west	27°11'46,15" E	26°11'9,04" S			27,1961527800	-26,1858444400	1633	508	-63	
Efflux Cave	Afrique du Sud	Cango Valley, Cape	Cango Valley								2450		
Stroomwater Cave	Afrique du Sud	Cango Valley, Cape	Cango Valley								2325		
Cango Cave	Afrique du Sud	Cango Valley, Cape, Oudtshoorn	Cango Valley	22°12'49.52"E	33°23'33.65"S			22,2137555556	-33,3926805556		5275		
Bobbejaan Gat	Afrique du Sud												
Perspiration Pot	Afrique du Sud	Eastern Transvaal	Est Transvaal										
Safreys	Afrique du Sud	Eastern Transvaal	Est Transvaal										
Mbobo, Makulu	Afrique du Sud	Eastern Transvaal	Est Transvaal										
Sudwala Caves, Muggies	Afrique du Sud	Eastern Transvaal	Est Transvaal	25°22'10.98"S	30°42'0.67"E			30,7001861111	-25,3697166667		1800		
Brooklands Depression, Lentegat 1, 2	Afrique du Sud	Eastern Transvaal	Est Transvaal										
Echo Cave	Afrique du Sud	Eastern Transvaal	Est Transvaal					30,6033610000	-24,5619760000		1720		
Magnet Cave	Afrique du Sud	Eastern Transvaal	Est Transvaal								2030		
Ceylon, Waterfall, Moria, Lone Creek,	Afrique du Sud	Eastern Transvaal	Est Transvaal										
Nondescript, Xmas	Afrique du Sud	Eastern Transvaal	Est Transvaal										
Jock's Cave	Afrique du Sud	Eastern Transvaal	Est Transvaal								1935		
Skull, Roberts, Bens, Bets & Hyrax, Sir	Afrique du Sud	Eastern Transvaal	Est Transvaal										
Wet Tiger Creek, Dry Tiger Creek, Dus	Afrique du Sud	Eastern Transvaal	Est Transvaal										
Kranzkllof	Afrique du Sud	Eastern Transvaal	Est Transvaal										
Ledovine	Afrique du Sud	Eastern Transvaal	Est Transvaal										
Vaalhoek Mine, Rockshelter	Afrique du Sud	Eastern Transvaal	Est Transvaal										
Zeppelin	Afrique du Sud	Eastern Transvaal	Est Transvaal										
Slabbert's, Doornhoek	Afrique du Sud	Eastern Transvaal	Est Transvaal										
Koshtra Belom	Afrique du Sud	Eastern Transvaal	Est Transvaal										
Langebaanweg	Afrique du Sud												
Giant's / Bat's / Climber's Cave	Afrique du Sud	Capetown	Péninsule du Cap								1635		
Klasies River Caves	Afrique du Sud		Péninsule du Cap	24°23'24.50"E	34° 6'29.17"S			24,3901388889	-34,1081027778				
Blombos Cave	Afrique du Sud		Bredasdorp	21°13'3.68"E	34°24'50.77"S			21,2176888889	-34,4141027778				
Marble Baths	Afrique du Sud		?	29°23'48.32"E	29° 9'3.65"S			29,3967555556	-29,1510138889				
Boesmansgat (Bushman's hole)	Afrique du Sud	Nothern Cape		23°38'30"E	27°55'18"S			29,3967555600	-27,9216666700				
Boomplaas Cave	Afrique du Sud	Western Cape		22°9'31"E	33°22'14"S			22,1586111100	-33,3705555600				
Border Cave	Afrique du Sud	Kwazuku Natal		31°59'20.00"E	27° 1'33.00"S			31,9888888900	-27,0258333300				
Diepkloof Roch Shelter	Afrique du Sud	Western Cape		18°27'10.00"E	32°23'12.00"S			18,4527777800	-32,2033333300				
Elands Bay Cave	Afrique du Sud	Western Cape		18°19'4.60"E	32°19'3.50"S			18,3179444400	-32,3866666700				
Nelson Bay Cave	Afrique du Sud	Le Cap		23°22'30.00"E	34° 6'10.00"S			23,3750000000	-34,1027777800				
Pinnacle Point	Afrique du Sud	Le Cap		22° 5'22.00"E	34°12'28.00"S			22,0894444400	-34,2077777800				
Sibudu Cave	Afrique du Sud	Kwazuku Natal		31° 5'9.22"E	29°31'21.46"S			31,0858944400	-29,5226277800				
Rose Cottage Cave	Afrique du Sud	Free State		27°27'16.78"E	29°12'25.69"S			27,4546611100	-29,2071361100				
Komati Springs	Afrique du Sud											-154	
Wondergat	Afrique du Sud											-104	
Knocking shop	Afrique du Sud												
Nick Cave	Afrique du Sud												
Mapungubwe	Afrique du Sud												
River passage	Afrique du Sud										314	-52	
Lost sea (lac souterrain)	Afrique du Sud												
Aikab (lac souterrain)	Afrique du Sud												
Sishen Mine Cave (lac souterrain)	Afrique du Sud												
Shwazkopf Cave (lac souterrain)	Afrique du Sud										160	-50	
Wynberg	Afrique du Sud												
Serunecjar	Afrique du Sud										1841	-66	
Luiperd mine 1	Afrique du Sud										788	-52	
Luiperd mine 2	Afrique du Sud												
Luiperd mine 3	Afrique du Sud										191	-20	
Luiperd mine 4	Afrique du Sud										313	-3	
Rapunzel tower	Afrique du Sud												
Divad Cave	Afrique du Sud												
Hyaena	Afrique du Sud												
Bat cave (Makapan)	Afrique du Sud	Makapans		29°11'42"	24°08'16"					1479			
Makapan cave (Historic)	Afrique du Sud	Makapans		29°11'59"	24°08'25"					1493	200		
Ficus	Afrique du Sud	Makapans											
Peppercorn cave	Afrique du Sud	Makapans											
Limeworks caves	Afrique du Sud	Makapans											
Abyss Pot	Afrique du Sud	Makapans											
Lusitania Pot (Portugal cave)	Afrique du Sud	Makapans											
Chocolate Pt et depression Mogoto	Afrique du Sud	Makapans											
Buffalo	Afrique du Sud	Makapans											
Rainbow	Afrique du Sud	Makapans											
Cave of Hearts	Afrique du Sud	Makapans											
Coldair	Afrique du Sud	Makapans											
Gutentight	Afrique du Sud	Makapans											
Murzel's	Afrique du Sud	Makapans											

Gatkop	Afrique du Sud			27°39'8.4"E	24°37'5.2"S			27,6523333000	-24,6181111100				
Waypoint 160	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7137700000	-26,0338350000				
Brad Pit A and B	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7122120000	-26,0340840000				
U Cave	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7150350000	-26,0302940000				
Alcephaline Site	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7136190000	-26,0336590000				
Franky's Cave	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7101880000	-26,0288950000				
Carnivore Pit	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7110420000	-26,0327360000				
Dom's Site	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7134940000	-26,0339020000				
Machine Cave	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7112670000	-26,0351630000				
Pit 1 (Kraal Pit)	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7174840000	-26,0287590000				
Pit 2 (Kiln Cave)	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7173990000	-26,0280340000				
Pit 3 (KB Cave)	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7170730000	-26,0281550000				
Pit 4 (Garage Ravine)	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7155720000	-26,0319270000				
Pit 5 (Smith Cave)	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7162440000	-26,0288630000				
Pit 6 (Baboon Cave)	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7113100000	-26,0327940000				
Pit 7 (Elephant Cave)	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7128290000	-26,0318960000				
Pit 8	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7163240000	-26,0292020000				
Pit 9	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7172270000	-26,0285410000				
Bushman Outcrop	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7106680000	-26,0324730000				
Pit 10	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7174170000	-26,0279040000				
Pit 11	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7150190000	-26,0296940000				
Pit 12	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7142040000	-26,0303620000				
Pit 12B	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7131150000	-26,0308250000				
Pit 13	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7161700000	-26,0288090000				
Pit 14 (Bench mark Pit)	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7161240000	-26,0290390000				
Pit 15	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7160390000	-26,0291650000				
Pit 16 (Equine Pit)	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7104390000	-26,0326920000				
Pit 23	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7129940000	-26,0347500000				
Tit Hill	Afrique du Sud	Krugersdorp, Western Transvaal	Cradle of Humankind					27,7126230000	-26,0347940000				
Zoovoorbij Cave (Keimoes : Bushmanl	Afrique du Sud	Nothern Cape						20,9783333300	-28,6450000000				
Brits	Afrique du Sud							27,8159000000	-25,5999000000				
Selo	Afrique du Sud							27,9106000000	-25,6092000000				
Indaba	Afrique du Sud							29,2642000000	-25,2906000000				
Barite	Afrique du Sud							29,4772000000	-25,5383000000				
Bats	Afrique du Sud		Cradle of Humankind	E27°44,089'	S26°02,008'			27,7348060000	-26,0334600000				
Mapoch	Afrique du Sud							29,9581000000	-25,1762000000				
Limequarry cave (Goldfields)	Afrique du Sud			E27°24' 47,772"	S26°17' 26,015"			27,4130555556	-26,2888889000				
Jaws Cave	Afrique du Sud			E27°10' 54,696"	S26°29' 4,92"			27,1818600000	-26,4844444000				
Rietpan Cave	Afrique du Sud			E26°36' 15,80"	S25°59' 35,699"			26,6041666667	-25,9930556000				
Hut Caves (Deelkraal/Lepalong caves)	Afrique du Sud			E27°14' 13,92"	S26°28' 35,29"			27,2372000000	-26,4763889000				
Blue lagoon	Afrique du Sud										7000		
Dart Pinnacle Deposits	Afrique du Sud	Ghaap		E 24 37. 990′	S 27 37. 215′			24,6331666667	-27,6202500000	1145			
Hrdlicka's deposits	Afrique du Sud	Ghaap		E 24 38. 021′	S 27 37. 165′			24,6333333333	-27,6194167000	1147			
Tobias Pinnacle deposits	Afrique du Sud	Ghaap		E 24 37. 906′	S 27 37.215′			24,6317666667	-27,6202500000	1164			
Berger Cave Complex	Afrique du Sud	Ghaap		E 24 37. 841′	S 27 37.155′			24,6306833333	-27,6192500000	1172			
Lucky Moon Cave	Afrique du Sud	Ghaap		E 24 37, 818′	S 27 37. 068′			24,6303000000	-27,6178000000	1158			
LSN Cave	Afrique du Sud	Ghaap		E 24 37. 812′	S 27 37. 085′			24,6302000000	-27,6180833000	1148			
Innominate Cave	Afrique du Sud	Ghaap		E 27 37. 823′	S 27 37. 056′			24,6303833333	-27,6176000000	1153			
Quinney Cave	Afrique du Sud	Ghaap		E 24 37. 855′	S 27 37. 032′			24,6309166667	-27,6172000000	1151			
Cut-through Alley	Afrique du Sud	Ghaap		E 24 37.868′	S 27 37.030′			24,6311333333	-27,6171667000	1147			
Black-Earth Cave	Afrique du Sud	Ghaap		E 24 37.950	S 27 37.025			24,6325000000	-27,6170833000	1158			
Peabody's equus Site	Afrique du Sud	Ghaap		E 24 37.800′	S 27 36.954′			24,6300000000	-27,6159000000	1146			
Equus Cave	Afrique du Sud	Ghaap		E 24 37.775′	S 27 36.936′			24,6295833333	-27,6156000000	1147			
Blom Cave	Afrique du Sud	Ghaap		E 24 37.815′	S 27 36.939′			24,6302500000	-27,6156500000	1150			
Satan Cave	Afrique du Sud	Ghaap		E 24 37.779′	S 27 36.845′			24,6296500000	-27,6140833000	1158			
Alcove Cave	Afrique du Sud	Ghaap		E 24 37.718′	S 27 36.762′			24,6286333333	-27,6127000000	1150			
Oxland large mammal site	Afrique du Sud	Ghaap		E 24 37.588′	S 27 36.782′			24,6264666667	-27,6130333000	1179			
Acacia Cave	Afrique du Sud	Ghaap		E 24 37.843′	S 27 37.155′	24°37'50,58"	27°37'9,303	24,6307170000	-27,6192500000	1162			
Witkrans Cave	Afrique du Sud	Ghaap											
Powerhouse Cave	Afrique du Sud	Ghaap											
Tobias Cave	Afrique du Sud	Ghaap											
Ochre Cave	Afrique du Sud	Ghaap											
Mine Delmas Silica	Afrique du Sud							28,7521600000	-25,9939200000				
~~Gruta 1 (Caverna VIII)~~	~~Mozambique~~	~~Buchane~~	~~Buchane~~	~~E034°51'53,9''~~	~~S21°40'20,1''~~					~~66~~	~~>50~~		brèches pédo sur diaclases, niveau
Gruta 1 (Caverna VIII)	Mozambique	Buchane	Buchane	E034°51'52,5060''	S21°40'17,0965''			34,8645850000	-21,6714156900	63	>50		
~~Gruta 2 (Caverna VII/VIIa)~~	~~Mozambique~~	~~Buchane~~	~~Buchane~~	~~E034°51'53,9''~~	~~S21°40'20,1''~~					~~66~~	~~130~~		
Gruta 2 (Caverna VII/VIIa)	Mozambique	Buchane	Buchane	E034°51'50,5901''	S21°40'18,1654''			34,8640528100	-21,6717126100	45	130		
~~Gruta 3 (Caverna VI/VIa/II)~~	~~Mozambique~~	~~Buchane~~	~~Buchane~~	~~E034°51'48,1''~~	~~S21°40'15,0''~~					~~60~~	~~186~~		
Gruta 5 (Caverna III)	Mozambique	Buchane	Buchane	E034°51'49,5929''	S21°40'14,6582''			34,8637758100	-21,6707383800	57	59		
~~Gruta 4 (Caverna V)~~	~~Mozambique~~	~~Buchane~~	~~Buchane~~	~~E034°51'48,1''~~	~~S21°40'15,0''~~					~~60~~	~~9~~		
~~Gruta 5 (Caverna III)~~	~~Mozambique~~	~~Buchane~~	~~Buchane~~	~~E034°51'48,1''~~	~~S21°40'15,0''~~					~~60~~	~~59~~		
~~Gruta 6 (Caverna IV)~~	~~Mozambique~~	~~Buchane~~	~~Buchane~~	~~E034°51'48,1''~~	~~S21°40'15,0''~~					~~60~~	~~8~~		

~~Gruta Inhaluele~~	~~Mozambique~~	~~Buchane~~	~~Buchane~~	~~E034°46'47,9''~~	~~S21°41'48,7''~~					~~82~~	~~142~~		
~~Inhaluele~~	~~Mozambique~~	~~Buchane~~	~~Buchane~~	~~E034°46'47,8686''~~	~~S21°41'48,9649''~~					~~96~~	~~142~~		~~bcp de CO2, brèches~~
Caverna Cagi (Caverna X)	~~Mozambique~~	~~Buchane~~	~~Buchane~~	~~E034°46'48,0''~~	~~S21°40'10,9''~~			34,7799635000	-21,6969346900	~~66~~			~~pt gps de Laumanns faux, en plus~~
Gruta 7 (Gruta da Cobra)	Mozambique	Buchane	Buchane	E034°51'10,7''	S21°40'04,1''			34,8529722000	-21,6678056000	54	>76		
Gruta do Embondeiro	Mozambique	Buchane	Buchane	E034°53'18,3''	S21°38'12,3''			34,8884167000	-21,6367500000	58	135		
Magochene	Mozambique	Buchane	Buchane	34°52'0.00"E	21°22'0.00"S			34,8666666667	-21,3666666667				
Maconjo 1	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°06'22,6" E	19°56'35,4" S			34,1062778000	-19,9431667000	100	230	-13	A voir. Roussettes et biocorrosion
Maconjo 2	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°06'22,6" E	19°56'35,4" S			34,1062778000	-19,9431667000	100	57	-8	Pas de topo.
Muchakaima1	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°08'28,5" E	19°56'42,2" S			34,1412500000	-19,9458889000	70	42	-13	19,4°. Pas de chauve souris. Beau
Muchakaima2	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°08'39,9" E	19°56'24,6" S			34,1444167000	-19,9401667000	70	161		
Muchakaima3	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°08'39,9" E	19°56'24,6" S			34,1444167000	-19,9401667000	70	12		Puits de 10m et vaste sale à
Muchakaima4	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°08'39,9" E	19°56'24,6" S			34,1444167000	-19,9401667000	70	12		
Muchakaima5	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°08'49,1" E	19°54'41,8" S			34,1469722000	-19,9116111000	90	667	-15	Erreur en X : 19°56 ? Plusieurs
Muchakaima6	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°08'16,2" E	19°56'06.7" S			34,1378333000	-19,9351944000	70	64	-15,5	Chauves souris. Brèche à
Dimba1	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°07'46,1" E	19°52'49,9" S			34,1294722000	-19,8805278000	90	84	-9,5	Araignées. T° : 19,8°.
Dimba2	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°07'47,4" E	19°52'46,8" S			34,1298333000	-19,8796667000	90	866	-12	Cavité labyrinthique à voir ! T° :
Dimba3	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°08'16,1" E	19°52'55,0" S			34,1378056000	-19,8819444000	90	40	-12,5	Chauves souris et roof pockets.
Dimba4	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°08'16,4" E	19°52'38,7" S			34,1378889000	-19,8774167000	90	15	-5	
Dimba5 (abri)	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°08'16,4" E	19°52'38,7" S			34,1378888889	-19,8774166667	90	5	-5	
Dimba6	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°07'55,2" E	19°52'38,1" S			34,1320000000	-19,8772500000	90	140	-5	Ossements actuels. T° : 21,2°.
Goonde1	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°07'35,8" E	19°57'37,1" S			34,1266111000	-19,9603056000	80	164	-12	Beaucoup de brèches ! « Solution
Goonde2	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°07'40,9" E	19°57'39,5" S			34,1280278000	-19,9609722000	80	10	-4	
Goonde3	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°07'40,9" E	19°57'39,5" S			34,1280278000	-19,9603056000	80	131	-10,5	T : 21,3°. Pas de chauve souris.
Goonde4	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°07'42,5" E	19°57'30,3" S			34,1284722000	-19,9584167000	80	8	-2	
Goonde5	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°07'40,2" E	19°57'27,9" S			34,1278333000	-19,9577500000	80	16	-16	Coordonnées de la topo car
Goonde6	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°07'40,2" E	19°57'27,9" S			34,1278333000	-19,9577500000	80	7	-6,5	Coordonnées de la topo car
Boca complex Cave 1 2 ou 3?	Mozambique	Buzi north	Sofala North	34°05'99,0" E	19°59'88,0" S			34,1108333000	-20,0077778000	220	717		
Boca complex Cave 2	Mozambique	Buzi north	Sofala North										
Boca complex Cave 3	Mozambique	Buzi north	Sofala North										
Mujanga	Mozambique		Sofala North	34°07'55,2" E	19°57'38,4" S			34,1320000000	-19,9606667000	60	46	-8	Importante corrosion ! Pas de
Mutanda	Mozambique	Buzi North	Sofala North	34°08'35,1" E	19°54'26,6" S			34,1430833000	-19,9073889000	85	68	-18,5	Beaucoup de chauve souris. Suite
Mutanda Francisco n°1	Mozambique		Sofala North	34°07'36,6" E	19°55'13,9" S			34,1268333000	-19,9205278000	120	57	-18	Ancienne exploitation de guano.
Mutanda Francisco n°2	Mozambique		Sofala North	34°07'36,6" E	19°55'13,9" S			34,1268333000	-19,9205278000	120	35		Quasiment pas de guano ni de
Mutanda Francisco n°3	Mozambique		Sofala North	34°07'36,6" E	19°55'13,9" S			34,1268333000	-19,9205278000	120	96	-18,5	
Mutanda Francisco n°4	Mozambique		Sofala North	34°07'56,3" E	19°54'39,3" S			34,1323056000	-19,9109167000	100	6		Erreur : pas en 19°55'13,9" et
Mutanda Francisco n°5	Mozambique		Sofala North	34°07'36,6" E	19°55'13,9" S			34,1323056000	-19,9109167000	120	24	-10	
Mutanda Francisco n°6	Mozambique		Sofala North	34°07'36,6" E	19°55'13,9" S			34,1323056000	-19,9109167000	120	33	-22	Co2 au sol.
Mutanda Francisco n°7	Mozambique		Sofala North	34°07'36,6" E	19°55'13,9" S			34,1323056000	-19,9109167000	120	10	-7,5	
Mutanda Francisco n°8	Mozambique		Sofala North	34°07'36,6" E	19°55'13,9" S			34,1323056000	-19,9109167000	120	16	-5	
Mutanda Francisco n°9	Mozambique		Sofala North	34°07'36,6" E	19°55'13,9" S			34,1323056000	-19,9109167000	120	10	-8	
Mutanda Francisco n°10	Mozambique		Sofala North	34°07'36,6" E	19°55'13,9" S			34,1323056000	-19,9109167000	120	14	-5	
Mutanda Francisco n°11	Mozambique		Sofala North	34°07'36,6" E	19°55'13,9" S			34,1323056000	-19,9109167000	120	11	-11	
Nhanbue ponor	Mozambique	Buzi	Sofala North	34°08'59,5" E	19°53'49,3" S			34,1498611000	-19,8970278000	85	51	-0,429	Température de 27 à 32° à cause
Nyaboa Caves	Mozambique	Paulo	Sofala South	33°37'0.00"E	20°22'0.00"S			33,6166666667	-20,3666666667				
Estaguinha area	Mozambique	Buzi South											
Ninga Cupicua (Cereal Hideout)	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°52'00"	S18°33'50"			34,8666667000	-18,5638889000	195	4		
Codzo River Cave	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°52'00"	S18°33'53"			34,8813889000	-18,5647222000	220	940		
Eastern Codzo Cave	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°52'57"	S18°33'10"			34,8825000000	-18,5527778000	230	40		
Western Codzo Cave (Laumanns)	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°52'49"	S18°32'59"			34,8802778000	-18,5469444000	230	612		
Smaller Eastern Codzo Cave	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°52'55"	S18°33'10"					230	156		pb coordonnées
Upper codzo River Cave	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°52'00"	S18°33'48"			34,8666667000	-18,5633333000	220	40		
Upper Nhagutua Cave	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)											
Ninga Miriango	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°55'08"	S18°32'28"			34,9188889000	-18,5411111000	200	610		
Ninja Manguenje	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°54'54"	S18°30'50"			34,9150000000	-18,5138889000	220	188		
Nkoto Rockshelter	Mozambique		Cheringoma	34°48'30,8"	18°38'5,8"			34,8135277778	-18,6349444000	201			
Nhagutua (Antigo Posto do PNG)	Mozambique		Cheringoma	34°48'48,7"	18°38'36,7"			34,8135277778	-18,6435278000	224			
Kundwe Nhangona	Mozambique		Cheringoma	34°46'37,3"	18°41'30,5"			34,7770277778	-18,6918056000	210			
Kundwe	Mozambique		Cheringoma	34°46'27,7"	18°41'26,9"			34,7743611111	-18,6908056000	204			
Kundwe Machibombo	Mozambique		Cheringoma	34°46'23,8"	18°41'19,7"			34,7732777778	-18,6888056000	197			
Kundwe levallois core	Mozambique		Cheringoma	34°46'49,8"	18°41'35,1"			34,7805000000	-18,6930833000	208			
Maziquidze 1	Mozambique		Cheringoma	34°45'11''	18°46'24''			34,7530555556	-18,7733333000	188			
Maziquidze 2	Mozambique		Cheringoma	34°45'16,9"	18°45'51,3"			34,7546944444	-18,7642500000	210			
Maziquidze 3	Mozambique		Cheringoma	34°45'35,1"	18°45'25,5"			34,7597500000	-18,7570833000	210			
Maziquidze 4	Mozambique		Cheringoma	34°45'38,9"	18°44'51,4'			34,7608055556	-18,7476111000	182			
Muanza carriere	Mozambique		Cheringoma	34°44'14,1"	18°48'58,3"			34,7372500000	-18,8161944000	153			
Muanza Konga Cave	Mozambique		Cheringoma	34°41'02,8"	18°48'46,3"			34,6841111111	-18,8128611000	125			
Muanza Nhamatica	Mozambique		Cheringoma	34°40'21,6"	18°46'44,7"			34,6726666667	-18,7790833000	90			
Muanza Pedreira Cave	Mozambique		Cheringoma	34°44'11,8"	18°48'41,9"			34,7366111111	-18,8116389000	125			
Muaredze 1	Mozambique		Cheringoma	34°36'17''	18°57'06,9''			34,6047222222	-18,9519167000	50			
Muaredze 2	Mozambique		Cheringoma	34°36'26''	18°57'06,1''			34,6072222222	-18,9516944000	70			
Muaredze Ndendera Cave	Mozambique												
Nhamissimbiti	Mozambique		Cheringoma	34ø53'33,2"	18ø31'56,6''			34,8925555556	-18,5323889000	200			

Nhamababwa	Mozambique		Cheringoma	34ø52'43,7''	18ø32'58,7''			34,8788055556	-18,5496389000				
Nhangona	Mozambique		Cheringoma	34ø46'37,3''	18ø41'30,5''			34,7770277778	-18,6918056000				
Pedreira Cave	Mozambique		Cheringoma	34°44'11,8"E	18°48'41,9"S			34,7366111111	-18,8116389000	125			
Ndendera in Steinbruch 2011	Mozambique												
Konga mine MSA	Mozambique		Cheringoma	34°41'02,8"E	18°48'46,3"S			34,6841111111	-18,8128611000	125			
Nhamasimbili	Mozambique		Cheringoma	34°53'33,2"E	18°31'56,6"S			34,8925000000	-18,5322222000				
travertine in limestone gorge	Mozambique		Cheringoma	34°36'47,1"E	18°57'16,8"S			34,6000000000	-18,9546667000				
Larger Umbira Cave	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E035°00'52''	S18°20'35''			35,0144444000	-18,3430556000	180	106		
Smaller Umbira Cave	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	35° 0'51.97"E	18°20'28.93"S			35,0144361111	-18,8128611111				
Ninja Rego Swere	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°58'11''	S18°22'22''			34,9697222000	-18,3727778000	270	101		
Ninga Tombo Apale	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°58'00''	S18°22'55''			34,9666667000	-18,3819444000	270	41		
Tombo Apale Cave 2	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°58'00''	S18°23'04''			34,9666667000	-18,3844444000	270	23		
Tombo Apale Cave 3	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°57'59''	S18°22'55''			34,9663889000	-18,3819444000	270	18		
Tombo Apale Cave 4	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°57'59''	S18°22'40''			34,9663889000	-18,3777778000	270	47		
Ninga Niamagingiri	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°58'22''	S18°22'29''			34,9727778000	-18,3747222000	230	165		
Ninga Macie (Cementary Cave)	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°58'46''	S18°22'21''			34,9794444000	-18,3725000000	260	5		
Ninga Niamabawa	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°52'00''	S18°33'40''			34,8666667000	-18,5611111000	170	130		
Ninga Nhagutua	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°49'26''	S18°38'37''			34,8238889000	-18,6436111000	210	170		
Mazamba Arch	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°52'00''	S18°33'50''			34,8666667000	-18,5638889000	220	6		
Mazamba Cave no.1 à 9	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°52'00''	S18°33'50''			34,8666667000	-18,5638889000	220	6		
Mazamba Cave no.2	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°52'00''	S18°33'50''					220	18		
Mazamba Cave no.3	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°52'00''	S18°33'50''					220	24		
Mazamba Cave no.4	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°52'00''	S18°33'50''					220	5		
Mazamba Cave no.5	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°52'00''	S18°33'50''					220	5		
Mazamba Cave no.6	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°52'00''	S18°33'50''					220	5		
Mazamba Cave no.7	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°52'00''	S18°33'50''					220	5		
Mazamba Cave no.8	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°52'00''	S18°33'50''					220	19		
Mazamba Cave no.9	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°52'00''	S18°33'50''					220	15		
Mazamba Pot	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)	Cheringoma	E034°52'00''	S18°33'50''					220	12		
"Quarry Cave"	Mozambique	Cheringoma (Sofala province)											
Pwanda n°1	Mozambique		Sofala North	34°08'16,2" E	19°54'45,7" S			34,1378333000	-19,8626944000	65	47	-12	Erreur en X : 19°51' sur la topo ?
Pwanda n°2	Mozambique		Sofala North	34°08'32,9" E	19°51'52,8" S			34,1424722000	-19,8646667000	65	9	-9	Très corrodée.
Pwanda n°3	Mozambique		Sofala North	34°08'35,2" E	19°54'55,5" S			34,1431111000	-19,8654167000	65	9	-5	Erreur en X : 19°51'
Pwanda n°4	Mozambique		Sofala North	34°08'17,3" E	19°51'20,9" S			34,1381389000	-19,8558056000	75	28	-8	
Pwanda n°5	Mozambique		Sofala North	34°08'19,0" E	19°51'08,4" S			34,1386111000	-19,8523333000	75	10	-4	
Pwanda n°6	Mozambique		Sofala North	34°08'16,8" E	19°51'09,1" S			34,1380000000	-19,8525278000	75	8	-3,5	
Xonondo 1	Mozambique		Sofala North	34°07'33,6" E	19°55'20,8" S			34,1260000000	-19,9224444000	120	45	-12	Ancienne exploitation de guano.
Xonondo 2	Mozambique		Sofala North	34°07'33,6" E	19°55'20,8" S			34,1260000000	-19,9224444000	120	23	-12,8	
Xonondo 3	Mozambique		Sofala North	34°07'33,6" E	19°55'20,8" S			34,1260000000	-19,9224444000	120	12	-4,5	
Pequena Xonondo n°1	Mozambique		Sofala North	34°07'31,1" E	19°55'25,3" S			34,1253056000	-19,9236944000	120	27	-16,7	No bats.
Pequena Xonondo n°2	Mozambique		Sofala North	34°07'31,1" E	19°55'252,3" S			34,1253056000	-19,9236944000	120	23	-14,8	No bats.
Pequena Xonondo n°3	Mozambique		Sofala North	34°07'31,1" E	19°55'25,3" S			34,1253056000	-19,9236944000	120	20	-12,8	No bats. Dépôts fins au sol.
Pequena Xonondo n°4	Mozambique		Sofala North	34°07'31,1" E	19°55'252,3" S			34,1253056000	-19,9236944000	120	17	-10,4	No bats.
Pequena Xonondo n°5	Mozambique		Sofala North	34°07'31,1" E	19°55'25,3" S			34,1253056000	-19,9236944000	120	32	-20,1	No bats.
Pequena Xonondo n°6	Mozambique		Sofala North	34°07'31,1" E	19°55'25,3" S			34,1253056000	-19,9236944000	120	19	-12,1	No bats.
Pequena Xonondo n°7	Mozambique		Sofala North	34°07'31,1" E	19°55'25,3" S			34,1253056000	-19,9236944000	120	5	-3	No bats.
Pequena Xonondo n°8	Mozambique		Sofala North	34°07'29,3" E	19°55'34,2" S			34,1248056000	-19,9261667000	120	42	-8	
Pequena Xonondo n°9	Mozambique		Sofala North	34°07'33,8" E	19°55'31,6" S			34,1260556000	-19,9254444000	120	9	-5	
Pequena Xonondo n°10	Mozambique		Sofala North	34°07'33,8" E	19°55'31,6" S			34,1260556000	-19,9254444000	120	8	-7,3	
Pequena Xonondo n°11	Mozambique		Sofala North	34°07'30,1" E	19°55'26,1" S			34,1250278000	-19,9239167000	120	20	-5,5	
Kunangua n°1	Mozambique		Sofala North	34°07'35,5" E	19°55'35,1" S			34,1265278000	-19,9264167000	120	114	-25,5	Ancienne exploitation de guano.
Kunuanga n°2	Mozambique		Sofala North	34°07'36,3" E	19°55'36,1" S			34,1267500000	-19,9266944000	120	30	-18,3	A côté, puits de 10 m non
Dombo 1	Mozambique		Sofala North	E034°04'51,3''	S19°54'09,2''			34,0809167000	-19,9025556000	100	253		
Dombo 2	Mozambique		Sofala North	E034°04'06,2''	S19°55'02,2''			34,0683889000	-19,9172778000	110	53		
Chipayike 1	Mozambique		Sofala North	34°06'35,5" E	19°57'04,3" S			34,1098611000	-19,9511944000	70	115	-3,25	Chauves souris et calcite.
Chipayike 2	Mozambique		Sofala North	34°06'24,3" E	19°57'04,1" S			34,1098611000	-19,9511944000	70	214	-8	Poteries anciennes. Brèches et
Mutenda Ndauya	Mozambique		Sofala North	34°07'27,5" E	19°55'18,6" S			34,1243056000	-19,9218333000	120	196	-26	Ancienne exploitation de guano.
Gruta Maruluwire	Mozambique		Sofala North	34°07'21,0" E	19°57'68,0" S			34,1225000000	-19,9688889000		114		Pas de topo. A voir !
Ngalue	Mozambique		Niassa	35°11'54,12"E	12°51'31,02"S	35°7'8.4''E	12°30'54''S	35,1983666667	-12,8586166667				
Nhanbue Ponor	Mozambique												
Morrugusu	Mozambique												
Paléokarst de Pitao	Malawi	Pitao	Pitao					33,0441400000	-16,9254550000	556			avec bauxite
petites cavités impénétrables sur esca	Malawi	Kirk Range	Kirk Range	E34°34'9,33"	S15°18'43,84"			34,5692583333	-15,3121777778				trois cavités impénétrables sur un
petites cavités impénétrables bc	Malawi	Kirk Range	Kirk Range					34,5694450000	-15,3120270000	1500			
petite cavité remplissage récent, Laur	Malawi	Kirk Range	Kirk Range	E34°33'58,11"	S15°18'14,35"			34,5661416667	-15,3039861111				petite cavité avec remplissage réc
grotte	Malawi	Kirk Range	Kirk Range					34,5843080000	-15,2970600000	1521			
Swallow Hole - Chilala - cavité dans m	Malawi	Kirk Range	Kirk Range	E34°35'3,93"	S15°17'49,41"			34,5844250000	-15,2970583333	1521			silicieuse, peu de vieux sédiments,
~~Swallow Hole - Chilala cave - Nsecula v~~	~~Malawi~~	~~Kirk Range~~	~~Kirk Range~~	~~E34°35'30,38"~~	~~S15°17'49,99"~~								~~les comptes-rendues coloniaux~~
soutirage dans végétation (pas visité)	Malawi	Kirk Range	Kirk Range	E34°34'47,26"	S15°18'12,85"			34,5797944444	-15,3035694444				pas précis
grotte sur massif ? visible depuis la ro	Malawi	Kirk Range	Kirk Range	E34°32'39,6254"	S14°37'38,9748"			34,5443043889	-14,6274930000	1472	?		non visitée
~~Kuhhula cave Chinkjovi village~~	~~Malawi~~	~~Kirk Range~~	~~Kirk Range~~	~~E34°35'5,31"~~	~~S15°17'40,30"~~								
travertin, eau, sur fissure	Malawi	Kirk Range	Kirk Range					34,5697720000	-15,3120160000	1505			

Changalumi Pothole	Malawi	Zomba	Zomba	E35°13'16,95"	S15°23'12,32"			35,2213750000	-15,3867555600	948			non visitée car aujourd'hui caserne
Chingwe's Hole (pas calcaire)	Malawi	Zomba plateau (Souther Malawi)	Zomba	E35°16'36,37"	S15°19'43,48"			35,2767694400	-15,3287444400	1899		-15	
~~Chingwe's Hole (pas calcaire)~~	~~Malawi~~	~~Zomba plateau (Souther Malawi)~~	~~Zomba~~	~~E35°11'~~	~~S15°24'~~					~~1900~~		~~-15~~	
~~Blue Cave (natural entrance)~~	~~Botswana~~	~~Koanaka Hills, NW Botswana~~	~~K3~~	~~21°4'49,69" E~~	~~20°9'18,06" S~~	~~508409,2559~~	~~7771362,372~~						
~~Blue cave~~	~~Botswana~~	~~Koanaka Hills, NW Botswana~~	~~K3~~	~~21°21'15,3" E~~	~~20°09'17,5" S~~								
Blue cave	Botswana	~~Koanaka Hills, NW Botswana~~	K3	21°4'49,13" E	20°9'17,788" S	508393,016	7771370,753	21,0803140000	-20,1549410000	1068	1800	-40	Topo Ritter 1995
~~Bone cave~~	~~Botswana~~	~~Koanaka Hills, NW Botswana~~	~~K2~~	~~E20°9,45~~							460	-44	
~~Bone Cave (natural entrance)~~	~~Botswana~~	~~Koanaka Hills, NW Botswana~~	~~K2~~	~~21°11'42,85" E~~	~~20°9'26,63" S~~	~~520402,3723~~	~~7771088,991~~						
~~Bone cave~~	~~Botswana~~	~~Koanaka Hills, NW Botswana~~	~~K2~~	~~21°11'42,8" E~~	~~20°09'27,2" S~~	~~520400,9003~~	~~7771071,466~~			~~1048~~			
Bone cave	Botswana	Koanaka Hills, NW Botswana	K2	21°11'42,817" E	20°09'27,338" S	520401,39	7771067,216	21,1952270000	-20,1575940000	1066	460	-44	+ topodroid 2022 Bruxelles + 3D 2
Mongongo - Diviners - Nqumtshaa - G	Botswana	Koanaka Hills, NW Botswana	K1								2341	-59	topo : R.Ellis avril 2012
~~Mongongo~~	~~Botswana~~	~~Koanaka Hills, NW Botswana~~	~~K1~~	~~21°12'27,0" E~~	~~20°08'47,2" S~~	~~521685,4776~~	~~7772299,505~~						
Mongongo Cave (tourist borehole entran	Botswana	Koanaka Hills, NW Botswana	K1	21°12'27,10" E	20°8'46,97" S	521688,3894	7772306,567	21,2075277800	-20,1463805600	1060			
~~Drotsky's Cave~~	~~Botswana~~	~~Kwihaba, Ngamiland~~	~~Gcwihaba G1~~	~~21°22'E~~	~~20°07'S~~						~~1200~~		
K2 Cave (small cave natural entrance)	Botswana	Koanaka Hills, NW Botswana	K2	21°11'39,89" E	20°9'31,47" S	520316,275	7770940,312	21,1944138900	-20,1587416700	1049			
entrée faille large 2 m	Botswana	Koanaka Hills, NW Botswana	K2	21°11'40,33" E	20°9'32,033" S	520329,015	7770922,997	21,1945360000	-20,1588980000	1047			
Fossil bones and palaeo cave floors K2	Botswana	Koanaka Hills, NW Botswana	K2	21°11'41,82" E	20°9'31,61" S	520372,2938	7770935,943	21,1949500000	-20,1587805600	1052			
Fossil bones and palaeo cave floors K1	Botswana	Koanaka Hills, NW Botswana	K1	21°12'24,16" E	20°8'51,09" S	521602,8832	7772180,026	21,2067111100	-20,1475250000	1046			
Diviner's cave (tourist borehole entra	Botswana	Koanaka Hills, NW Botswana	K1	21°12'36,65" E	20°8'32,09" S	521966,2057	7772763,623	21,2101805600	-20,1422472200	1074	2341	-59	topo : R. Ellis, G.Jacobs, O.Ledimo,
~~Diviner's~~	~~Botswana~~	~~Koanaka Hills, NW Botswana~~	~~K1~~	~~21°12'36,5" E~~	~~20°08'32,2" S~~	~~521961,8468~~	~~7772760,245~~						
~~!Wadoum Cave (natural entrance)~~	~~Botswana~~	Gcwihaba Hills, NW Botswana	Gcwihaba	~~21°21'15,39" E~~	~~20°0'55,17" S~~	~~537055,6113~~	~~7786783,624~~						
~~Wa!Doum~~	~~Botswana~~	~~Gcwihaba Hills, NW Botswana~~	~~Gcwihaba~~	~~21°04'49,2" E~~	~~20°00'55,1" S~~								
Wadoum	Botswana	~~Gcwihaba Hills, NW Botswana~~	~~Gcwihaba~~	21°21'15,231" E	20°0'55,093" S	537051	7786786	21,3542308600	-20,0153036200	1018	850	-25 (pu	Topo : RITTER R.C., GARNER R. A.
~~Wadoum Cave~~	~~Botswana~~	~~Gcwihaba Hills, NW Botswana~~	~~Gcwihaba~~			~~UTM34 537140~~	~~7786845~~						
Gcwihaba Cave (North entrance)	Botswana	Gcwihaba Hills, NW Botswana	G1	21°21'18,34" E	20°1'18,48" S	537139,8022	7786066,907	21,3550944400	-20,0218000000	1024	1200	-25	+ topodroid 2022 Bruxelles + 3D 2
Gcwihaba Cave (South entrance)	Botswana	Gcwihaba Hills, NW Botswana	G1	21°21'15,83" E	20°1'27,14" S	537066,3143	7785800,858	21,3543972200	-20,0242055600	1028			
~~Gcwihaba~~	~~Botswana~~		~~Gcwihaba hill 1~~	~~21°21'25,8" E~~	~~20°01'45,6" S~~	~~537354,7613~~	~~7785232,796~~						
Aven à brèches south entrance (Pickfo	Botswana					537096	7785981	21,3546770000	-20,0225770000				
Dimapo Cave (tourist borehole entrance)	Botswana			21°21'32,11" E	20°1'14,24" S	537540,1476	7786196,389	21,3589194400	-20,0206222200	1030	700	-40	Topo : R.Ellis, G. Jacobs, A. Jacobs,
Fossil cave	Botswana			21°12'29,9" E	20°8'42,4" S	521769,8499	7772446,946	21,2083055600	-20,1451111110				
Fossil cave	Botswana							21,2083010000	-20,1450920000	1085			
Fossil cave	Botswana							21,2082780000	-20,1451150000	1083			
Fossil Cave (borehole entrance)	Botswana			21°12'30,06" E	20°8'42,40" S	521774,4947	7772446,939	21,2083500000	-20,1451111100	1078			Topo : O.Ledimo, T.Jankie avril 201
~~Dimapo~~	~~Botswana~~		~~Gcwihaba hill 3~~	~~21°21'22,1" E~~	~~20°01'14,6" S~~	~~537249,2969~~	~~7786185,944~~						
~~Gecko~~	~~Botswana~~		~~Koanaka hill 1~~	~~21°12'46,5" E~~	~~20°08'27,1" S~~	~~522252,357~~	~~7772916,651~~						
~~Gecko cave cave tubage~~	~~Botswana~~					~~522261~~	~~7772899~~			~~1057~~			
~~Gecko chamber (borehole entrance)~~	~~Botswana~~			~~21°12'46,76"E~~	~~20°8'27,34"S~~	~~522259,8957~~	~~7772909,263~~						
Gecko	Botswana					522256	7772909	21,2129516159	-20,1409302000	1058			2eme tubage par lequelle on desc
~~Mongongo~~	~~Botswana~~		~~Koanaka hill 1~~	~~21°12'27,0" E~~	~~20°08'47,2" S~~	~~521685,4776~~	~~7772299,505~~						
Mongongo Cave (tourist borehole entran	Botswana			21°12'27,10" E	20°8'46,97" S	521688,3894	7772306,567	21,2075277800	-20,1463805600	1060			
Aven rebouché, arbre mort	Botswana					537205	7786044	21,3557182600	-20,0220057500	1030			
fantome + calcite + plancher = grotte	Botswana					536571	7786587	21,3496458000	-20,0171110100	1008			
nos fouilles 2022	Botswana					520383	7770919	21,1950526400	-20,1589335500	1051			
grotte décapitée brèche	Botswana	Koanaka Hills, NW Botswana	K1 ouest					21,2065630000	-20,1472560000	1047			
aven comblé	Botswana	Koanaka Hills, NW Botswana	K1 ouest					21,2063570000	-20,1449140000	1037			
Lobatse Cave 1	Botswana	Lobatse		25°42,680'S	25°09,771'E			25,7113330000	-25,1628500000				
Lobatse Cave 1	Botswana	Lobatse						25,7109722200	-25,1636250000				
Lobatse Cave 1	Botswana	Lobatse											
Lobatse Cave 2	Botswana	Lobatse		25°43,537'S	25°07,751'E			25,7256167000	-25,1291833000				
Lobatse Cave 2	Botswana	Lobatse						25,7242361100	-25,1311722200	1123		-132	Prof. Laumanns 2017
~~Lobatse Cave 2~~	~~Botswana~~	~~Lobatse~~		~~25,68'~~	~~-25,21'~~					~~1200~~			~~ces coordonnées correspondent à~~
~~Lobatse Cave 2~~	~~Botswana~~	~~Lobatse~~				~~25°07,751'~~	~~-25°43,537'~~						~~ces coordonnées correspondent à~~
Lobatse Cave 3	Botswana	Lobatse		25°42,228'S	25°09,956'E			25,7038000000	-25,1659333000				la seule cavité prospectée par Ste
Lobatse Cave 3	Botswana	Lobatse											non prospecté à cause des guêpes
Lobatse Cave 4 (Mohu)	Botswana	Lobatse		25°42,122'	25°10,065'			25,7020333000	-25,1677500000				
Mohu (wasp cave)	Botswana	Lobatse		25°42,120'S	25°10,066'E			25,7019990000	-25,1677667000				
Mohu	Botswana	Lobatse		25°42,122'S	25°10,065'E								
Athlone cave	Botswana	Lobatse		25°40,213'	25°12,400'			25,6702167000	-25,2066667000				silicate Segwagwa Group
Lepokole cave	Botswana	Lobatse											granite
Manyana Rockshelter and cave	Botswana	Lobatse		25°35,372'	24°45,831'			25,5895333000	-24,7638500000				silicate Waterberg group
Mmalogage (Lekgolobotlo)	Botswana	Lobatse		25°32,936'	25°54,944'			25,5489333000	-25,9157333000				silicate Waterberg group
Kobokwe cave (Molepolole)	Botswana	Lobatse		25°32,132'	24°25,889'			25,5355333000	-24,4314833000				silicate Waterberg group
Malladiepe Cave	Botswana	Otse		25°45,354'	25°01,962'			25,7559000000	-25,0327000000				silicate Waterberg group
Malladiepe rockshelter & spring	Botswana	Otse		25°45,306'	25°02,012'			25,7551000000	-25,0335333000				silicate Waterberg group
Mannyelanong Cave	Botswana	Otse		25°46,131'	25°2,669'			25,7688500000	-25,0444833000				silicate Waterberg group
Mannyelanong (vulture cliff) Cave	Botswana	Otse		25°45,504'	25°3,610'			25,7584000000	-25,0601667000				silicate Waterberg group
Baratani - Segorong Cave	Botswana	Otse		25°43,449'	25°00,467'			25,7241500000	-25,0077833000				silicate Waterberg group
Shoshong Cave	Botswana	Otse											silicate Waterberg group
Dimomo Cave	Botswana	Tswapong Hills											silicate Waterberg group
Cave in Phato Ye Sebilo Gorge	Botswana	Tswapong Hills		27°26,255'	22°36,676'			27,4375833000	-22,6112667000				silicate Waterberg group
~~Waxhu North Cave sada~~	~~Botswana~~	~~Aha Hills, Xai Xai, Ngamiland~~	~~Aha~~	~~21°03,489' E~~	~~19°43,532' S~~						-40		
~~Waxhu North Cave ledimo~~	~~Botswana~~	~~Aha Hills, Xai Xai, Ngamiland~~	~~Aha~~	~~21°3'30,19" E~~	~~19°43'32,91" S~~	~~506117,9986~~	~~7818859,234~~						

Waxhu North Cave	Botswana	Aha Hills, Xai Xai, Ngamiland	Aha					21,0578190000	-19,7256400000	1177				C
~~Waxhu South Cave sada~~	~~Botswana~~	~~Aha Hills, Xai Xai, Ngamiland~~	~~Aha~~	~~21°02,496' E~~	~~19°46,680' S~~						-52			
~~Waxhu South Cave ledimo~~	~~Botswana~~	~~Aha Hills, Xai Xai, Ngamiland~~	~~Aha~~	~~21°2'31,78" E~~	~~19°46'40,70" S~~	~~504416,4235~~	~~7813087,441~~							L
Small cave K1	Botswana	Waxhou South	Aha	21°0'43,575''	19°46'15,257''	501268	7813870	21,0121043500	-19,7709048600	1216				C
~~Small cave K1~~	~~Botswana~~	~~Waxhou South~~	~~Aha~~	~~21°00,711'E~~	~~19°46,202'S~~									G
Waxhu South Cave	Botswana	Aha Hills, Xai Xai, Ngamiland	Aha					21,0416040000	-19,7779580000	1217				C
Aha	Namibie	Aha Hills, Xai Xai, Ngamiland	Aha								-55			
Aigmas1	Namibie	Otavi	Otavi	17ø13'05"E	19ø29'15"S			17,2180555556	-19,4875000000					
Aigmas2	Namibie	Otavi	Otavi	17ø17'30"E	19ø27'30"S			17,2916666667	-19,4583333333					
Uisib 1	Namibie	Otavi Bergland	Otavi	17ø14'10"E	19ø33'10"S			17,2361111111	-19,5527777778			-103		
Gabus	Namibie	Otavi	Otavi	17ø17'30"E	19ø32'15"S			17,2916666667	-19,5375000000					
Berg Aukas1	Namibie	Otavi	Otavi	18ø15'10"E	19ø30'58"S			18,2527777778	-19,5161111111					
Berg Aukas2	Namibie	Otavi	Otavi	18ø15'08"E	19ø31'00"S			18,2522222222	-19,5166666667			-225	dolomie, lac -130m	
~~Harasib 1~~	~~Namibie~~	~~Otavi, Bergland, Harasib farm~~	~~Otavi~~											
Harasib 1 lac	Namibie	Otavi, Bergland, Harasib farm	Otavi					17,7928930000	-19,4969020000	1643				
Harasib 3a	Namibie	Otavi, Bergland, Harasib farm	Otavi	17ø48'20"E	19ø34'00"S			17,8055555556	-19,5666666667				coordonnnées bonnes	
~~Harasib~~	~~Namibie~~	~~Otavi, Bergland, Harasib farm~~	~~Otavi~~	~~17°47'34,3"E~~	~~19°29'48,8"S~~					1643				
Dragon Breeth	Namibie	Otavi, Bergland, Harasib farm	Otavi	17°47'0,22"E	19°31'1,57"S			17,7833944400	-19,5171027800	1596				
Dragon Breeth bc	Namibie	Otavi, Bergland, Harasib farm	Otavi					17,7834270000	-19,5171870000	1632				
Jägersquelle	Namibie	Otavi	Otavi	18°04'01,0"E	19°25'37,0"S			18,0669444444	-19,4269444000	1462				
grande doline	Namibie	Otavi	Otavi					17,7685380000	-19,5245920000	1726				
aven	Namibie							17,7518800000	-19,5140240000	1675				
Nosib PalaeoCave (Pickford 2019)	Namibie	Otavi	Otavi	17°48'30,9"E	19°25'43,2"S			17,8085833333	-19,4286667000	1563				
Nosib PalaeoCave (Pickford 2010)	Namibie	Otavi	Otavi	17ø48'32"E	19ø25'45"S			17,8088888889	-19,4291666667					
Friesenberg Hilltop	Namibie	Otavi	Otavi	17ø40'54"E	19ø17'24"S			17,6816666667	-19,2900000000					
Rietfontein	Namibie	Otavi	Otavi	17ø52'38"E	19ø41'36"S			17,8772222222	-19,6933333333					
Asis Ost	Namibie	Otavi	Otavi	17ø43'52"E	19ø42'35"S			17,7311111111	-19,7097222222					
Kombat E900	Namibie	Otavi	Otavi	17ø43'55"E	19ø42'35"S			17,7319444444	-19,7097222222					
Elefantenberg Nord	Namibie	Otavi	Otavi	17ø24'20"E	19ø42'40"S			17,4055555556	-19,7111111111					
Orunkima Ondundu Okwena	Namibie		Otavi	17°34'34.86"E	19°25'3.60"S			17,5763500000	-19,4176666667		2708	-31		
Gauab, Ghaub Cave	Namibie	Otavi Bergland								1550	944	-114		
Temple of the Gods	Namibie	Otavi Bergland									917			
Naos Cave	Namibie	Otavi Bergland									828			
Dante	Namibie	Otavi Bergland									689	-150	la plus profonde sans eau	
Nosibhöhle	Namibie	Otavi Bergland								1500	602			
Windgat	Namibie	Otavi Bergland									~~566~~			
~~Scorpions Maze~~	~~Namibie~~	~~Otavi Bergland~~												
Scorpions Maze	Namibie	Otavi	Harasib					17,8263870000	-19,5061580000	1591	2812	-31		
Pofadder Cave / Honeycomb-Pas-Perdus	Namibie	Otavi Bergland								1550	374	-111		
Varianto Höhle	Namibie	Otavi Bergland									373	-150	Tsumed Supergroup dolomite, plus g	
Drachenhauchloch (Dragon's Breath Hole	Namibie	Otavi Bergland										-153		
Guinas Lake	Namibie	Otavi Bergland										-131		
Rendevous shaft	Namibie	Otavi Bergland												
Rocky 1	Namibie	Otavi	Karstveld	13ø41'55"E	17ø48'07"S			13,6986111111	-17,8019444444					
Rocky 2	Namibie	Otavi	Karstveld	13ø41'15"E	17ø48'02"S			13,6875000000	-17,8005555556					
Rocky 3	Namibie	Otavi	Karstveld	13ø41'21"E	17ø47'55"S			13,6891666667	-17,7986111111					
Rocky 4	Namibie	Otavi	Karstveld	13ø41'15"E	17ø48'02"S			13,6875000000	-17,8005555556					
Tim's Cave	Namibie	Otavi	Karstveld	13ø59'00"E	17ø47'00"S			13,9833333333	-17,7833333333					
Ondera	Namibie	Otavi	Karstveld	13ø38'50"E	18ø39'05"S			13,6472222222	-18,6513888889		830		Damara limestone	
Twyfelfontein Wondergat	Namibie	Kaokoveld, Twyfelfontein	Kaokoveld	E014°22'20,9''	S20°30'51,7''			14,3722222000	-20,5141666667		435	-84	dolomie hydrothermal	
Temple of Doom	Namibie	Kaokoveld										-131		
Wow gdoom pothole	Namibie	Kaokoveld												
Apollo11 cav	Namibie		Naukluft	17° 8'43.00"E	27°59'3.00"S			17,1452777778	-27,9841666667		550		dolomite	
Märker (Merker Cave)	Namibie	Naukluft Mountains	Naukluft								457		shaly limestone caprock	
Neuras/Hoab	Namibie	near Namib-Naukluft Reserve	Naukluft								4494	-113	bats	
Arnhem Cave	Namibie	East of Windhoek, Gobabis								1550	755		marbles of the Khomas Supergrou	
Nooitgedachthöhle	Namibie	Karibib									448		quartzite	
Münsterland	Namibie	Ugab Valley										-123	lac à -68	
Aikab	Namibie	Etosha									695		5 niveau de galeries - hydrotherma	
II Gâuab AS	Namibie	Hakos Mountain									413			
Nooitgedacht 3	Namibie													
Orumana sinkhole	Namibie													
Blister pot	Namibie													
Wow gdoom pothole	Namibie													
Columbarium sinkole	Namibie													
Parakietgat	Namibie													
Arboretum pothole	Namibie													
Hermitage Cave	Namibie													
Ludwig Cave	Namibie										358	-59	plan et coupe	
Ondimba Ja Omungongo	Namibie	Kaokoland Kunene						13,8499500000	-18,2988800000	1525	19	-13	plan et coupe	
Ondimba Ja Omundu 1	Namibie	Kaokoland Kunene						13,9447300000	-18,4444400000	1736	34	-26	plan et coupe	
Ondimba Ja Omundu 2	Namibie	Kaokoland Kunene						13,9450700000	-18,4445900000	1734	36	-23	plan et coupe	

Ondimba Ja Okavau	Namibie	Kaokoland Kunene						13,7805400000	-18,7401600000	1549	13	-7	plan et coupe	
Ondimba Ja Uahana	Namibie	Kaokoland Kunene						13,7008500000	-18,6695100000	1526	67	-22	plan et coupe	
Ondimba Ja Okuapa	Namibie	Kaokoland Kunene						13,7121600000	-18,6773100000	1399	91	-28	plan et coupe	
Ondimba Ja Mundumithe	Namibie	Kaokoland Kunene						13,7503400000	-18,9140700000	1353				
Bat Pipe Hole	Namibie	Kaokoland Kunene						13,7618600000	-18,7632700000	1491				
Ochre Mine	Namibie	Kaokoland Kunene						13,7494700000	-18,7631380000	1486			topo	
Orumana sinkhole	Namibie	Kaokoland Kunene						13,9619400000	-18,2452900000	1557				
Ondimba ja Donald	Namibie	Kaokoland Kunene						13,6435900000	-18,6887900000	1512				
Algal Arch	Namibie	Kaokoland Kunene						13,9263600000	-18,4307900000	1615				
Blister pot	Namibie	Kaokoland Kunene						13,9087100000	-18,2671000000	1623				
Wow Gdoom abyss	Namibie	Kaokoland Kunene						13,9347300000	-18,3470300000	1616				
Ondimba ja Omutungi	Namibie	Kaokoland Kunene						13,7508000000	-18,9033400000	1382	57	-68		
Starlingshaft	Namibie	Kaokoland									27	-47		
Three Guardians	Namibie	Kaokoland									180			
Parrot / Portal	Namibie	Kaokoland									505	-54		
Omuhako	Namibie	Kaokoland												
Blowing Hole	Namibie	Kaokoland												
Ekoto Bastion Tufa	Namibie	Kaokoland			13°13'20.7"E	17°56'06.8"S		13,2224166667	-17,9352222222	1110				
Kaoko Otavi groundwater calcrete do	Namibie	Kaokoland			13°39'48.3"E	18°17'51.3"S		13,6634166667	-18,2975833333	1449				
Khowarib calc tufa	Namibie	Kaokoland			13°53'39.1"E	19°16'29.4"S		13,8941944444	-19,2748333333	723				
Okombako Bastion Tufa	Namibie	Kaokoland			14°02'43.0"E	18°52'15.0"S		14,0452777778	-18,8708333333	1308				
Okombeiza Barrage Tufa	Namibie	Kaokoland			13°33'59.9"E	18°48'06.9"S		13,5666388889	-18,8019166667	1146				
Okongwe tufa lobes	Namibie	Kaokoland			14°04'15.0"E	18°53'50.0"S		14,0708333333	-18,8972222222	1228				
Okapiku Cascade Tufas	Namibie	Kaokoland			14°03'22.0"E	18°53'21.0"S		14,0561111111	-18,8891666667	1306				
Okovanatje Cascade Tufa	Namibie	Kaokoland			14°02'25.0"E	18°51'38.0"S		14,0402777778	-18,8605555556	1347				
Omokutu, barrage tufa in situ in river	Namibie	Kaokoland			13°53'58.6"E	19°16'29.1"S		13,8996111111	-19,2747500000	795				
Omungunda show cave (= Rocky 3)	Namibie	Kaokoland			13°41'21.0"E	17°47'56.8"S		13,6891666667	-17,7991111111	1345				
Omungunda stone tool site	Namibie	Kaokoland			13°41'20.2"E	17°47'55.3"S		13,6889444444	-17,7986944444	1359				
Ongongo Spring Tufa	Namibie	Kaokoland			13°49'10.0"E	19°08'23.0"S		13,8194444444	-19,1397222222	731				
Opuwo Cascade Tufa	Namibie	Kaokoland			13°53'19.1"E	18°07'14.6"S		13,8886388889	-18,1207222222	1280				
Otjisakumuka Cascade Tufa	Namibie	Kaokoland			13°57'01.1"E	19°05'40.5"S		13,9503055556	-19,0945833333	1065				
Otjitaime Downstream cascade tufas	Namibie	Kaokoland			13°44'36.3"E	18°51'59.7"S		13,7434166667	-18,8665833333	1020				
Otjitieue groundwater calcrete dome	Namibie	Kaokoland			13°32'19.4"E	18°43'07.2"S		13,5387222222	-18,7186666667	1140				
Rössing	Namibie	Namib			14°47'84"E	22°31'88"S		14,8066666667	-22,5411111000	330				
Tinkas	Namibie	Namib			15°03'55"E	22°48'25"S		15,0652777778	-22,8069444000	425	622	-305	coupe - quartzitic sandstone	
grotte	Namibie	Aha Hills, Xai Xai, Ngamiland			20°54'33,01"E	19°51'37,98"S		20,9091694400	-19,8605500000				Petite grotte 5m de long. porche X	
grotte tanière	Namibie	Aha Hills, Xai Xai, Ngamiland			20°54'37,86"E	19°51'36,10"S		20,9105166700	-19,8600277800				Grotte avec seuil poli par la faune.	
petite cavité	Namibie	Aha Hills, Xai Xai, Ngamiland			20°58'7,47"E	19°47'44,09"S		20,9687416700	-19,7955805600				petite cavité de pied de versant corn	
petit trou	Namibie	Aha Hills, Xai Xai, Ngamiland			20°59'35,41"E	19°46'53,28"S		20,9931694400	-19,7814666700				visite 07/12/2016	
terrier dans cavité	Namibie	Aha Hills, Xai Xai, Ngamiland			20°58'45,98"E	19°46'43,17"S		20,9794388900	-19,7786583300				visite 07/12/2016	
paléokarst calcite	Namibie	Aha Hills, Xai Xai, Ngamiland			20°59'18,37"E	19°48'06,34"S		20,9884361100	-19,8017611100	1200			visite du 06/12/2016 + fouilles	
Torus (mal localisé)	Namibie	Aha Hills, Xai Xai, Ngamiland			20°57'47,78"E	19°48'44,68"S		20,9632722200	-19,8124111100					
Gam	Namibie	Aha Hills, Xai Xai, Ngamiland			20°50'48,33"E	20°16'40,10"S		20,8467583300	-20,2778055600					
Mawenge Mwena (Z9) - Mayenne Mw	Zimbabwe	Chimanimani Mountains National Park, Eas	Chimanimani		E33°02'48,68''	S19°47'58,80"		33,0468555556	-19,7996666667		407	-186	coupe + plan x2	
Black Crystal Abyss (Z2) (SEC Caving)	Zimbabwe	Chimanimani Mountains National Park, Eas	Chimanimani		E33°02'59,90''	S19°47'58,43"		33,0499722222	-19,7995638889			-194	coupe	
Bounding Pot (Z1) (SEC Caving)	Zimbabwe	Chimanimani Mountains National Park, Eas	Chimanimani		E33°02'58''	S19°48'05,59"		33,0494444444	-19,8015527778		390	-150	coupe	
Big end Chasm (Z3) (SEC Caving)	Zimbabwe	Chimanimani Mountains National Park, Eas	Chimanimani		E33°02'53,47''	S19°48'01,23"		33,0481861111	-19,8003416667			-51		
Ndoro's Beetle (SEC Caving)	Zimbabwe	Chimanimani	Chimanimani		E33°02'49,69''	S19°47'55,74"		33,0471361111	-19,7988166667		217			
Resurgence (SEC Caving)	Zimbabwe	Chimanimani	Chimanimani		E33°02'18,69''	S19°48'05,54"		33,0385250000	-19,8015388889			-90	plan	
Moss pot (Mozpot) (Z11)	Zimbabwe		Chimanimani								215	-58		
Zee-in-Zee Middle (SEC Caving)	Zimbabwe		Chimanimani		E33°02'55,28''	S19°48'02,83"		33,0486888889	-19,8007861111		380	-221		
Jungle Pot (Z4)	Zimbabwe	Chimanimani Mountains National Park, Eas	Chimanimani		E033°02'52,02"	S19°47'57,11"		33,0477833333	-19,7991972222					
grotte habitée 1	Zimbabwe	Chimanimani Mountains National Park, Eas	Chimanimani		E033°05'21"	S19°47'10"		33,0891666700	-19,7861111000	1660				
grotte habitée 2	Zimbabwe	Chimanimani Mountains National Park, Eas	Chimanimani		E033°05'11"	S19°50'22"		33,0863888800	-19,8394440000	1420				
Mermaid's grotto	Zimbabwe	Chimanimani Mountains National Park, Eas	Chimanimani					32,8826280000	-19,9815000000	1513				
Mermaid's grotto-bis	Zimbabwe	Chimanimani Mountains National Park, Eas	Chimanimani					32,8825000000	-19,9813889000					
Paradise cave	Zimbabwe	Chimanimani	Chimanimani					33,0297000000	-19,7902900000					
Peterhouse cave (cascade)	Zimbabwe	Chimanimani	Chimanimani					33,0310820000	-19,7973000000					
Terry's cave (SEC Caving)	Zimbabwe	Chimanimani	Chimanimani		E33°01'58,87''	S19°48'04,30"		33,0335400000	-19,8133600000					
Terry's cave	Zimbabwe	Chimanimani	Chimanimani					33,0335090000	-19,8250400000	1530				
Digby's	Zimbabwe	Chimanimani	Chimanimani					33,0310600000	-19,7900290000	1531				
Poachers	Zimbabwe	Chimanimani	Chimanimani					33,0828130000	-19,8587880000	1430				
Redwall	Zimbabwe	Chimanimani	Chimanimani					33,0236010000	-19,7630960000	1720				
St Georges	Zimbabwe	Chimanimani	Chimanimani					33,0534500000	-19,8689130000	1460	1037	"-25 (-4	coupe x2 + plan réseau sup + plan	
Badze (Laumanns)	Zimbabwe	Hurrongwe District	Chinhoyi Umboe West		E029°11'1"	S17°10'2"		29,1836111111	-17,1672222222		457	-50	plan x2 + coupe	
Bashungwe (Laumanns)	Zimbabwe	Hurrongwe District	Chinhoyi Umboe West		E029°7'0''	S17°7'0"					457	-50	plan x2 + coupe	
Bashungwe SASA 2015	Zimbabwe	Hurrongwe District	Chinhoyi Umboe West		E029°13'	S17°12'8"		29,2166666667	-17,2022222222		532		plan	
Chimsoro (SEC Caving)	Zimbabwe	Mafungabusi Plateau	Chinhoyi Umboe West		E029°18'37,32"	S18°08'15,33"		29,3103666667	-18,1375916667					
~~Chimsoro (Chikoroso pots) (SEC Cavir~~	~~Zimbabwe~~	~~Mafungabusi Plateau~~	~~Chinhoyi Umboe West~~		~~E029°13'2"~~	~~S17°13'2"~~					~~532~~		~~plan~~	
~~Magweto Caverns (SEC Caving)~~	~~Zimbabwe~~	~~Hurrongwe District~~	~~Chinhoyi Umboe West~~		~~E029°12'05"~~	~~S17°05'7"~~					698	-35	plan + coupe	
Magweto Caverns SASA2015	Zimbabwe	Hurrongwe District	Chinhoyi Umboe West		E029°12'3"	S17°05'8"		29,2008333333	-17,0855556000		~~887~~	~~-190~~	~~coupe x2 + plan x2~~	
~~Chinhoyi SASA2015~~	~~Zimbabwe~~	~~Chinhoyi~~	~~Chinhoyi Umboe Est~~		~~E030°8'0"~~	~~S17°21'4"~~					887	-190	coupe x2 + plan x2	
Chinhoyi LB	Zimbabwe	Chinhoyi	Chinhoyi Umboe Est		E030°7'46,03''	S17°21'25,1"		30,1294527778	-17,3569722222		~~887~~	~~-190~~	~~coupe x2 + plan x2~~	

~~Chinhoyi (?)~~	~~Zimbabwe~~	~~Chinhoyi~~	~~Chinhoyi Umboe Est~~	~~E030°8'1''~~	~~S17°21'22''~~						~~887~~	~~-190~~	~~coupe x2 + plan x2~~
~~Chinhoyi Laumanns~~	~~Zimbabwe~~	~~Chinhoyi (false)~~	~~Chinhoyi Umboe Est~~	~~E030°05'~~	~~S17°22'~~						691	-75	plan
Highlands Cave Pt Topo HOPE Z 2022	Zimbabwe	Chinhoyi	Chinhoyi Umboe Est	E030°06'11,45"	S17°19'47,66"			30,1031805556	-17,3299055556		~~691~~	~~-75~~	~~plan~~
~~Highlands Cave SASA2015~~	~~Zimbabwe~~	~~Chinhoyi~~	~~Chinhoyi Umboe Est~~	~~E030°05'2''~~	~~S17°19'5''~~						232		
Kauka Cave (Kau-Kua) + brèches LB	Zimbabwe	Chinhoyi	Chinhoyi Umboe Est	E030°11'09,54''	S17°01'45,08''			30,1859833333	-17,0291888889		~~232~~		
~~Kauka Cave (Kau-Kua) LB?~~	~~Zimbabwe~~	~~Chinhoyi~~	~~Chinhoyi Umboe Est~~	~~E030°05'12,00''~~	~~S17°01'54,00''~~						~~232~~		
~~Kauka Cave (Kau-Kua) SASA2015~~	~~Zimbabwe~~	~~Chinhoyi~~	~~Chinhoyi Umboe Est~~	~~E030°11'2''~~	~~S17°01'9''~~								
Sinkhole Ulster LB	Zimbabwe			E30°05'54,96''	S17°23'13,28"			30,0986000000	-17,3870222222		242	-50	plan + coupe
Ulster LB	Zimbabwe	Chinhoyi	Chinhoyi	E30°07'13,96''	S17°22'46,52"			30,1205444444	-17,3795888889	1253	~~242~~	~~-50~~	~~plan + coupe~~
~~Ulster SASA2015~~	~~Zimbabwe~~	~~Chinhoyi~~	~~Chinhoyi~~	~~E30°07'5''~~	~~S17°22'6''~~								
Cotswold 4 (SEC Caving)	Zimbabwe	Chinhoyi	Chinhoyi	E30°14'05,48''	S16°58'07,07"			30,2348555556	-16,9686305556		208		
Cotswold 1 (SEC Caving)	Zimbabwe	Chinhoyi	Chinhoyi	E30°13'56,63''	S16°59'30,26"			30,2323972222	-16,9917388889				
Turret towers	Zimbabwe										332		
Mabura1 (Rhino cave 2) (SEC Caving)	Zimbabwe	Mafungabusi Plateau, Ngondoma River		E29°18'10,53''	S18°04'25,77"			29,3029250000	-18,0738250000		800		
Chitita (Chirisa?)	Zimbabwe			E28°24'	S17°41'			28,4000000000	-17,6833300000				
Chirisa Cave (SEC Caving)	Zimbabwe	Chirisa Safari area		E28°22'	S17°37'			28,3666666667	-17,6166667000				
Garden Cave	Zimbabwe	Great Zimbabwe		E30°49'	S20°27'			30,8166666667	-20,4500000000				
Tsungwesi cave (SEC Caving)	Zimbabwe	Mutanda		E32°07'	S19°07'			32,1166666667	-19,1166667000				
Domboshawa caves	Zimbabwe		Musami					31,1687800000	-17,6080200000				
Murehwa cave paintings (abri?)	Zimbabwe							31,7656500000	-17,6255300000				
Manhemba Caves	Zimbabwe		Nyadire					32,0695100000	-17,3898500000				
Chikupo caves (abri)	Zimbabwe							31,2898000000	-17,4431000000				
Bamata caves	Zimbabwe		Matopos					28,4057300000	-20,5030900000				
Python	Zimbabwe												plan
Coal cave & Dark cave	Zimbabwe										13	-10	coupe
Kenyungu Pot	Zimbabwe	Hurrongwe District		E29°11'7''	S17°08'9''			29,1852777778	-17,1358333333		44		plan + coupe
Msukwe	Zimbabwe	Hurrongwe District		E29°12'2''	S17°06'0''			29,2005555556	-17,1000000000		50	-16	plan + coupe
Dhusvi pot	Zimbabwe	Hurrongwe District		E29°12'5''	S17°05'6''			29,2013888889	-17,0850000000		73		plan + coupe
Chinyavada	Zimbabwe	Hurrongwe District		E29°12'5''	S17°05'7''			29,2013888889	-17,0852777778		120	-17	plan + coupe
Rengwe (SEC Caving)	Zimbabwe	Hurrongwe District		E29°08'9''	S17°10'0''			29,1358333333	-17,1666666667		150	-26	plan + coupe
Mutandacharimo pot (M'charimo) (S	Zimbabwe	Hurrongwe District		E29°13'0''	S17°13'0''			29,2166666667	-17,2166666667		26		plan + coupe
Mujenge (SEC Caving)	Zimbabwe	Hurrongwe District		E29°13'4''	S17°13'2''			29,2177777778	-17,2172222222		33		plan + coupe
Chikosoro	Zimbabwe	Hurrongwe District		E29°13'2''	S17°13'2''			29,2172222222	-17,2172222222		241	-23	plan + coupe
Zvarayi Caves (SEC Caving)	Zimbabwe	Hurrongwe District		E29°25'9''	S17°09'4''			29,4191666667	-17,1511111111		10		coupe
Mahwada Pot	Zimbabwe	Hurrongwe District		E29°23'1''	S17°08'8''			29,3836111111	-17,1355555556		20		plan + coupe
Mutambaramwe	Zimbabwe	Hurrongwe District		E29°20'0''	S17°06'5''			29,3333333333	-17,1013888889		100	-30	
Dzimhaiwe Pot (Mutambaeamwa)	Zimbabwe	5km to Chidamoyo		E29°13'9''	S17°06'1''			29,2191666667	-17,1002777778				
Baobab Pot (SEC Caving)	Zimbabwe			E29°18'37,38''	S18°08'13,15"			29,3103833333	-18,1369861111				
Bowling hole (SEC Caving)	Zimbabwe			E29°18'37,43''	S18°08'11,44"			29,3103972222	-18,1365111111				
Deep sinkhole LB	Zimbabwe			E30°09'35,81''	S17°18'28,83"			30,1599472222	-17,3080083333				
Devonia 1 LB	Zimbabwe			E30°11'12,76''	S17°06'02,42"			30,1868777778	-17,1006722222				
Devonia 1 (SEC Caving)	Zimbabwe			E30°11'13,37''	S17°05'58,37"			30,1870472222	-17,0995472222				
Devonia 2 ? LB	Zimbabwe			E30°11'24,90''	S17°06'10,71"			30,1902500000	-17,1029750000				
Devonia 2 (SEC Caving)	Zimbabwe			E30°10'46,00''	S17°05'52,43"			30,1794444444	-17,0978972222				
Dingley Dell Sinkhole (SEC Caving)	Zimbabwe			E30°10'29,23''	S17°15'31,40"			30,1747861111	-17,2587222222				
Dombodzvuku cave - Sacré cave LB	Zimbabwe			E30°10'19,95''	S17°05'08,44"			30,1722083333	-17,0856777778				
Grotte mine de Kapetarongwe LB	Zimbabwe			E30°11'35,27''	S17°15'43,46"			30,1931305556	-17,2620722222				
Grotte ? LB	Zimbabwe			E30°14'11,32''	S17°00'04,74"			30,2364777778	-17,0013166667				
Grotte dans schistes LB	Zimbabwe			E30°15'01,78''	S16°57'54,47"			30,2504944444	-16,9651305556				
Grottes connue LB	Zimbabwe			E30°11'46,15''	S17°04'14,06"			30,1961527778	-17,0705722222				
Gute cave LB	Zimbabwe			E30°11'39,14''	S17°00'10,80"			30,1942055556	-17,0030000000				
Gwamure cave LB	Zimbabwe			E30°11'33,96''	S17°16'11,10"			30,1927666667	-17,2697500000				
Rhino ranch cave 1 (SEC Caving)	Zimbabwe			E29°18'10,50''	S18°04'26,09"			29,3029166667	-18,0739138889				
Siso Hill cave (SEC Caving)	Zimbabwe			E29°55'11,24''	S17°24'04,69"			29,9197888889	-17,4013027778				
Emergence dans dolomie indiquée LB	Zimbabwe			E30°12'41,26''	S16°58'18,99"			30,2114611111	-16,9719416667				
Whindale Ranch cave (SEC Caving)	Zimbabwe			E30°12'37,06''	S16°56'58,27"			30,2102944444	-16,9495194444				
Sinkhole Harmony Hall Farm LB	Zimbabwe			E30°09'30,58''	S17°18'43,05"			30,1584944444	-17,3119583333				
Sinkhole LB	Zimbabwe			E30°11'42,52''	S16°59'08,88"			30,1951444444	-16,9858000000				
~~Sinkhole from map LB~~	~~Zimbabwe~~			~~E30°08'21,70''~~	~~S17°21'54,69''~~								
Sinkhole from map LB	Zimbabwe			E30°09'23,26''	S17°18'30,22"			30,1564611111	-17,3083944444				
Sinkhole from map LB	Zimbabwe			E30°10'28,70''	S17°15'31,38"			30,1746388889	-17,2587166667				
~~Sinkhole? from map LB~~	~~Zimbabwe~~			~~E30°09'14,32''~~	~~S17°18'25,64''~~								série de soutirage autour d'un énc
Sinkhole penetrante avec gros figuier	Zimbabwe			E30°12'11,96''	S16°58'23,95"			30,2033222222	-16,9733194444				
Sinkhole railway LB	Zimbabwe			E30°05'54,85''	S17°23'13,71"			30,0985694444	-17,3871416667				
Sinkhole Witherspoon dolomite pinac	Zimbabwe			E30°09'36,65''	S17°18'24,26"			30,1601805556	-17,3067388889				
Sinkhole évolué LB	Zimbabwe			E30°09'31,75''	S17°18'41,34"			30,1588194444	-17,3114833333				
Sinkhole évolué LB	Zimbabwe			E30°09'30,89''	S17°18'44,62"			30,1585805556	-17,3123944444				
Sinkhole LB	Zimbabwe			E30°11'50,61''	S17°04'06,34"			30,1973916667	-17,0684277778				
Small sinkhole LB	Zimbabwe			E30°11'36,03''	S17°16'11,93"			30,1933416667	-17,2699805556				
Trou - 2m + abeilles LB	Zimbabwe			E30°11'08,90''	S17°01'43,45"			30,1858055556	-17,0287361111				
do Leba	Angola												
Rio N'gunza (de furna Grande)	Angola	Novo Rodondo / Porto Amboim									500		calcaire crétacée, guano
do Mulolas	Angola	SW of Lubango, Humpata region								1800	30		calcaire précambrien Bembe System
Mugobo	Burundi	Mugobo, east Burundi	Burundi	30°36'15.00"E	3°26'15.00"S			30,6041666667	-3,4375000000		90		quartzite
Mont Teza	Burundi		Burundi	29°33'15.00"E	3°29'10.00"S			29,5541666667	-3,4861111111				
Kayovu (Mpinga-Kaove)	Burundi	Kayovu, Mount Nkoma, south-East of B	Burundi	30° 9'60.00"E	3°46'60.00"S			30,1666666667	-3,7833333000	1858	39	-30	
Gouffre de Mbilibekon (Trou des fant	Cameroun	South Cameroon, Ebolowa, Nko'étyé	Ebolowa	11°17'24.92"E	2°52'29.92"N			11,2902555556	2,8749777778	650			

Nkolenyeng	Cameroun		Ebolowa	11° 3'39.29"E	2°51'16.48"N			11,0609138889	2,8545777778				
~~Cueva Monte Camerun 1~~	~~Cameroun~~	~~Buea, Mount Cameroon~~	Buea	~~9°13'23"E~~	~~4°9'36"5~~					~~1119~~	~~73~~	~~-19~~	~~Lava tube cave~~
Gaskin	Cameroun	Buea, Mount Cameroon	Buea	9°11'57.00"E	4°11'45.00"N			9,1991666667	4,1958333333	2920	450	-95	
Monte Camerun 1	Cameroun		Buea	9°13'23.00"E	4° 9'36.00"N			9,2230555556	4,1600000000			-19	
Pozzo del monte castellaro	Cameroun		Buea	9°43'31.80"E	4°10'31.44"N			9,7255000000	4,1754000000				
Ndemvoh	Cameroun	Dschang		10° 0'32.77"E	5°32'58.49"N			10,0091027778	5,5495805556				
Petite Grotte Ndemvo	Cameroun	West Cameroon, Menoua, Fongo Tongo									172		
Demvoh Mâle	Cameroun	West Cameroon, Menoua, Fongo Tongo									290		
Demvoh Femelle	Cameroun	West Cameroon, Menoua, Fongo Tongo									161		
Grotte de Loung	Cameroun	West Cameroon, Menoua, Fongo Tongo									140		
Grotte Kaa	Cameroun	West Cameroon, Hauts-Plateaux, Batié									168		
Fo Mbouh 2	Cameroun	West Cameroon, Bamiléké, Fongo Tango									60		
Nkolbisson-Pharmacie	Cameroun	Yaounde, Nkolbisson									117		Labyrinthe granite/gneiss
Mfouda (Mfoula)	Cameroun	Yaounde, Nkoteng									60		granite/gneiss
Mézessé	Cameroun	Yaounde, Sangmelima									57	-15	granite/gneiss
Linté 1	Cameroun	Linté, Plateau de l'Adamoua									100	-35	Labyrinthe granite/gneiss
Linté 2	Cameroun	Linté, Plateau de l'Adamoua									95		Labyrinthe granite/gneiss
Musaké	Cameroun	Mount Cameroon								1830	70		
Molaliei	Cameroun	Mount Cameroon								2650	55		
Gouffre de Djoukou (de Yabingui)	Centrafrique		Bangui	19° 7'60.00"E	5°17'30.00"N			19,1333333333	5,2916666667				
	Centrafrique	near Mbaïki	Bangui	18°01'E	3°53'N			18,0166666667	3,8833333333				
de la source du Minguéré	Centrafrique	Plateau de Gadzi-Carnot Western CAR	Plateau de Gadzi	16°16'60.00"E	5°12'0.00"N			16,2833333333	5,2000000000				SCHIST
de la source du Jebe	Centrafrique	Plateau de Gadzi-Carnot Western CAR	Plateau de Gadzi	15°22'60.00"E	5°33'60.00"N			15,3833333333	5,5666666667				SCHIST
Goussséné	Centrafrique	Plateau de Gadzi-Carnot Western CAR	Plateau de Gadzi	16°47'60.00"E	5°17'30.00"N			16,8000000000	5,2916666667				
Boane	Centrafrique	Plateau de Gadzi-Carnot Western CAR	Plateau de Gadzi	16°53'60.00"E	5°35'30.00"N			16,9000000000	5,5916666667				SCHIST
Sangoma	Centrafrique	Plateau de Gadzi-Carnot Western CAR	Plateau de Gadzi	15°55'30.00"E	4°45'30.00"N			16,9250000000	4,7583333333				SCHIST
Démo	Centrafrique	Plateau de Gadzi-Carnot Western CAR	Plateau de Gadzi	16° 5'0.00"E	4°55'0.00"N			16,0833333333	4,9166666667				SCHIST resurgence>100m
Bo	Centrafrique	Plateau de Gadzi-Carnot Western CAR	Plateau de Gadzi	16°45'0.00"E	4°55'0.00"N			16,7500000000	4,9166666667				SCHIST resurgence>100m
Goubi	Centrafrique	Plateau de Gadzi-Carnot Western CAR	Plateau de Gadzi	16°46'60.00"E	5°17'30.00"N			16,7833333333	5,2916666667				SCHIST resurgence>100m
Mwi	Centrafrique	Plateau de Gadzi-Carnot Western CAR	Plateau de Gadzi	16°50'30.00"E	5°17'30.00"N			16,8416666667	5,2916666667				SCHIST resurgence>100m
Source qui chante	Centrafrique	Plateau de Gadzi-Carnot Western CAR	Plateau de Gadzi	16°15'60.00"E	4° 1'60.00"N			16,2666666667	4,0333333333				SCHIST resurgence>100m
Gouffre aux Chauves-souris	Centrafrique		Plateau de Gadzi	85°30'30"E	4°40'30"N			15,5083333333	4,6750000000				
depression sur photo aeri 1	Centrafrique	Bangui	Fouroumbala	24°50'E	6°30'N			24,8333333333	6,5000000000				
depression sur photo aeri 2	Centrafrique	Bangui	Fouroumbala	24°45'E	6°34'			24,7500000000	6,5666666667				
near to Derbaki North of Rafai	Centrafrique	Plateau de Ouadda (Central-North CAR)	Fouroumbala	23°50'E	5°23'N			23,8333333333	5,3833333333				SCHIST
L'Arc de Triomphe	Centrafrique	Plateau de Ouadda (Central-North CAR)	Plateau de Ouadda	22°25'E	8°11'N			22,4166666667	8,1833333333				SCHIST
Pipi	Centrafrique	Plateau de Ouadda (Central-North CAR)	Plateau de Ouadda	22°26'E	8°12'N			22,4333333333	8,2000000000				SCHIST
near Mbélé	Centrafrique	Plateau de Ouadda (Central-North CAR)	Plateau de Ouadda	21°20'E	8°9'N			21,3333333333	8,1500000000				SCHIST
near Mbélé2	Centrafrique	Plateau de Ouadda (Central-North CAR)	Plateau de Ouadda	21°8'40"E	8°8'N			21,1444444444	8,1333333333				SCHIST
near Birini	Centrafrique	Plateau de Ouadda (Central-North CAR)	Plateau de Ouadda	22°23,4'E	7°51,4'N			22,3900000000	7,8566667000				SCHIST
near Mouka	Centrafrique	Plateau de Ouadda (Central-North CAR)	Plateau de Ouadda	21°53'E	7°16'N			21,8833333333	7,2666666667				SCHIST
cave de Mount Amangaya	Centrafrique	Plateau de Ouadda (Central-North CAR)	Plateau de Ouadda	24°15'E	8°16'30"N			24,2500000000	8,2750000000		50		SCHIST
	Centrafrique	Mount Zali	Yadé	15°59'E	7°39'N			15,9833333333	7,6500000000				
	Centrafrique	Massif du Bakoré	Yadé	15°38'E	7°18'N			15,6333333333	7,3000000000				
	Centrafrique	Mount Simbal (Mount Dang Lang)	Yadé	15°59'E	7°05'N			15,9833333333	7,0833333333				
	Centrafrique	Mount Sikoum	Yadé	15°53'E	7°02'N			15,8833333333	7,0333333333				
	Centrafrique	Kom-siri Hill	Yadé	15°32'E	6°55'N			15,5333333333	6,9166666667				
	Centrafrique	Mounts Gono and Booro	Yadé	15°37'E	7°N			15,6166666667	7,0000000000				
	Centrafrique	Mount Kellé	Yadé	15°37'E	7°17'N			15,6166666667	7,2833333333				
	Centrafrique	Mount Bolio (Mount Kaléo)	Yadé	15°54'E	7°18'30"N			15,9000000000	7,3083333333				
	Centrafrique	Mount Goulé	Yadé	15°48'30"E	7°21'30"N			15,8083333333	7,3583333333				
~~Kom Zollé~~	~~Centrafrique~~		Yadé	~~15°41'0.00"E~~	~~7°17'60.00"N~~						~~50~~		~~granite~~
Touga	Centrafrique		Yadé	15°39'60.00"E	7°27'0.00"N			15,6666666667	7,4500000000				
	Centrafrique	Mount Pana											
	Centrafrique	near Ngou Ngala		20°17'E	7°56'N			20,2833333333	7,9333333333				
	Centrafrique	near Kaga Poungourou		20°14'E	7°50'N			20,2333333333	7,8333333333				
	Centrafrique	Mount Kaga Jaa		19°59'E	8°8'N			19,9833333333	8,1333333333				
	Centrafrique	near Koulakari		20°18'E	8°40'30"N			20,3000000000	8,6750000000				
	Centrafrique	Ippy		21°11'40"	6°28'30"N			21,1944444444	6,4750000000				
Malkara	Centrafrique	near Kaga Omboro	Plateau de Ouadda	19°46'60.00"E	7°41'0.00"N			19,7833333333	7,6833333333				
Abri des Mbrés	Centrafrique		Plateau de Ouadda	19°48'60.00"E	6°39'0.00"N			19,8166666667	6,6500000000				
Doumboula	Congo République		Niari	12°59'60.00"E	4°15'0.00"S			13,0000000000	-4,2500000000				
Kimanika	Congo République		Niari	14°24'60.00"E	3°59'0.00"S			14,4166666667	-3,9833333333				
Loudima	Congo République		Niari	12°59'60.00"E	4°15'0.00"S			13,0000000000	-4,2500000000				
Matouridi	Congo République		Niari	14°29'0.00"E	3°48'0.00"S			14,4833333333	-3,8000000000				
Meya-Nzouari	Congo République	Massif de Bangou	Niari	14°31'30.00"E	3°53'15.00"S			14,5250000000	-3,8875000000		1500		
Mpassa	Congo République		Niari	14°27'0.00"E	3°50'60.00"S			14,4500000000	-3,8500000000				
Mpoka	Congo République		Niari	14°30'0.00"E	3°54'60.00"S			14,5000000000	-3,9166666667				
Viaduc	Congo République	Loudima	Niari	12°59'60.00"E	4°15'0.00"S			13,0000000000	-4,2500000000				
Perte Mboumba (M'boma)	Congo République	Madingou, Mouelou, Kimponzi Mts.	Niari			33S 385020	33S 9520175	13,9638079464	-4,3403320893	355	1200		
Ressurgence Mbouma	Congo République	Madingou, Mouelou, Kimponzi Mts.	Niari			33S 385150	33S 9520175	13,9649793686	-4,3403336980	260			
N'kila-N'tari	Congo République	Madingou, Mudzanga, Mouyondzi, Kind	Niari	13°51'10"E	4°7'13"S	~~33S 374150~~	~~33S 9453250~~	13,8527777778	-4,1202777778	246	1500		

Bankoussou	Congo République	Madingou, Mouyondzi, Kimficou, Banko	Niari			33S 376000	33S 9554220	13,8829670089	-4,0322756678	300	500	
Ntadi Ndinga	Congo République		Niari			33S 340850	33S 9532790	13,5660358175	-4,2255907472	290		
des Boas	Congo République		Niari			33S 372950	33S 9531350	13,8551983856	-4,2390970713	175		
Kioudi	Congo République		Niari			33S 362550	33S 9518625	13,7613162510	-4,3540459386	550		
Kikongo	Congo République		Niari			33S 358750	33S 9520275	13,7271017477	-4,3390652407	576		
Kikounou	Congo République		Niari			33S 365525	33S 9518120	13,7881152077	-4,3586572320	640		
Ntadi ba nti ntie	Congo République		Niari			33S 349800	33S 9540400	13,6467793237	-4,1569088198	155		
Malala	Congo République										350	
Bittori	Congo République										114	
Meya-Nzouari	Congo République											
Niari-Nyanga	Congo République											
	Congo République	Bouansa										
Lemba	Congo République	Kipangu region										
Kulomoni	Congo Démocratique		Shaba 1	26°42'0.00"E	10°58'60.00"S			26,7000000000	-10,9833333333			
Pempéré (Mwanga, Katembavikulu, I'	Congo Démocratique		Shaba 1	26°38'60.00"E	10°58'0.00"S			26,6500000000	-10,9666667000	1367		
de Mulungwishi (Anne, Desy, Jean-Pie	Congo Démocratique	near Likasi	Shaba 1	26°37'60.00"E	10°46'60.00"S			26,6333333333	-10,7833333000	1350		
Kulumbu	Congo Démocratique		Shaba 1	26°38'60.00"E	10°50'0.00"S			26,6500000000	-10,8333333333			
Kalumba/Kalumbu, Kamulenda, Kiako	Congo Démocratique		Shaba 1	E26°39'	S10°50'			26,6500000000	-10,8333333000	1595		
Kondo	Congo Démocratique	in the Kapidi-Muntu Hills	Shaba 1	26°36'0.00"E	10°46'60.00"S			26,6333333333	-10,7833333000	1438		
Salomoni	Congo Démocratique	Likasi (the Former Jadotville) region	Shaba 1	E26°42'	S10°59'			26,7000000000	-10,9833333000	1294		
de la Mura, Gouffre Swanepoel	Congo Démocratique	in the Swanepoel domaine south of Kan	Shaba 1	E26°41'	S10°51'			26,6833333333	-10,8500000000	1350		
Pitashi (Pitanshi)	Congo Démocratique	Kamina, Shaba	Shaba 1								2000	
grotte-tunnel de la Kanianga	Congo Démocratique	Kanianga, Shaba	Shaba									
Tshamakele (Kamashinka)	Congo Démocratique		Shaba North	26° 9'60.00"E	10°30'0.00"S			26,1666666667	-10,5000000000	1350		
Tsamalenge	Congo Démocratique		Shaba south	26°30'0.00"E	11°46'0.00"S			26,5000000000	-11,7666667000			
Petite grotte de Baya	Congo Démocratique		Shaba South	E27°07'	S11°52'			27,1166666667	-11,8666667000	1300		
Kyantapo (Kiantopo)	Congo Démocratique	near Lubudi	Lubudi	E25°28'	S9°56'			25,4666666667	-9,9333333000			
Kyamakonde (des Bananiers)	Congo Démocratique	near to Kwete-Lusambo	Lubudi	E25°28'	S9°56'			25,4666666667	-9,9333333000	1450		
Kando	Congo Démocratique	near to Kwete-Lusambo	Lubudi	E25°28'	S9°56'			25,4666666667	-9,9333333000	1450		
Mpapala (Mpopola)	Congo Démocratique	near to Kwete-Lusambo	Lubudi	E25°28'	S9°56'			25,4666666667	-9,9333333000	1450		
de la ferme de Mulonga	Congo Démocratique	near Lubudi	Lubudi	E25°28'	S9°56'			25,4666666667	-9,9333333000	1450		
Lusolo	Congo Démocratique	near Lubudi	Lubudi	E25°28'	S9°56'			25,4666666667	-9,9333333000			
Kyasala	Congo Démocratique	near Lubudi	Lubudi	E25°28'	S9°56'			25,4666666667	-9,9333333000			
Mototo	Congo Démocratique	near Lubudi	Lubudi	E25°28'	S9°56'			25,4666666667	-9,9333333000			
Kaboyaboya	Congo Démocratique	near Lubudi	Lubudi	E25°28'	S9°56'			25,4666666667	-9,9333333000			
~~Ndimba Dimba (B13, Tondeur)~~	~~Congo Démocratique~~		~~Bas Congo~~	~~14°54'15.58"E~~	~~5°16'16.09"S~~						~~1600~~	
Ngovo (de Langa)	Congo Démocratique	Mbanza Ngungu, Bas Congo	Bas Congo	'56'14.23"E E014°55	'18'6.85"S S5°18'30''			14,9372861111	-5,3019028000		5860	
Mbuzi	Congo Démocratique		Bas Congo	14°51'40.00"E	5°18'47.31"S			14,8611111111	-5,3131416667		610	
Ziaka	Congo Démocratique		Bas Congo	14°37'51.13"E	5°34'51.77"S			14,6308694444	-5,5810472222			
Ndimba Dimba (B13, Tordeur)	Congo Démocratique	Mbanza Ngungu, Bas Congo	Bas Congo	E014°52'13"	S5°17'27''			14,8702777778	-5,2908333000		1600	guano
Kavuaya	Congo Démocratique	Mbanza Ngungu, Bas Congo	Bas Congo									
grotte du Citoyen	Congo Démocratique	Mbanza Ngungu, Bas Congo	Bas Congo									
tadi Ndieka	Congo Démocratique	Kanka, Lovo, Bas Congo	Bas Congo								800	
Grande grotte de Thysville (B7, Rando	Congo Démocratique	Mbanza Ngungu, Bas Congo, 3 ko south	Bas Congo								2100	
Emergence de Ziaka	Congo Démocratique	Kwilu Nongo, Tukisa, Bas-Congo	Bas Congo								1300	
tadi Kieza	Congo Démocratique	Mbanza Ngungu, Bas Congo	Bas Congo									
Mbuzi	Congo Démocratique	Mbanza Ngungu, Bas Congo	Bas Congo								610	
Wene	Congo Démocratique	Wene, Bas Congo	Bas Congo								385	-51
tadi Gwango	Congo Démocratique	Mbanza Ngungu, Kiasi-Mankala, Bas Co	Bas Congo								165	-65
~~Matupi (Laumanns)~~	~~Congo Démocratique~~	~~Ituri forest~~	~~Ituri forest~~	~~E29°52'~~	~~N01°52'~~					1066		
Matupi (grottocenter)	Congo Démocratique	Ituri forest	Ituri forest	29°49'12.00"E	1°13'48.00"N			29,8200000000	1,2300000000			
~~Matupi~~	~~Congo Démocratique~~	~~Ituri forest~~	~~Ituri forest~~	~~E29°52'~~	~~N01°52'~~					~~1066~~		
Matata	Congo Démocratique	near Ituri, Mount Hoyo	Ituri forest	E29°52'	N01°58'			29,8666666667	1,9666667000	1160		
Kalambi	Congo Démocratique	Mt Hoyo, Ituri	Ituri forest									
Kabambi	Congo Démocratique	Mt Hoyo, Ituri	Ituri forest								1600	
Atata	Congo Démocratique	Massif de Otha, Mt.Hoyo and Kpandron	Ituri forest	E031°01'49,5''	S2°06'45,9''			31,0304166667	-2,1127500000	1360		
Lufuishi, Lindi, Lindi, Opienge (Androd	Congo Démocratique		Lindien	E27°15'	N0°25'			27,2500000000	0,4166667000			
Salanga	Congo Démocratique	Gandajika, Lupata, Kasai									2000	
Kiwakishi (near Casteret)	Congo Démocratique	Mitabwa, Shaba		E027°10'32''	S9°9'5''			27,1755555556	-9,1513889000	1050	2100	precambrian limestone
Kiwakishi (Laumanns)	Congo Démocratique	Mitabwa, Shaba		E027°10'32''	S9°9'5''			27,1755555556	-9,1513888889	1050	2100	
Casteret	Congo Démocratique			27°10'16.81"E	9° 8'55.80"S			27,1713361111	-9,1488333333			
Tala Tala	Congo Démocratique											
Yolohafiri	Congo Démocratique											
Bombi	Congo Démocratique											
Matetu	Congo Démocratique											
Saga Saga	Congo Démocratique											
Gouffre de Lukwila	Congo Démocratique											
Salonga	Congo Démocratique											
Kabwe	Congo Démocratique											
Mwana-Kusu	Congo Démocratique											
Kilubi	Congo Démocratique											
Tumba	Congo Démocratique											

Lufurfu	Congo Démocratique												
Kashinge	Congo Démocratique												
underground lake of Luimukata	Congo Démocratique												
Kaswebilenga, Masombwe, Pelenge	Congo Démocratique	Upemba park											
Tantara (Likasi), grotte au Ruisseau, t	Congo Démocratique												
Kasoma	Congo Démocratique			E26°37'	S9°25'			26,6166666667	-9,4166667000				
Moero lake	Congo Démocratique												
Kiantere, Mihogve	Congo Démocratique												
Kilubi	Congo Démocratique	Katanga, about 100 km NE of Kamina, Lomami-Katanga distrcit, Niembo area									2000		bat, recoupement de méandre?
tadi Kieza	Congo Démocratique												
Pitashi	Congo Démocratique										2000		
Kasuo-Kibwe	Congo Démocratique	ouest du Lac Edouard		29° 0'60.00"E	0°14'0.00"S			29,0166666667	-0,2333333000	1500			
Tjamakele	Congo Démocratique			26°10'E	10°80'S								
Kafunda - Mikopo	Congo Démocratique			26°E	11°48'S								
Mokana Caves	Congo Démocratique												
Kimoyo	Congo Démocratique			26°19'00,1"E	10°4'0,1"S			26,3167000000	-10,0667000000				
~~Mbénaltembe~~	~~Gabon~~		~~Lastourville~~	~~11°43'15.74"E~~	~~2°23'29.68"S~~								
Mbénaltembe (Iwanga) (Laumanns)	Gabon		Lastourville	11°35'19,5"E	2°20'32,0"S			11,5887500000	-2,3422222222	149	2380		
Mavoundi	Gabon		Lastourville	10°59'18.00"E	2°56'52.00"S			10,9883333333	-2,9477777778				
Ntsona	Gabon		Lastourville	11°19'11.00"E	2°25'20.00"S			11,3197222222	-2,4222222222				
Diengui	Gabon		Lastourville	11°14'50.00"E	2°15'25.00"S			11,2472222222	-2,2569444444				
Ngeudi Eduma	Gabon	Mabanga village, Lébamba préfecture,	Lastourville	11°34'36,4"E	2°18'44,3"S			11,5766666667	-2,3122222000	177	830		
Ndongou (Laumanns), Ndongou 1 Cav	Gabon	Sanga village, Lébamba préfecture, Lou	Lastourville	11°10'34,7' E'	2°09'26,5'' S			11,1761111111	-2,1572222000	140	720		
Ndoungou	Gabon		Lastourville	11°10'34.00"E	2° 9'25.00"S			11,1761111111	-2,1569444444				
Mungangal/ Iduku	Gabon		Lastourville	11°26'27.0"E	2°10'39.4"S			11,4408333333	-2,1776111000	195			
Ngongongo	Gabon		Lastourville	11°11'41.0"E	2°11'33.0"S			11,1947222222	-2,1925000000				
Nguenda	Gabon		Lastourville	11°08'28.0"E	2°05'59.0"S			11,1411111111	-2,0997222000	158			
Lebamba (du Camp Malheur, Peyrot 8	Gabon	Lébamba préfecture, Louetsi-Wano dist	Lastourville	°30'2.87"E 11°27'42,	°11'26.60"S 2°11'2,6"S			11,4616666667	-2,1838889000	210	700		
de Malébé (g.de Lebamba, g. de Mou	Gabon		Lastourville	11°27'42.0"E	2°11'03.0"S			11,4616666667	-2,1841667000	210			
g. du Faucon	Gabon							13,2073900000	1,0728700000				
Caverne de Belinga (g. du Faucon)	Gabon		Lastourville	13°11'50.82"E	0°59'5.4"N			13,1974500000	0,9848333000	557			
Bongolo (grottocenter)	Gabon		Lastourville	11°30'36.24"E	2°15'0.88"S			11,5100666667	-2,2502444444				
Bongolo (Laumanns)	Gabon	Lebamba, Ndende, Ngoulie	Lastourville	11°27'44.0"E	2°14'14.8"S			11,4622222222	-2,2374444000	100	1150		
Dimany	Gabon	Lebamba, Ndende, Ngoulie	Lastourville	10°34'23.3"E	1°24'42.8"S			10,5731388889	-1,4118889000	208			
Abanda	Gabon		Lastourville	9°41'21.9"E	1°25'39.6"S			9,6894166667	-1,4276667000	50			
Bangouéguélé	Gabon		Lastourville	11°19'52.2"E	2°15'24.7"S			11,3311666667	-2,2568611000	118			
de Yengue (g. de Diengui, g. de Yengu	Gabon		Lastourville	11°19'52.2"E	2°15'24.7"S			11,3311666667	-2,2568611000	134			
Lipopa (de Noumbou Strinati 1958,19	Gabon	Lastourville, Ogooue-Lolo	Ogooue	12°43'52.68"E	0°49'51.96"S	32N 247500	2N 9908200 (c 90820	12,7313000000	-0,8327666667	400	1352		
Lihouma	Gabon		Ogooue	12°48'39.7"E	0°47'29.2"S			12,8110277778	-0,7914444000	456			
Limbenga	Gabon		Ogooue	12°45'2.4"E	0°50'1.3"S			12,7506666667	-0,8336944000	407			
Lipopa 1 et 2 (g. de Lastourville, f. de	Gabon		Ogooue	12°43'52.7"E	0°49'52.0"S			12,7313055556	-0,8311111000	400			
Mbera	Gabon		Ogooue	12°50'21.2"E	0°54'49.3"S			12,8392222222	-0,9136944000	339			
Mibounzi (Minbouzi)	Gabon		Ogooue	12°47'18.9"E	0°51'57.3"S			12,7885833333	-0,8659167000	480			
Pahon (de Pahou, de Paouen)	Gabon		Ogooue	12°45'05.1"E	0°48'51.8"S			12,7514166667	-0,8143889000	316			
Siyou2	Gabon		Ogooue	12°45'48.8"E	0°48'30.9"S			12,7635555556	-0,8085833000	290			
Youmbidi	Gabon		Ogooue	12°45'09.0"E	0°49'58.5"S			12,7525000000	-0,8329167000	410			
Ngougourouma (Kessipougou)	Gabon	Lastourville, Ogooue-Lolo	Ogooue	12°47'31.20"E	0°52'1.92"S	32N 254200	2N 9903700 (c 90370	12,7920000000	-0,8672000000	470	1550		
Mounguéké	Gabon	Lastourville, Ogooue-Lolo	Ogooue	12°47'52.80"E	0°47'47.40"S	32N 254936	9911877 (corrige : 911	12,7980000000	-0,7965000000	300	1591		
Missié	Gabon		Ogooue	12°43'38.64"E	0°50'11.04"S			12,7274000000	-0,8364000000				
Boukama	Gabon		Ogooue	12°46'40.60"E	0°48'24.03"S			12,7779444444	-0,8066750000				
Pahon1, Pahou1 (Paouen1) fausse	Gabon	Lastourville, Ogooue-Lolo	Ogooue	12°49'8.35"E	0°47'52.28"S	32N 249950	2N 9910100 (c 91010	12,8189861111	-0,7978555556	340	1153		
de la rivière Ibembé	Gabon	Lastourville, Bembikani, Ogooue-Lolo				32N 259050	2N 9898050 (c 898050)			360	641		
Mibounzi	Gabon												
Ndindinga	Gabon												
Tao Tao	Gabon												
Mabeto	Gabon												
Ndongou	Gabon			11,17620 E	2,15724 S			11,1762	-2,15724	117	1765		
d'Iroungou	Gabon									141	30		
de Yengue	Gabon			11,24667 E	2,25604S			11,24667	-2,25604	113	534		
Ngongongo	Gabon			11,19503 E	2,19254 S			11,19503	-2,19254	108	60		
de Ngouanga	Gabon			11,26550 E	2,29215 S			11,2655	-2,29215	147	130		
de Ntsona	Gabon			11,32091 E	2,42464 S			11,32091	-2,42464	140	269		
Gouffre de Ngeunda Nord	Gabon			11,1382 E	2,09153 S			11,1382	-2,09153	132	70		
de Ngeunda Nord	Gabon			11,13813 E	2,09350 S			11,13813	-2,0935	158	229		
Ngeuda centre	Gabon			11,14123 E	2,09969 S			11,14123	-2,09969	126	840		
de l'abri de Nguenda	Gabon			11°08'26"E	2°05'55"S			11,14055555	-2,098611111	145			
le tunnel (Gnoumbitsi)	Gabon			11°03'28"E	3°05'46"S			11,0577777778	-3,0961111000	170	150		
falaise et grotte de la sirène	Gabon			11°05'25"E	3°05'35"S			11,0902777778	-3,0930556000	170			
Moukalaba-Mourindi	Gabon												
Koumougari	Gabon			10°53'46,2"E	2°52'46,8"S			10,8961111110	-2,8794444000	64			
Case de passage (3 grottes)	Gabon			10°50'30,0"E	2°55'35,0"S			10,8416666667	-2,9263889000		27		
grotte du poulailler	Gabon			10°46'50,0"E	2°53'43,0"S			10,7805555557	-2,8952778000		73		
gouffre Sébastien	Gabon			10°58'46"E	2°56'28"S			10,9794444445	-2,9411111000		151		

de Mavoundi 1	Gabon			10°59'18"E	2°56'52"S			10,9883333300	-2,9477778000	70	192		
aven Mavoundi 2	Gabon			10°59'18"E	2°56'52"S			10,9883333300	-2,9477778000	70	75		
de Mavoundi 3	Gabon			10°59'18"E	2°56'52"S			10,9883333300	-2,9477778000	70	61		
de Mavoundi 4	Gabon			10°59'18"E	2°56'52"S			10,9883333300	-2,9477778000	70	100		
de Mavoundi 5	Gabon			10°59'18"E	2°56'52"S			10,9883333300	-2,9477778000	70	4		
tunnel de Doussiégoussou	Gabon			10°53'32,3"E	3°2'57,3"S			10,8923055556	-3,0492500000	63	95		
de Magalisseva	Gabon			11°06'0,9"E	3°09'3,7"S			11,1000000000	-3,1508333000	270			
Mougambi	Gabon			11°24'38,9"E	2°06'51,9"S			11,4105555556	-2,1141667000	230	258		
dilime de Mutsobulu	Gabon			11°24'20,7"E	2°07'3,5"S			11,4055555570	-2,1175000000	208	157		
de Mindoubi(résurgence)	Gabon			11°24'01,3"E	2°07'00,4"S			11,4002777770	-2,1166667000	173	20		
de Bangouéguelé	Gabon			11°26'21,6"E	2°10'29,5"S			11,4391666667	-2,1747222000	179	153		
de Munganga/Iduku	Gabon			11°26'27,0"E	2°10'39,4"S			11,4408333334	-2,1775000000	195	343		
de Mbenaltembe (Mbenaltembe Cave	Gabon			11°35'19,5"E	2°20'32,0"S			11,5886111111	-2,3422222000	149	2380		
de Tsona	Gabon			11°19'14,5"E	2°25'28,7"S			11,3205555556	-2,4244444000	170	266		
de Ndongou	Gabon			11°10'34,7"E	2°09'26,5"S			11,1761111110	-2,1572222000	140	384		
de Nguedi Eduma	Gabon			11°34'36,4"E	2°18'44,3"S			11,5766666660	-2,3122222000	177	830		
de Diengui	Gabon			11°19'52,2"E	2°15'24,7"S			11,3311111111	-2,2566667300	118	261		
de Tsende	Gabon			11°29'21,3"E	2°16'59,7"S			11,4891666667	-2,2830556000	109	50		
de Tongo	Gabon			11°36'01,9"E	2°19'37,0"S			11,6002777770	-2,3269444000	245	463		
de Boloukoubouè	Gabon			9°22'13,6"E	00°36'16,0"S			9,3704444440	-0,6044444440	24	25		
de Ntoum	Gabon			9°45'49,1"E	00°22'33,4"N			9,7636889000	0,3759444400	8	62		
de la Cascade	Gabon			10°42'17,5"E	2°48'05,5"S			10,7048611100	-2,8015277800	56	25		
Dimbi	Gabon			10°42'21,9"E	2°47'56,0"S			10,7060833300	-2,7988889000	56	211		
Munumbumba (grotte Deux)	Gabon			10°52'31,7"E	2°55'38,1"S			10,8754722200	-2,9272500000	66	148		
de Magalisseva 1	Gabon			11°05'29,4"E	3°08'23,3"S			11,0915000000	-3,1398055600	198	10		
perte de Magalisseva	Gabon			11°05'29,4"E	3°08'23,3"S			11,0913888889	-3,1397222000	180	76		
de Magalisseva 2	Gabon			11°05'29,2"E	3°08'18,0"S			11,0914444440	-3,1383333000	202	63		
de Magalisseva 3	Gabon										107		
de Magalisseva 4	Gabon			11°06'00,5"E	3°09'02,2"S			11,1001388900	-3,1506111000	216	51		
Cailloux de la Lune 1	Gabon			10°51'03,5"E	2°57'45,3"S			10,3509722200	-2,9625833300	93			
Cailloux de la Lune 2	Gabon			10°51'03,2"E	2°57'29,6"S			10,8508888900	-2,9582222200	91			
Macaya Cossi 1	Gabon			10°53'45,7"E	2°52'45,0"S			10,8960277800	-2,8791666700	95	34		
Macaya Cossi 2	Gabon			10°53'45,7"E	2°52'45,0"S			10,8960277800	-2,8791666700	95	8		
Macaya Cossi 3	Gabon			10°53'45,7"E	2°52'45,0"S			10,8960277800	-2,8791666700	95	51		
Macaya Cossi 4	Gabon			10°53'45,7"E	2°52'45,0"S			10,8960277800	-2,8791666700	95	14		
Biganga (g. de chauve-souris, g. du po	Gabon			10°46'48,9"E	2°53'32"S			10,7802500000	-2,8922222220	46	112		
Missala 1 (Case de Passage 1)	Gabon			10°50'29,5"E	2°55'24,2"S			10,8415277800	-2,9233888900	47	16		
Missala 2 (Case de Passage 3)	Gabon			10°50'29,5"E	2°55'24,2"S			10,8415277800	-2,9233888900	55	12		
Niawssa	Gabon			10°42'46,6"E	2°54'46,8"S			10,7129444400	-2,9130000000	124	100		
Midounga 1	Gabon			10°45'28,6"E	2°56'25,7"S			10,7579444000	-2,9404722200	131	23		
Midounga 2	Gabon			10°45'29,3"E	2°56'24,9"S			10,7581388900	-2,9402500000	132	10		
Zadie	Gabon							13,1974500000	0,9859500000				O
Kessipoughou	Gabon							12,7738900000	0,8672200000				O
Djibilong	Gabon							13,4629600000	1,3629610000				O
Batouala	Gabon							13,7500000000	1,3666667000				M
Bourdout Oumou	Tchad	Fada Ennedi									115		
de l'Arche	Tchad	Zouar, Tibesti									62		
Bicha	Tchad	Fada Ennedi									55		
de la guelta d'Archei	Tchad	Fada Ennedi									50		
Labyrinth Cave	Kenya	near Mombasa	Monbasa									-50	
Chasimba (calcaire)	Kenya	Pangani, Mombasa	Monbasa								500		
Mathioni/Kimikia/Ithundu (calcaire)	Kenya	Chyulu Mts., Kiboko									1900+1400		
Toroton (salty bedrock)	Kenya	Mount Elgon									500		
Mbenyenye (calcaire)	Kenya										400		
Shimoni Cave	Kenya										150		
Melka Murri Pot	Kenya											-45	
Chebotokon Cave (quartarenites)	Kenya	Cherangani Hills, Sina, Kapenguria, West Pokot)											
Ha Baroana (Hakhotso)	Lesotho												
Quthing Rock-Shelder	Lesotho												
Bisihiko (Tanambao)	Madagascar	Toliara province	Bemaraha	E43°46'	S23°32'			43,7666666667	-23,5333333000	5			
Mikea	Madagascar	Toliara province	Bemaraha	E43°46'	S23°28'			43,7666666667	-23,4666667000	37			
Mitoho area (RNI de Tsimanampetsot	Madagascar		Bemaraha	E43°45'	S24°03'			43,7500000000	-24,0500000000	50			
Anjohy Lalamanapaky	Madagascar	Bemaraha, Andamozavaky	Kelifely			22545	78620	44,7971200000	-18,7886550000	130	3960		
Anjohy Masoandro Mena	Madagascar	Bemahara, Ambalarano	Kelifely			22830	81435	44,8238340000	-18,7861060000	90	4082		
Anjohy Kibojenjy	Madagascar	Bemaraha, Bekopaka, Ankazoambo zon	Kelifely			225,15 c 22515,0	788,87 c 78887,0	44,7996530000	-18,7889280000	130	13717		
Anjohi Tsilika	Madagascar	Bemaraha, Be Rano	Kelifely			21825 c : 38K N:21825,0	88150 c : 38K E: 7888	44,7995930000	-18,7951640000	80	6581		
Complexe d'Anjohy Tsivintsy	Madagascar	Bemaraha, Tsivintsy	Kelifely	44°42'54.96"E	18°46'33.64"S	UTM38 469992	UTM 38 7923932	44,7152680000	-18,7760120000	90	6207		
Anjohy Soma	Madagascar	Bemaraha, Bekopaka	Kelifely			22930	77280	44,7844080000	-18,7851610000	56	5661		
Anjohin'Olitry	Madagascar	Bemahara, Ambalarano	Kelifely			223775 c: N 22377,5	789782 c: E 78978,2	44,8005170000	-18,7901720000	137	5610		
Anjohy Ambalarano	Madagascar	Bemahara, Ambalarano	Kelifely			22350	78950	44,8002490000	-18,7904200000	105	4357		
Anjohy Toakagai-Anjohirivotra	Madagascar		Kelifely			22350	78915	44,7999170000	-18,7904200000	100	3627		
Zohy Krisitaly	Madagascar		Kelifely	4°43,301' 44°43'18.1	°42,751' 18°42'45.06"S			44,7166666667	-18,7000000000	176	3355		
Zohy Velany Telo	Madagascar	Namoroka	Kelifely			28582,5	71692	44,7314650000	-18,7340060000	128	3290		
Anjohy Kina Kina	Madagascar		Kelifely	E044°46'	S19°00'	22445	78660	44,7974980000	-18,7895590000	123	3233		
Zohy Malalaky	Madagascar		Kelifely	4°43,182' 44°43'10.7	°42,891' 18°42'53.46"S			44,7166666667	-18,7000000000	127	2166		
Anjohy Lefy Mena	Madagascar		Kelifely			22500	78480	44,7957910000	-18,7890600000				
Zohy Scomony	Madagascar		Kelifely			23120	77190	44,7835570000	-18,7834430000	120	1636		
Zohy Siramamy	Madagascar		Kelifely			22565	78490	44,7958860000	-18,7884720000	125	1622		
Zohy Tsy Koza	Madagascar		Kelifely			22363,9	78980,6	44,8005390000	-18,7902950000	128	1000		
Anjohy Andranomavo	Madagascar		Kelifely			22350	78970	44,8004390000	-18,7904200000	115	1568		
Anjohy Be Rano	Madagascar		Kelifely			21830	81490	44,8243470000	-18,7951440000	80	1351		
Anjohy Be Moky	Madagascar		Kelifely			22460	78650	44,7974030000	-18,7894230000	110	1265		
Zohy Manakava	Madagascar		Kelifely			22299	79148,9	44,8021360000	-18,7908830000	118	1205		
Zohin'Ankazoambo	Madagascar		Kelifely			22375	78910	44,7998700000	-18,7901940000	108	1183		
Zohy Tsohamadiro	Madagascar		Kelifely			utm38 218841 c 21884,3	812750 c 81275	44,8223070000	-18,7946530000		1158		
Anjohy Rano Tsara	Madagascar		Kelifely			22575	78470	44,7956960000	-18,7883820000	125	1096		
Arch Cave	Madagascar		Kelifely			23120	77190	44,7835570000	-18,7834430000	120	1080		
Anjohy Siotra	Madagascar		Kelifely			23010	77520	44,7866870000	-18,7844000000	115	1079		
Zohy Dadabe	Madagascar		Kelifely			utm38 218466	812832	44,8223850000	-18,7949920000	72	1012		
Anjoh Tavy Fotsy	Madagascar		Kelifely			22480	78650	44,7974030000	-18,7892420000	125	2959		
Anjohibe	Madagascar	Narinda, Andranoboka, Mahajanga	Namoroka North	E046°52'	S15°33'			46,8666666667	-15,5500000000	100	5330		

Anjohibe n°1 (Anjohibe Cave)	Madagascar		Namoroka North	46°53'7.44"E	15°32'32.45"S			46,8854000000	-15,5423472222				
Anjohibe n°2	Madagascar		Namoroka North	46°52'39.31"E	15°33'30.62"S			46,8775861111	-15,5585055556				
Anjohibe n°3	Madagascar		Namoroka North	46°52'27.13"E	15°33'38.76"S			46,8742027778	-15,5607666667				
Anjohibe n°4	Madagascar		Namoroka North	46°52'46.38"E	15°33'18.79"S			46,8962166667	-15,5552194444				
Anjohibe Entrée C	Madagascar		Namoroka North	46°53'3.39"E	15°32'29.98"S			46,8842750000	-15,5416611111				
Anjohibe Entrée G	Madagascar		Namoroka North	46°53'7.75"E	15°32'26.55"S			46,8854861111	-15,5407083333				
Anjohibe Entrée I	Madagascar		Namoroka North	46°53'10.94"E	15°32'19.70"S			46,8863722222	-15,5388055556				
Anjohibe Entrée Q	Madagascar		Namoroka North	46°53'12.88"E	15°32'44.60"S			46,8869111111	-15,5457222222				
Anjohibe Entrée S (Grotte d')	Madagascar		Namoroka North	46°53'29.52"E	15°32'36.88"S			46,8915333333	-15,5435777778				
Anjohibe Entrée V1 (Grotte d')	Madagascar		Namoroka North	46°53'20.97"E	15°32'48.53"S			46,8891583333	-15,5468138889				
Anjohibe Entrée Y (Grotte d')	Madagascar		Namoroka North	46°53'14.64"E	15°32'53.27"S			46,8874000000	-15,5481305556				
Anjohibe n°2 Entrée 17_03 (Grotte d')	Madagascar		Namoroka North	46°52'39.07"E	15°33'26.79"S			46,8775194444	-15,5574416667				
Anjohibe n°2 Entrée 17_06 (Grotte d')	Madagascar		Namoroka North	46°52'38.47"E	15°33'31.12"S			46,8773527778	-15,5586444444				
Anjohibe n°2 Entrée 17_07 (Grotte d')	Madagascar		Namoroka North	46°52'43.51"E	15°33'20.37"S			46,8787527778	-15,5556583333				
Anjohibe n°2 Entrée 17_11 (Grotte d')	Madagascar		Namoroka North	46°52'33.92"E	15°33'28.52"S			46,8760888889	-15,5579222222				
Anjohibe n°2 Entrée 17_12 (Grotte d')	Madagascar		Namoroka North	46°52'37.07"E	15°33'25.15"S			46,8769638889	-15,5569861111				
Anjohibe n°3 - Entrée 17_08 (Grotte d	Madagascar		Namoroka North	46°52'29.30"E	15°33'30.29"S			46,8748055556	-15,5584138889				
Anjohibe n°3 Entrée 17_09 (Grotte d')	Madagascar		Namoroka North	46°52'30.49"E	15°33'28.03"S			46,8751361111	-15,5577861111				
Anjohibe n°3 Entrée 17_10 (Grotte d')	Madagascar		Namoroka North	46°52'32.74"E	15°33'28.76"S			46,8757611111	-15,5579888889				
Anjohibe (Siphon)	Madagascar		Namoroka North	46°52'27.72"E	15°33'40.61"S			46,8743666667	-15,5612805556				
Anjohibe n°4 Entrée 17_14 (Grotte d')	Madagascar		Namoroka North	46°52'47.54"E	15°33'16.86"S			46,8798722222	-15,5546833333				
Anjohikely	Madagascar	Narinda, Andranoboka, Mahajanga	Namoroka North	E046°53'	S15°32'			46,8833333333	-15,5333333000	100	2104		
Anjohiambovonomby	Madagascar	Namoroka	Namoroka South	E045°20'	S16°28'			45,3333333333	-16,4666667000	200	4630		
Anjohi Feno Efitra	Madagascar	Namoroka	Namoroka South	E045°19'01,3''	S16°25'055''			45,3169444444	-16,4319444000		2430		
Anjohy Belaka	Madagascar	Namoroka	Namoroka South	E045°20'03"	S16°27'50''			45,3341666667	-16,4638889000		1970		
Anjohi Ambovonombykely	Madagascar		Namoroka South	E045°21'14"	S16°27'51''			45,3538888889	-16,4641667000		1010		
Zohy Tsongom'omby	Madagascar		Namoroka South	45°20'7.53"E	16°27'6.81"S			45,3354250000	-16,4518916667				
Antsiroandoha	Madagascar		Ankarana	E049°06'	S12°54'			49,1000000000	-12,9000000000	125	1110		
Andalameloka	Madagascar		Ankarana	E048°59,959'	S13°02,070'			48,9833333333	-13,0333333000	44	1000		
Ambatoharanana	Madagascar	Ankarana, Ambilobe	Ankarana	E049°00'	S12°59'			49,0000000000	-12,9833333000	20	18100		
Andrafiabe	Madagascar	Ankarana, Ambilobe	Ankarana	E049°03'	S12°55'			49,0500000000	-12,9166667000	50	12030		
Ampandriamapanihy-Nord	Madagascar	Ankarana, Ambilobe	Ankarana	E049°02'	S12°58'			49,0333333333	-12,9666667000	20	4480		
Anjohimilaintety	Madagascar	Ankarana, Ambilobe	Ankarana	E049°02'	S12°57'			49,0333333333	-12,9500000000	40	9005		
Labyrinthe d'Antsarahaso	Madagascar	Analamera, Andrafiamena	Ankarana	E049°10'04,3''	S12°59'56,6''			49,1677777778	-12,9988889000		11879		
Antombanboanjo	Madagascar			E047°00'22,0''	S20°05'50,0''			47,0061111111	-20,0972222000	2112			
Bekapity	Madagascar	Fianarantsoa province		E45°13'	S22°37'			45,2166666667	-22,6166667000	1000			
Réseau Marosakabe	Madagascar	Namoroka massif				A SUIVRE pou Mada					90460		
Ambatoanjahana	Madagascar	Ankarana, Ambilobe									3850		
Antsatrabonko	Madagascar	Ankarana, Ambilobe									10475		
du Moteur	Madagascar	Ankarana									5237		
Andetobe	Madagascar	Ankarana, Ambilobe									4260		
B	Madagascar	Ankarana, Ambilobe											
Ambatoanjahana	Madagascar												
Anjohi'ny Voamboana	Madagascar	Ankarana, Ambilobe								100	3750		
Mandresy	Madagascar												
Anjohivasimba	Madagascar												
Andavakandrehy	Madagascar												
Y	Madagascar												
Ambarabanja	Madagascar												
Anjohiantsatrabonko	Madagascar												
Anjohibefoka	Madagascar												
Anjohy Lehilay Berehoky	Madagascar												
Zohy Tsarabe	Madagascar												
Zohy Tsara Be	Madagascar												
Analamisondotra	Madagascar												
Caméléon	Madagascar	Ilharana									1777		
Zohy Antsifostra	Madagascar												
Ambatofomela	Madagascar	Analamera, Andrafiamena									1572		
Ankoa Patra	Madagascar												
Seconds Cave	Madagascar												
Gouffre Gaby	Madagascar												
Araignées	Madagascar												
Anjohiambatafotsy	Madagascar												
Ambiky	Madagascar												
Antaninkatakatan'i Benoely	Madagascar												
Ankilitelo	Madagascar	Mikoboka, Toliara									630	-230	
Puis des tourelles	Madagascar	Ankarana										-215	
Aven des perroquets	Madagascar	Mikoboka, Toliara										-200	
Ampehabe (Cave 12)	Madagascar	Mikoboka										-166	
	Madagascar	A SUIVRE pou Mada											
Dio	Mali												
Kateng Boko	Mali												
Nafadié	Mali												
Sanga	Mali												
Ubuvumo Bwibihonga	Rwanda		Rwanda	E029°22'42,5''	S01°38'53,2''			29,3783333333	-1,6480556000	2341	4530		
Ubuvumo Nyabikuri-Ruri	Rwanda		Rwanda	E029°39,685'	S01°25,914'			29,6500000000	-1,4166667000	2212	3384		
doline	Rwanda		Rwanda	E029°40,125'	S01°26,764'			29,6666666667	-1,4333333000	2014			
Ubuvumo Manjari 2	Rwanda	Virunga Mountains	Rwanda	E029°32'06,6''	S01°33'12,6"			29,5350000000	-1,5533333000	2250	1660		
Ubuvumo bwa Musanze	Rwanda		Rwanda	E029°36,783'	S01°30,212'			29,6000000000	-1,5000000000	1870	1600		
Ubuvumo Cyamazera	Rwanda		Rwanda	E029°22'25,8"	S01°38'37,0"			29,3736111111	-1,6436111000	2295	1484		
Ubuvumo Gacinyiro 1	Rwanda			29°34'58.38"E	1°27'32.22"S								
Ubuvumo Gacinyiro 2	Rwanda		Rwanda	E029°35,049'	S01°27,697'			29,5833333333	-1,4500000000	2159	1470		
Ubuvumo Nyiragihima	Rwanda		Rwanda	E029°33'12,2"	S01°30'02,0"			29,5533333333	-1,5005556000	2215	1116		
Ubuvumo Rwego (des commandos)	Rwanda		Rwanda	E029°35'43,7"	S01°29'54,7"			29,5954722222	-1,4985278000	2314	952		
Ubuvumo Gisuvo	Rwanda		Rwanda	E029°44,686'	S01°23,631'			29,7166666667	-1,3833333000	2031	733		
Ubuvumo Numatongo	Rwanda		Rwanda	E029°43,376'	S01°24,906'			29,7166666667	-1,4000000000	2055	620		
Ubuvumo Ruswa	Rwanda		Rwanda	E029°44,041'	S01°24,173'			29,7333333333	-1,4000000000	2047	510		
Ubuvumo Kabari	Rwanda		Rwanda	E029°22'52,1"	S01°38'44,7"			29,3811111111	-1,6455556000	2302	496		
Ubuvumo Nyaruhonga 3	Rwanda		Rwanda	E029°29,784'	S01°34,378'			29,4833333333	-1,5666667000	2694		-32	
Ubuvumo bwa Nyirabadogo	Rwanda										1500		
Ubuvumo Minyove	Rwanda										756		

Ubuvumo Kanyondo	Rwanda												
Kleines Labyrinth	Somalie		Bihendula	E048°16'54"	N08°27'50"			48,2816666667	8,4638889000	505	190		
Grosses Labyrinth	Somalie		Bihendula	E048°16'54"	N08°27'50"			48,2816666667	8,4638889000	505	130		
Bura Wadal fossil Cave	Somalie		Bihendula	E048°16'54"	N08°27'50"			48,2816666667	8,4638889000		190		
Guud Aanoud	Somalie												
Hyanenlabyrinth	Somalie												
Guud Biyod	Somalie												
Höhle 1 bei Las Anod	Somalie												
Hayla	Somalie												
Showli Berdi	Somalie												
Mugdile	Somalie												
Dolinenlabyrinth	Somalie												
Golharfo	Somalie												
Shama Hale	Somalie			E045°07'	N07°56'			45,1166666667	7,9333333000		58		
Nandembo	Tanzania	Kilwa district, Kipatimu, Nandembo, Ma	Matumbi	E038°53'00"	S08°30'38"			38,8833333333	-8,5105556000	430	7510	-114	
Namaingo Wet (Laumanns)	Tanzania	Kilwa district, Kipatimi, Mtondo wa Kim	Matumbi	E038°54'31,8"	S08°32'33,2"			38,9088333333	-8,5425555556	340	2390		
Namaingo N°3	Tanzania		Matumbi	38°54'31.80"E	8°32'33.30"S			38,9088333333	-8,5425833333		44		
Mampombo (Laumanns)	Tanzania	Kilwa district, Kipatimu, Mampombo, M	Matumbi	E038°49'56"	S08°28'46"			38,8322222222	-8,4794444444	330	1250		
Mpatawa	Tanzania	Kilwa district, Kipatimu, Nandembo, Ma	Matumbi	E038°52'25"	S08°30'27"			38,8736111111	-8,5075000000	660	1160		
Nangoma Cave (Upper entrance)	Tanzania		Matumbi	38°52'60.00"E	8°30'38.00"S			38,8833333333	-8,5105555556				
Namaingo Dry	Tanzania		Matumbi	38°54'31.80"E	8°32'33.30"S			38,9088333333	-8,5425833333				
Upper Chingya	Tanzania		Matumbi	38°54'32.50"E	8°32'58.50"S			38,9090277778	-8,5495833333				
Lower Chingya	Tanzania		Matumbi	38°54'32.50"E	8°32'58.50"S			38,9090277778	-8,5495833333				
Kilindima	Tanzania		Matumbi	38°52'47.10"E	8°30'39.70"S			38,8797500000	-8,5110277778				
Ngunde Cave	Tanzania		Matumbi	38°49'37.20"E	8°28'29.90"S			38,8270000000	-8,4749722222				
Nakilango Cave	Tanzania		Matumbi	38°49'20.20"E	8°28'10.70"S			38,8222777778	-8,4696388889				
Maji-Maji Cave	Tanzania		Matumbi	38°49'18.50"E	8°29'13.00"S			38,8218055556	-8,4869444444				
Likolongomba	Tanzania		Matumbi	38°49'15.20"E	8°28'21.00"S			38,8208888889	-8,4725000000				
Nawanja Cave	Tanzania		Matumbi	38°49'39.20"E	8°28'21.50"S			38,8275555556	-8,4726388889				
Mtumbukiae Cave	Tanzania		Matumbi	38°52'53.20"E	8°29'3.00"S			38,8814444444	-8,4841666667				
Kihangambembe	Tanzania		Matumbi	38°55'17.30"E	8°33'3.30"S			38,9214722222	-8,5509166667				
Kiongoro	Tanzania		Matumbi	38°53'2.40"E	8°30'37.54"S			38,8840000000	-8,5104277778				
Miumbukiae Cave	Tanzania		Matumbi	38°52'53.20"E	8°29'3.00"S			38,8814444444	-8,4841666667				
Ngunde (Nakilango)	Tanzania	Kilwa district, Kipatimu, Nandembo, Ma	tumbi Hills								681		
Amboni Caves	Tanzania		Tanga	39° 2'60.00"E	5° 3'60.00"S			39,0500000000	-5,0666666667				
Amboni Cave 1 & 2	Tanzania	Tanga, Kiomoni, Mukulumuzi River	Tanga	39° 2'48.50"E	5° 4'20.90"S			39,0468055556	-5,0724722222	21	1105		
Amboni Cave 3A	Tanzania	Tanga, Kiomoni, Mukulumuzi River	Tanga	39° 2'42.50"E	5° 4'20.90"S			39,0451388889	-5,0724722222	21	620		
Amboni Cave 3B	Tanzania		Tanga	39° 2'44.50"E	5° 4'20.90"S			39,0456944444	-5,0724722222				
Amboni Cave 4	Tanzania		Tanga	39° 2'37.90"E	5° 4'25.00"S			39,0438611111	-5,0736111111				
Amboni Cave 5	Tanzania		Tanga	39° 2'33.60"E	5° 4'21.70"S			39,0426666667	-5,0726944444				
Amboni Cave 6 A-B	Tanzania		Tanga	39° 2'18.40"E	5° 4'17.00"S			39,0384444444	-5,0713888889				
Amboni Cave 7A	Tanzania		Tanga	39° 2'17.30"E	5° 4'15.10"S			39,0381388889	-5,0708611111				
Amboni Cave 7B	Tanzania		Tanga	39° 2'43.30"E	5° 4'25.90"S			39,0453611111	-5,0738611111				
Amboni Cave 8	Tanzania	Tanga, Kiomoni, Mukulumuzi River	Tanga	39° 2'36.50"E	5° 4'18.60"S			39,0434722222	-5,0718333333	23	755		
Rock Shelter Cave	Tanzania		Tanga	39° 2'25.10"E	5° 4'16.20"S			39,0403055556	-5,0711666667				
Kiomoni Quarry Cave 1	Tanzania		Tanga	39° 3'5.28"E	5° 4'8.55"S			39,0514666667	-5,0690416667				
Mwinyigogo	Tanzania	Tanga, Amboni, Mukulumuzi River	Tanga							25	2640		
Pango La Tumbuli	Tanzania	Songwe, Mbeya	Songwe									-50	
Pango La Popo	Tanzania	Songwe, Mbeya	Songwe									-25	
Mangapwani Cave	Tanzania			39°11'28.60"E	6° 0'8.30"S			39,1912777778	-6,0023055556				
Lake Inampamba	Zambia		Mpongwe										
Lake Kasiba	Zambia		Mpongwe										
Lake Ishiku	Zambia		Mpongwe										
Lake Chilengwa	Zambia		Mpongwe										
Bilimia River Cave	Zambia		Mpongwe										
Mukalowatmpa	Zambia	the southern margin of the Mpongwe k	Mpongwe									-8	
Leopard's hill	Zambia	Leopard's Hill	Lusaka	~~E028°43'20"~~	~~S16°40'15"~~						298		
Leopard's hill	Zambia	Leopard's Hill	Lusaka	~~E28.45~~	~~S15.25~~								
Leopard's hill	Zambia	Leopard's Hill	Lusaka					28,7207300000	-15,6045300000		298		
Ngewerere	Zambia		Lusaka	28°20'0.00"E	15°18'0.00"S								
Ngwerere ACR2022	Zambia					15° 19' 00" S	28° 19' 00" E	28,3166666667	-15,3166667000	1280			
Ngwerere chiro	Zambia							28,3300000000	-15,3000000000				h
Chilanga	Zambia		Lusaka	28°16'E	15°33'0.00"S			28,2666666667	-15,5500000000	1236			
Chilanga chiro	Zambia							28,2700000000	-15,5500000000				H
Chilanga2 ACR2022	Zambia					15° 33' 00" S	28° 16' 00" E						
Chipongwe	Zambia		Lusaka	28°14'0.00"E	15°38'S					1128			
Chipongwe (Shimabala) floor	Zambia		Lusaka	28°14'15"E	15°39'01"S								
Chipongwe Cotterill	Zambia		Lusaka	28°20' E	15°18' S								
Chipongwe chiro	Zambia												H
Kapongo (Freeman's Guano Cave)	Zambia	at Kafue River gorge	Lusaka										
Kapongo	Zambia	Kafue river gorge, Shimabala area Lusak	Lusaka	E028°20'58,6"	S15°46'17,3"					1309	245		
Nsalu Cave	Zambia		Luapala										
Membo	Zambia	Membo hill, Kilwa island Nchelenge dist	Luapala	E029°04'04,5"	S09°19'00,8"			29,0679166667	-9,3168888889	931	730		
Broken Hill Cave	Zambia		Kabwe District										
Mumbwa Caves	Zambia	Central Zambia	Mumbwa					25,5160486000	-15,7722531000				
Shankenge cave (insignifiant chamber	Zambia	karst plateau between Chisasa and Lum	Solwezi										
Baya	Zambia			27° 7'0.00"E	11°52'0.00"S			27,1166666667	-11,8666666667	1326			
Jelli's sinkhole	Zambia			28°27'42"E	15°29'30"S			28,4616666667	-15,4916667000			-63	
Batcave	Zambia							28,6988397000	-15,8741666000				
Kriel ACR2022	Zambia					15° 19' 11" S	28° 19' 55" E	28,3319444444	-15,3197222000				
Dzala ACR2022	Zambia					15° 26' 00" S	28° 20' 00" E	28,3333333333	-15,4333333000				
Kapongo chiro	Zambia												H
Kapongo Ruggieri 2003	Zambia			28°20'58,6"	15°46'17,3"								R
Kapongo ACR2022	Zambia					15° 46' 00" S	28° 21' 00" E						
Nachikufu	Zambia							31,1467400000	-12,2369400000				G
Chipongwe	Zambia			28°13'58,39"E	15°38'49,31"S			28,2328866000	-15,6470303000	1117			
Twin Rivers	Zambia							28,1306966000	-15,5615075000				
Marende	Zambia							28,2258988000	-15,6402532000				
Kapongo 1	Zambia							28,3496085000	-15,7715217000	996			
Kapongo 2	Zambia							28,3496718000	-15,7716868000	996			
Kapongo 3	Zambia							28,3497877000	-15,7717538000	996			

7.4. ANNEXE N°4 DU CHAPITRE N°1: TABLEAU DES DECLINAISONS MAGNETIQUES DES PLANS TOPOGRAPHIQUES UTILISEES.

Noms	X	Y	Z	Date	Déclinaison (°)	Source
Grobler N ou Grobler 1				2017	18,57	Trucker S. Grove A., 2018
Koelenhof (avant Grobler)			1485	1972	17,02	SASA 1972
Sterkfontein (Silberberg grotto, Exit series, Terror Chamber, Milner Hall Name Chamber, Fossil Chamber)					15,87	Martini 2003 (Fig. 2)
Lincoln - Fault cave					16,2	Boshoff 1990
Armaggedon				2013 à 2015	26,48	Trucker, 2015 Bulletin SASA Volume 41 p.39 à 47
Rising Star *(Westminster, Empire, Bedspring, Silt)*				1985	15,45	Harris J., Rees D., Möller H., Priddle C., van der Hoodt R. 1985
Eel			1435	?		Möller H., Priddle C., Redmayesmith, Harris J., Rees D.
Eel				07/03/1988	16,3	Martini , Bulletin SASA, Volume 31, p.43
Villa Louisa III				2014	18,22	Boshoff P., Hunter R., Tucker S.
Villa Louisa I				2014	18,22	Boshoff P., Hunter R., Tucker S.
Villa Louisa II				1971	17,08	
Yom Tov				1972		
Yom Tov				2016	18,08	van Rooyen D., Hlophe M., Tucker S ; Ramalepa M.

Tableau 60 des déclinaisons des topographies de grottes.

8. FICHES METHODOLOGIQUES SIG

8.1. FICHE METHODOLOGIQUE N°1 : INTERROGER LA CARTE TOPOGRAPHIQUE OU L'IMAGE SATELLITE DE L'AFRIQUE DU SUD PAR FLUX WMS

Dans la fenêtre de droite, choisir « *Browse ERDAS APOLLO Catalog* »
Coverage Catalog > *MAPPING* > *50K* > *MOSAIC* > *50k_MOSAIC_FIRST_EDITION*



Figure 1087 Portail de visualisation et de téléchargement des données géographiques de l'Afrique du Sud.

Dans la fenêtre du bas, cliquer sur wms.
On obtient ainsi les adresses wms pour ces cartes :
Carte topographique au 1/50 000,première édition :
http://apollo.cdngiportal.co.za/ApolloCatalogWMSPublic/service.svc/get?service=WMS&version=1.3.0&request=GetLayer&layers=50K_MOSAIC_FIRST_EDITION&
Carte topographique au 1/50 000 , édition Déc 2018 :
http://apollo.cdngiportal.co.za/ApolloCatalogWMSPublic/service.svc/get?service=WMS&version=1.3.0&request=GetLayer&layers=50K_MOSAIC_DEC2018&
Pour les photographies aériennes, il faut choisir : Coverage Catalog > IMAGERY > ORTHO_RECTIFIED > WGS84 > MOSAIC > DIGITAL > MOSAICS.
Choisir celle du bas RSA_MOSAIC_50CM_201612.
Orthophotographie (image satellite) :
http://apollo.cdngiportal.co.za/ApolloCatalogWMSPublic/service.svc/get?service=WMS&version=1.3.0&request=GetLayer&layers=RSA_MOSAIC_50CM_201612& (juin 2024)
On peut alors intégrer les adresses wms de ces différentes cartes dans un logiciel SIG et les visualiser facilement si on est connecté à internet.

8.2. FICHE METHODOLOGIQUE N°2 : CONSTRUIRE UNE HYPSOMETRIE AVEC ARCMAP A PARTIR D'UN MNT

Avec le logiciel ARCMAP, en faisant clic-droit sur le MNT que nous venons de créer à l'étape précédente et en sélectionnant *Properties* > *Symbology*, on peut choisir par exemple *Stretched* ou *Classified* pour classer les altitudes et mettre en valeur certaines surfaces morphologiques du paysage.

Avec les logiciels SIG, nous avons le choix entre plusieurs gammes de couleurs pour faire varier l'hypsométrie, comme l'illustre la Figure 1088, ci-dessous.

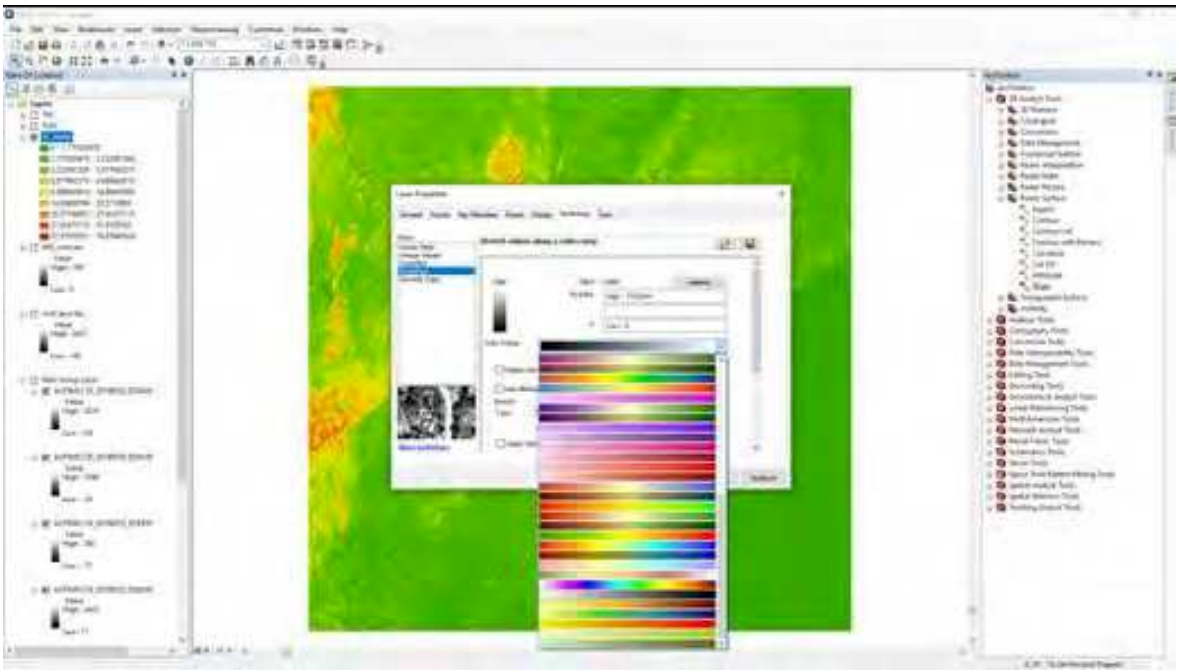


Figure 1088. Plusieurs gamme de couleurs sont disponibles sur le logiciel Arcmap.

8.3. FICHE METHODOLOGIQUE N°3 : REUNIR DES DALLES ASCI POUR FAIRE UN MNT AVEC ARCMAP (ARCGIS™)

Objectif : réunir les dalles de MNT pour obtenir une seule dalle. Cette opération consiste à harmoniser les minimums et maximums d'altitude entre toutes les dalles afin d'avoir une carte hypsométrique cohérente, dont les niveaux de gris s'étalent du blanc au noir. Le noir pour l'altitude la plus basse de toute la dalle et le blanc plus l'altitude la plus élevée de la dalle.

Le nom de chaque dalle fait référence à sa position géographique, par exemple ALPSMLC30_S011E013_DSM. Ici la dalle est située à 11°S et13°E.

Prenons l'exemple du traitement des dalles de MNT pour le sud du Mozambique (Figure 34). Sur les figures suivantes, ci-dessous (Figure 34 et Figure 35), l'écran est divisé en trois, avec les couches utilisées dans la colonne de gauche, la *« Table of Contents »*, et les outils utilisées dans la boîte à outils (*Arc Tool Box*) sont dans la colonne de droite.

L'opération suivante est réalisée avec l'outils Mosaic to New Raster disponible ici : Arctoolbox > Data Management Tools > Raster > Raster Dataset > Mosaic to New Raster.

Dans la première ligne, on choisit directement le nom du dossier qui contient les dalles.

Deuxième ligne, on indique la destination du nouveau fichier que l'on va obtenir et on lui donne un nom, de moins de 13 lettres.

Sixième ligne, on indique le *Number of bands* : 1.

Le temps de l'opération sera plus ou moins long en fonction du nombre de dalles. Pour la totalité de l'Afrique australe l'opération a duré plus de trois jours et a donné un fichier final de 60 Go (giga octet).

Le logiciel ARCGIS™ va créer un seul fichier MNT qui peut être très lourd. Sur GlobalMapper et Qgis la réunion est automatique et permet un gain de temps au niveau du calcul. Il y a toujours l'exportation du raster qui prend du temps.

Le MNT de l'Afrique australe, compilé à partir des 641 dalles du satellite DAICHI (JAXA) , soit 174 giga de données, est réduit à 8 giga (Figure 1088).

8.4. FICHE METHODOLOGIQUE N°4 : TRAITEMENT RRIM.

Nous avons parlé du traitement RRIM des MNT dans le Chapitre n°1 (p.77). Au préalable, il faut réunir les dalles de MNT afin d'avoir un seul fichier raster de MNT comme nous l'avons indiqué sur la fiche méthodologique précédente (p.1111).

Avec Qgis

Les futures opérations se feront avec le logiciel Qgis.

Étape 1

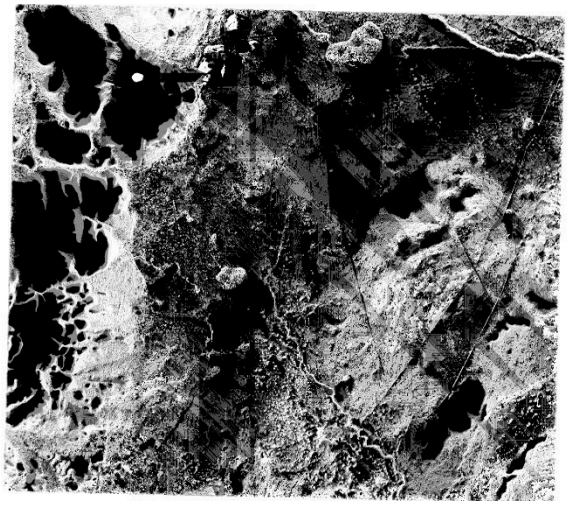


Figure 1089 Raster NTO (Negative Topographic Openness) (bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud).

Boîte à outils de traitement > *Topographic openness*

Permet de créer un PTO et un NTO.

Paramètres :

Radial limit : 10000
Méthod [1]line tracing
Multi Scale Factor : 3
Number of sector : 8
Unit [0]Radians

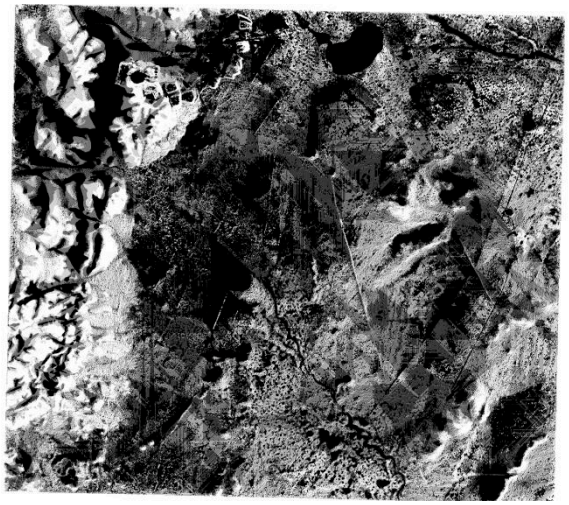


Figure 1090 Raster PTO (Positive Topographic Openness) (bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud).

Étape 2

Utiliser la calculette.
Raster > Calculette Raster
Calcul à effectuer : « (*Positive Openness - Negative Openness*) /2 » pour créer un *Openness Différentiel.*

("Positive Openness@1" - "Negative Openness@1") / 2
Remarquons que nous utilisons l'inverse de la « *Negative Openness* ».
Pour terminer le calcul et rendre fonctionnel le bouton « ok », il faut définir le dossier où va être enregistré le fichier créé. Il faut aussi bien définir le système de projection de ce nouveau fichier.
Pour cela, il faut définir les paramètres du *Raster calculator*, le *Reference layer (s)* en cliquant sur le bouton à trois points et en indiquant d'utiliser le MNT et valider par Ok. Ensuite il faut bien définir aussi l'*Output extend* en cliquant sur le bouton, et enfin choisir l'Output CRS en cliquant sur la flèche vers le bas, cela valide le système de référencement du fichier source.

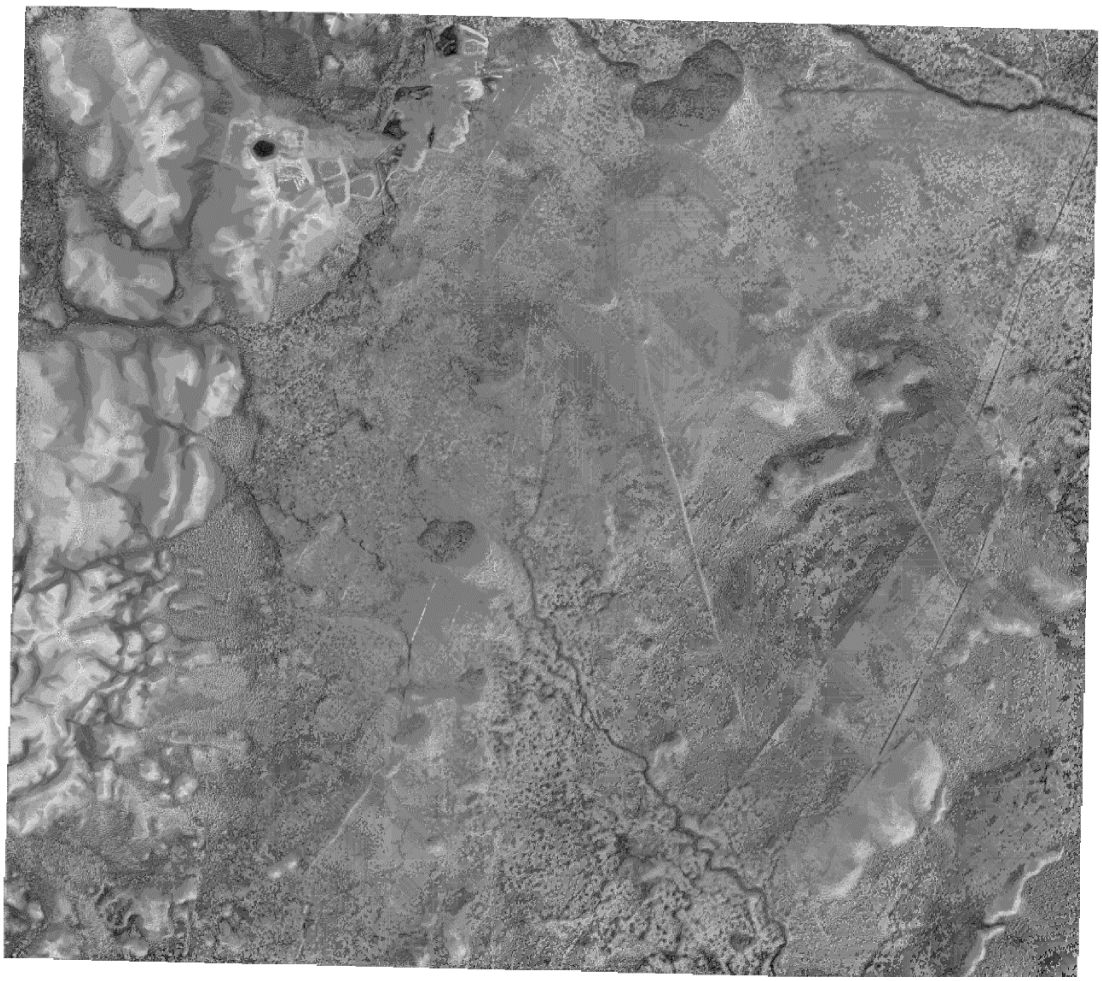


Figure 1091 Rendu du relief par Differential Openness calculé en utilisant la Calculette Raster(bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud).

Étape 3

Modifier le contraste dans symbologie.

Clic-droit sur le raster > Propriétés
Choisir Symbologie
Cliquer sur Paramètres de valeurs Min / max pour ouvrir le menu
Cochez « moyenne +/- déviation standard » (valeur 2) au lieu de Min/max
Appuyez sur OK

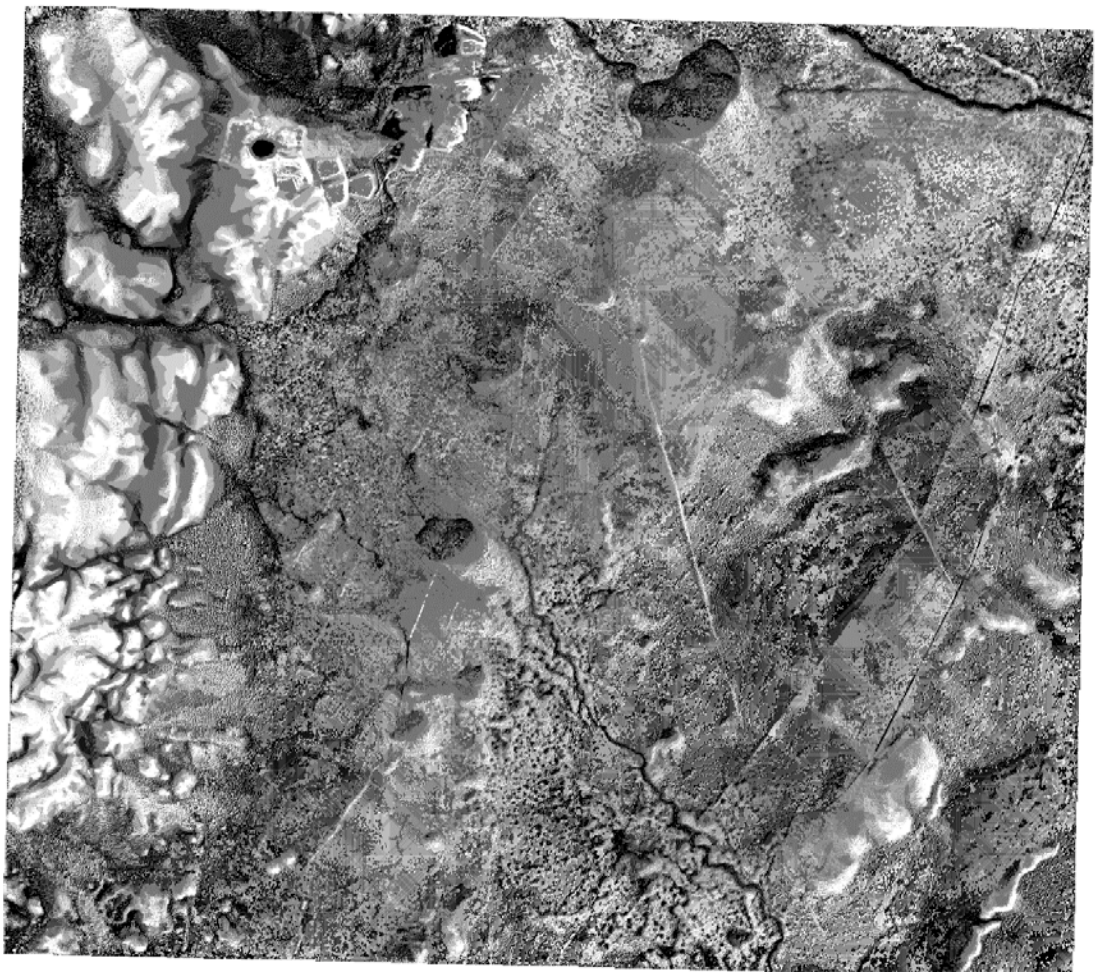


Figure 1092 Résultat obtenu avec modification du contraste du Differential Openness(bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud).

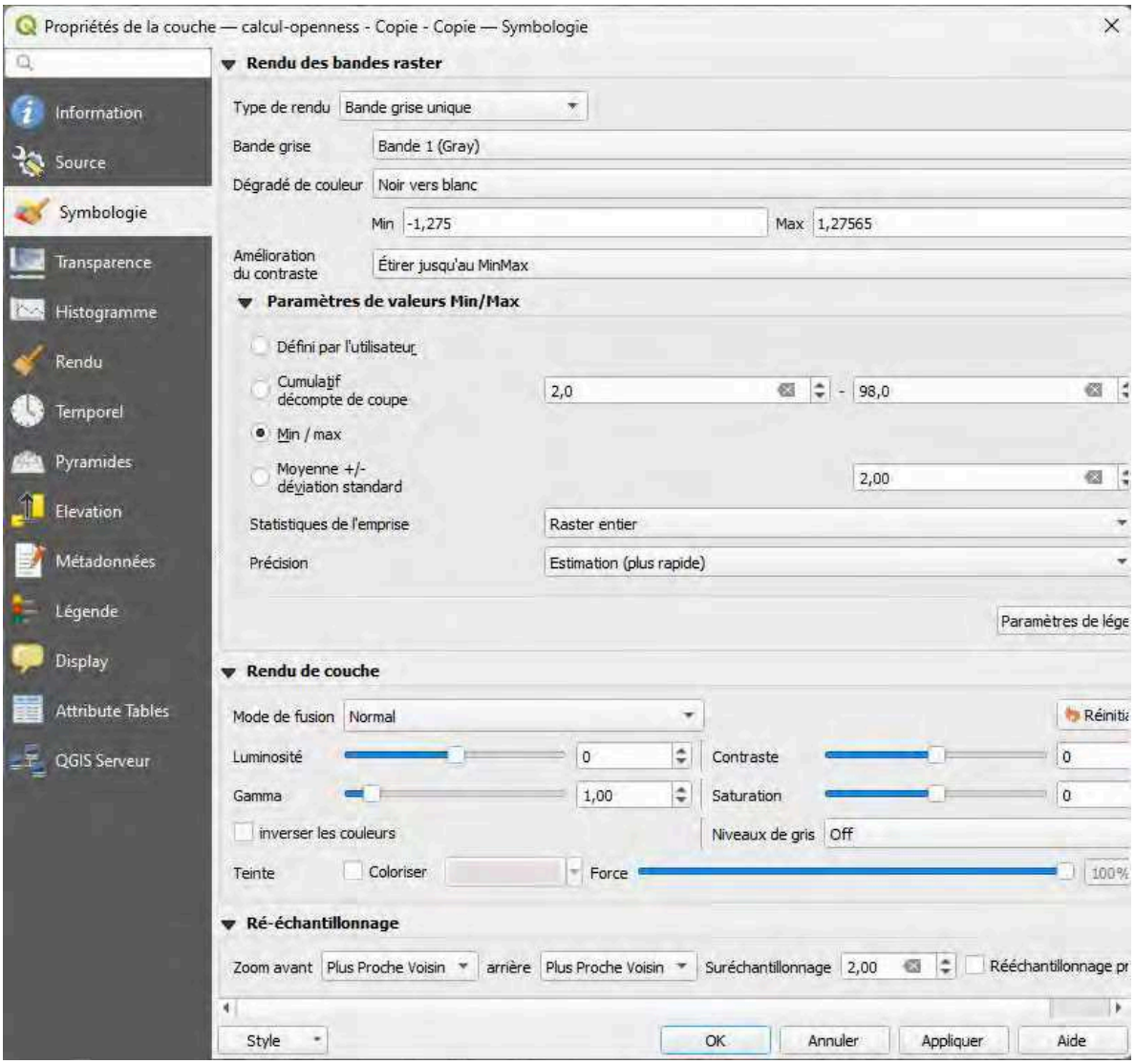


Figure 1093 Réglages initiaux des paramètres de valeur Min/max dans Qgis pour l'étape 3.

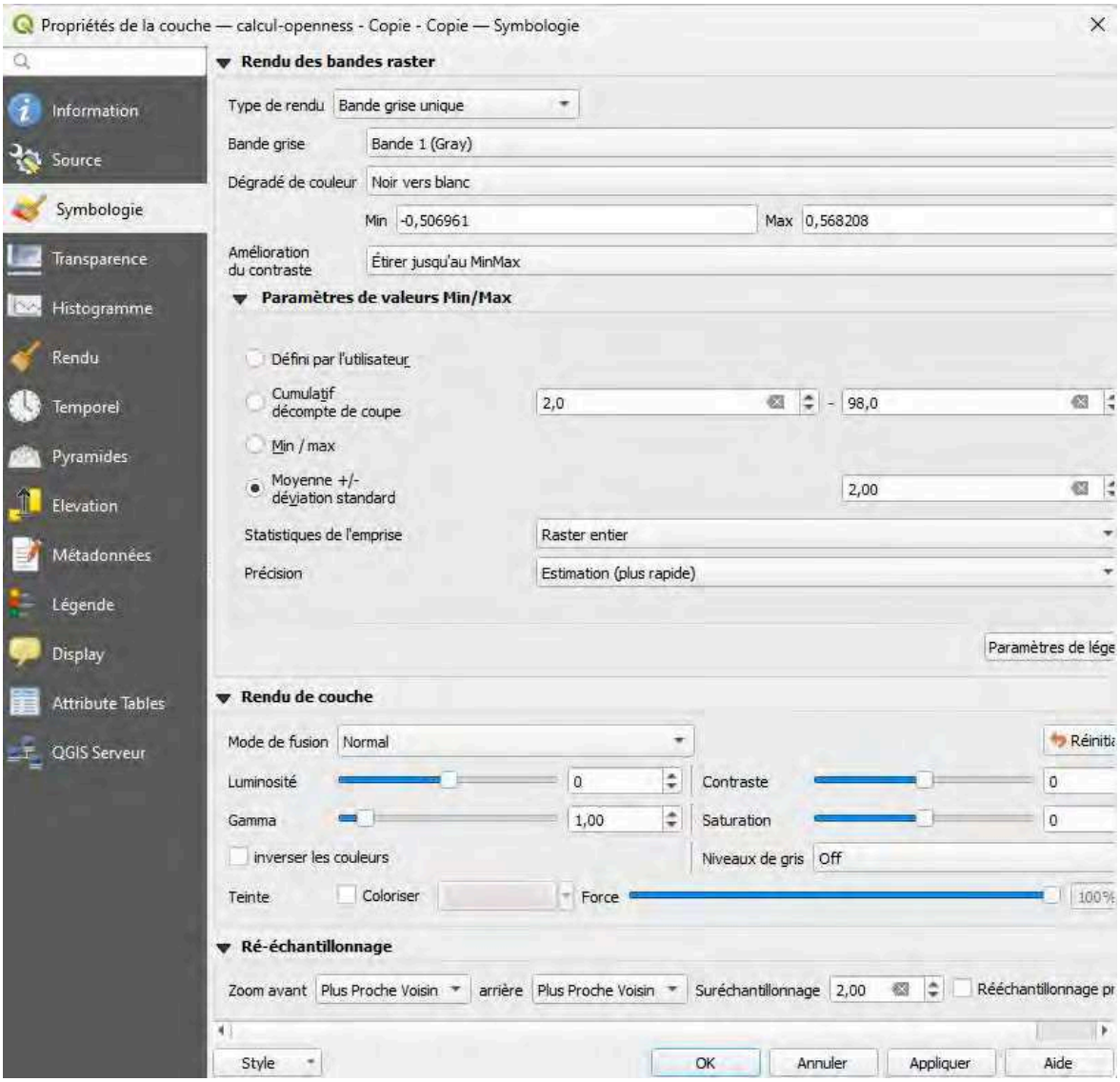


Figure 1094 Réglage des paramètres de valeur Min/max : en moyenne /- déviation standard dans Qgis pour l'étape 3.

Étape 4

Resampling mode

Si le raster est trop pixelisé, il faut le ré-échantillonner avec le paramètre Symbologie. Dans le menu de Ré-échantillonnage on modifie le paramètre initial :

- Zoom avant « plus proche voisin » arrière « Plus proche Voisin »

En :

- Zoom avant « Bilénaire » arrière-« Moyenne ».

Cliquer sur rééchantillonnage précoce, selon la version de Qgis.



Figure 1095 Résultat obtenu avec rééchantillonnage du Differential Openness(bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud).

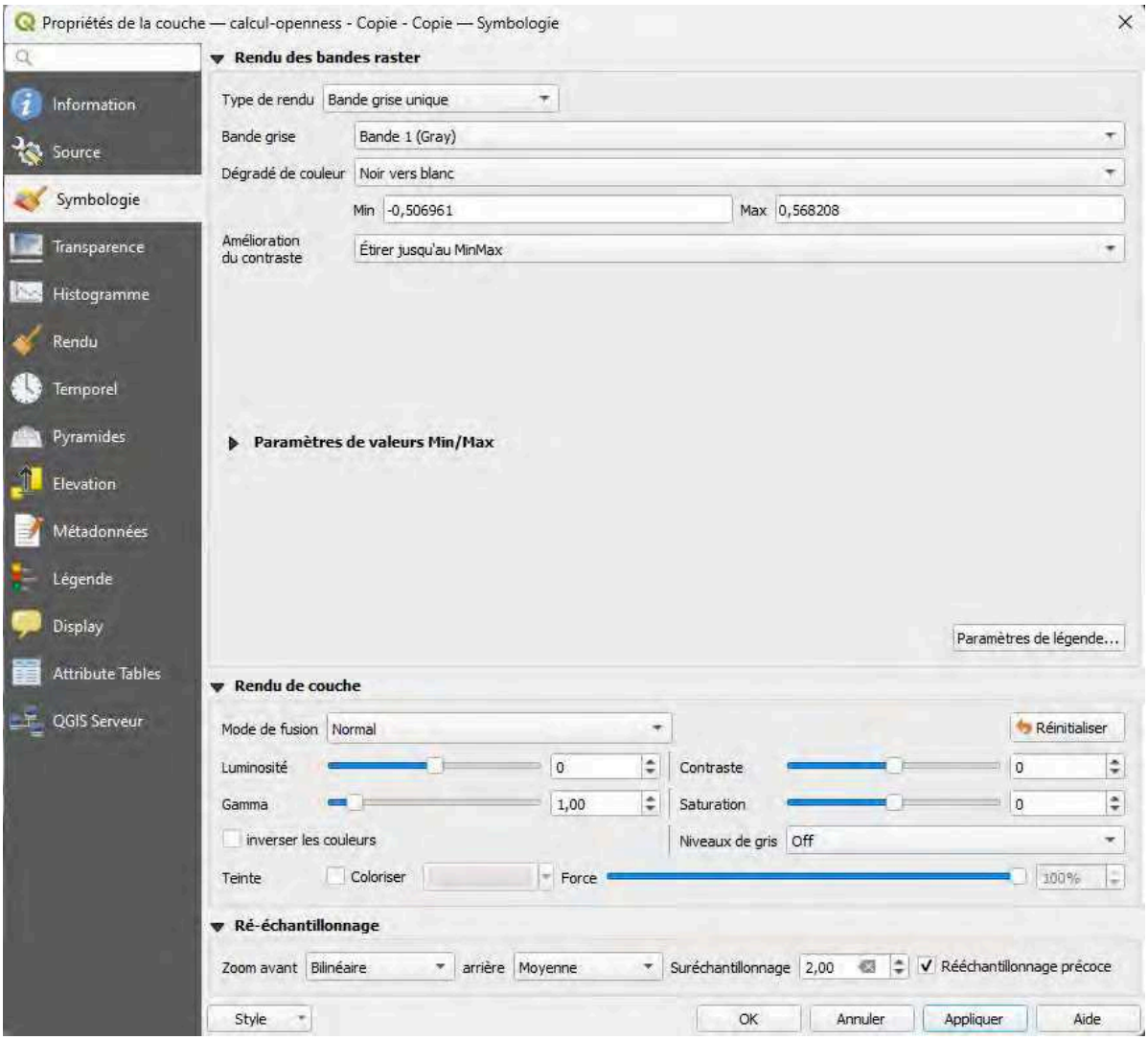


Figure 1096 Réglage des paramètres du rééchantillonnage lors de l'étape 4 dans Qgis pour dépixéliser.

Étape 5

Calcul des pentes.

Dans « Boîte à outils de traitements », choisir « Pente » dans « analyse de terrain raster » (pas celui de GDAL).

Laisser facteur Z : laissez la valeur 1°.

Dans « Couche d'élévation », vérifier que ce soit bien le MNT et non le *Differential Topographic Openness*, le fichier réalisé par la calculette raster.

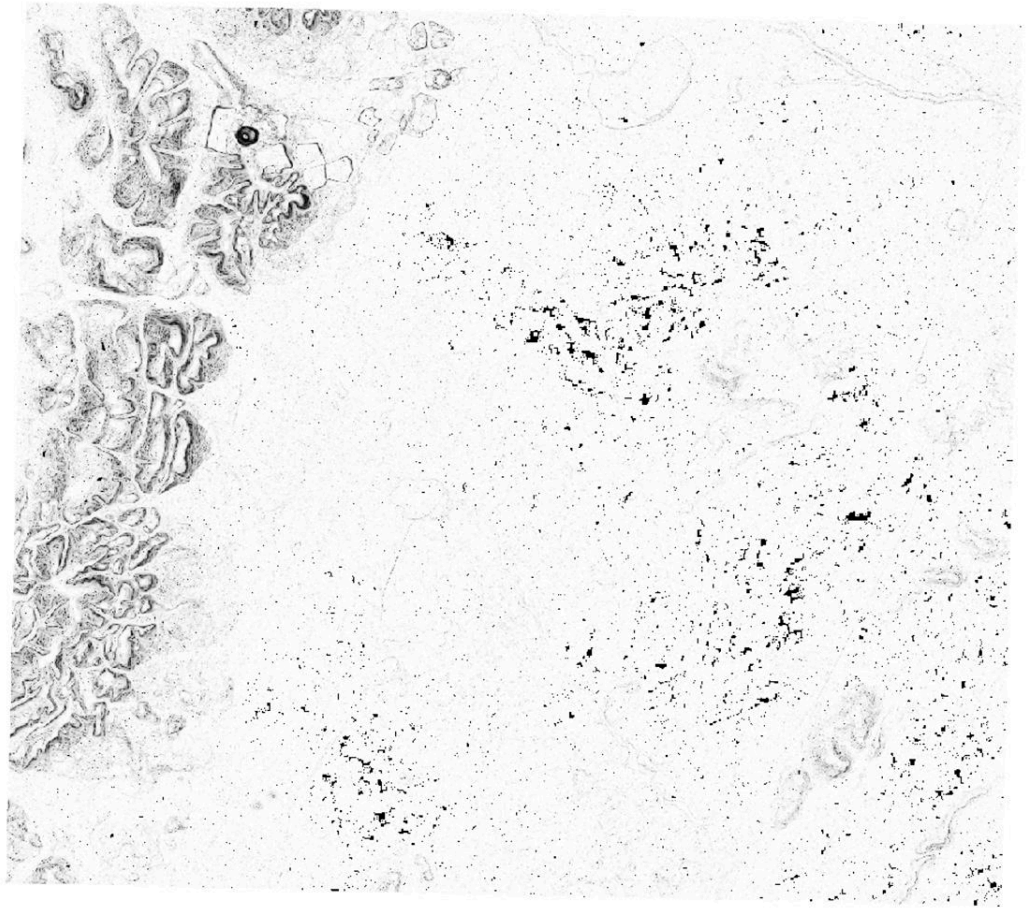


Figure 1097 Carte des pentes réalisées avec Qgis. On aurait pu la réaliser avec GlobalMapper(bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud).

Étape 6

Utiliser du rouge pour la carte des pentes.

Dans « Symbologie', changer le « type de rendu » :

Au lieu de Bande grise unique, dans palettes/valeurs uniques, on choisit « pseudo-couleur à bande unique ».

Puis, dans « palette de couleurs », en cliquant sur la flèche on choisit : « Reds ».

Il faut inverser la gamme pour que le Blanc corresponde aux pentes faibles ou nulles et le Rouge aux pentes prononcées. Pour cela, aller dans « Propriété > Symbologie> Rendu des bandes raster > Paramètres de valeur min/max > Palettes de couleurs >Inverser la palette de couleur ».

On choisit aussi : Luminosité = 80 ; multiplier, opacité 50 %.

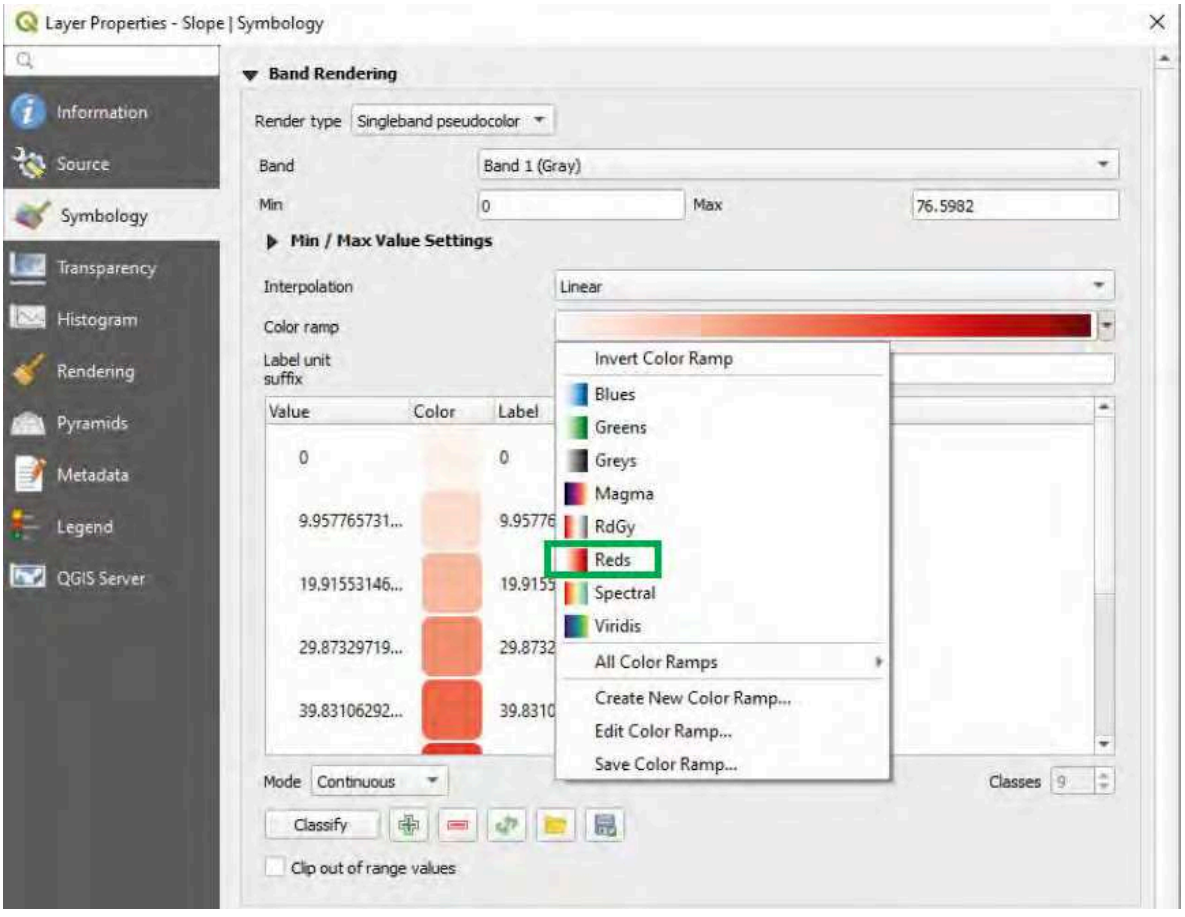


Figure 1098 Changer la symbologie du raster de pente par la Color ramp : Reds.

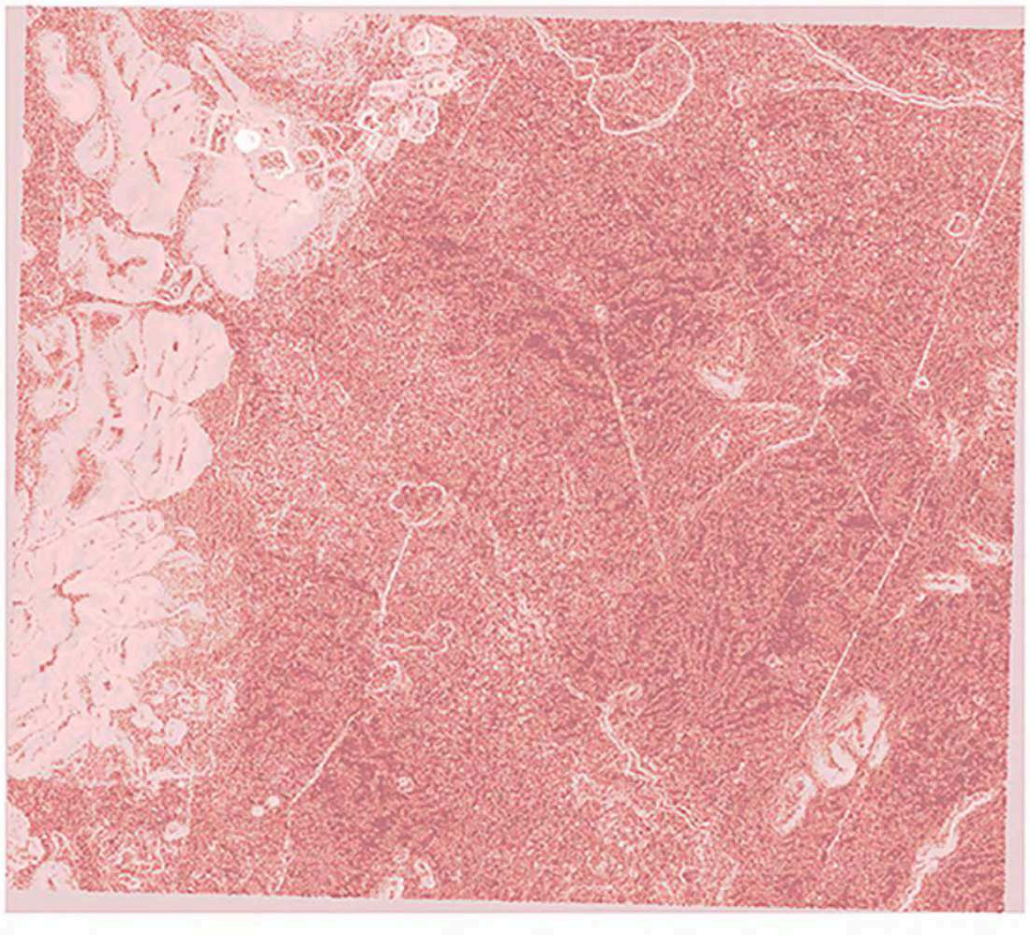


Figure 1099 Résultats de la carte des pente avec la palette Reds (bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud).

Résultat

Pour visualiser le résultat, on empile les calques du haut vers le bas

- Hypso (multiplier)
- Pente (étape 6) (luminosité = 80 ; multiplier, opacité 50 %)
- Modèle ombré (lumière douce / dure ; multiplier)
- Differential Openness (changer min/max étape 2 + étape 4) (luminosité = 50)

Pour chaque couche, aller dans Propriétés > Symbologie > Rendu de la couche > mode de fusion : Multiplier, ou luminosité, etc.

On fait le réglage de la transparence : Symbologie > Transparence > Opacité globale : 50%.

Pour le MNT, on va choisir dans Symbologie > Rendu des bandes raster > type de rendu > pseudo-couleur à bande unique.
Et dans palette de couleur : tous les dégradés de couleur : RdYiBu.
Pour le *Differential Openness* nous pouvons augmenter la luminosité de 50, dans : « Propriétés > Symbologie > Rendu de la couche > Luminosité « où on monte le curseur à 50 ».

Afin d'améliorer le rendu nous aurions pu calculer une carte des pentes sur GlobalMapper, comme expliqué dans la Fiche méthodologique Établir une carte des pentes (slope) avec Globalmapper (p. 69).

Nous aurions pu aussi rajouter des courbes de niveaux.

Nous pouvons rajouter des courbes de niveaux, d'un pas d'1 m, que nous colorons avec la même palette que le MNT.

Pour colorer les courbes, il faut choisir « Gradué », choisir la même palette que pour le MNT, puis dans valeur choisir « contour » cliquer sur « Classer ».

Nous avons ensuite rajouté un modèle ombré.

Avec ARGIS

Nous pouvons réaliser la méthode RRIM avec ARCGIS™.

Un outil pour ARCGIS™ est disponible pour réaliser automatiquement ces opérations.
https://www.
ARCGIS™.com/home/item.html?id=063a4977d3ae4be099cbb472ecf38298

Il faut ouvrir le fichier setup en mode administrateur et l'installer avec les autres outils de la boîte à outils : C:\Program Files (x86)\ ARCGIS™\Desktop10.8\ArcToolbox\Toolboxes

Dans ARCGIS™, clic-droit sur *Arctool box* > *Add Toolbox*. Choisir *System toolbox* et choisir *Raster Analysis Tool*. Il est composé de l'outil *Morphological Interpolation* et l'outil *Topographic Openness*. Laisser la valeur de Radial à 0.

La calculatrice raster est donc :
ARCTOOLBOX > SPATIAL ANALYST TOOL > MAP ALGEBRA > RASTER CALCULATOR

Voici quelques liens bibliographiques (Daxer, 2020) et internet que nous avons utilisé pour ces opérations :

https://desktop. ARCGIS™.com/fr/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/raster-calculator.htm(juin 2024)

https://www.usna.edu/Users/oceano/pguth/md_help/html/openness/openness.htm(juin 2024)
https://www.rrim.jp/en/3(juin 2024)

https://saga-gis.sourceforge.io/saga_tool_doc/2.2.4/ta_lighting_5.html(juin 2024)

8.5. FICHE METHODOLOGIQUE N°5 : DEFINIR LE BASSIN VERSANT D'UNE RIVIERE ET LES SOUS-BASSINS VERSANTS DE SES AFFLUENTS A PARTIR D'UN MNT

Utiliser *spatial analyst tools>hydrology>*
(1) Fill
Input : le MNT (réuni)
Output : fill
(2) Flow direction
Input : fill
Output : flowdir_fill
(3) Flow accumulation
Utiliser le raster flow direction
Nom du raster créé : flowAcc_flow
(4) Conditional con value > 2000 1
L'outil n'est pas situé dans « *hydrology* » mais dans « *conditional* », et il s'appelle : « con »
Utiliser le raster : flowAcc_flow
Expression : value > 20000 (réseau hydro faible) 2000 (pour un réseau hydro dense)
Expression : laisser comme tel dans la version ARCGIS™ PRO (there is no expression defined)
Input true raster or constant value : 1
Input false raster or constant value : 0
Nom du raster créé : *Con_FlowAcc*
(5) Stream to feature
Input : con_FlowAcc
et *flowDir_mnt*
Nom du raster crée : *StreamT_Con_Flo*
(6) Ajout des points exutoires en WGS84
(7) Watershet
(8)
Catalog> CD new>shapefile>choisir WGS84
Dans *Table Of Contents*>CD sur le *shapefile>Edit features>star editing*
Dans *Create features>construction tools>points*
Mettre le point sur le tracé ***streamT_con_Flo3***
Stop edit, save
(9)

Watershet :
Input flow direction raster : FlowDir_Fill3
Input raster ou feature pour point data : sbv_14
(10)
Conversion tools
From raster > raster to polygon

Tableau 61 Description du calcul des talwegs.

8.6. FICHE METHODOLOGIQUE N°6 : CALCUL DES COURBES DE NIVEAU A PARTIR DU MNS AVEC QGIS

Prenons l'exemple de la région karstique d'Otavi en Namibie, à partir du MNS (modèle numérique de surface réalisé par Benjamin Lans, qu'il soit remercié ici pour son aide. Un MNS prend en compte par exemple la végétation et le bâti. Les courbes de niveau sont donc calculées en tenant compte de la végétation ce qui ne donne pas un rendu esthétique. Nous devons donc les nettoyer, les affiner.

Nous réalisons avec ARCGIS trois lots de courbes de niveaux avec un pas de 10m, que nous affinons avec QGIS.

Paramètres et réalisation des courbe de niveau avec QGIS :

Raster > Extraction > Contours

Couche d'entrée DEM_Test_Otavi_2.5m_OK

Numéro de bande Bande 1 (*Gray*)

Intervalle entre les courbes de niveaux : 10,000 m

Nom de l'attribut ELEV

Décalage par rapport à zéro pour l'interprétation des intervalles [optionnel] : 0.00

Nom : contour-10m-mnt2,5m-qgis.shp

Tableau 62 Opération pour calculer des courbes de niveau avec Arcgis.

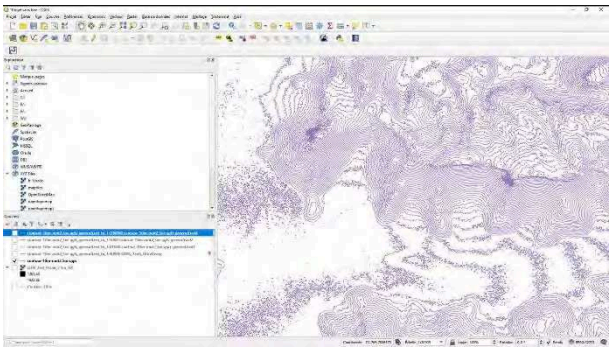


Figure 1100 Courbes de niveaux réalisées avec QGIS

Résultat du calcul des courbes de niveau avec un pas de 10m.

Avec la version récente du logiciel QGIS (3.1) nous utilisons le plugin *Cartographic Line Generalisation-CartoLineGen et nous testons 4 valeurs pour le paramètres :* Map scale denomination : 5 000, 21 000, 40 000 et 100 000.

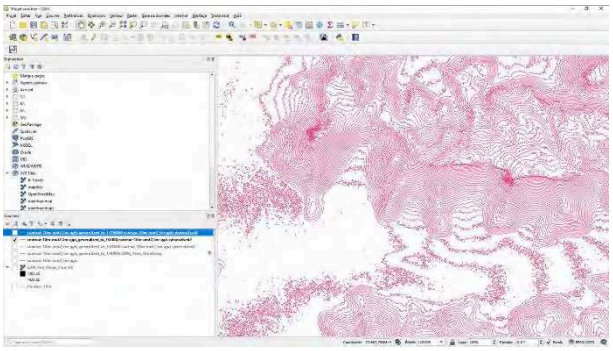


Figure 1101 Courbes de niveaux simplifiées Generalized 5k

Generalised1 :

Remove too small areas
Map scale denomination : 5 000
Generalisation type : Simplification + Smoothing

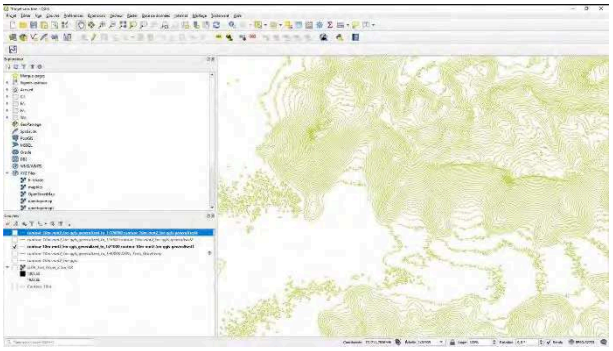


Figure 1102 Courbes de niveaux simplifiées Generalized 21k

Generalised2 :

Remove too small areas
Map scale denomination : 21 000

Generalisation type : Simplification + Smoothing

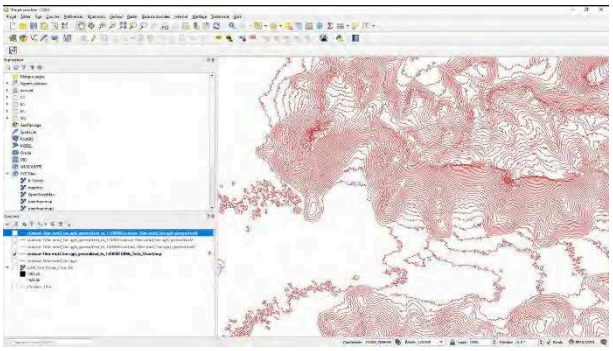


Figure 1103 Courbes de niveaux simplifiées Generalized 40k

Generalised3 :

Remove too small areas
Map scale denomination : 40 000

Generalisation type : Simplification + Smoothing

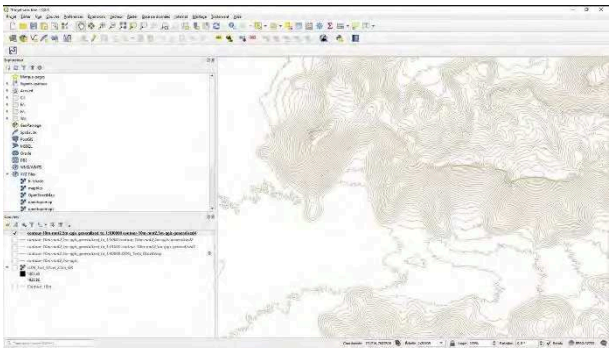


Figure 1104 Courbes de niveaux simplifiées Generalized 100k

Generalised4 :

Remove too small areas
Map scale denomination : 100 000

Generalisation type : Simplification + Smoothing

Nous remarquons que les courbes sont de plus en plus affinées en augmentant le paramètre *Map scale denomination* (Figure 1100 à Figure 1104).

Liens internet:

https://georezo.net/forum/viewtopic.php?id=100966(juin 2024)
https://desktop.ARCGI.com/fr/arcmap/10.3/guide-books/extensions/production-mapping/creating-contours-on-dem-layers.htm(juin 2024)
https://pro. ARCGIS™.com/fr/pro-app/tool-reference/3d-analyst/contour.htm(juin 2024)

8.7. FICHE METHODOLOGIQUE N°7 : DETECTION AUTOMATIQUE DES DOLINES PAR CALCUL DU MNT AVEC QGIS

Intégrer les outils dans QGIS
Dans les versions récentes de Qgis le module SAGA n'est plus intégré
Il faut le télécharger ici :
https://sourceforge.net/projects/saga-gis/files/latest/download
Téléchargement du fichier : saga-9.0.2_x64.zip qu'il faut ensuite dézipper.
Ensuite il faut l'intégrer dans Qgis.
Dans la barre d'outils de la fenêtre traitement
Fournisseur de traitement > SAGA folder : il faut mettre le dossier que l'on vient de télécharger qui s'appelle : saga-9.0.2_x64
Ensuite il faut télécharger le script : ExtractionDolines_3.0.model3
Et l'ouvrir avec le modeleur graphique de Qgis

Utilisation des outils
Traitement > modeleur graphique
Modèle > Ouvrir le modèle.
La fenêtre qui s'ouvre contient le script qui décrit la succession des opérations.
Choisir Modèle > Exécuter le modèle
Dans *Input-Raster* nous indiquons le MNT dont nous voulons détecter les dolines. Il faut indiquer son dossier d'emplacement dans l'ordinateur.
Dans *Input Vector*, il faut indiquer l'emprise où l'on souhaite effectuer les calculs avec un polygone au format shp. Nous pouvons utiliser celui qui nous a servi à découper le MNT.
On peut changer les paramètres.
Dans ce script tu peux faire plusieurs réglages en fonction de ce que tu veux, notamment de filtrer les dolines en fonctions de leur superficie.
Pour cela, il faut double cliquer "extraire par attribut" (c'est le dernier) et modifier par exemple la valeur (surface en m²). Les cases grisées sont des commentaires pour savoir ce que fait l'opération.
On peut modifier la profondeur max dans le champ "alti-max".
Afin d'obtenir une carte de profondeur des dolines, nous pouvons découper le raster avec le polygone des dolines, et réappliquer une symbologie.
Adapter.
Pour des dolines de 200000 m2.
Bibliographie succincte : Ayache et Cabaret (2022).
Lien internet :
https://www.sigterritoires.fr/index.php/comment-integrer-saga-a-qgis-a-partir-de-la-version-3-30/ (juin 2024)

Tableau 63 Méthode pour détecter des dolines sur le MNT.

8.8. FICHE METHODOLOGIQUE N°8 : BASE DE DONNEES DE CAVITES DE GROTTOCENTER

Télécharger sur le site les données au format .kml. https://www.grottocenter.org/ Créer un login et mot de passe. Outils > télécharger un export pour GPS. Cliquez sur Ajouter à la liste… Choisir un pays. Choisir d'afficher plus de 300 lignes par page. Cliquer sur le bouton pour sélectionner toutes les cavités, le refaire pour chaque page lorsqu'il y en a plusieurs (ajouter et poursuivre la sélection). Ou ajouter s'il n'y a qu'une page. Cliquer sur le format KML. Indiquer un nom et télécharger. Avec ARCGIS™ > geoprocessing > arctoolbox > conversion tools > to KML > KML to layer. Output location : choisir le dossier où sera enregistré le nouveau fichier. Ensuite dans la *table of content* d'ARCGIS™, développer le nouveau calque et clic droit sur le calque qui s'appelle « Points » et qui montre une punaise, *data* > *export data*. Le site ne permet plus de faire un téléchargement des données automatiquement.

Tableau 64 Procédure d'extraction des données issues de GROTTOCENTER.

8.9. FICHE METHODOLOGIQUE N°9 : CONVERTIR DES DONNEES GPS POUR UN SIG

On trouve dans les publications ou dans les bulletins spéléologiques des coordonnées d'entrée de cavité.

Les coordonnées les plus récentes ont été mesurées au GPS et sont de bonne précision. Il faudra faire attention au format des données et à bien les convertir.

En revanche certaines coordonnées, plus anciennes, ont été mesuré directement sur les cartes topographiques et ne sont pas précises comme le GPS.

Les données disponibles : format jpg et GPX

Trajets :

Format GPW Format SHP

On utilise sous Excel, le format : Csv (ms-dos)

Points GPS

https://www.coordonnees-gps.fr/conversion-coordonnees-gps

Attention à mettre des virgules ou des points aux nombres décimaux selon si on utilise un logiciel (ou un site internet de conversion des données GPS) anglo-saxon ou français.

19°55'02,20"S19°55'02.20"S = 19°55'02"S

34°04'06,20"E 34°04'06.20"E = 34°04'06"E

Site internet pour convertir des données en degrés minutes décimale en degrés minutes secondes:

https://coordinates-converter.com/fr

https://fr.planetcalc.com/1129/
https://calculis.net/conversion/gps#resultat
https://www.coordonnees-gps.fr/

Tableau 65 Processus pour convertir des données GPS.

8.10. FICHE METHODOLOGIQUE N°10 : EXPORTER LES POINTS GPS PRIS SUR LE TERRAIN (EXEMPLE DE LA MISSION NAMIBIE 2018) DANS UN FICHIER EXCEL.

Ouvrir le fichier KML avec GlobalMapper.
Faire un clic-droit sur le fichier et choisir *Layer > EXPORT - Export Layer(s) to New file* (Figure 85).
Choisir le format CSV et les paramètres suivants :
Field separator : semicolons (;).
Cocher *Format Lat/Lon Coordinates with Position Display Format* (Figure 1106).
Ouvrir ensuite le fichier csv avec Excel.
Régler la largeur des colonnes et les exporter au format pdf, puis au format jpg (Figure 1107).
Pour exporter au format jpg le fichier excel je choisis Imprimer.
Choisir l'imprimante Adobe PDF, au format A4 et choisir « Ajuster toutes les colonnes à une page ».

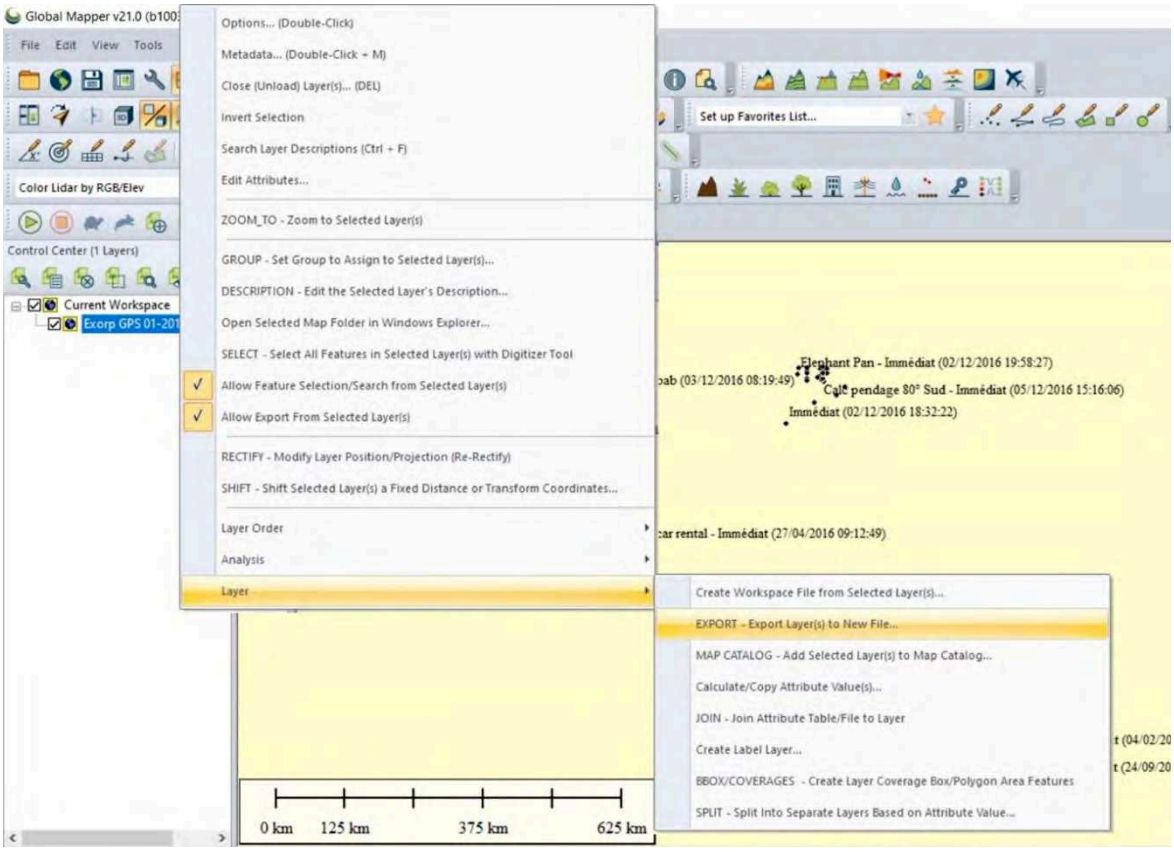


Figure 1105 Procédure d'extraction des données GPS avec GlobalMapper.

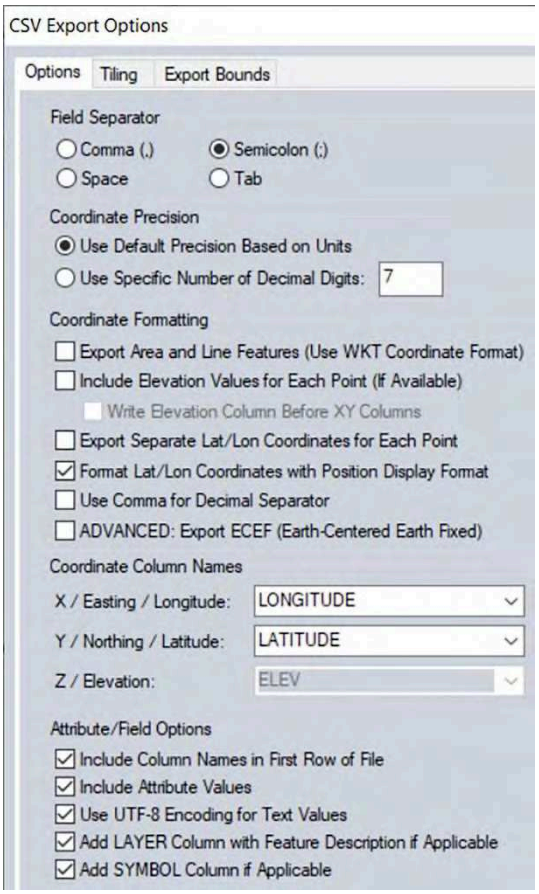


Figure 1106 Paramètres d'extraction.



Figure 1107 Paramètres d'impression au format pdf.

8.11. FICHE METHODOLOGIQUE N°11 : CONVERTIR DES DONNEES COMPEGPS

On ouvre les données GPS au format *compegps.files* avec le logiciel *Land Two Nav*. https://www.twonav.com/fr/logiciels/land (juin 2024)

Faire un clic-droit sur le fichier à exporter et choisir : Fichiers > Sauvegarder waypoints sous> Cartes vectorielles de ArcView (.shp)

Attention il faut modifier le système de référencement car l'exportation au format shape est paramétré directement en UTM 36N.

Il faut donc changer les paramètres dans : Projection Lat / Long : Datum WGS84.

Ouvrir les données avec un logiciel SIG, comme ARCGIS™ .

Attention en exportant les données dans ARCGIS™ il faut vérifier le système de projection dans le *data frame*, suivant si on est en WGS 84 / EPSG : 4326 ou en UTM36S. *Data > export data >data frame*

8.12. FICHE METHODOLOGIQUE N°12 : CALCUL DE LA DECLINAISON POUR LA TOPOGRAPHIE DE LA GROTTE DE GROBER

Prenons pour exemple la topographie de la grotte de Grober, dans *le Cradle of Humankind* en Afrique du Sud», levée par Steven Tucker en 2017. La déclinaison était donc de **18°34'W** au moment du levé, soit **18,57°** en degrés décimaux.

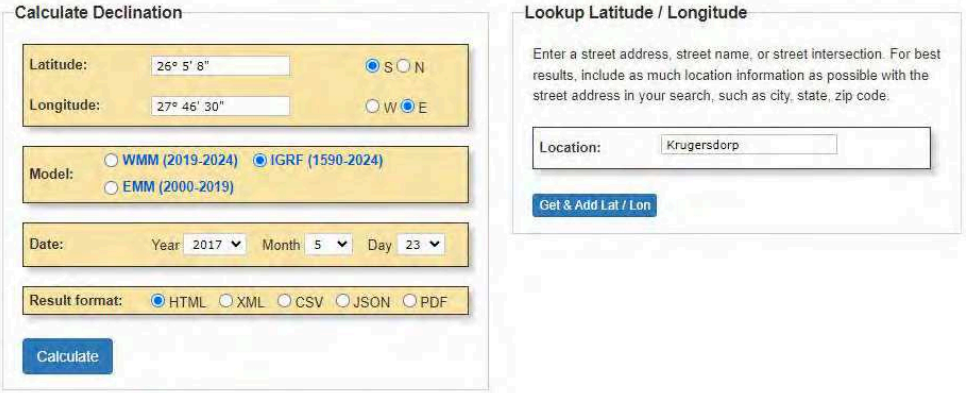


Figure 1108 Calcul de la déclinaison magnétique pour la topographie de la grotte de Grobler, levé en 2017.



Figure 1109 La déclinaison est donc de 18°34'W, soit 18,57° anti-horaire.

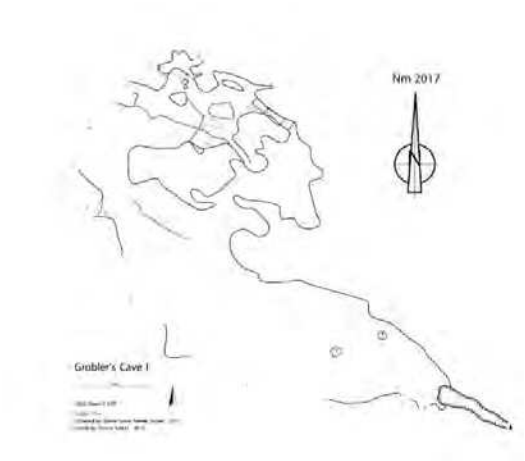


Figure 1110 Plan topographique de la grotte de Grobler calé par rapport au nord de la boussole (noté « Nm 2017 »).

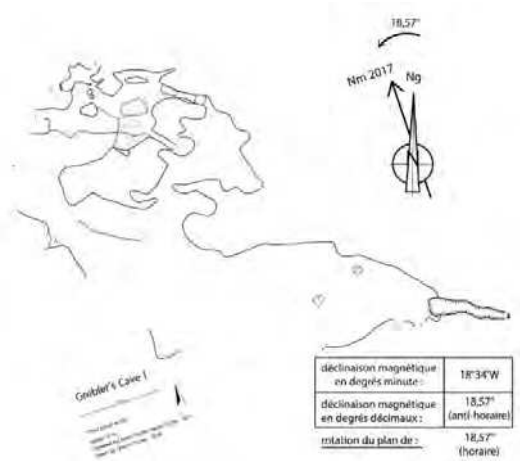


Figure 1111 Plan topographique de la grotte de Grobler recalé par rapport au nord géographique (noté « ng »).

8.13. FICHE METHODOLOGIQUE N°13 : TELECHARGER LES CARTES GEOLOGIQUES DU *CRADLE OF HUMANKIND*

Pour l'Afrique du Sud, des cartes géologiques à différentes échelles et leurs notices, sont téléchargeables sur le site du Council of Geoscience, en créant un compte gratuit : https://maps.geoscience.org.za/download/geology-maps.php (novembre 2023). https://maps.geoscience.org.za/portal/apps/sites/#/council-for-geoscience-interactive-web-map-1/apps/f17eb56408b34add9c43878de5ccd4c2/explore(août 2024).

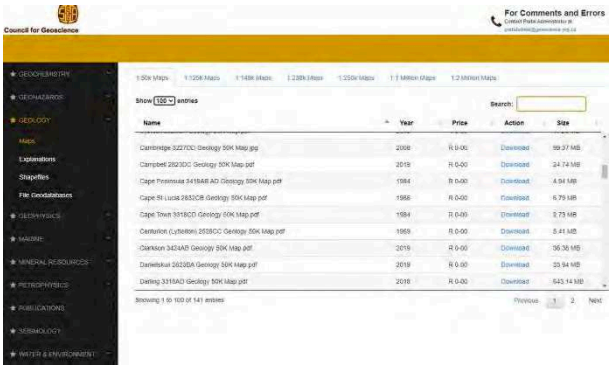


Figure 1112 Portail de téléchargement de différents types de cartes et à différentes échelles.

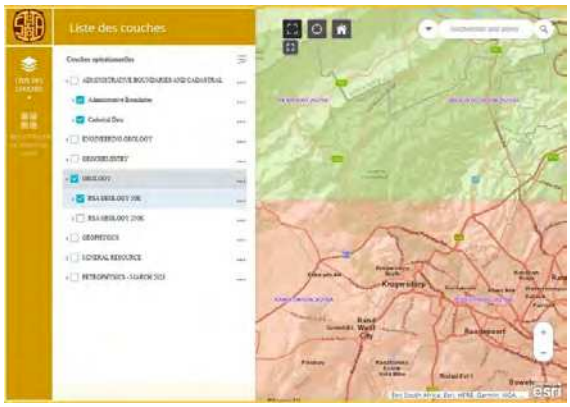


Figure 1113 Le portail interactif du Council of Geoscience indique que les cartes géologiques, au 1/50 000, du Cradle of Humankind sont les cartes : Hekpoort 2527Dc, Broederstroom 2527DD, Randfontein 2627BA et Roodepoort 2627BB, etc.

Pour connaître les numéros de cartes, on peut se référer à la carte interactive du portail internet située à cette adresse : https://maps.geoscience.org.za/portal/apps/sites/?fromEdit=true#/interactivewebmap (novembre 2023). En rouge sont indiquées les cartes non disponibles et en vert les cartes disponibles.

8.14. FICHE METHODOLOGIQUE N°14 : ROGNER LES CARTES (RASTER) AVEC PHOTOSHOP

Ouverture du fichier pdf avec le logiciel Photoshop.

Définition d'un cadre de rognage selon les dimensions et l'empattement de la carte désirée. Cette opération permet d'enlever les légendes et le texte indésirable, surtout lorsqu'on assemblera plusieurs cartes côte-à-côte. Cette opération permet aussi de réduire la taille du raster.

Etape 1 : Outils : rectangle de sélection (touche M) (Figure 1114 et Figure 1115).

Etape 2 : Rogner l'image selon ce rectangle *Outils : recadrage (touche C)* (Figure 1115).

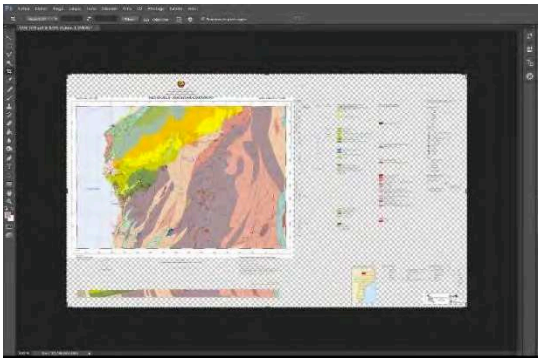


Figure 1114 Ouverture de la carte géologique au format pdf avec Photoshop

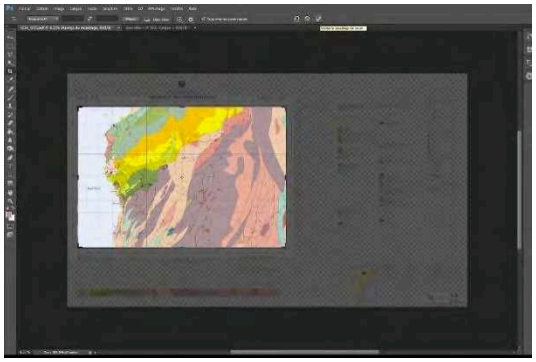


Figure 1115 Définition de la zone à rogner.



Figure 404 Outil rognage

Ouverture avec le logiciel ARCMAP du raster obtenu, au format jpg, pour le géoréférencer.

Attention, il se peut que le fichier jpg s'ouvre dans ARCGIS™ mais ne s'ouvre pas dans l'outil G*eoreferencing*. Cela est lié au raster qui est trop lourd, il faut alors revenir sur PHOTOSHOP et réduire la dimension du raster. Pour cela on réduit la dimension de l'image (Image > Taille de l'image >) soit en modifiant la largeur et la hauteur, soit en diminuant directement la résolution. Réduire la qualité du raster en utilisant du jpg compressé ne va pas permettre de résoudre le problème. Faire l'opération plusieurs fois jusqu'à obtenir un raster qui s'ouvre dans l'outil G*eoreferencing* du logiciel ARCGIS™.

8.15. FICHE METHODOLOGIQUE N°15 : GEOREFERENCER DES IMAGES RASTER DE CARTES GEOLOGIQUES DANS ARCMAP (ARCGIS™).

Une fois le raster créé, comme indiqué dans la fiche précédente, nous pouvons l'ouvrir avec ARCMAP dans la « *Table of Contents* », puis l'intégrer dans l'outil G*eoreferencing*, nous allons ensuite définir des points de calage entre le raster et une image de référence (une carte topographique de la même zone, des rivières, des grilles de coordonnées, etc.).

Ouverture de l'outil *« Georeferencing » : Menu > Customize >Toolbars> Georeferencing* (Figure 1116).

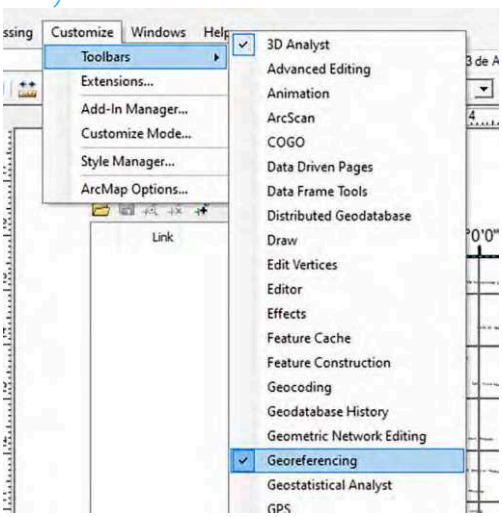


Figure 1116 Ouverture de l'outil « Georeferencing » : Menu > Customize >Toolbars> Georeferencing.

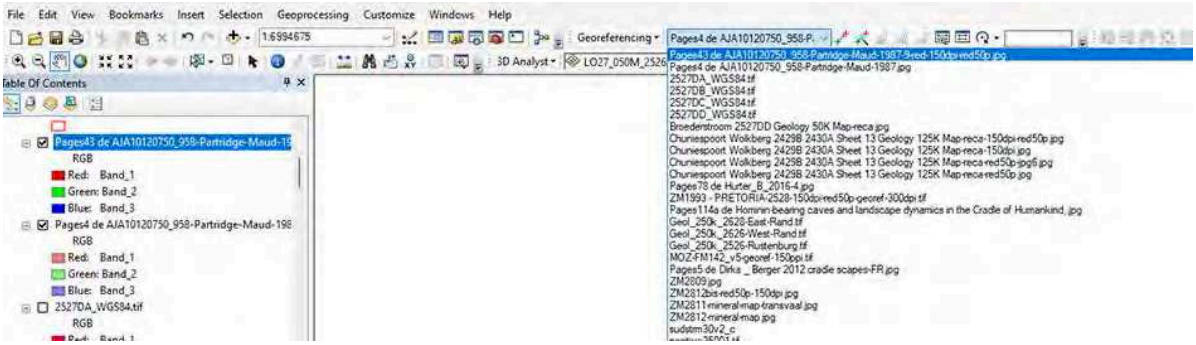


Figure 1117 Intégration du raster dans l'outil « Georeferencing ».

Intégration du raster dans l'outil « Georeferencing » **(Figure 1117)**.

Affichage du « Viewer », en cliquant sur la cinquième icône. Une nouvelle fenêtre va s'ouvrir pour voir le raster à géoréférencer et définir ainsi des points de calage **(Figure 1118)**.

Parfois, afficher ou masquer le raster dans « Table of Contents » va aveugler le raster dans le « Viewer », il faudra alternativement afficher ou masquer le raster dans « Table of Contents », en définissant, l'un après l'autre, les points de calage.

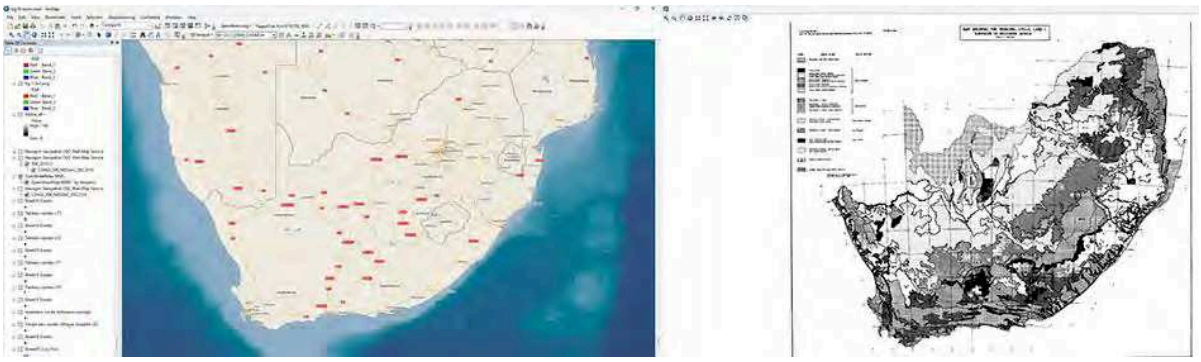


Figure 1118 Ouverture à droite de la fenêtre du « Viewer » correspond au raster que l'on souhaite géoréférencer et affichage à gauche de la carte géoréférencée qui va servir de support de calage, ici c'est le raster d'OpenStreetMap, en serveur wms.

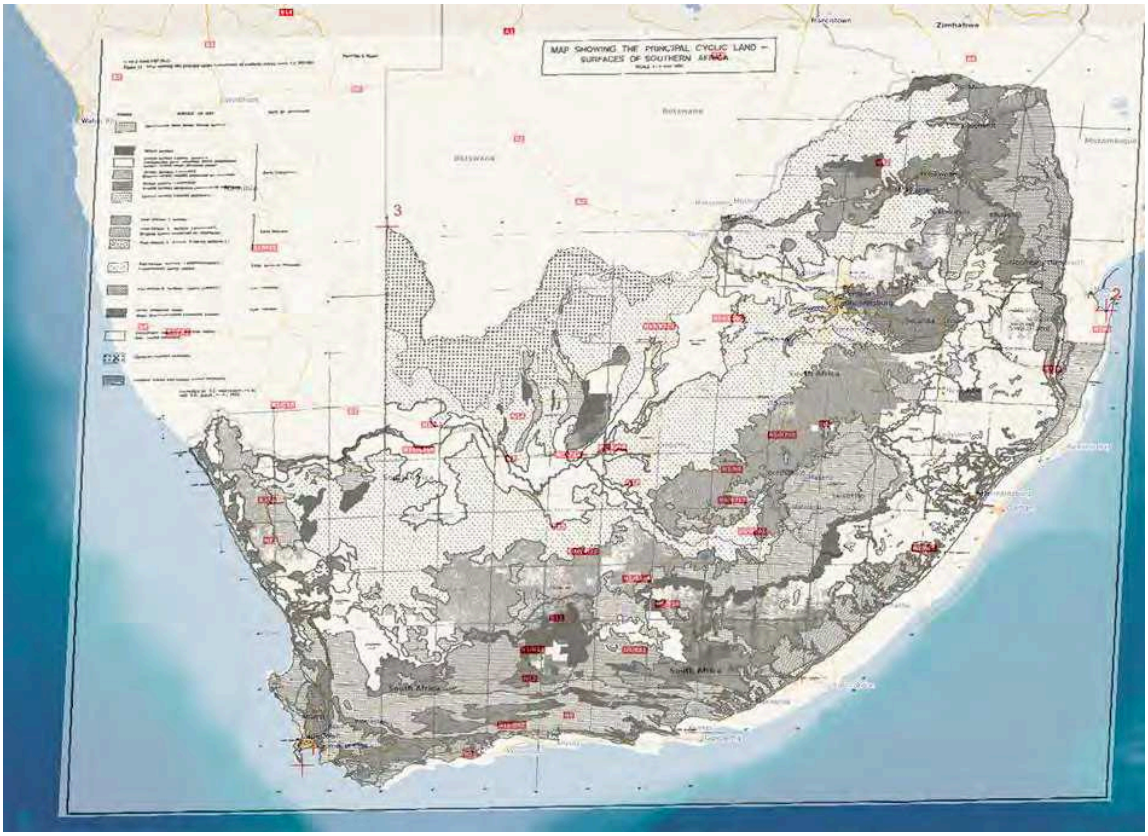


Figure 1119 Définition des premiers points de calage pour caler provisoirement le raster.

Dans un premier temps, on peut définir rapidement quelques points de calage, mal résolus, afin de caler sommairement le raster. Nous avons calé ici en utilisant les péninsules et quelques points caractéristiques le long de la côte. Nous avons utilisé un serveur *wms* d'*Openstreetmap* afin d'avoir une carte de l'Afrique australe. Nous aurions pu aussi utiliser de la même manière les frontières nationales vectorisées ou les cours d'eau.

Maintenant, nous pouvons mettre de la transparence sur le raster afin de ne travailler que sur une seule fenêtre et affiner le calage et le géoréférencement plus facilement (Figure 1119). En faisant clic-droit sur le calque dans « *Table of Contents* » et en choisissant *Properties* > *Layer Properties* > *Transparency* : 50%. Nous pouvons, maintenant, choisir de nouveaux points de calage en restant sur une seule fenêtre de l'ordinateur.

Si la carte que l'on souhaite géoréférencer possède des grilles géodésiques, de latitude et de longitude, il est préférable d'utiliser le croisement de ces lignes pour affiner le géoréférencement. Car les frontières, les rivières et les éléments qui nous permettent de caler peuvent varier dans le temps et selon l'année d'édition de la carte, selon la résolution et la méthode de cartographie utilisée. Parfois, nous serons amenés à géoréférencer de vieilles cartes, comme cela a été le cas pour le Malawi et le bassin permien à l'ouest de Karonga (CGMR, 1956).

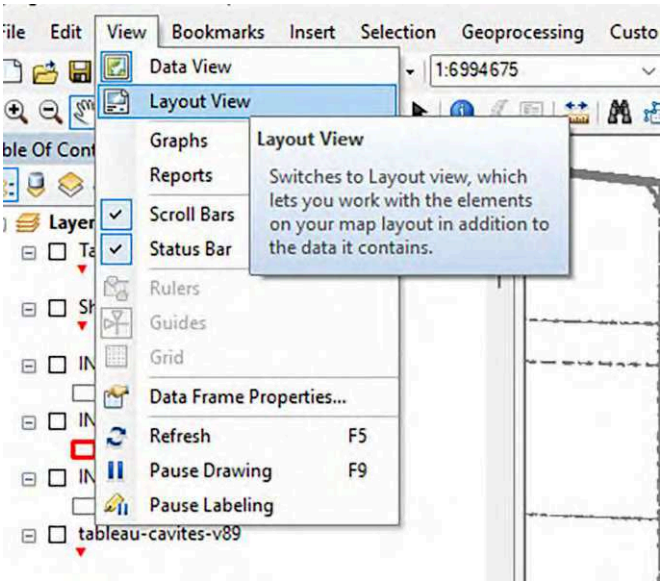


Figure 1120 Passage du mode « Data view » à « Layout View ».

L'utilisation des grilles de référencement améliore le géoréférencement du raster. Pour cela, il faut afficher les grilles, c'est-à-dire passer d'une vue « *data view* » en une vue « *layout view* » (Figure 1120).

Une fois passé en mode « layout view », nous devons créer une *« measured grid » (data frame properties)*. En faisant clic-droit sur le raster, dans *« Table of Contents »* (Figure 1121) puis *Properties*. Il est intéressant de se mettre dans le même type de projection que la carte que l'on souhaite géoréférencer pour avoir le moins possible de transformations à effectuer.

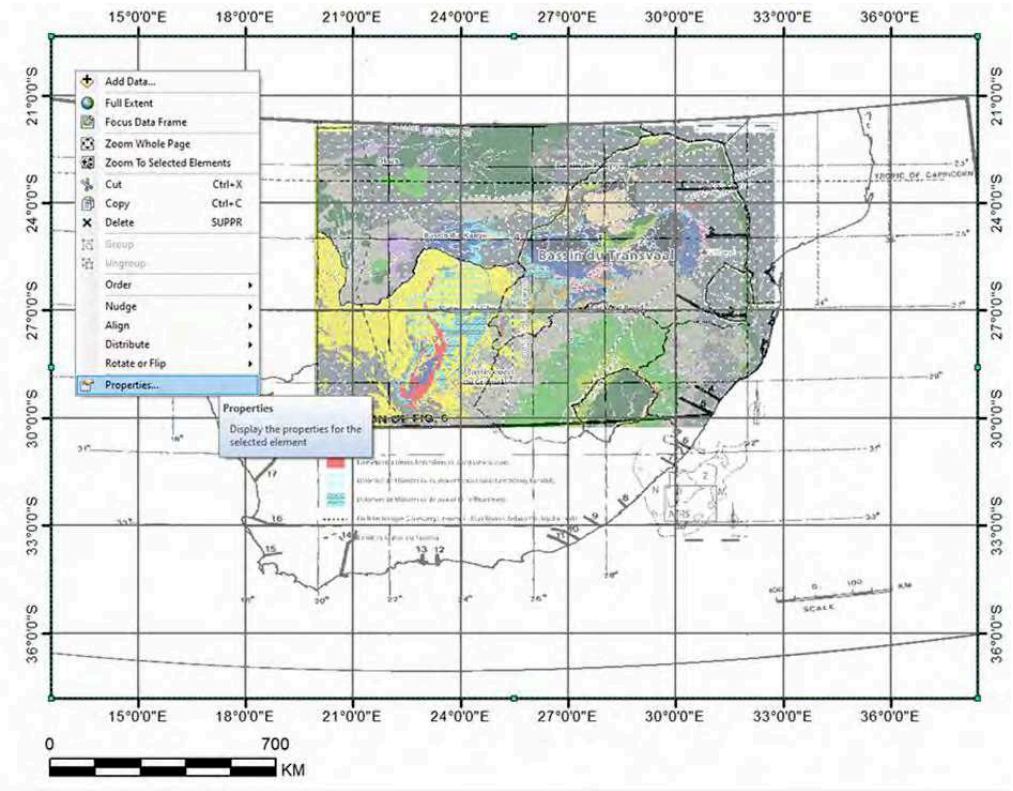


Figure 1121 Clic-droit sur la carte pour ouvrir le menu Properties, un cadre bleu va apparaitre, nous pouvons maintenant demander d'afficher une grille de référencement (« measured grid » ou « graticule »).

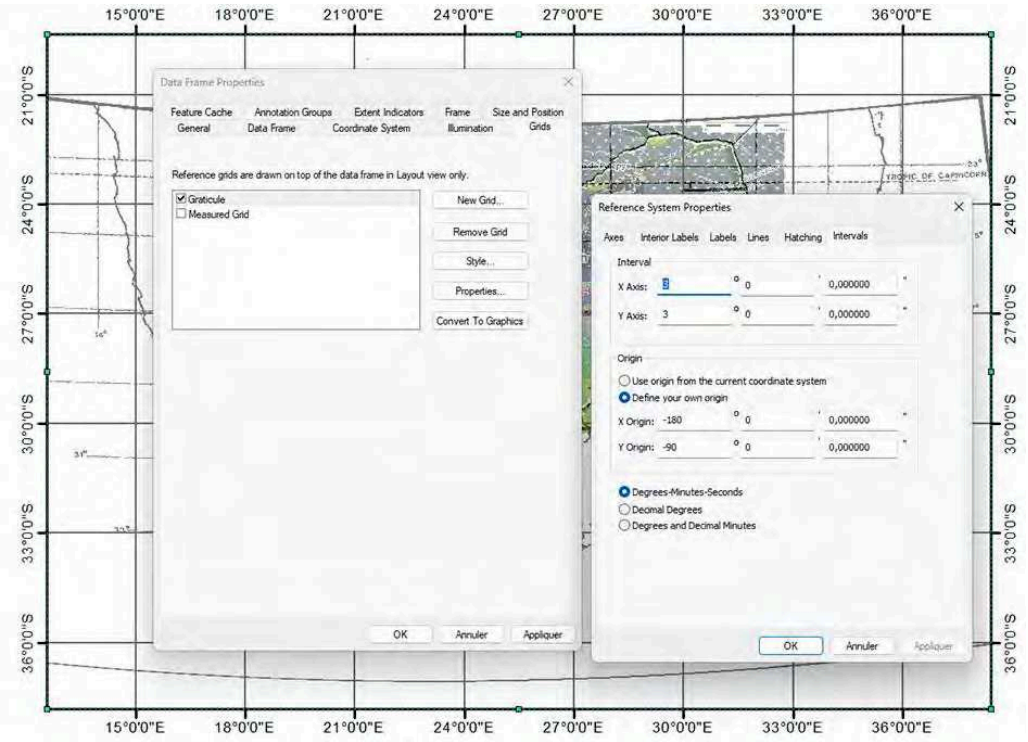


Figure 1122 Définition d'une « measured grid » ou de « graticule » pour géoréférencer un raster

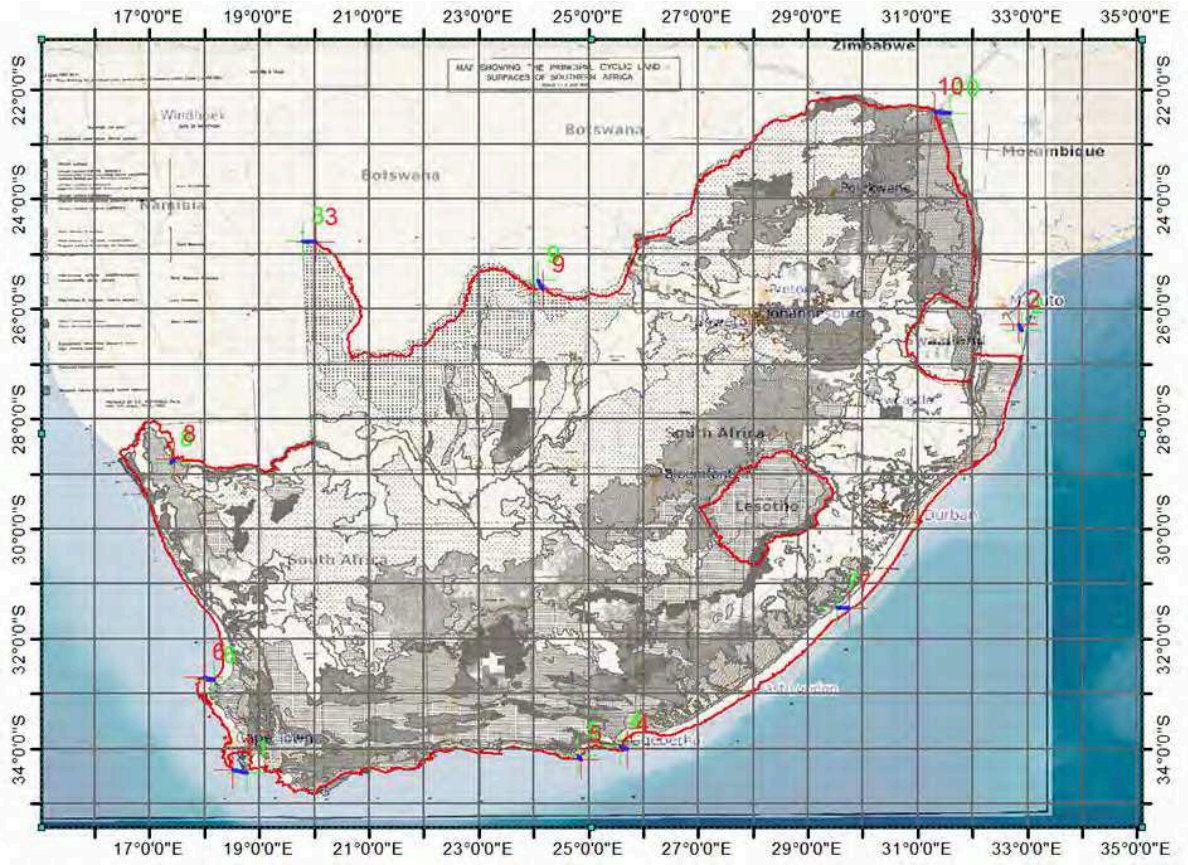


Figure 1123 Affichage de la grille géodésique, des frontières vectorisées et géoréférencées de l'Afrique du Sud en rouge et du raster. En utilisant quelques points de calage sur la cote et le long de frontière, nous remarquons que le raster est mal calé. Nous allons alors utiliser de nouveaux points de calage sur les grilles géodésiques.

Ensuite, nous pouvons éliminer les premiers points de calage, qui nous ont permis de faire un premier calage grossier (Figure 1124).

Nous utilisons ensuite l'option *Transformation>Adjust* (Figure 1125 et Figure 1126), elle permet d'ajuster tous les points de calage (Figure 1127).

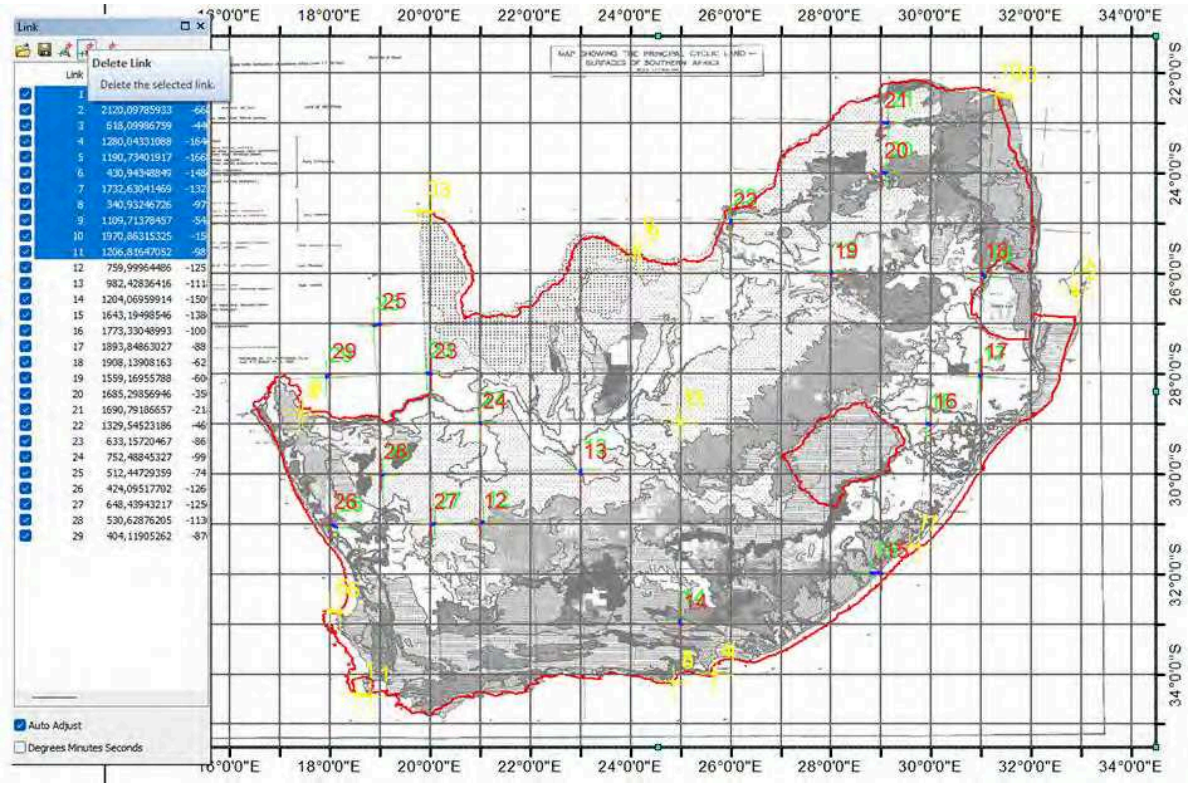


Figure 1124 Elimination des premiers points de calage, le long de la côte, de 1 à 11.

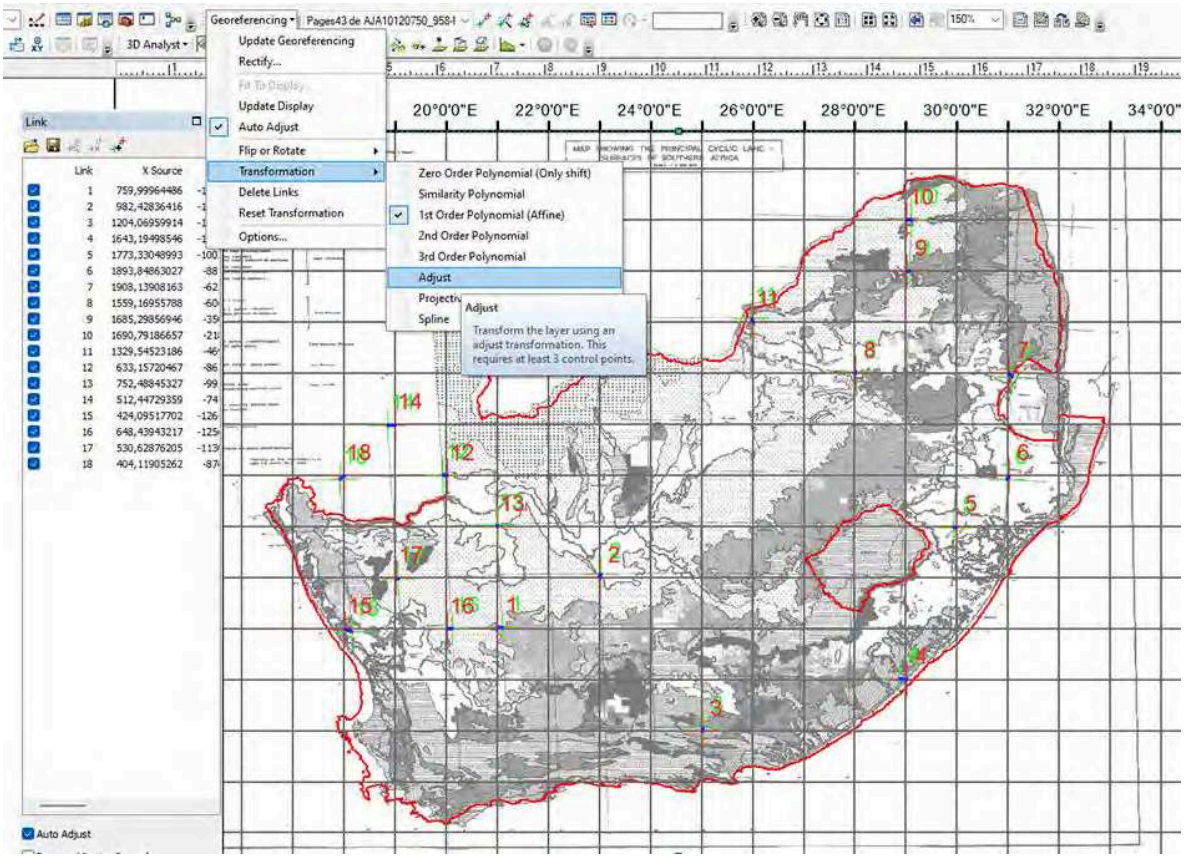


Figure 1125 Etape d'ajustement du raster en prenant en compte tous les points de calage.

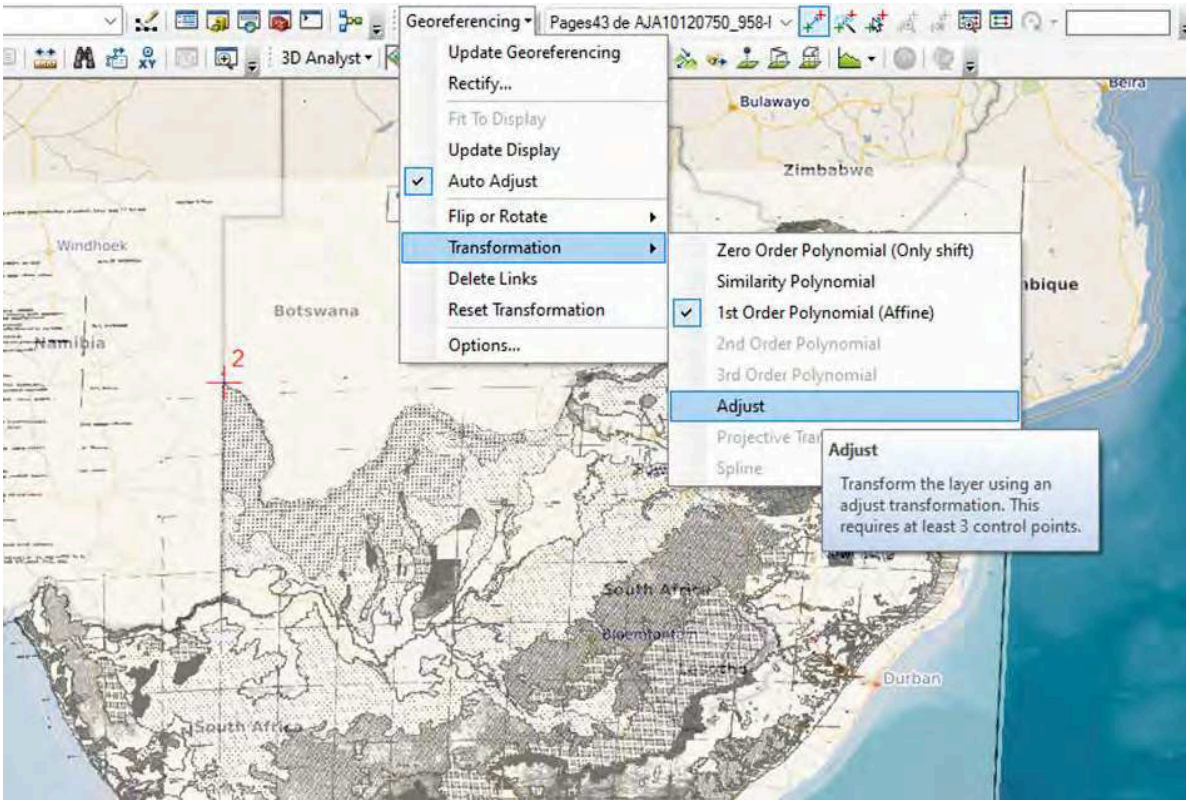


Figure 1126 Utilisation du géoréférencement en utilisant tous les points de calage.

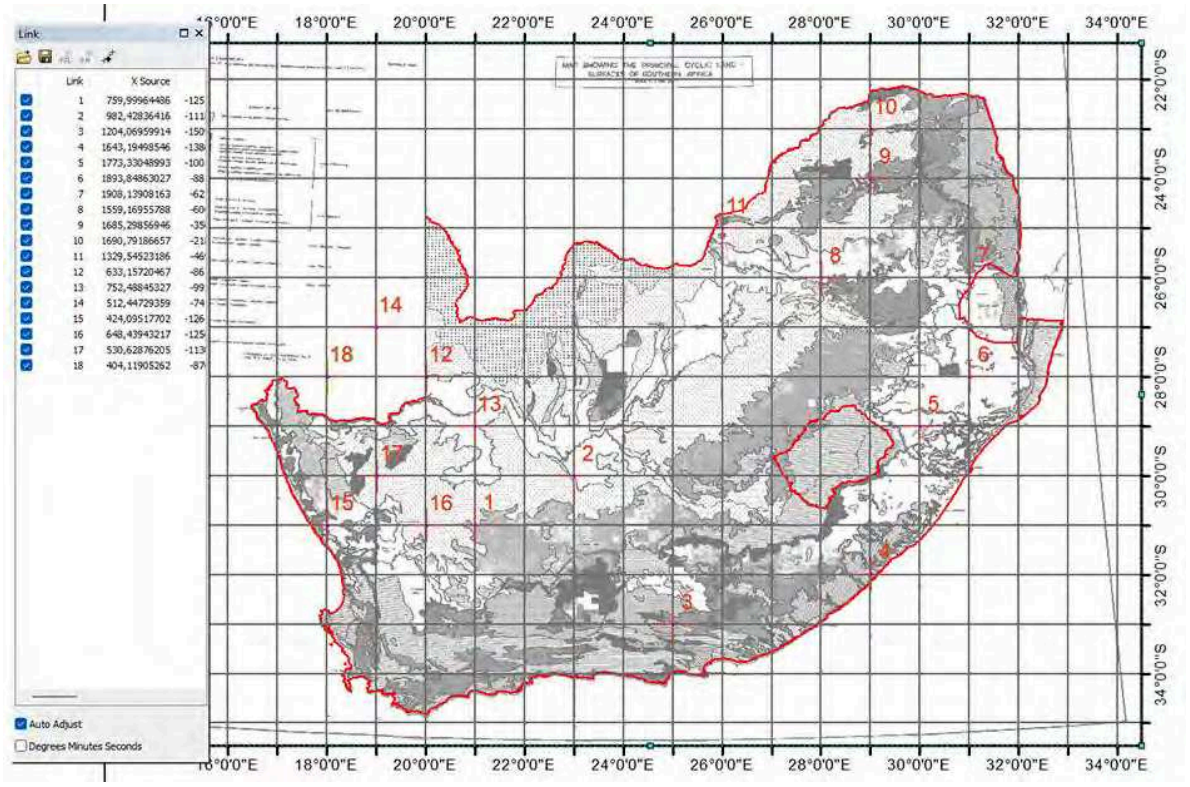


Figure 1127 Après élimination des premiers points de calage, nous n'avons gardé que les points positionnés sur les grilles géodésiques et nous avons choisi d'ajuster le calage avec tous les points. Nous voyons que le raster coïncide parfaitement avec les frontières vectorisées en rouge.

Pour terminer, nous devons actualiser le géoréférencement (Figure 1128). Nous donnons comme exemple la carte géologique du Mozambique que nous avons calée avec la grille géodésique (Figure 1129).

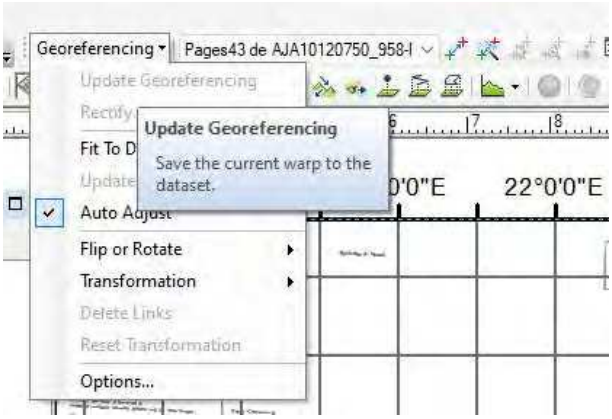


Figure 1128 Actualiser le géoréférencement.

Enfin, nous pouvons exporter le raster géoréférencé en faisant une exportation. Pour cela, il faut cadrer correctement le raster dans la fenêtre de gauche, en mode « data view ». Remettre la transparence à zéro. Puis, on exporte en faisant File > Export Map > au format TIFF, en cochant Write Geo TIFF tags, et avec une résolution de 300 dpi, que l'on adapte en fonction du résultat et du poids du fichier que l'on souhaite obtenir.

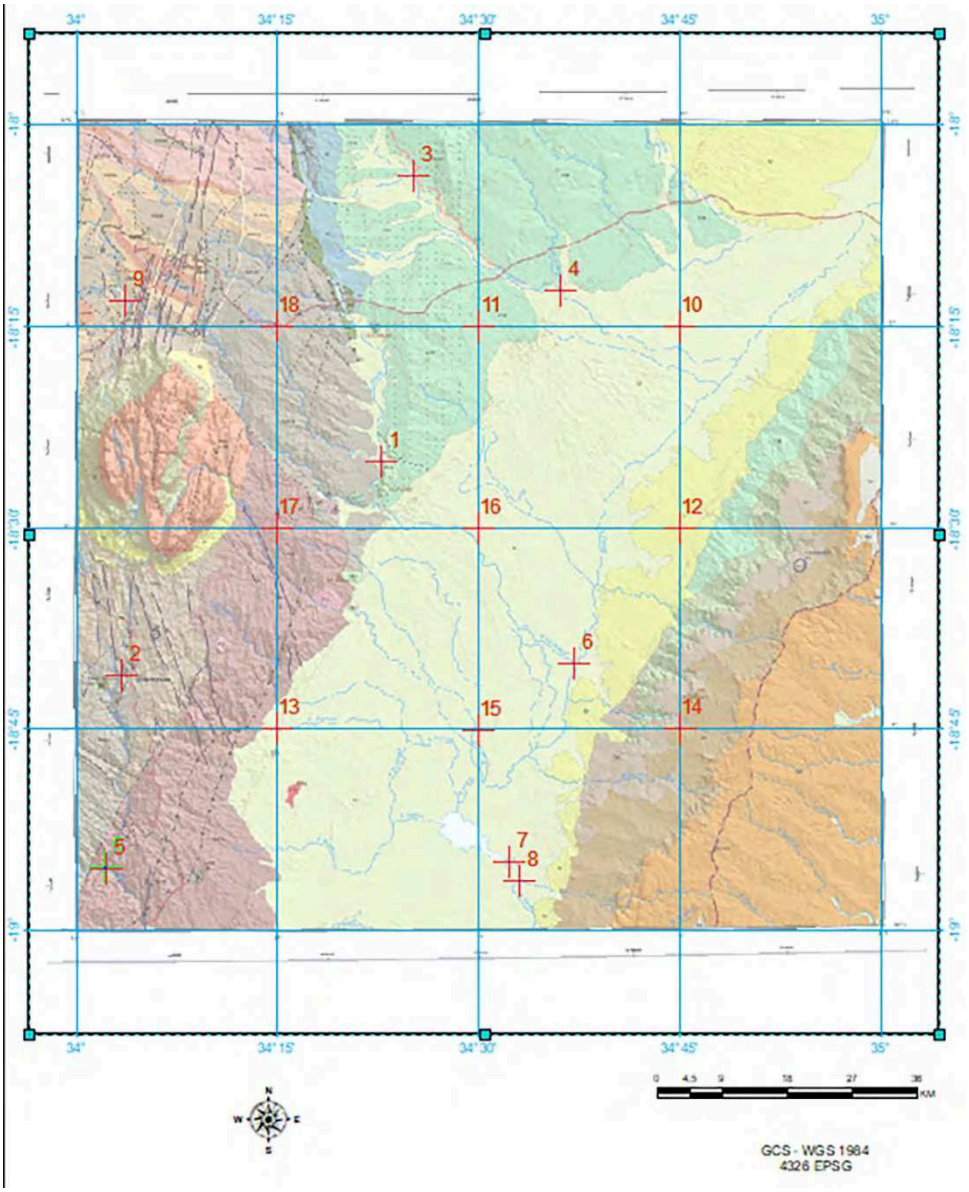


Figure 1129 Exemple du géoréférencement de la carte géologique GTK_MZ_1834 du Mozambique.

Si la carte ne possède pas de grille géodésique, on peut se caler sur les rivières, sur les villes ou sur les frontières administratives des pays, que l'on peut télécharger ici au format vectorisé :
https://www.diva-gis.org/gdata
https://data.apps.fao.org/aquamaps/?lang=en
https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/fr/.

8.16. FICHE METHODOLOGIQUE N°16 : AFFICHER LES CARTES GEOLOGIQUES RASTERS GEOREFERENCEES (GEOTIFF OU TIFF) DANS GLOBALMAPPER

Nous allons décrire les étapes de traitement cartographique sur le logiciel GLOBALMAPPER

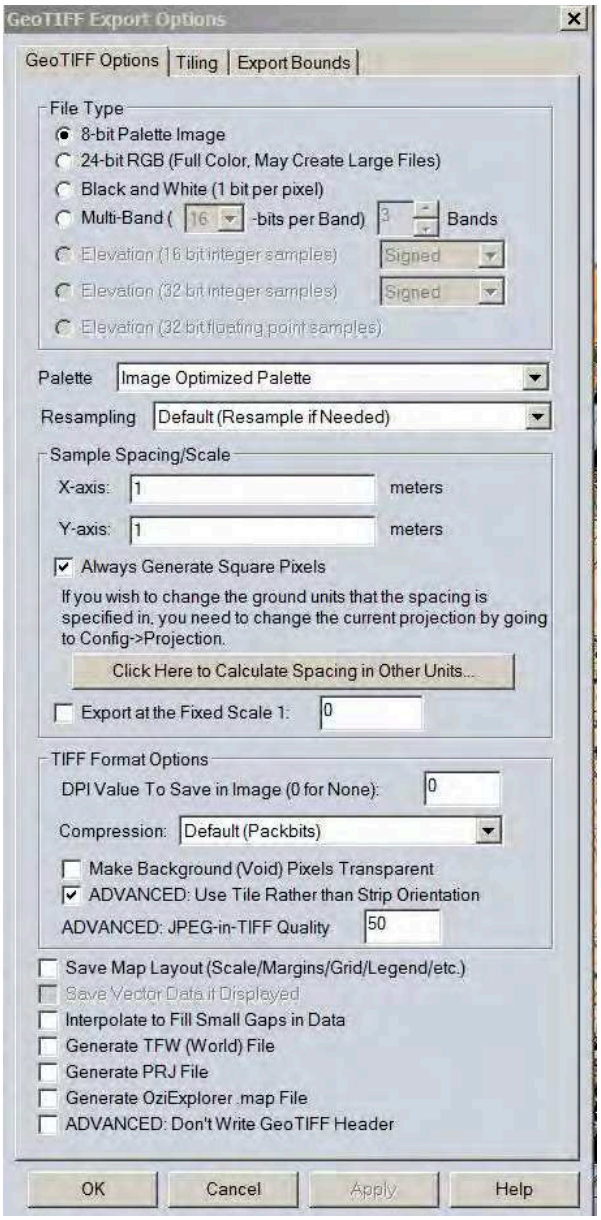
Etape 1 : Ouverture du MNT au format .adf. Sa place est en première position dans la fenêtre des calques.

Etape 2 : Intégration des cartes géologiques imprimées raster, au format .cl2e. Leurs places étant en dernière position dans la fenêtre des calques.

Etape 3 : Nous devons masquer la couleur blanche transparente, en faisant clic-droit sur le calque *0883cl2e.tiff* > *option* > *display* > *transparency* cocher *transparent* puis choisir *« set transparent color »* en indiquant la couleur blanche Pal Idx 0-RGB(255,255,255).

Etape 4 : Nous définissons l'effet *« multiply »* aux cartes géologiques pour que l'on puisse voir le modèle ombré du MNT. Pour cela, nous faisons clic-droit sur le fichier « 0883cl2e.tiff » > *Option* > *Display* >*Blend mode : Multiply*

Etape 5 : Afin d'améliorer le rendu du modèle ombré du MNT et de distinguer les dolines, nous allons dans : *Tools* > *Configure* > *Shader option* > *Slope shader* > *Minimum slope* > *Slope value*, et nous modifions dans la première colonne (degrees (entrer slope in degrees from horizontal) le zéro en mettant 8 degrés.
Idem, dans *Maximum slope* > *Slope value*, c'est sur zéro on peut mettre 15 degrés.



Etape 6 : Nous pouvons enfin exporter le raster (géologique raster + mnt dolines) en faisant : *File* > *Export* > *Export raster/image format* > *Geotiff* **(Figure 1130)**.
Puis « *Export bounds* » pour choisir un cadre d'export et « *Draw a box* ».

Figure 1130 Fenêtre d'exportation sous GLOBALMAPPER.

8.17. FICHE METHODOLOGIQUE N°17 : UTILISER DES TAB DE LA CARTE GEOLOGIQUE VECTORISEE AU 1M AVEC MAPINFO

Ouvrir Mozambique1M_Lithology_v1.TAB
Exporter le raster en geotiff qui sera en WGS84 pseudo.
Ouvrir dans Arcmap et l'exporter en WGS84 ESPG 2654
Pour séparer le shp selon les attributs : *Split to attribut dans ArcToolbox* >*Analysis Tools* > *Extract* > *Split By Attributes*

8.18. FICHE METHODOLOGIQUE N°18 : UTILISER DES DONNEES TAB DANS ARCMAP (ARCGIS™)

Comment utiliser les données vectorisées ?

Données vectorisées géologiques du Mozambique au 1M, au format TAB
Mozambique1M_Dating__v1
Mozambique1M_Fault_v1
Mozambique1M_HotSpring_v1
Mozambique1M_Lithology_v1
Mozambique1M_LithologyBndy_v1
Mozambique1M_MinOcc_v1
Mozambique1M_StructureDip_v1
Mozambique1M_Workings_v1

On a donc 363 formations géologiques différentes.
Via Mapinfo

FME Traducteur Express
Utiliser le traducteur universel pour convertir les tab en Sélectionner les données dans la fenêtre du navigateur et les insérer directement dans la fenêtre de Mapinfo

Comment exporter un raster de la carte géologique ?

Dans Mapinfo
Pour faire un tiff géoréférencé (Figure 1131 p.1148)
Map > Option > Image Processing > Reprojection > Always

Créer une légende

Map > Add to map
Afficher le label des polygones avec Arcmap (Figure 1132 p.1148)

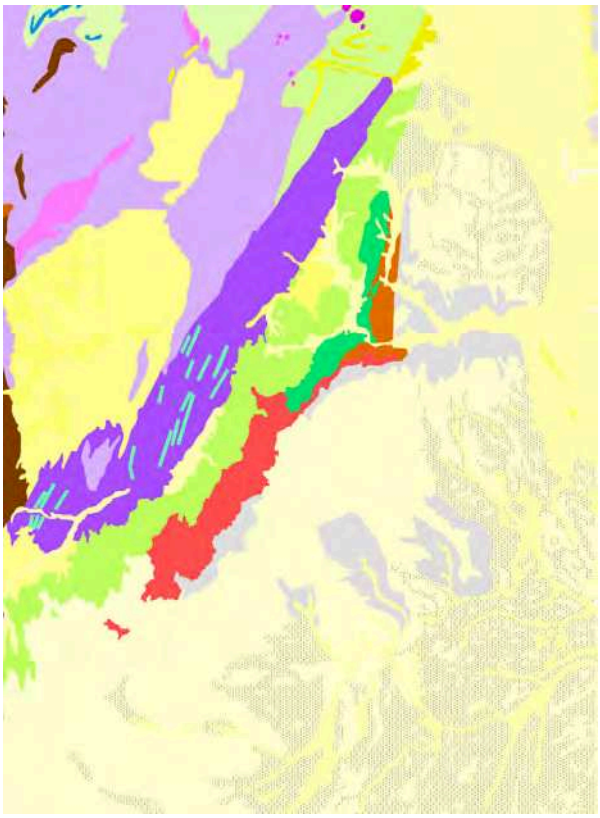


Figure 1131 Carte géologique vectorisée colorisée à l'échelle 1/1 000 000 de 1987 ouverte sous Mapinfo à partir des données tab dont nous venons d'expliquer l'utilisation.



Figure 1132 ARCGIS™ permet d'indiquer le nom des formations géologiques pour chaque polygone de la carte géologique précédente, géoréférencée et exportée en tiff.

8.19. FICHE METHODOLOGIQUE N°19 : CONVERSION DES FORMATS DE STYLE ENTRE ARCGIS™ ET QGIS

Nom du format de style	Logiciel
.gm_layer_style	GlobalMapper
.qml	QGIS
.lyr	ARCGIS™
.SLD	ARCGIS™-*map to SLD converter* (il faut avoir le shape (.shp) et son fichier ".lyr" dans ARCGIS™ et utiliser le logiciel

1) Exemple avec la carte géologique régionale vectorisée de l'Aquitaine (publiée en mai 2020)

1.1) Ouvrir Arcmap (ARCGIS™)

Ouvrir ALIENOR_S_FGEOL.shp
Clic-droit propriété symbology import, choisir dans layer S_FGEOL.lyr (laisser cliquer le premier choix : import symbology definition form another layer in the map or from a layer file).
Choisir dans value field CODE_250k > et appuyez sur OK.
Laisser Arcmap ouvert, on va passer à un autre logiciel.

1.2) Ouvrir ARCGIS™-map to SLD converter

Télécharger le logiciel arcmap2sld.
Cliquer sur Adjust_for_ ARCGIS™-version.bat
Cliquer ensuite sur ARCGIS™_SLD_Converter.exe
Choisir dans « *save SLD to* » le dossier où sont déjà rangés les fichiers de la carte d'Aquitaine
Mettre le nom ALIENOR_S_FGEOL
Cliquer sur SLD en bas à droite.

1.3) Ouvrir QGIS

Ouvrir le fichier vectoriel ALIENOR_S_FGEOL.shp
Clic-droit : propriétés > symbologie
Choisir : Ensemble de règles
En bas à gauche, cliquer sur style > charger le style depuis un fichier et aller chercher le fichier .sld précédemment créé.
On peut maintenant exporter ce style au format QGIS .qml.

8.20. FICHE METHODOLOGIQUE N°20 : CONVERSION DES FORMATS DE STYLE ENTRE ARCGIS™ ET GLOBALMAPPER

Première procédure

Il faut convertir le .lyr en .kmz en utilisant Qgis.

Avec > *geoprocessing* > *arctoolbox* > *conversion tools* > *to KML* > *layer to KML*

Sélectionner le fichier .lyr.
Indiquer sous quel format, on veut le convertir et lancer la conversion.

Une fois dans GlobalMapper ouvrir le .kmz. On doit pouvoir aussi l'exporter en fichier style dédié GlobalMapper.

Deuxième procédure

Dans QGIS

Ouvrir les six fichiers GEO050K_HARM_030_S_FGEOL_2154, avec l'icone en dessous de la page blanche (ouvrir un vecteur).
Trois fichiers s'affichent.
Clic-droit sur cette couche et exporter au format Keyhole Markup Language [KML].
Dans « nom du fichier », il faut chercher le dossier dans lequel on veut le placer et en lui donne un nom.

Dans GlobalMapper

Ouvrir le fichier : SGEOL.shp.
Clic-droit : *option* > *AREA Style* >. Cliquer sur : *Apply Styling Based on Attribute/name Values.*
En haut, il y a « *Load Style files* » qui est devenu noir et on peut cliquer dessus. Il faut ensuite chercher le fichier en indiquant en bas à droite que l'on chercher un fichier avec tous type d'extension : AllFiles.
Paramètres avancés.
Converti :

8.21. FICHE METHODOLOGIQUE N°21 : SEPARER DES SHAPES SELON LES ATTRIBUTS

Les cartes géologiques harmonisées et vectorisées du BRGM ou celles utilisées pour l'Afrique contiennent un seul fichier shp contenant toutes les formations géologiques sous forme de polygones et d'une table attributaire.
Le but de la manipulation est d'extraire tous les polygones d'une même formation pour ensuite les intégrer dans un logiciel SIG. Ainsi, on obtiendra un fichier shp pour chaque formation géologique et il sera plus facile d'attribuer des couleurs et de créer une carte géologique simplifiée notamment dans Illustrator.

Procédure avec QGIS :

Dans QGIS 2.8.9-Wien, utiliser Vecteur > Outils de gestion de données > séparer une couche vectorielle.
Choisir le champ d'identification unique : c'est-à-dire l'attribut.
C'est automatique.
Avec QGIS, ouvrir le fichier nouvellement créé un format .gpkg et l'exporter au format shp.

Procédure avec Arcmap :

Pour séparer le shp selon les attributs avec Arcmap, il faut utiliser l'outil : « *Split to attribut*' situé dans *ArcToolbox >Analysis Tools > Extract > Split By Attributes.*

8.22. FICHE METHODOLOGIQUE N°22 : DECOUPER UN MNT POUR FAIRE UNE ANALYSE RRIM OU AUTRES AVEC ARCMAP (ARCGIS™)

Arctoolbox > *Data Management Tools* > *Raster* > *Raster Processing* > *Clip*
Choisir le MNT à découper.
Créer un fichier shape (polygone) en fonction du cadre que l'on souhaite étudier.
Le nouveau MNT se crée automatiquement dans ce répertoire : *C:\Users\nom-de-l'ordinateur\Documents\ ARCGIS™\Default.gdb*
Dans un format où il ne peut pas être ouvert sur un autre ordinateur, ni par un autre logiciel SIG. Il faut l'exporter dans un autre répertoire, et à un autre format. Pour cela, faire clic-droit sur le nouveau mnt > *Data* > *export data* > choisir un dossier de destination et valider. Choisir : Raster dataset (original), format TIFF et compression type : non.
Maintenant ce nouveau MNT est au format raster TIFF qui peut être ouvert avec un autre SIG, comme QGIS.

8.23. FICHE METHODOLOGIQUE N°23 : RANGEMENT DES FICHIERS LOURDS SUR ARCMAP (ARCGIS) POUR EXPORTATION OU LORS D'UN CHANGEMENT D'ORDINATEUR

Les MNT et les modèles ombrés sont rangés à la racine du disque dur d'installation de Windows ici :
C:\Users\nom-de-l'ordinateur\Documents\ ARCGIS™\Default.gdb
On peut voir cet emplacement sur ARCMAP et faisant clic-droit sur le calque qui nous intéresse et regarder dans : Source.
Il faut ouvrir avec son explorateur de fichiers cette adresse, en mettant le nom de son ordinateur.

Mais ces fichiers ne sont pas exportables directement car ils sont au format .gdb. On peut aussi l'exporter en faisant clic-droit et en choisissant Data > Export data, comme nous venons de le voir dans la fiche méthodologique précédente.

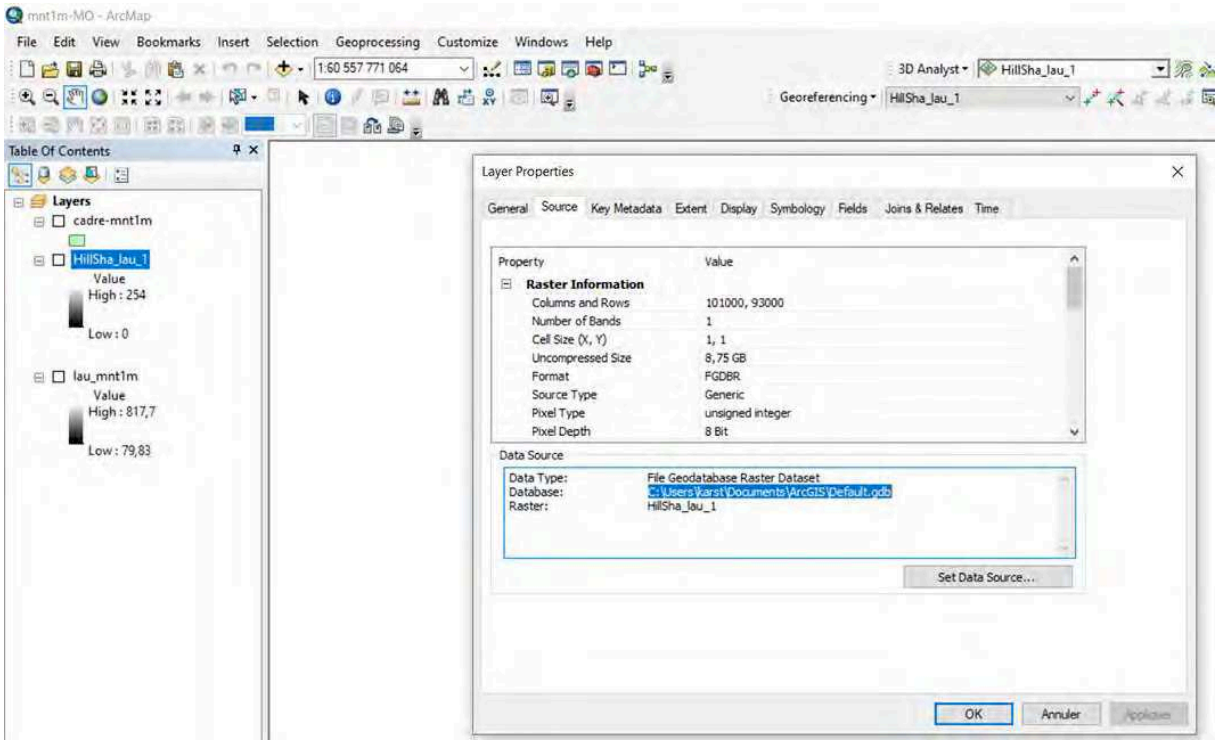


Figure 1133 Emplacement des fichiers MNT dans l'ordinateur, avec Arcmap.

9. ANNEXES DU CHAPITRE N°2

9.1. ANNEXE N°1 DU CHAPITRE N°2 : ECHELLE DES TEMPS GEOLOGIQUES SYNTHETIQUES

Nous avons synthétisé l'ensemble des évènements géologiques sur cette échelle des temps (Figure 1134) et nous proposons un agrandissement de cette échelle (Figure 1135).

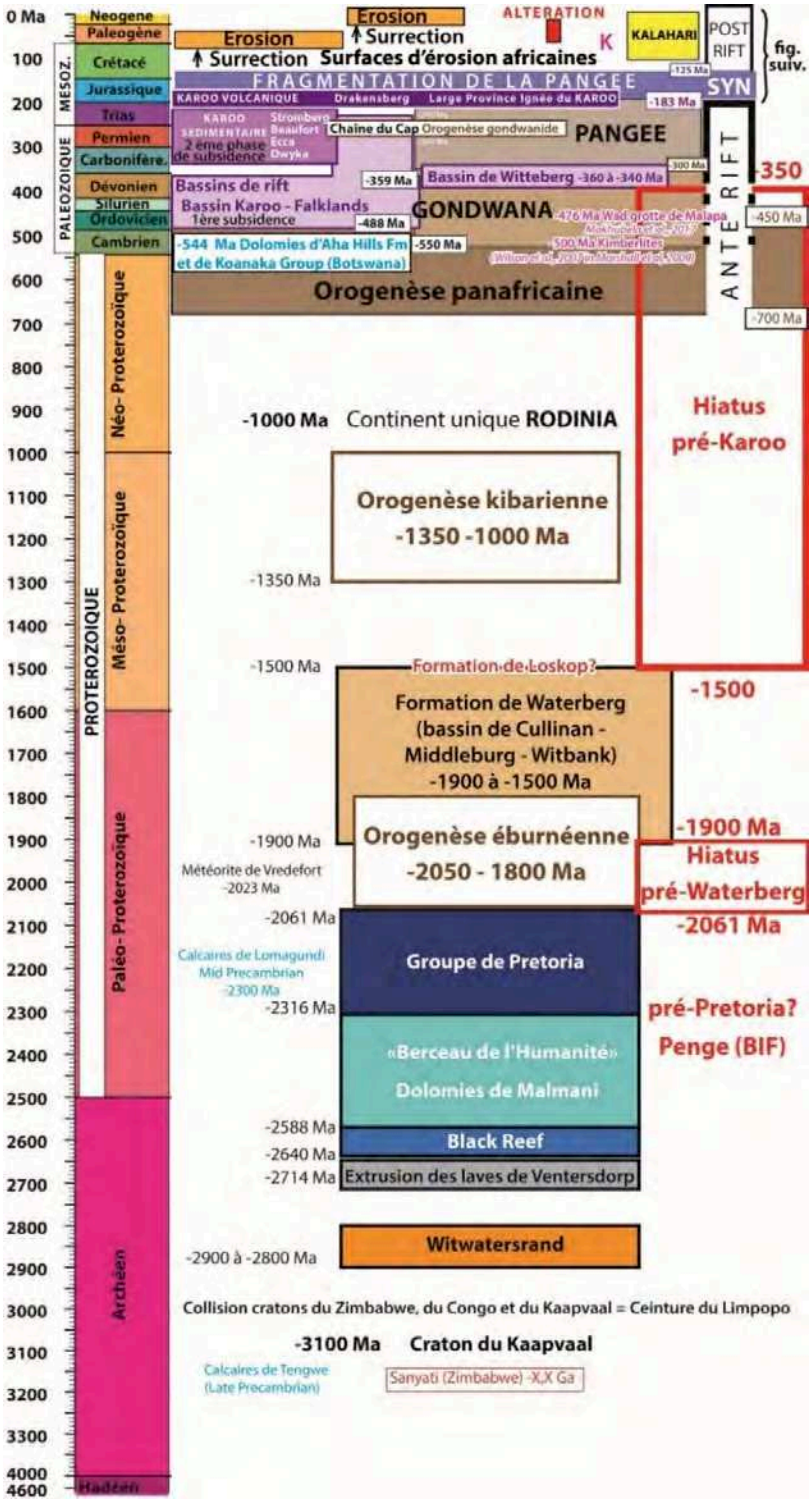


Figure 1134 Chronologie des évènements géologiques en Afrique australe depuis 4.6 Ga. (Voir aussi Johnson et Wolmarans, 2008).

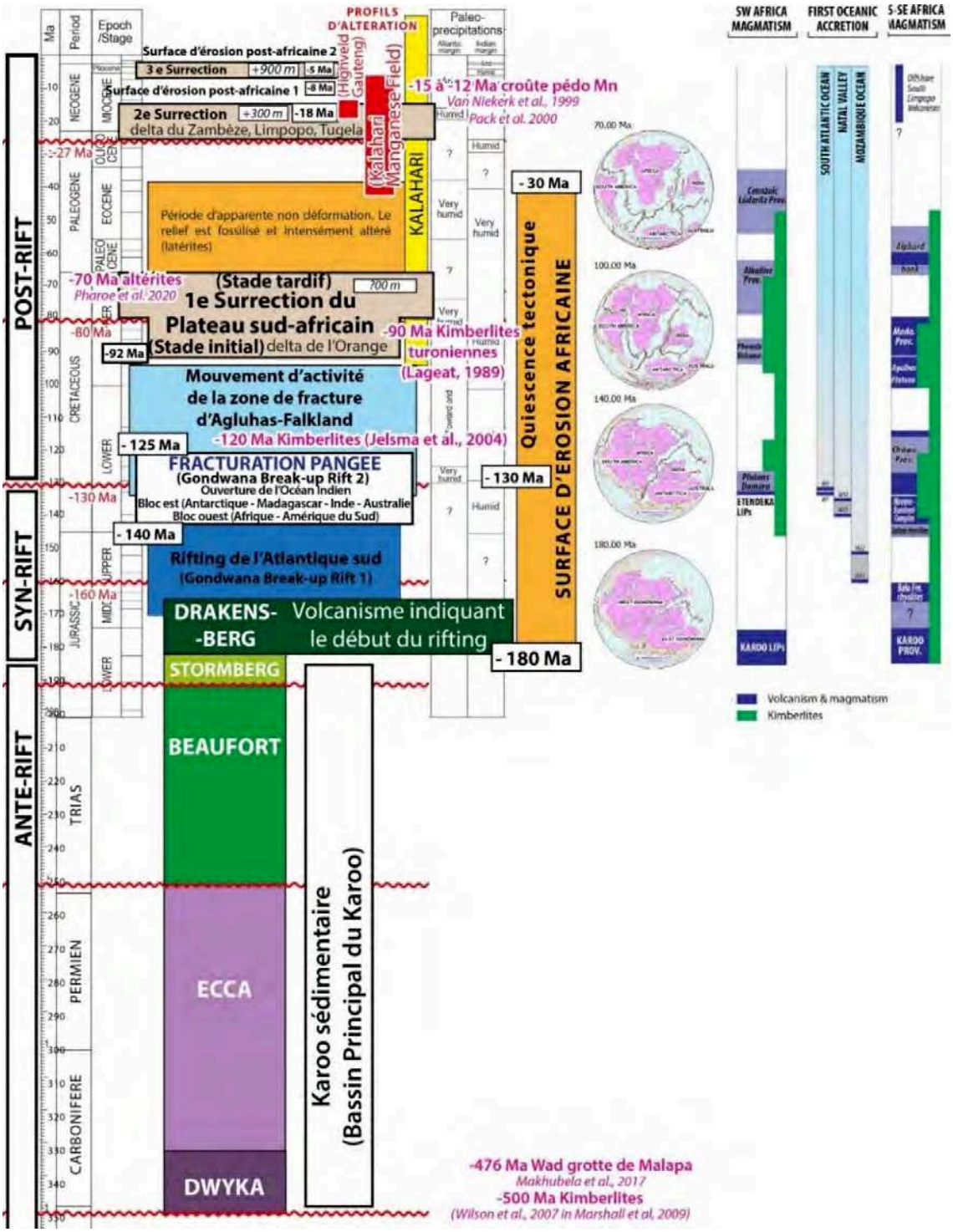


Figure 1135 Chronologique des évènements géologiques en l'Afrique australe depuis le Paléozoïque. Notons la contemporanéité entre les surrections du continent, les surfaces d'érosion africaines et la mise en place des profils d'altération. Les profils d'altération sont issus de Van Niekerk et al. (1999) (par datation $^{40}Ar/^{39}Ar$ sur des cryptomélanes) et Gutzmer et al. (2012) (par datation $^{40}Ar/^{39}Ar$ sur des todorokites et des manganomélanes). L'âge des discordances du Crétacé a été déterminé par stratigraphie séquentielle des marges offshores du Canal du Mozambique (Baby, 2017).

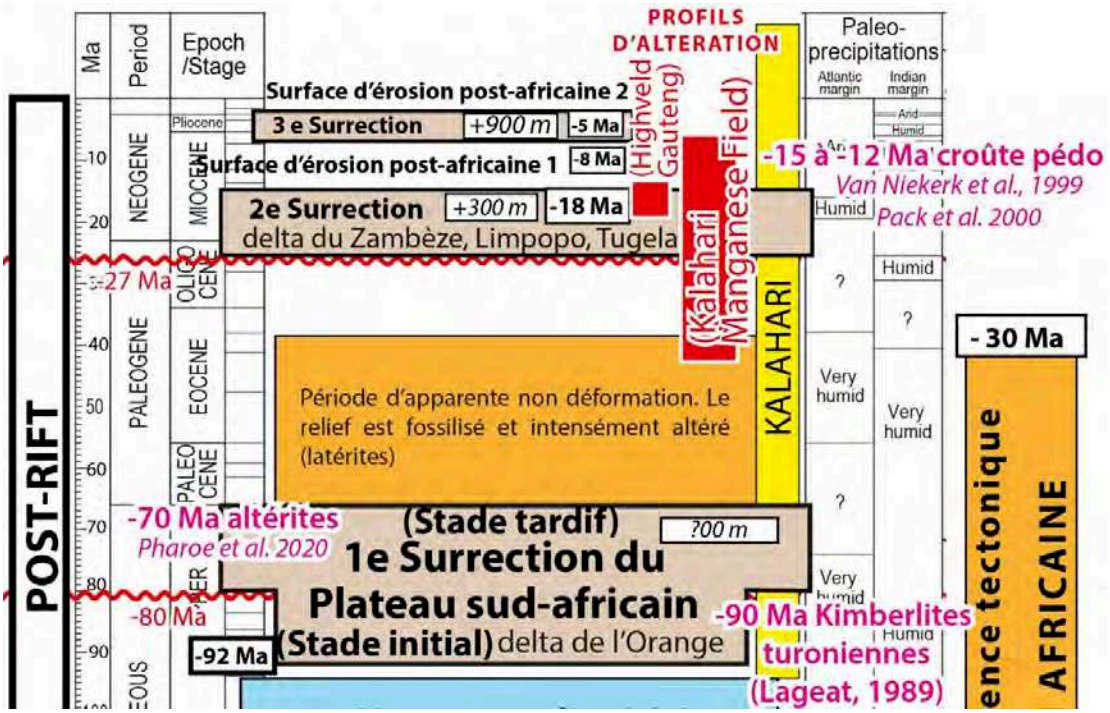


Figure 1136 Synthèse chronologique des Surfaces d'érosion africaine et des phases de surrection.

9.2. ANNEXE N°2 DU CHAPITRE N°2 : DATATIONS DES FORMATIONS GEOLOGIQUES DU BASSIN DU TRANSVAAL

Table 1 – SIMPLIFIED STRATIGRAPHIC COLUMN FOR THE ROCKS OF THE 2527DD BROEDERSTROOM 1:50 000-SCALE SHEET WITH THE RELATIVE AGES

SUPERGROUP/GROUP/SUBGROUP/FORMATION			AGE
QUATERNARY SEDIMENTS			Recent
POST-TRANSVAAL INTRUSIVE ROCKS			1 193 ± 98 Ma (Harmer 1993)
TRANSVAAL SUPERGROUP	PRETORIA GROUP	HEKPOORT FORMATION	2 222 ± 12 Ma (Cornell *et al.* 1996) 2 224 ± 21 Ma (Burger and Coertze 1975) 2 225 ± 3 Ma (Dorland 2004) 2 240 Ma (Dorland 2004) 2 250–2 200 Ma (Tankard *et al.* 1982)
		TIMEBALL HILL FORMATION	2 208 ± 63 Ma (Hunter and Hamilton 1978) 2 238 ± 90 Ma (Armstrong 1987) 2 263 ± 85 Ma (Hamilton 1977) 2 320 Ma (Hannah *et al.* 2003)
	MALMANI SUBGROUP (CHUNIESPOORT GROUP)	OAKTREE FORMATION	2 516 ± 4 Ma (Altermann and Nelson 1998) 2 521 ± 3 Ma (Sumner and Bowring 1996) 2 549 ± 7 Ma (Altermann and Nelson 1998) 2 552 ± 11 Ma (Barton *et al.* 1994) 2 555 ± 11 Ma (Altermann 1996, Altermann and Nelson 1998) 2 557 ± 49 Ma (Jahn *et al.* 1990) 2 585 Ma (Martin *et al.* 1998) 2 588 ± 6 Ma (Altermann 1996, Altermann and Nelson 1998)
		BLACK REEF FORMATION	± 2 600 Ma (Jahn *et al.* 1990) 2 600–2 430 Ma (Walraven and Martini 1995) 2 642 ± 2 Ma (Walraven *et al.* 1999, unpubl.) 2 650 ± 8 Ma (Gutzmer and Beukes 1998)
VENTERSDORP SUPERGROUP	PLATBERG GROUP		2 699 ± 50 Ma (Walraven *et al.* 1990) 2 708 ± 5 Ma (Walraven *et al.* 1990) 2 709 ± 4 Ma (Armstrong *et al.* 1991) 2 714 ± 8 Ma (Armstrong *et al.* 1991)
WITWATERSRAND SUPERGROUP	WEST RAND GROUP		2 914 ± 8 Ma (Armstrong *et al.* 1991) 2 970–2 914 Ma (Robb and Meyer 1995) 2 895–3 000 Ma (Barton *et al.* 1989)
LANSERIA GNEISS	Migmatitic gneiss: Leucosome		3 135 ± 51 Ma (Barton *et al.* 1999)
	Tonalites		2 385 ± 127 Ma (Barton *et al.* 1999) 3 170 ± 64 Ma (Anhaeusser and Burger 1982)
	Trondhjemitic gneisses		3 340 ± 3 Ma (Poujol and Anhaeusser 1999)
ARCHAEAN MAFIC AND ULTRAMAFIC LITHOLOGIES			3 750–2 870 Ma (SACS 1980)

Tableau 66 Datation des formations géologiques du Bassin du Transvaal. (Source : Ingram et Van Tonder, 2011, Table 1, p.16).

9.3. ANNEXE N°3 DU CHAPITRE N°2 : EQUIVALENCE STRATIGRAPHIQUE DES DOLOMIES ENTRE LES DIFFERENTS BASSINS

Dans le *CoH*, nous passons des dolomies de Malmani aux quartzites de Pretoria.

Au niveau du Plateau de Ghaap (qui appartient au Bassin occidental du Griqualand) nous passons des dolomies du Boomplaas et de Campbellrand aux quartzites de Postmasburg (Eriksson *et al.,* 1993**,** Dorland, 1999 *in* Frauenstein, 2005 ; Gutzmer et Beukes, 1998, Fig.2.1.1 p.6 ; Frauenstein 2005, Abbildung 19 p.47).

Dans le bassin de Kanye, elles sont appelées les dolomies de Ramonnedi (Eriksson *et al.,* 1993).

À l'ouest du Bassin du Transvaal, nous avons les dolomies de Ramotswa, de Maholoboa puis de Magopane (Eriksson *et al.,* 1993).

9.4. ANNEXE N°4 DU CHAPITRE N°2 : DEFINITION DES DOLOLITHITES ET DOLOCLAST.

Remarques:
Le terme « **dololithite** » peut être utilisé pour parler des dolomies formées de fragments détritiques de dolomie, provenant de l'altération de la dolomie antérieure (Michel *et al.*, 2004, p.74).

> *« Dololithite : Une roche dolomite contenant 50 % ou plus de fragments de roches dolomitiques plus anciennes (doloclastes) qui ont été érodées et redéposées. Dans la région d'Otavi (Namibie), deux sortes de dololithite ont été reconnues. L'une est interstratale, et se compose de volumineux lits de brèches d'âge protérozoïque, tandis qu'une variété moins importante s'est formée localement au cours du Tertiaire, principalement dans des contextes spéléologiques tels que Berg Aukas » (Pickford et Senut, 2010, p.67).*

Le terme « **doloclast** » est utilisé pour parler d'un « *lithoclaste dérivé de l'érosion d'une roche dolomite plus ancienne* » (Pickford et Senut, 2010, p.67).

9.5. ANNEXE N°5 DU CHAPITRE N°2 : MODELES DE KARSTIFICATIONS DE BUTTON (1973)

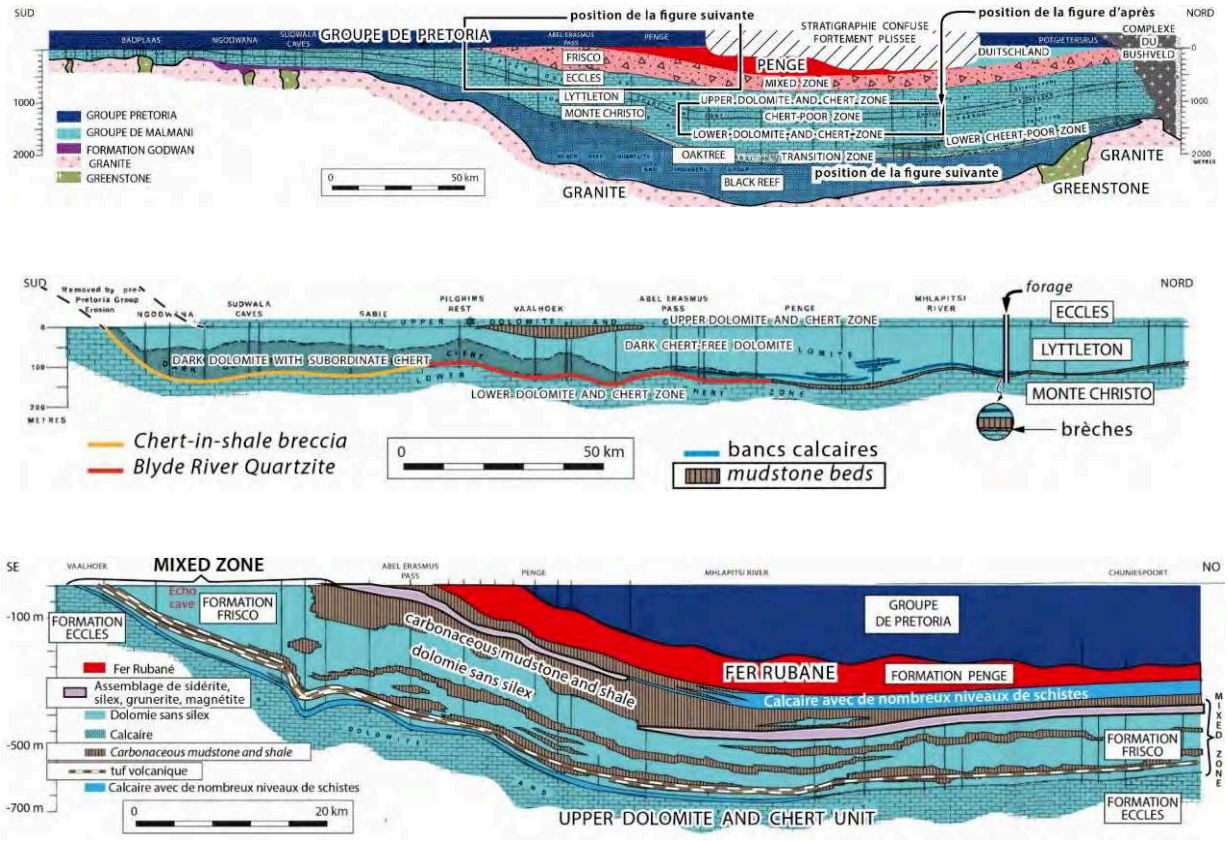


Figure 1137 Coupes géologiques du Bassin du Transvaal proposées par Button (1973, modifié).

9.6. ANNEXE N°5 DU CHAPITRE N°2 : MODELE DE KARSTIFICATION DES DOLOMIES DE MALMANI PAR MARTINI (1976)

D'après ces observations dans le karst d'Ottoshop, à l'ouest du Bassin du Transvaal, Martini (1976) propose un modèle de karstification des dolomies de Malmani.

Coupe Stratigraphique et géologique des altérations et des karstifications au niveau du karst d'Ottoshop, à l'ouest du Bassin du Transvaal

La « Zone Mixte » définie par Button (1973) et utilisée ici par Martini (1976) décrit l'alternance de formations carbonatées (dolomies et calcaires) et de formations oxydées, altérées, ferreuses, minéralisées et conglomératiques au sommet des dolomies (Penge, brèches, conglomérats, mudstone, chert-in-shale-breccia, etc).

La coupe stratigraphique proposée par Martini (1976) dans la région d'Ottoshoop (Figure 1138) montre deux générations de brèches de chert (en rose et en violet), en position supergène, une (celle en violet) appartenant stratigraphiquement à l'épisode des BIF (en rouge) et interprétée comme du Paléo-protérozoïque et une autre (en rose), où parfois des interbancs de cherts, appartenant aux dolomies, sont situées au-dessous des brèches, voire pris dans les brèches, nous les avons indiqués par des flèches. Ceci concorderait avec le fait que les brèches de cherts seraient, pour certaines d'entre elles, une production d'altération autochtone des dolomies et des bancs de chert.

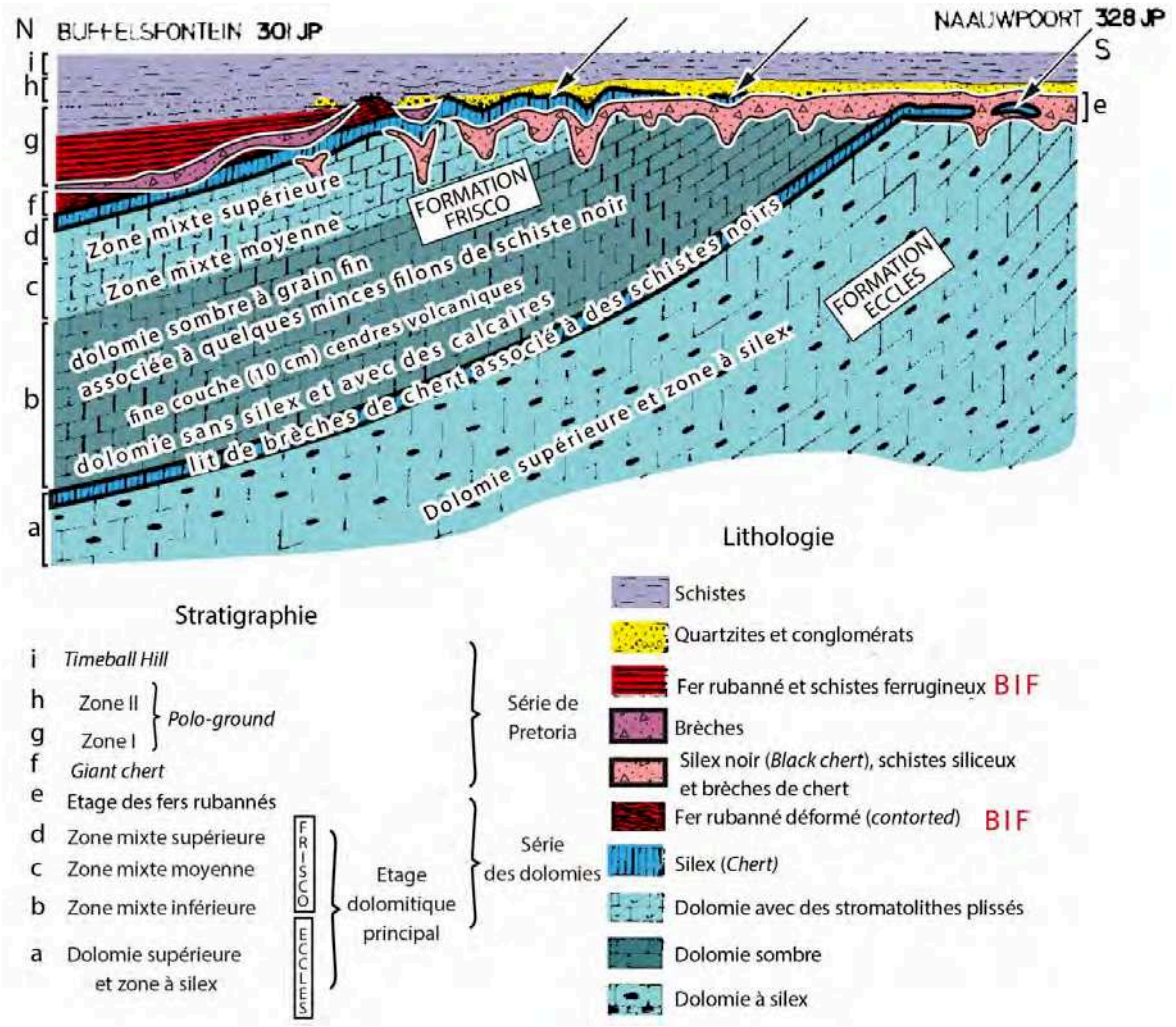


Figure 1138 Coupe géologique synthétique du karst d'Ottoshoop (Martini, 1976, modifié).

9.7. ANNEXE N°6 DU CHAPITRE N°2 : MODELE DE KARSTIFICATION DES DOLOMIES A L'EST DU BASSIN DU TRANSVAAL (MARTINI, 1987)

Comme le montre la coupe géologique de Molengraaff (1901) (Figure 403, p.444) dans ce secteur toute la tranche des dolomies de Malmani a été karstifiée, érodée ou altérée avant le dépôt du Karoo (ou sous le dépôt du Karoo par crypto-corrosion). Nous avons décrit ces modalités de karstification dans le Chapitre n°2 (p.206). Dans ce secteur, de grandes cavités sont présentes : les grottes de Berlin Martini (1987) (Figure 1143 p.1166, Figure 1139).

Molengraaff (1904, p.32) précise en parlant du secteur de Berlin (*Barett's Berlin*) :

"Dans toute la formation des dolomies, on trouve un nombre considérable de veines litées de quartz minéralisé et, vers la base et le sommet, quelques bandes de schistes interstratifiés. Dans la partie centrale du Transvaal, on trouve, près de la base de la dolomie, un schiste complexe et des ardoises, accompagnés d'une veine quartz litée portant des pyrites, du manganèse et de l'or. Ces ardoises ont été nommées Tweefontein Slates et la veine Tweefontein Reef. Cette zone

aurifère est très persistante, et je l'ai trouvée presque toujours là où affleure la base de la dolomie. La grande quantité de manganèse qu'elle contient est très caractéristique, et toute la zone est souvent représentée uniquement par un lit épais de sol manganifère et aurifère renfermant des veinules irrégulières de quartz. Cette ceinture a jusqu'à présent été très peu travaillée, encore faut-il mettre à son compte les intéressants gisements aurifères de Barett's Berlin et de Spitskop, sur l'escarpement oriental du haut plateau dans le district de Lydenburg (dans l'est du Bassin du Transvaal). *La zone aurifère y est plus développée, et sa composition est considérablement altérée par l'influence des intrusions diabasiques ; ces diabases étant fortement décomposées, forment une sorte de latérite qui se mêle aux débris manganifères des couches supérieures et entièrement dénudées de dolomie. Les lits du barett's Berlin sont travaillés à ciel ouvert"* Molengraaff (1904, p.32).

Reliefs ruiniformes et pinacles de Kaapsehoop dans l'est du Bassin du Transvaal, près des grottes de Berlin

Les reliefs particuliers, illustrés par la photographie suivante (Figure 1141), portent le nom de « *Devil's Katoor* » et sont cités par Molengraaff (1903, p.33), Martini (1979, 1987) et De Bever (1997). Ils sont visibles sur les levés cartographiques de Martini (1987a, Fig. 2, p. 47) (3b sur la Figure 1143).
On trouve ces ruiniformes sur les quartzites du *Black Reef* (carte de la Figure 1143), qui sont situées stratigraphiquement au-dessous des dolomies de Malmani. On les retrouve en bordure de plateau comme le montre la coupe géologique suivante (Figure 1140).

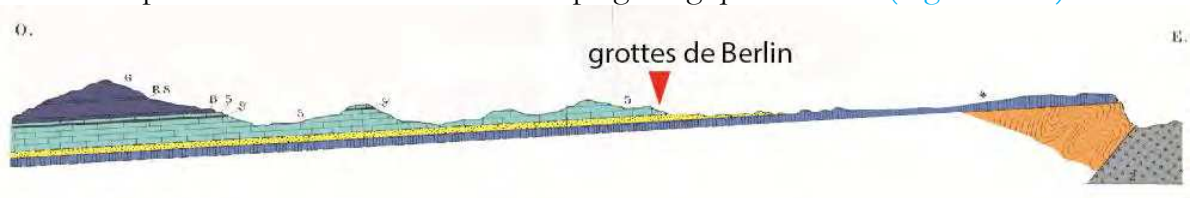


Figure 1139 Coupe géologique montrant l'érosion des dolomies de Malmani dans le secteur des grottes de Berlin (décrites par Martini, 1987a) (Source : Molengraaff, 1901, fig.3, Planche II, colorisée et modifiée). En jaune : Horizon du Diggers-Leaders équivalent au gisement de Barrett's Berlin et au Tweefontein Reef, correspondant à l'accumulation des produits inaltérés par la karstification par crypto-corrosion des dolomies sur les quartzites du Black Reef et montrant ce faciès de lapiaz et de pinacles.

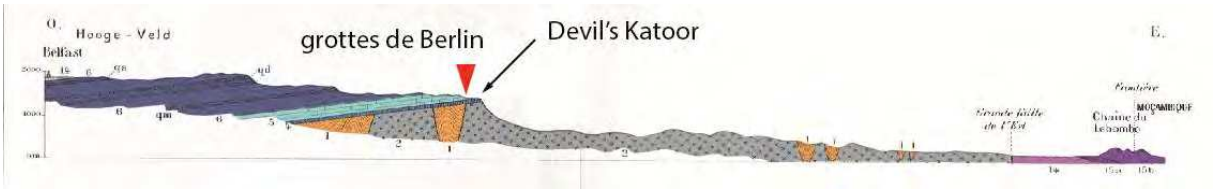


Figure 1140 Position du karst de Berlin, décrit par Martini (1987a), et des pinacles de Devil's Katoor (de la photographie précédente) en bordure de plateau comme l'indique cette coupe de Molengraaff (Source : Molengraaff, 1901, fig.3, Planche II, colorisée et modifiée).

Lageat (1989, p.85) précise que : « *pour* Button(1978) *le lit conglomératique surmonté d'une couche de quartzite de Kaapsehoop est le témoin le plus oriental de la sédimentation terminale du Witwatersrand recouvert en discordance par la séquence sédimentaire du Transvaal* » (Lageat, 1989, p.85). Donc, pour Lageat ça serait les témoins d'une phase d'altération daté du Witwatersrand c'est-à-dire entre -2970 Ma et -2700 Ma), avant la mise en place de la mer paléoprotérozoïque.
Il serait tentant de faire un lien chronologique entre ces altérations en surfaces du *Black Reef* et le paléosol et la saprolite de 25 m d'épaisseur conservés en place sur des granodiorites de la formation de Witwatersrand et qui ont été datés de -2600 Ma (Tau *et al.* 2024, Fig.2 p.3). Ils sont localisés dans la vallée de la rivière Juke juste avant sa confluence avec la rivière *Crocodil*.

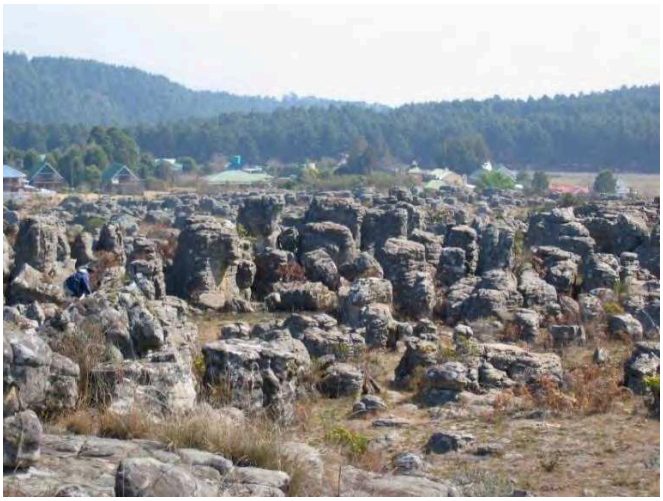


Figure 1141

Reliefs ruiniformes et pinacles de Kaapsehoop dans l'est du Bassin du Transvaal, près des grottes de Berlin, localisés sur les deux coupes suivantes (Figure 1140 et Figure 1139) et cartographiés en bleu foncé (3b) sur la carte suivante.

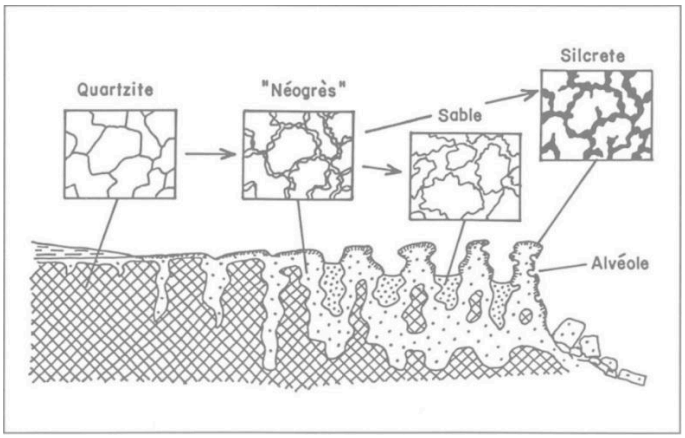


Figure 1142 Coupe expliquant l'altération des quartzites du Black Reef en wad-(Source : Martini-1987).

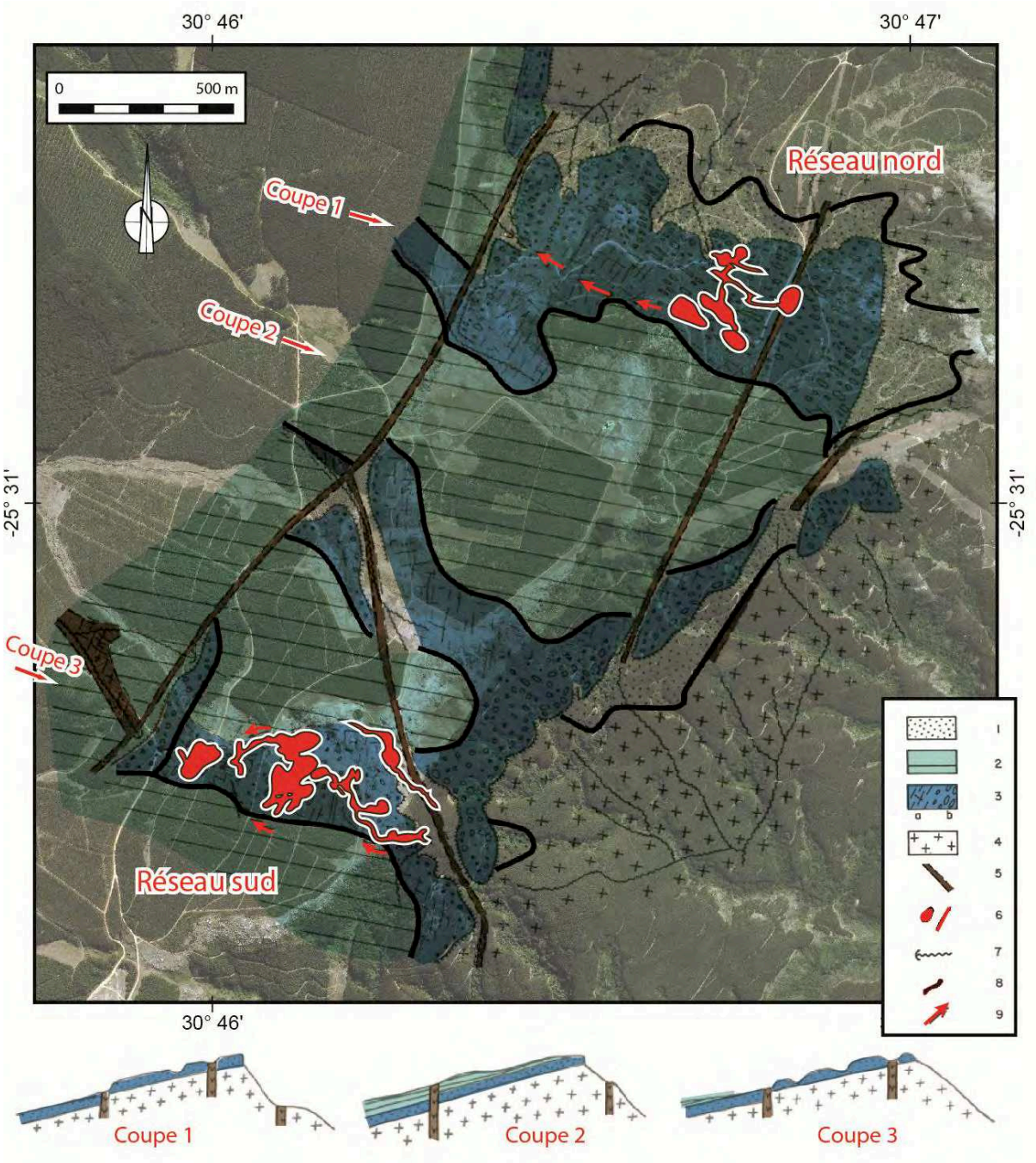


Figure 1143 Cartographie en surface du karst de Berlin, en rouge selon Martini (1987, Fig. 2, p. 47) montrant les ruiniformes du Black Reef en bleu foncé (en photo Figure 1141), l'organisation des dykes de diabase, en marron et la répartition des grottes et des avens (SASA Cave Register).

En légende : 1 :éboulis ; 2 : dolomie presque complètement altérée en wad (fantôme) ; 3 : quartzite du Black Reef affleurant en dalles a) ou en pinacles (b) ; 4 : socle granitique ; 5 : dykes de diabase ; 6 : dolines et rebord de plateau ; 7 : ruisseau et perte-résurgence ; 8 : report des grottes de Berlin.

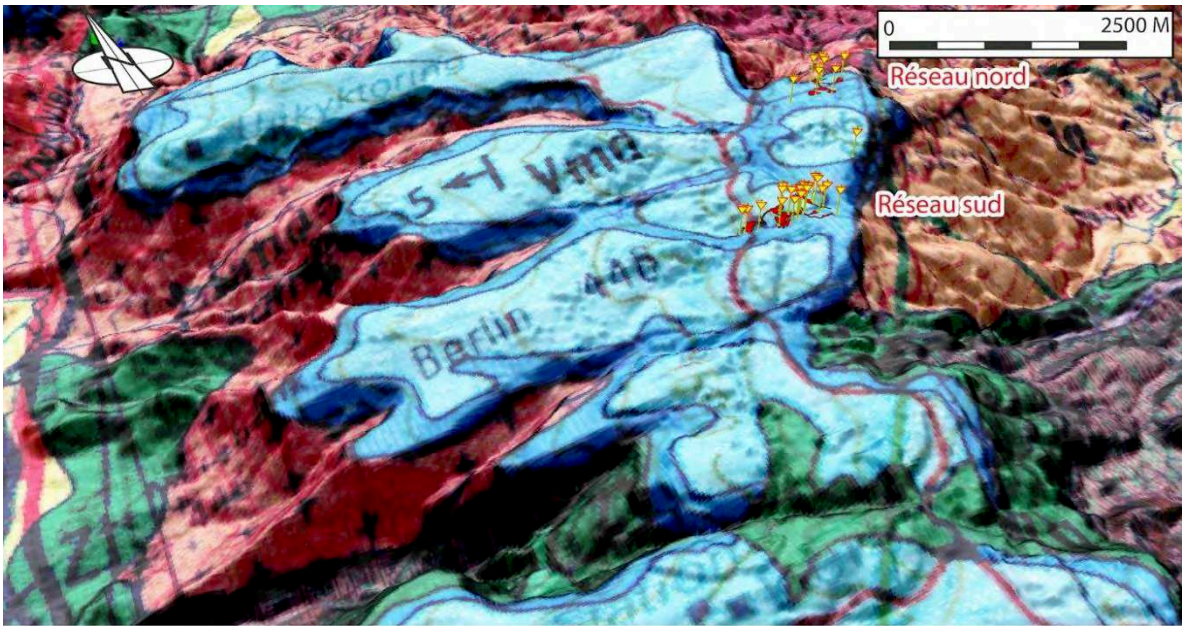


Figure 1144 Vue 2.5 D des grottes de Berlin (en rouge selon Martini, 1987b) la carte géologique en relief du plateau dolomitique karstifié de Berlin (est du Bassin du Transvaal). Les points jaunes correspondent à l'inventaire des cavités du SASA Cave Register.

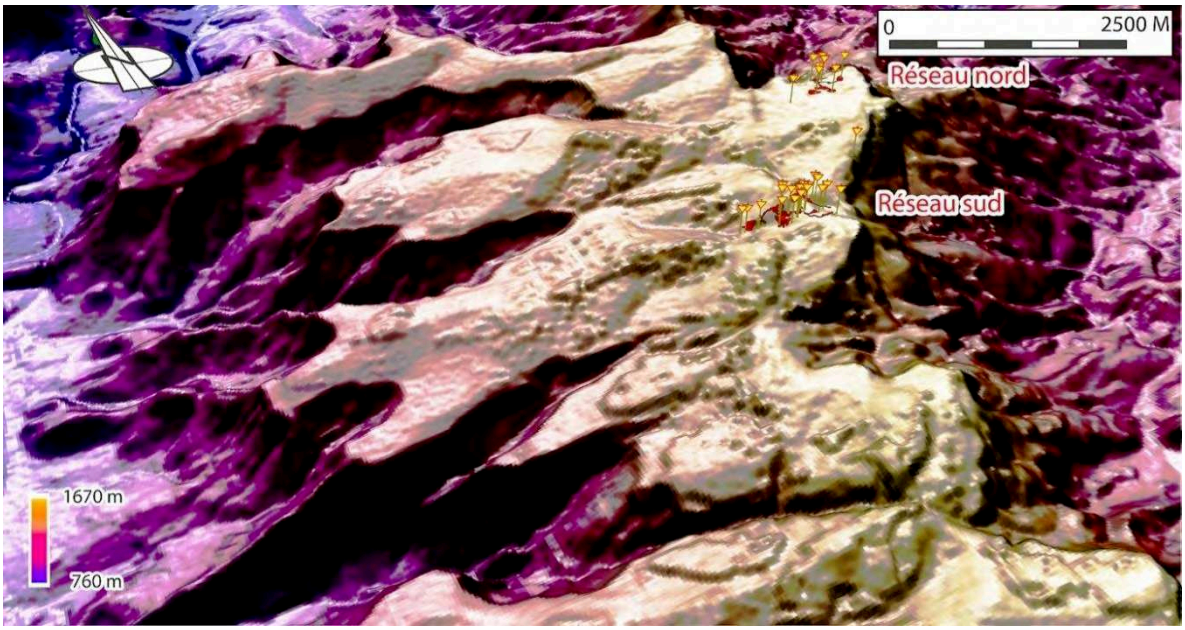


Figure 1145 Vue 2.5 D hypsométrique des grottes de Berlin (en rouge selon Martini, 1987b) du plateau dolomitique karstifié de Berlin (est du Bassin du Transvaal). Les points jaunes correspondent à l'inventaire des cavités du SASA Cave Register.

9.8. ANNEXE N°7 DU CHAPITRE N°2 : MODELE DE KARSTIFICATION DE FOSTER (1988)

Le modèle de Foster (1988) localise les karsts et la formation Rooihoogte au toit stratigraphique des dolomies.

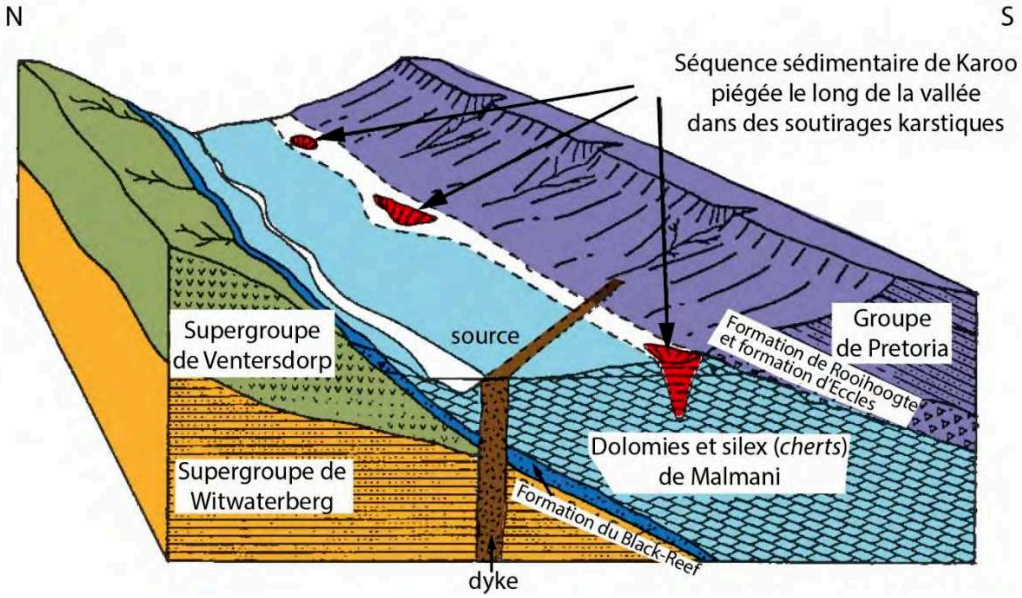


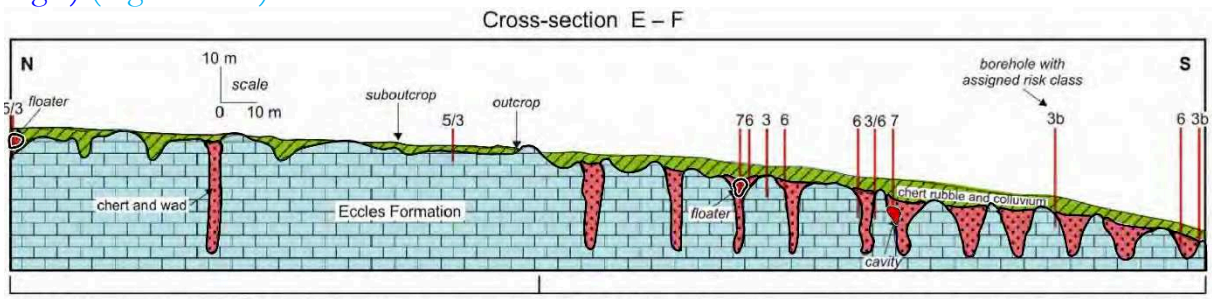
Figure 1146 Bloc diagramme schématique de la vallée de la Kliprivier, au nord-ouest du Cradle of Humankind (Foster, 1988, Fig. 2, p.6, traduite et colorisée).

9.9. ANNEXE N°8 DU CHAPITRE N°2 :MODELE DE KARSTIFICATION DE TROLLIP (2006)

Ces observations sont intéressantes car elles montrent des géométries en couloir typique de la karstification par fantômisation.

Exemple de l'ancienne carrière de Pretoria (Trollip, 2006)

Des couloirs similaires sont décrits dans une ancienne carrière de Pretoria (Trollip, 2006, Fig.5) (Figure 1147).



Les dolomies affleurent sous une mince couverture sédimentaire. Les grykes sont peu nombreux et peu profonds, plus rarement certains sont profonds. Les floaters (fragments rocheux détachés par altération) sont occasionnels ainsi que les zones lessivées du substrat

Les dolomies sont masquées sous une couverture sédimentaire plus épaisse, constituées de clastes de chert (*chert rubble*). Les *grykes* sont profondément lessivés et contiennent des *floaters* et des cavités dans les fentes

Figure 1147 Profil stratigraphique montrant la répartition des couloirs d'altération (fantômes) et leurs profondeurs (~30 m) au niveau d'une ancienne carrière de Pretoria (Trollip, 2006, coloré). Notons que la base des couloirs est subhorizontale et pourrait correspondre au niveau de base.

Les structures cartographiées et photographiées par Trollip (2006, Fig.5, fig. 25, Plates 5 et 6) dans cette ancienne carrière de Pretoria sont les mêmes que celles rencontrées dans l'ancienne carrière de *Bolt's Farm* à Sterkfontein. Cette carrière est située dans les formations de Lyttelton(pauvre en chert) et Eccles (riche en chert). Le profil synthétique ci-dessous montre (1) trois types de formations à brèches, (2) la présence de cavités et (3) des pinacles dolomitiques au sommet de la formation d'Eccles.

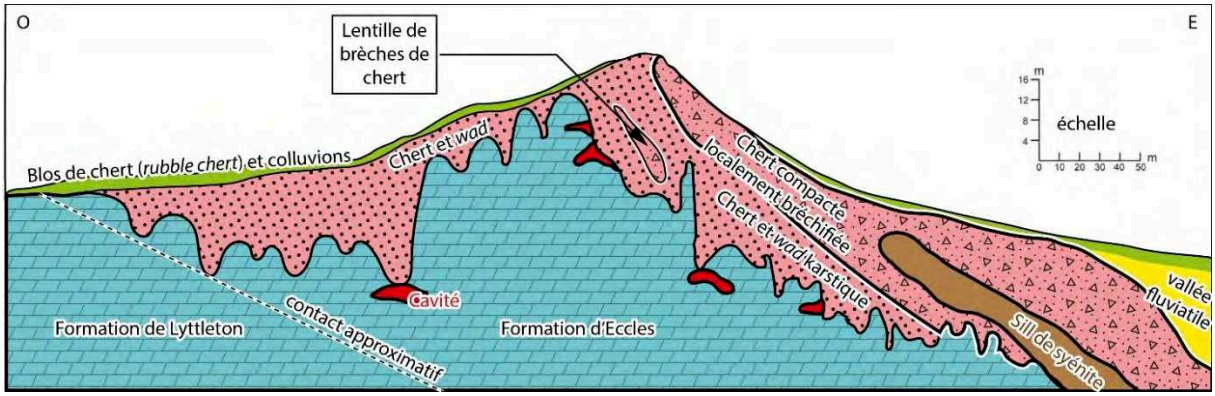


Figure 1148 Profil synthétique (Trollip, 2006) du toit des dolomies de Malmani et de leurs altérations à l'est au contact du sill de syénites.

10. ATLAS CARTOGRAPHIQUES DU CHAPITRE N°3

10.1. ATLAS CARTOGRAPHIQUE DU *CRADLE OF HUMANKIND*

10.1.1. Localisation des atlas

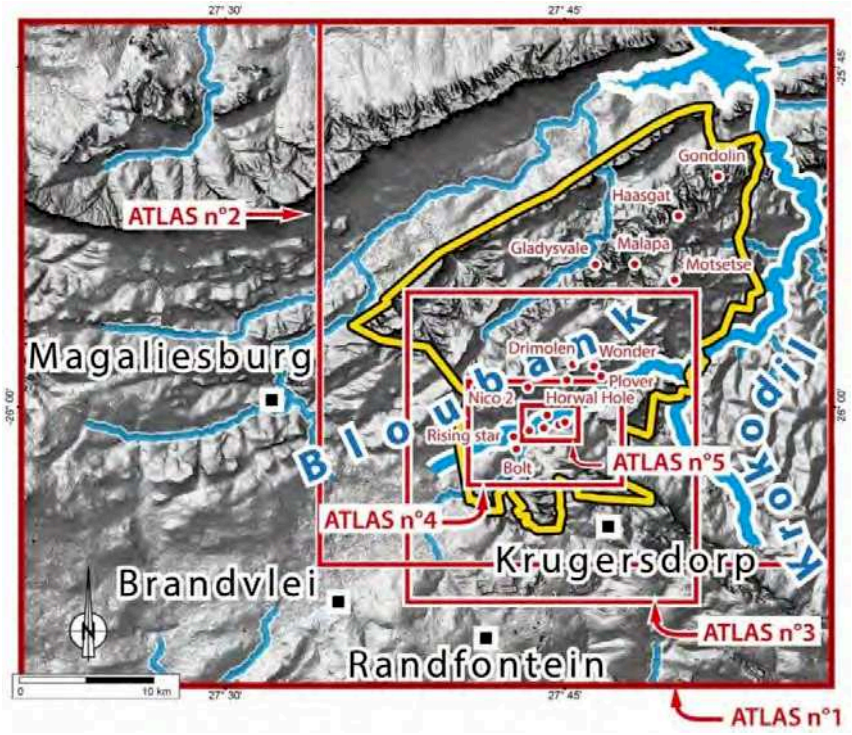


Figure 1149 Localisation des atlas n°1 à 5.

Nous avons rajouté la grotte de Nico 2 et la grotte d'Horwal Hole qui sont de grandes dimensions mais pour lesquelles nous avons peu d'informations.

Les noms des cavités de l'Atlas n°5 ne se sont pas indiqués sur cette carte mais figurent sur la carte suivante.

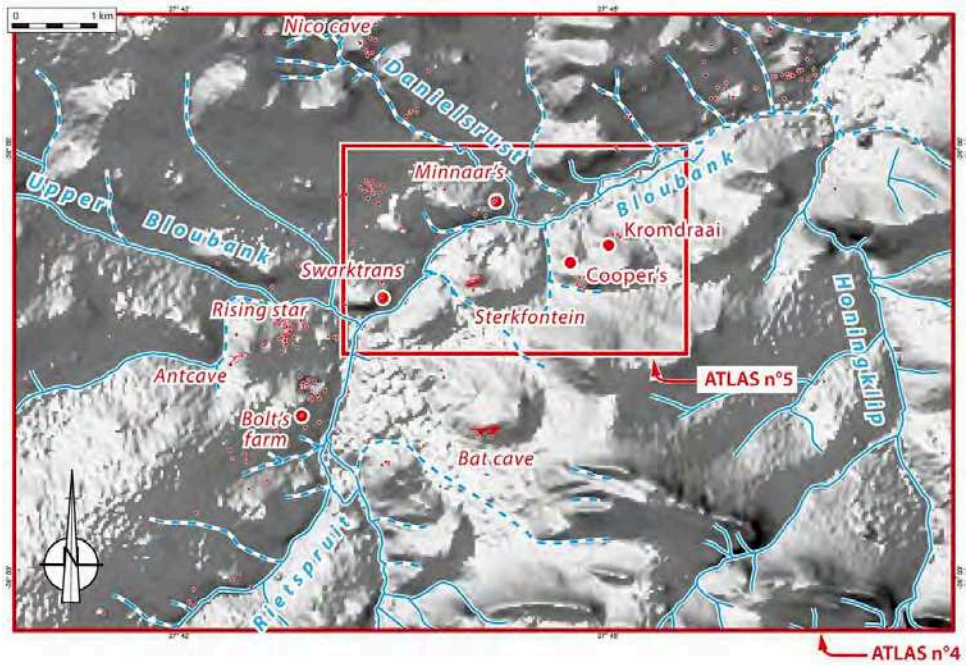


Figure 1150 Localisation des atlas n°4 et 5.

10.1.2. Liste des données cartographiques utilisées pour synthétiser l'Atlas cartographie du « Berceau de l'Humanité »

Les différentes cartes géologiques utilisées pour faire la synthèse cartographique sont:

- Carte du secteur de Sterkfontein de la thèse de Wilkinson, au 1/10 000 (1973, Fig.2.3, p.3) ;
- Carte du relief de Swartkop, au 1/10 000, par Roering (1984), modifiée par Stanistreet et Mc Cathy (1990) et publiée par Ingram et Van Tonder (2011, Fig.15, p.36) ;
- Hekpoort 2527DC au 1/50 000 (1973, Jansen, 1977) ;
- Broederstroom 2527DD 1/50 000 (1973)
- Broederstroom 2527DD 1/50 000 (2010) ;
- West Rand 2626 1/250 000 (1986) ;
- East Rand 2628 1/250 000 (1986).

Certaines publications nous ont aussi été utiles, comme :

- Hobbs *et al.*, 2011 ;
- Stratford, 2017, Fig. 2 p.881;
- Obbes, 2000;
- Abiye, 2011, Fig.2, p.201 ;
- Holland, 2009 ; Holland et Cobbin, 2009 ; Holland et Wiegmans, 2009 carte du Westrand avec distinction des différentes formations des dolomies de Malmani *in* Cobbing et al., 2016, Fig.3.2 p.21) et cartes hydrogéologiques au 1/80 000, avec un modèle ombré ;
- Holland 2011 ;
- Cobbing, 2018 pour la région de Grootfontein ;
- Meyer, 2014a, 2014b, cartes géophysiques ;
- Dippennaar, 2019 ;
- Montjane *et al.*, 2020, pour la région karstique de Centurion ;
- Barnard, 2000 compartimentation hydrogéologique du Westrand (Fig.10c, p.38);
- DWA 2008, 2020 (Etudes hydrogéologiques).

10.1.3. Atlas cartographique n°1 du Cradle of Humankind

10.1.3.1. A1 Carte des cavités du Cradle of Humankind

Cette carte des cavités montre une répartition différente de la carte de Dirk et Berger (2013, Fig.11 p.122 et Fig.12 p.123) qui utilise pourtant le même inventaire (*SASA Cave Register*).

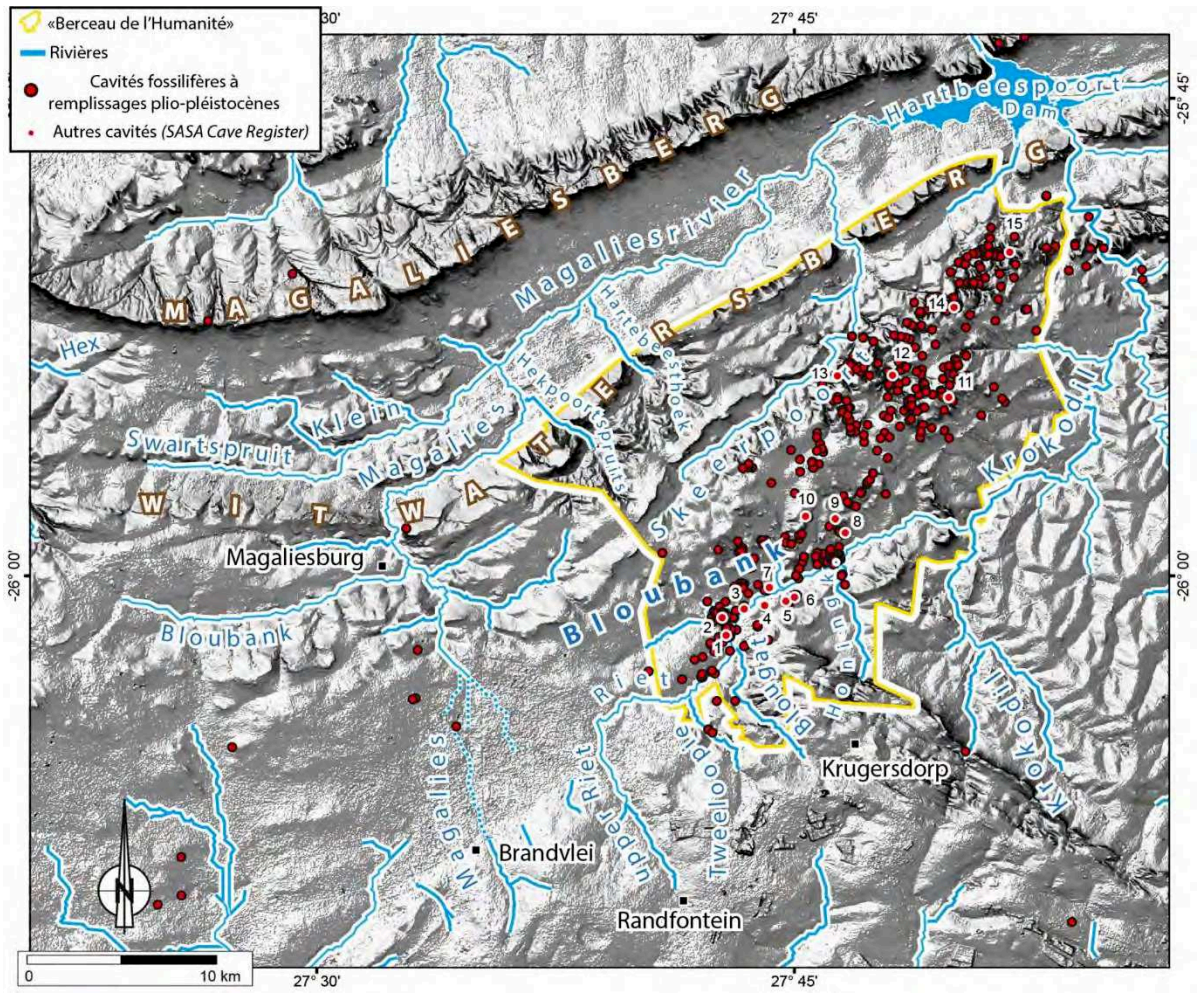


Figure 1151 Carte des cavités du Cradle of Humankind *(Inventaire : SASA Cave Register).*

Noms des cavités : 1 : Bolt's Farm (Bolt's cave), 2 : Rising Star, 3 :Swartkrans, 4 : Sterkfontein, 5 : Cooper's, 6 : Kromdraai, 7 : Minaars, 8 :Plover's lake, 9 : Wondercave, 10 : Drimolen, 11 : Motsetse, 12 : Malapa, 13 : Gladysvale, 14 : Haasgat et 15 : Gondolin.

10.1.3.2. A1 Carte géologique du Cradle of Humankind

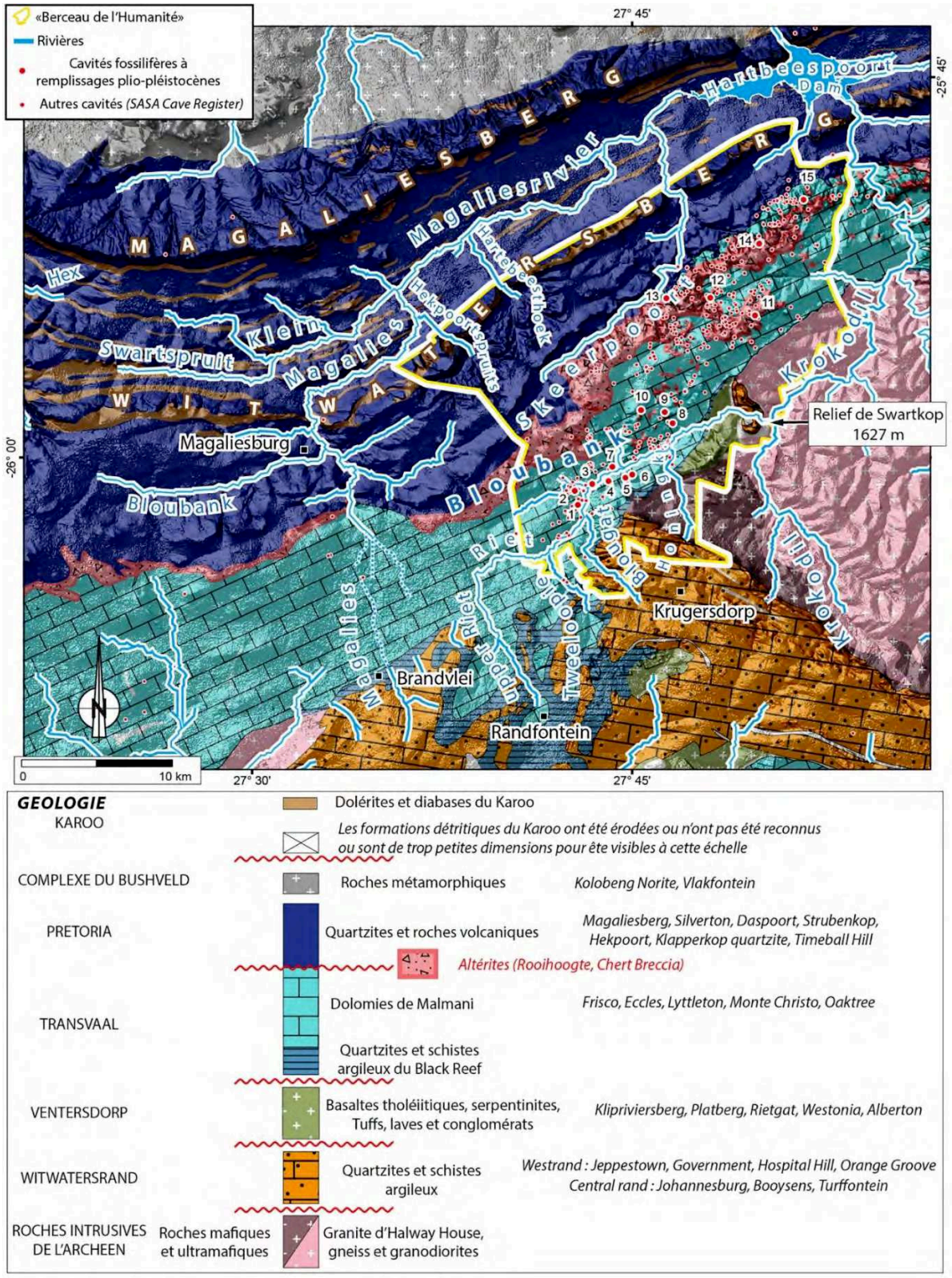


Figure 1152 Carte géologique du Cradle of Humankind.

10.1.3.3. A1 Carte géologique détaillée (distinction des formations du groupe géologique de Pretoria) du Cradle of Humankind

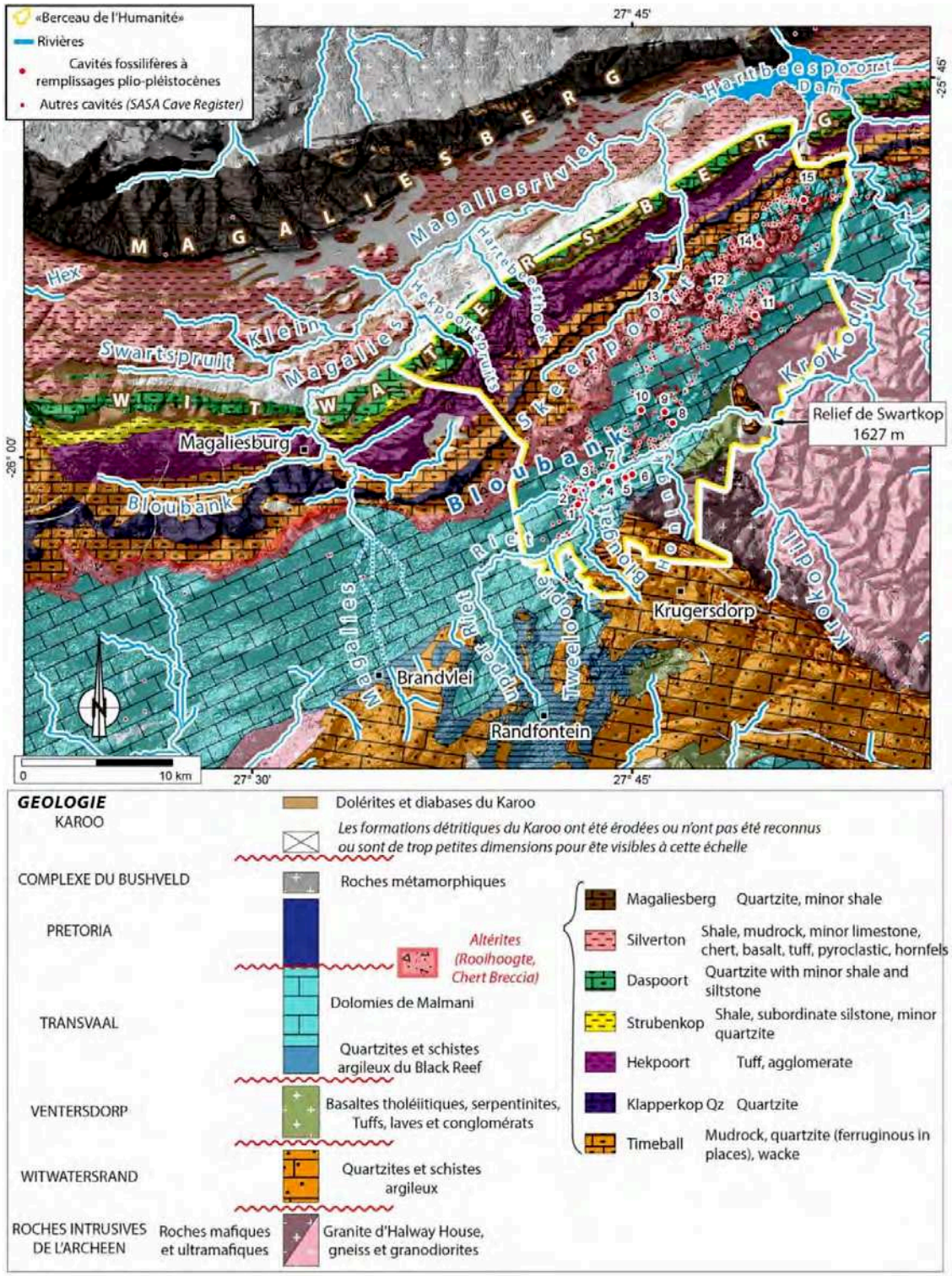


Figure 1153 Carte géologique détaillée (distinction des formations du groupe géologique de Pretoria) du Cradle of Humankind.

10.1.3.4. A1 Carte géologique détaillée (distinction des formations des dolomies de Malmani) du Cradle of Humankind

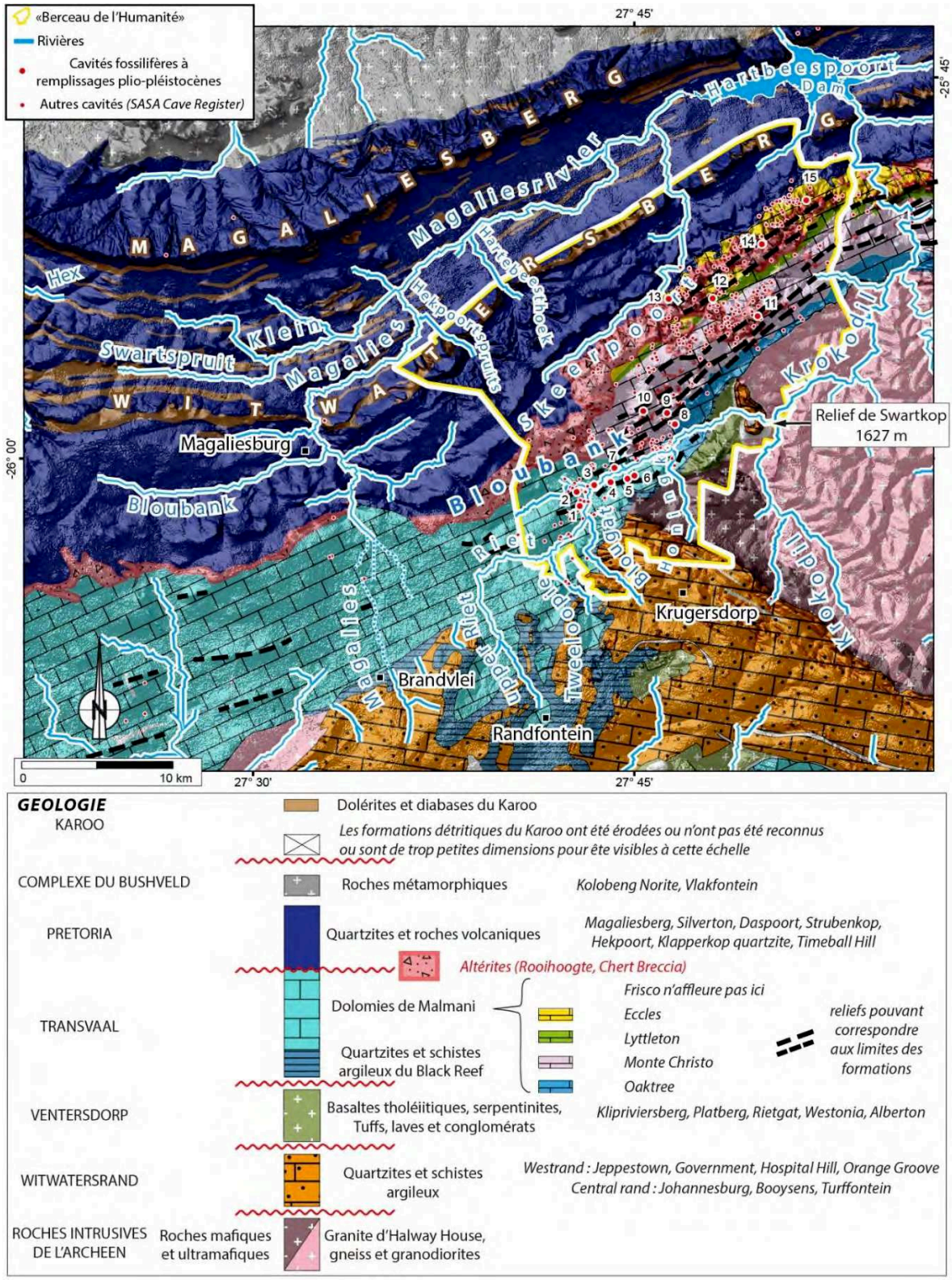


Figure 1154 Détails des formations des Dolomies de Malmani, qui sont incomplètes vers l'ouest.

10.1.3.5. A1 Carte géologique détaillée (distinction des altérites au-dessus des dolomies de Malmani) du Cradle of Humankind

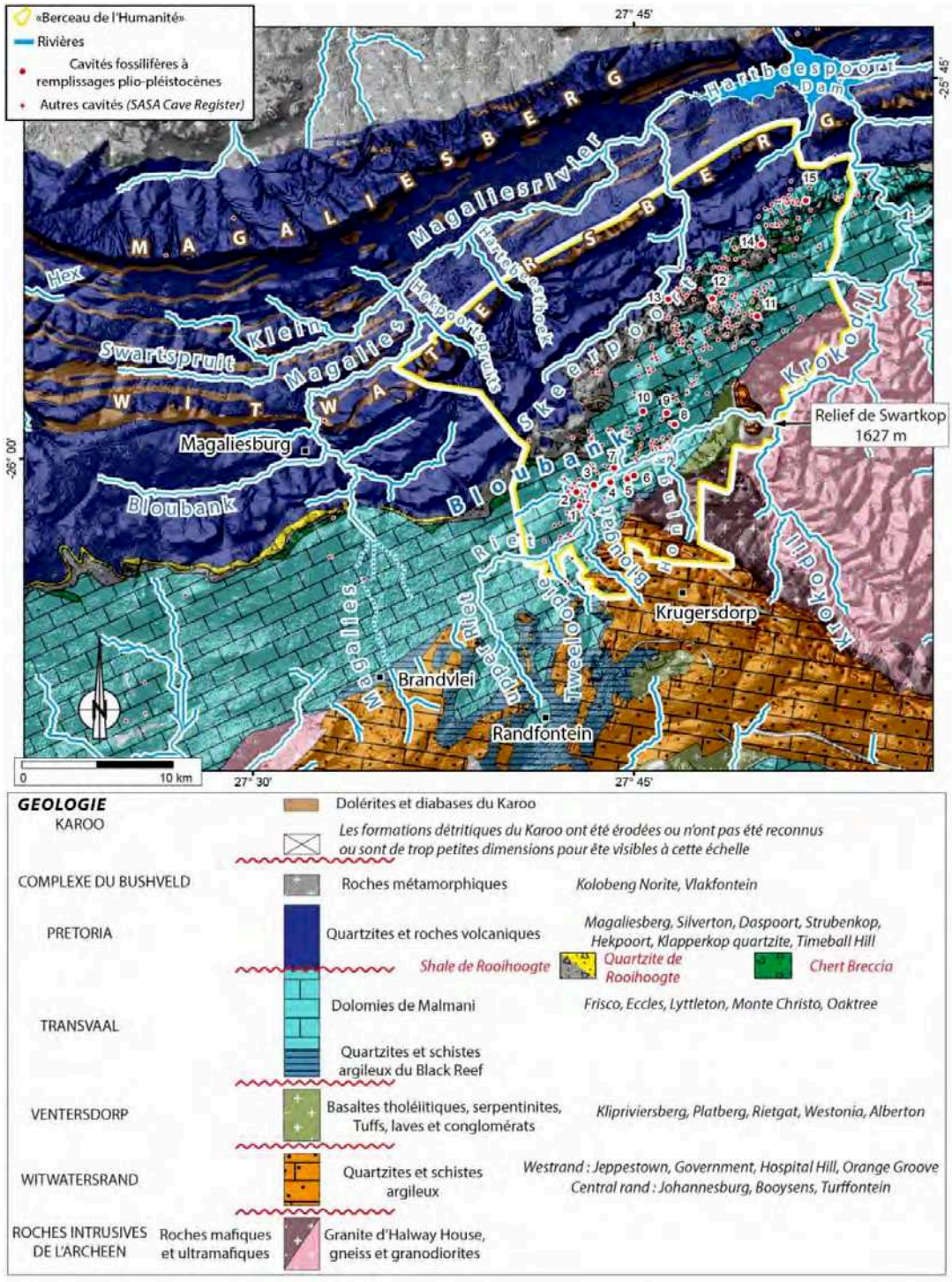


Figure 1155 Détails des faciès de la formation Rooihoogte, au-dessus des Dolomies de Malmani.

10.1.3.6. A1 Carte hypsométrique du Cradle of Humankind et lithologie

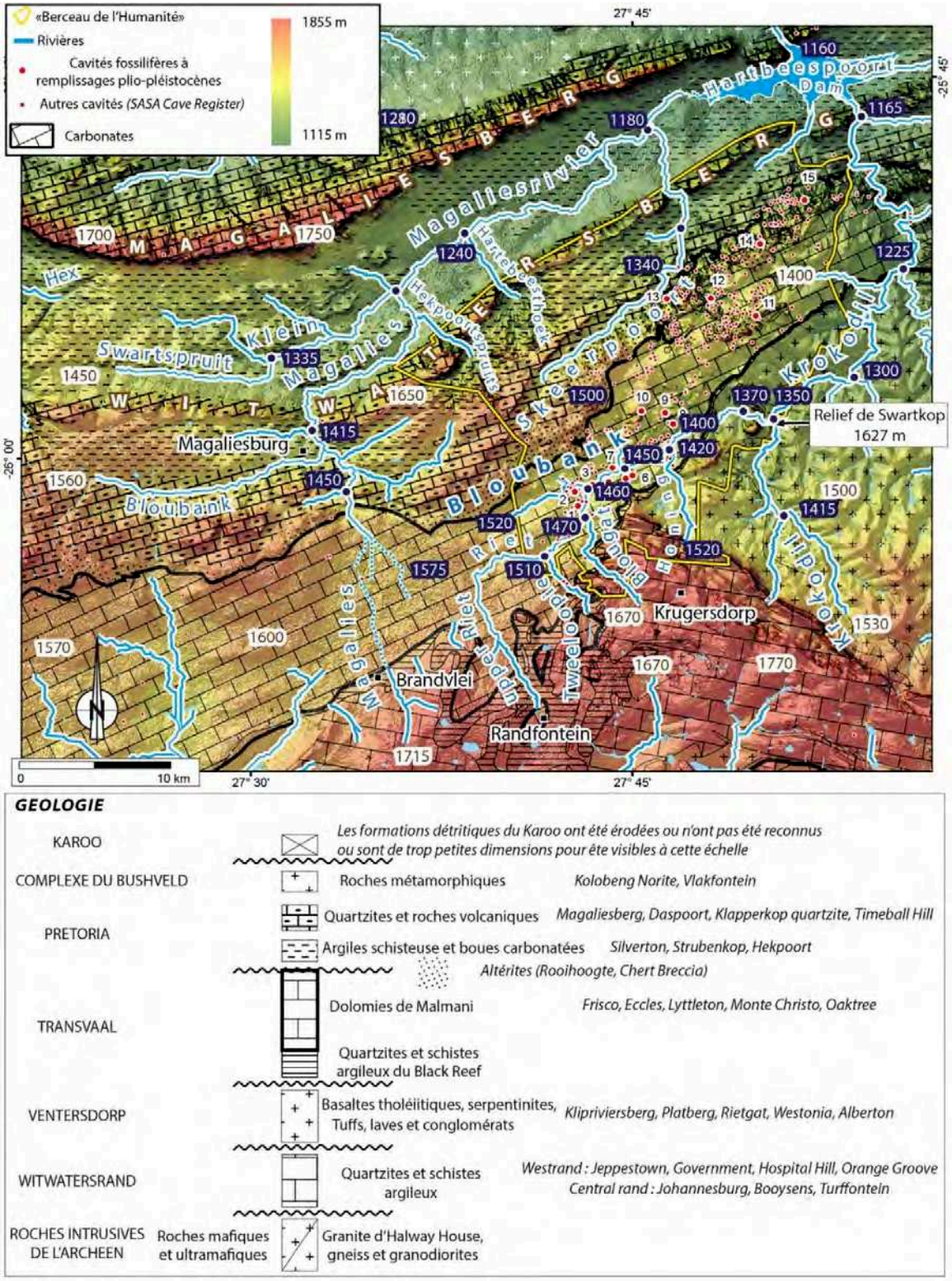


Figure 1156 Carte hypsométrie et hydrographique du Cradle of Humankind *dans les bassins versants de Magaliesrivier, de la Bloubank et de la Krokodil.*

Les altitudes des confluences sont indiquées.

10.1.3.7. A1 Carte orohydrographique du Cradle of Humankind

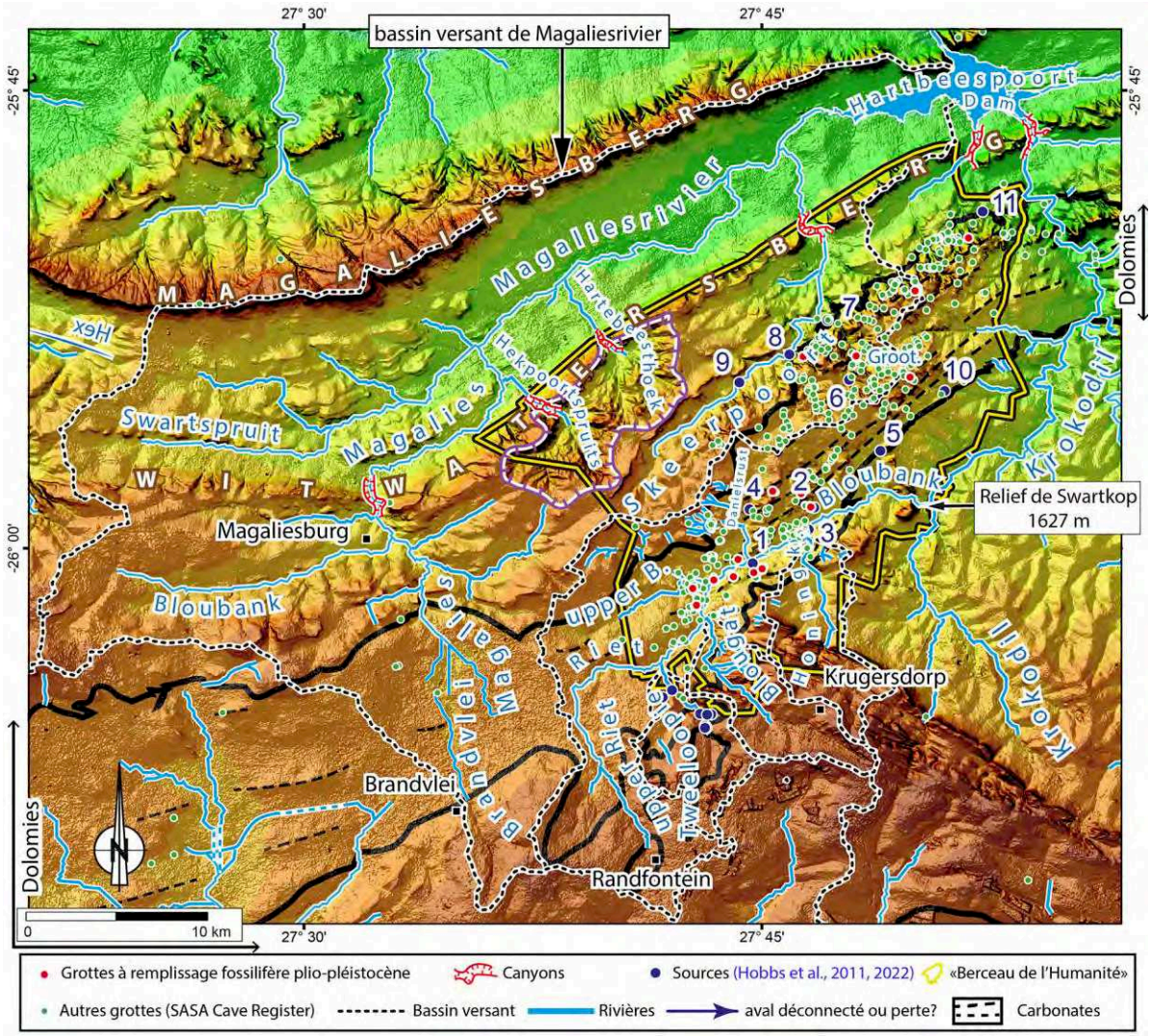


Figure 1157 Bassins versants hydrographiques du Cradle of Humankind.

Noms des sources (Hobbs et al., 2011, 2022) 1 : Zwartkrans, 2 : Plover's lake, 3 : Kromdraai, 4 : Danielrust, 5 : Aquamine, 6 : Tweefontein, 7 : Nouklip, 8 : Nash, 9 : Uitkomst, 10 : Cradle, 11 : Broederstroom.

Notons la distinction de différentes formations dans les dolomies de Malmani, notamment dans le Westrand.

10.1.3.8. A1 Carte des anomalies hydrologiques du Cradle of Humankind

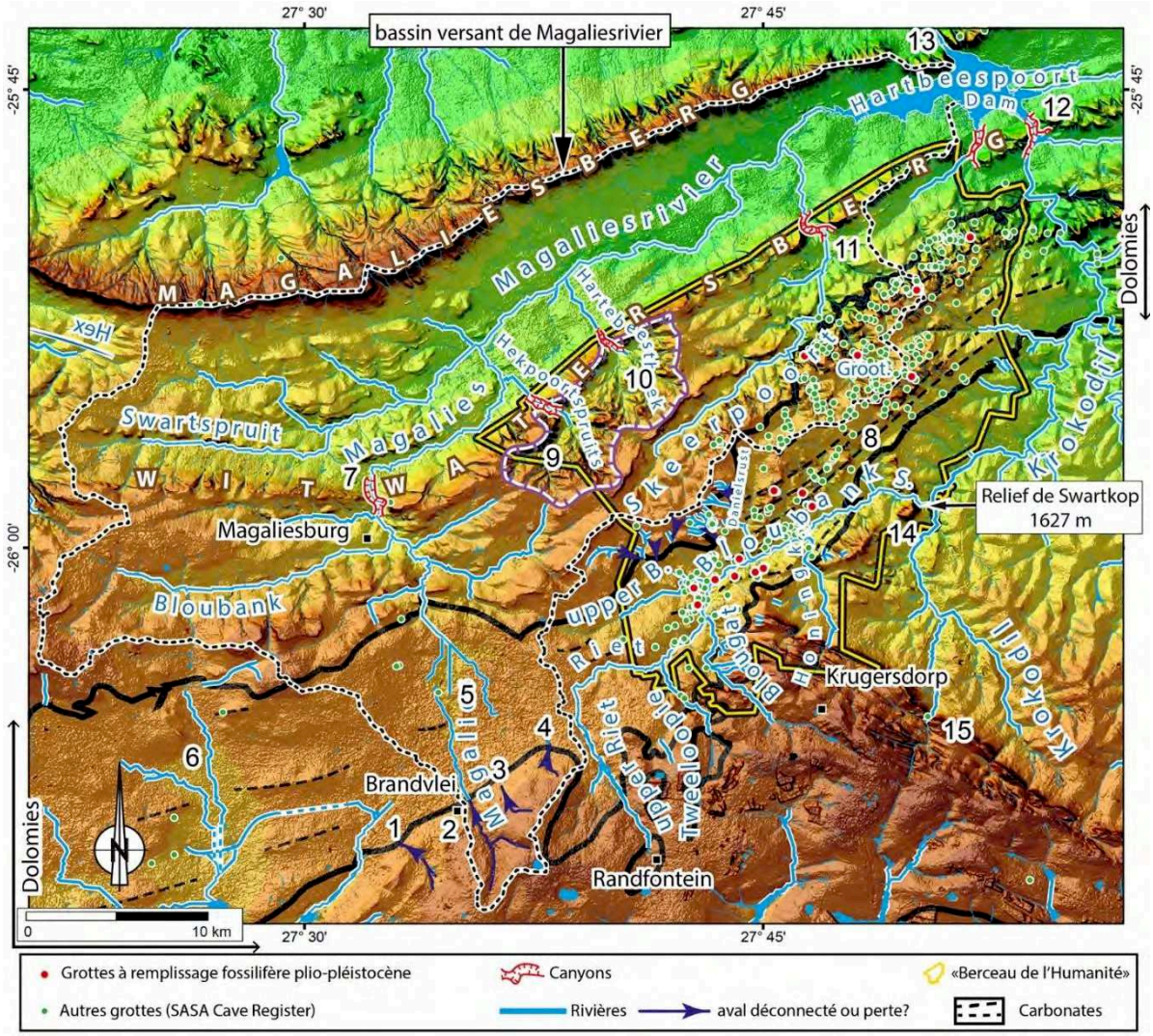


Figure 1158 Particularités géomorphologiques ou karstologiques du Cradle of Humankind *(contour jaune).*

Les numéros font référence aux particularités géomorphologiques que nous avons présenté avant.

10.1.3.9. A1 Carte des bassins-versants hydrographiques du Cradle of Humankind et lithologie

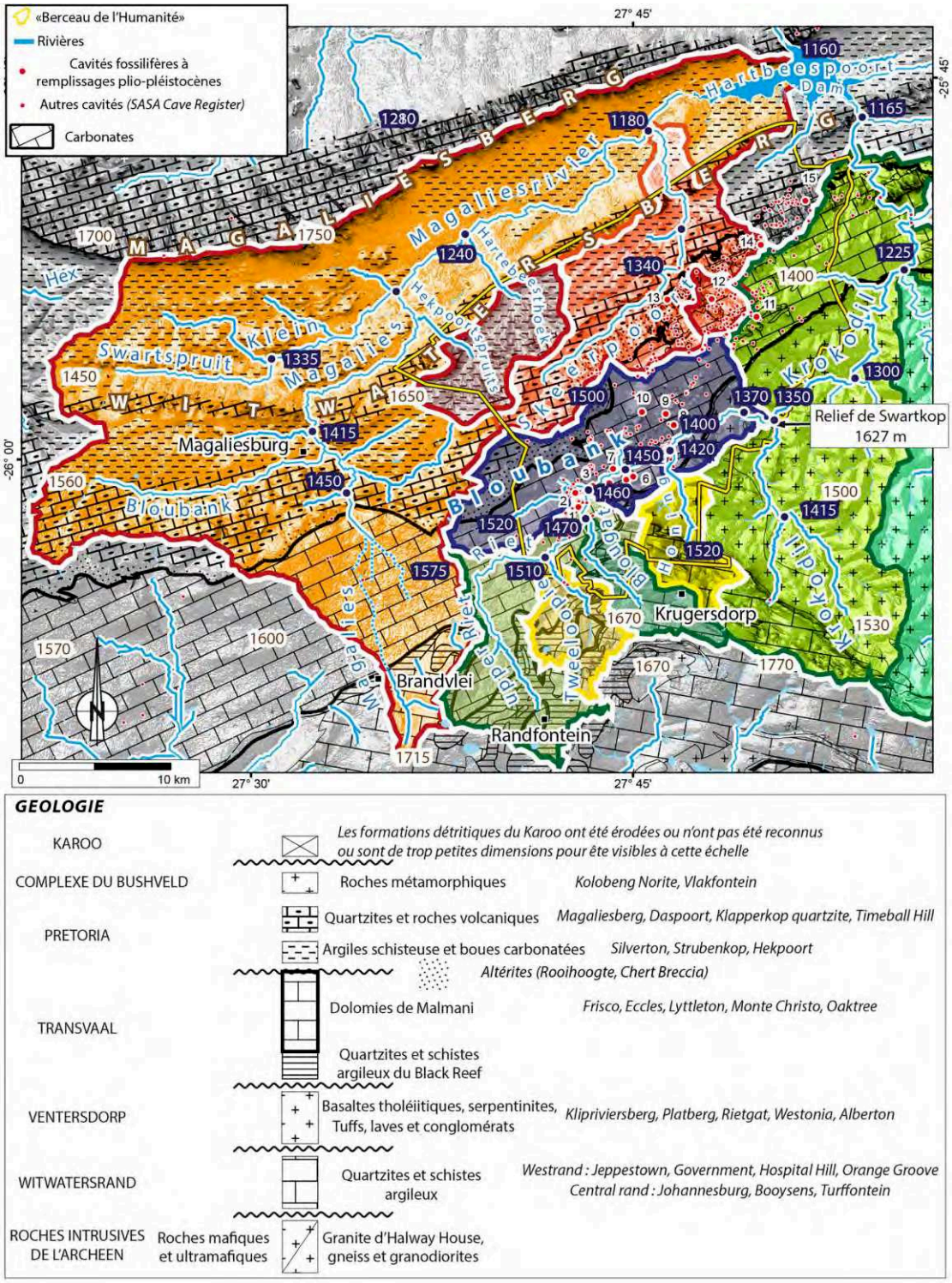


Figure 1159 Bassins versants hydrologiques du Cradle of Humankind *et lithologies.*

10.1.3.10. A1 Carte hydrologique du Cradle of Humankind et optimisation des reliefs (Méthode RRIM)

Optimisation de la visualisation des reliefs du Cradle of Humankind avec la Méthode RRIM (Chiba *et al.*, 2008 ; Yokoyama *et al.*, 2002), décrit dans le 1 (p.76).

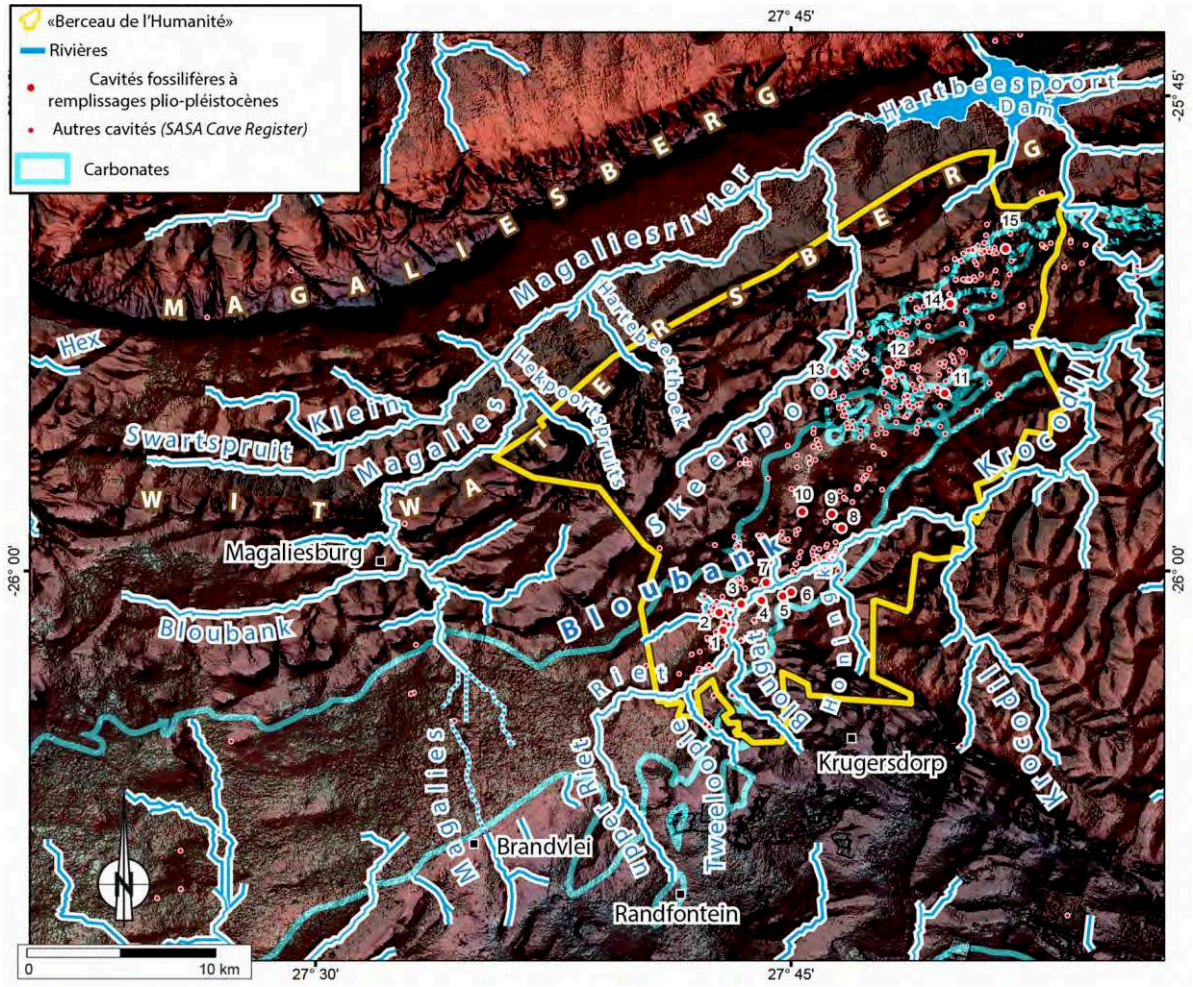


Figure 1160 Carte hydrologique du Cradle of Humankind.

10.1.3.11. A1 Carte morphokarstique du Cradle of Humankind

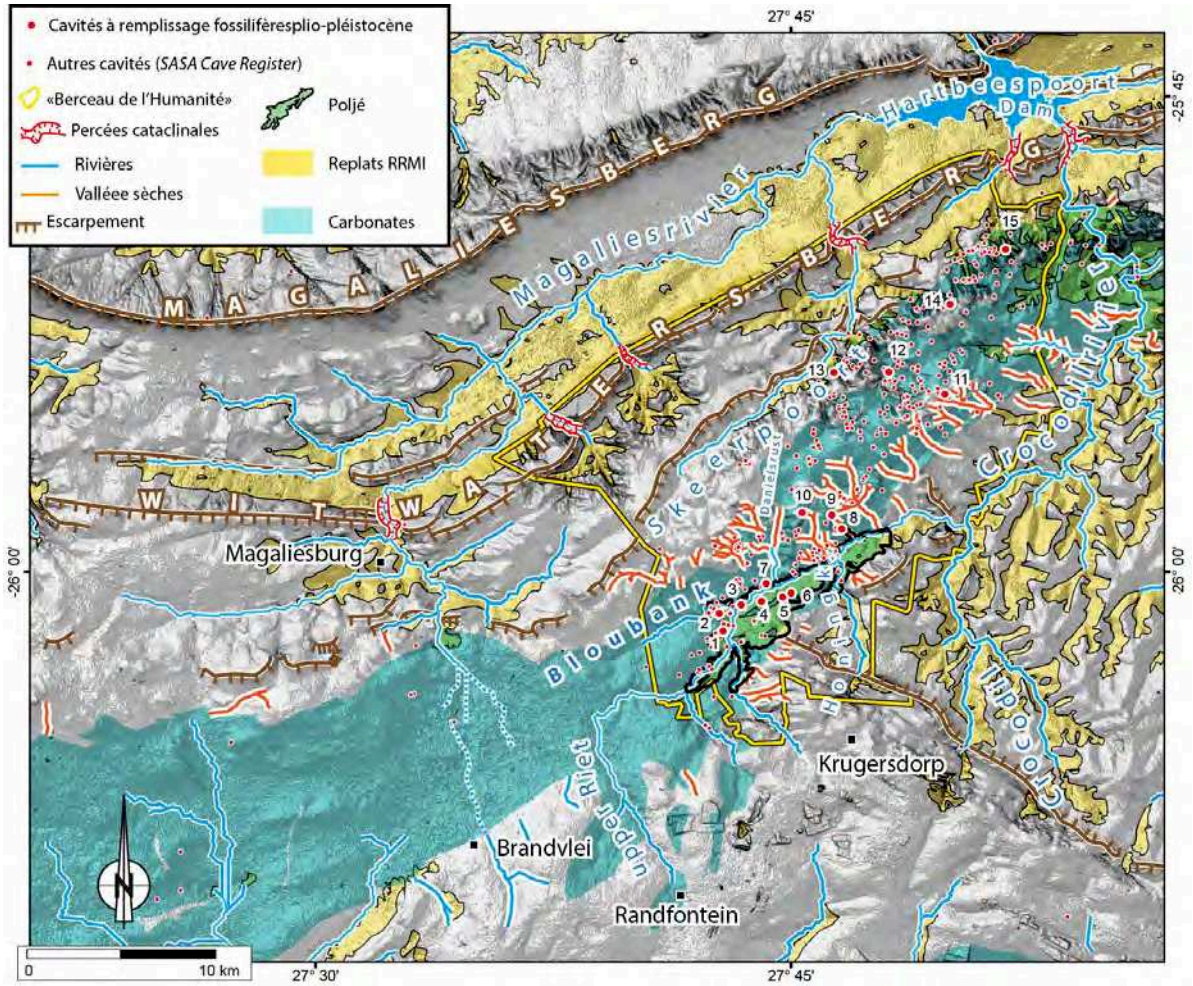


Figure 1161 Carte morphokarstique du Cradle of Humankind.

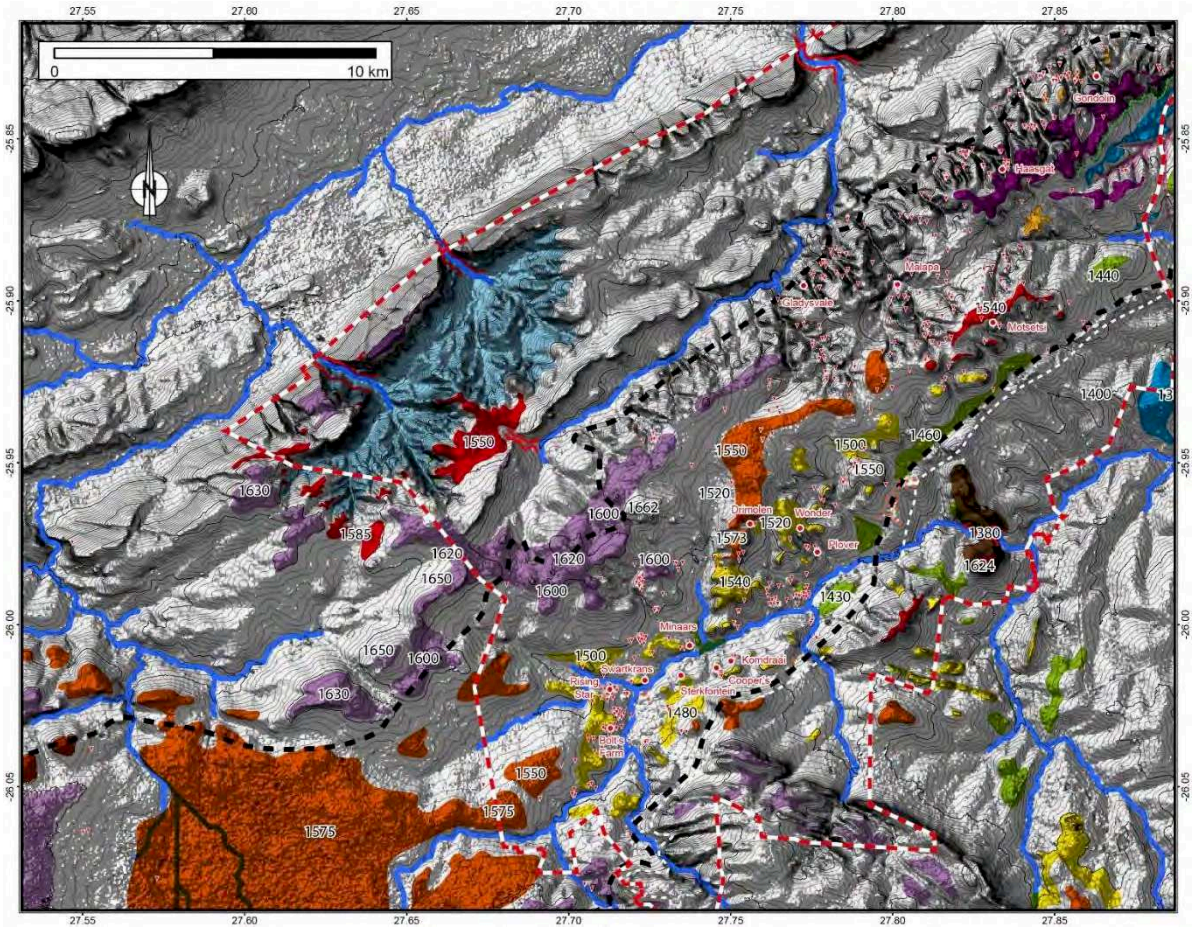


Figure 1162 Analyse des surfaces dans le Cradle of Humankind.

10.1.4. Atlas cartographique n°2

10.1.4.1. A2 Géologie

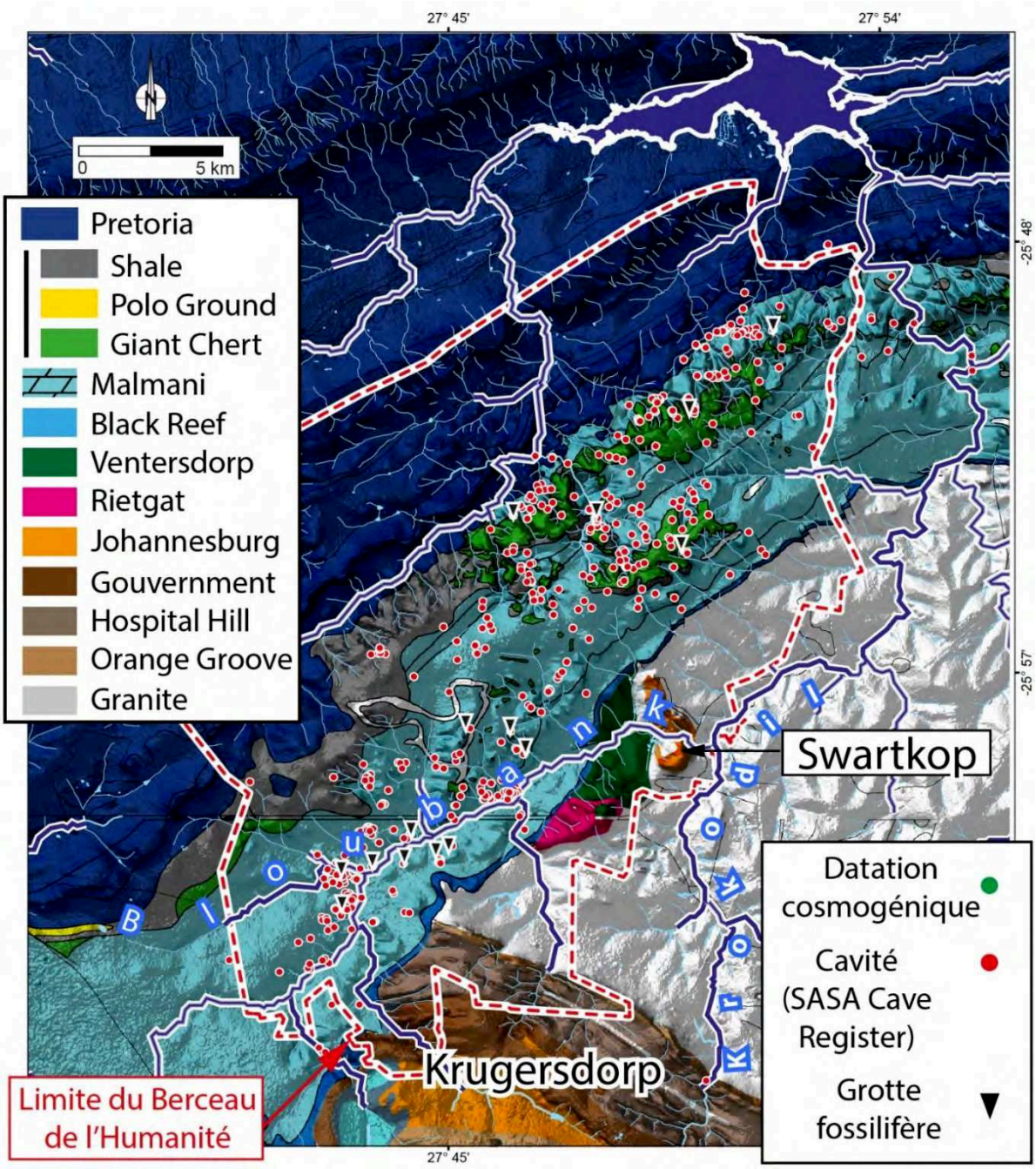


Figure 1163 Carte géologique du Cradle of Humankind *montrant le lien entre les lithologies en roche dure et les surfaces élevées de la carte précédente.*

Le massif de Krugersdorp est constitué des quartzites de Hospital Hill, Gouvernent et Johannesburg series. Le relief de Swartkop est constitué des quartzites d'Orange Groove. Ces reliefs sont visibles sur les panoramas analysés (Figure 206 et Figure 210).

10.1.4.2. A2 Hypsométrie par classe d'altitude

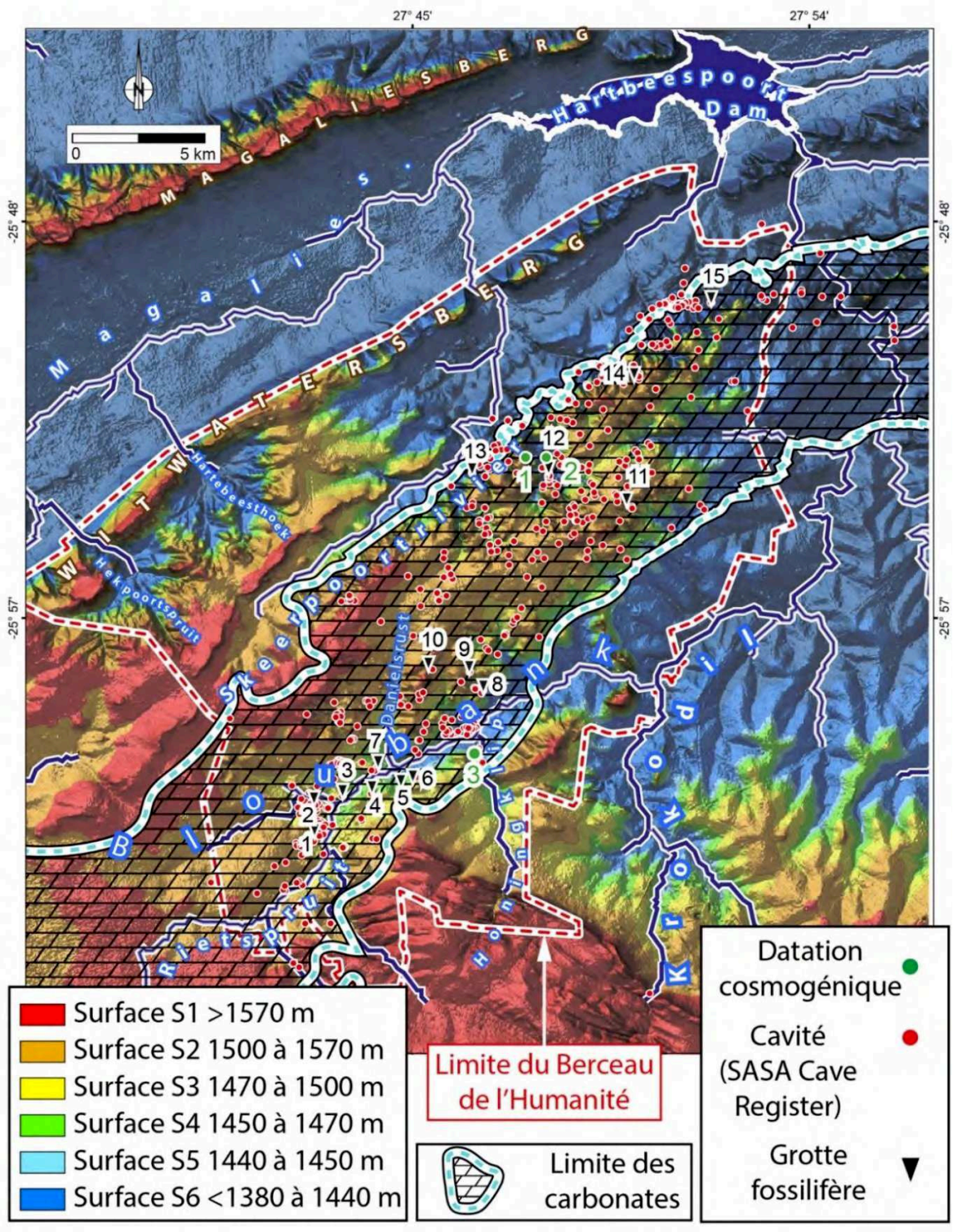


Figure 1164 Hypsométrie du Cradle of Humankind et localisation des cavités.

Les cavités sont majoritairement situées dans les dolomies. Le *Cradle of Humankind* est délimité en rouge. Les principales rivières sont la Bloubank, la Magalies, la Skeerpoort et la Krokodil qui alimentent le lac du barrage d'Hartbeespoort, à 1165 m d'altitude. Version géologique Figure 1163

10.1.5. Atlas cartographique n°3 du bassin versant de la Bloubank en amont du Swartkop

10.1.5.1. A3 Carte des bassins versants en amont de Swartkop et lithologie

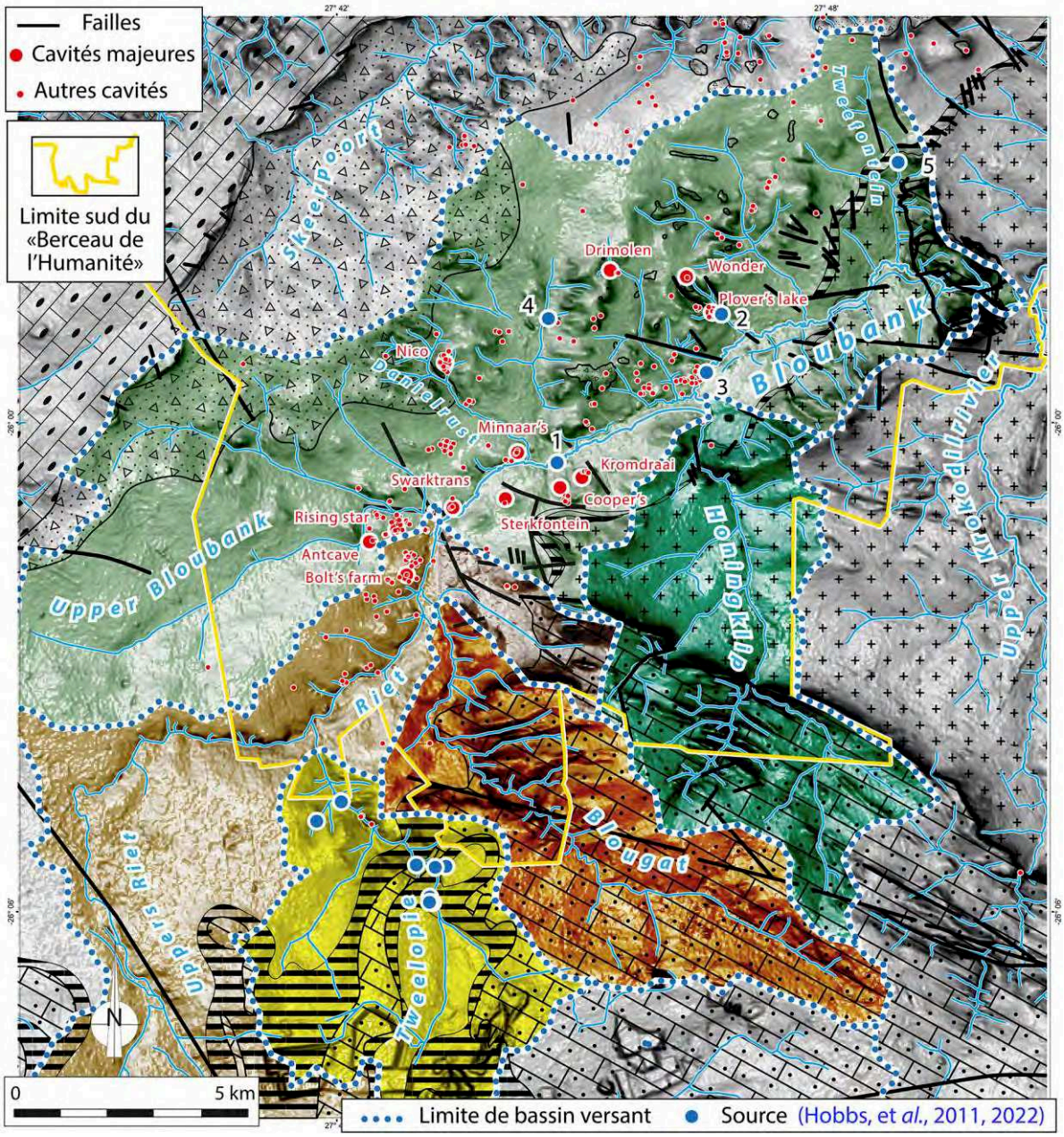


Figure 1165 Carte des bassins versants en amont de Swartkop qui impactent les cavités de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai et rappel de la lithologie.

Légende des lithologies sur la carte suivante ou bien sur la Figure 1156 (p.1179). Les dolomies n'ont pas été représentées en trame.

10.1.5.2. A3 Carte géologique des roches intrusives du bassin versant de la Bloubank en amont du Swartkop

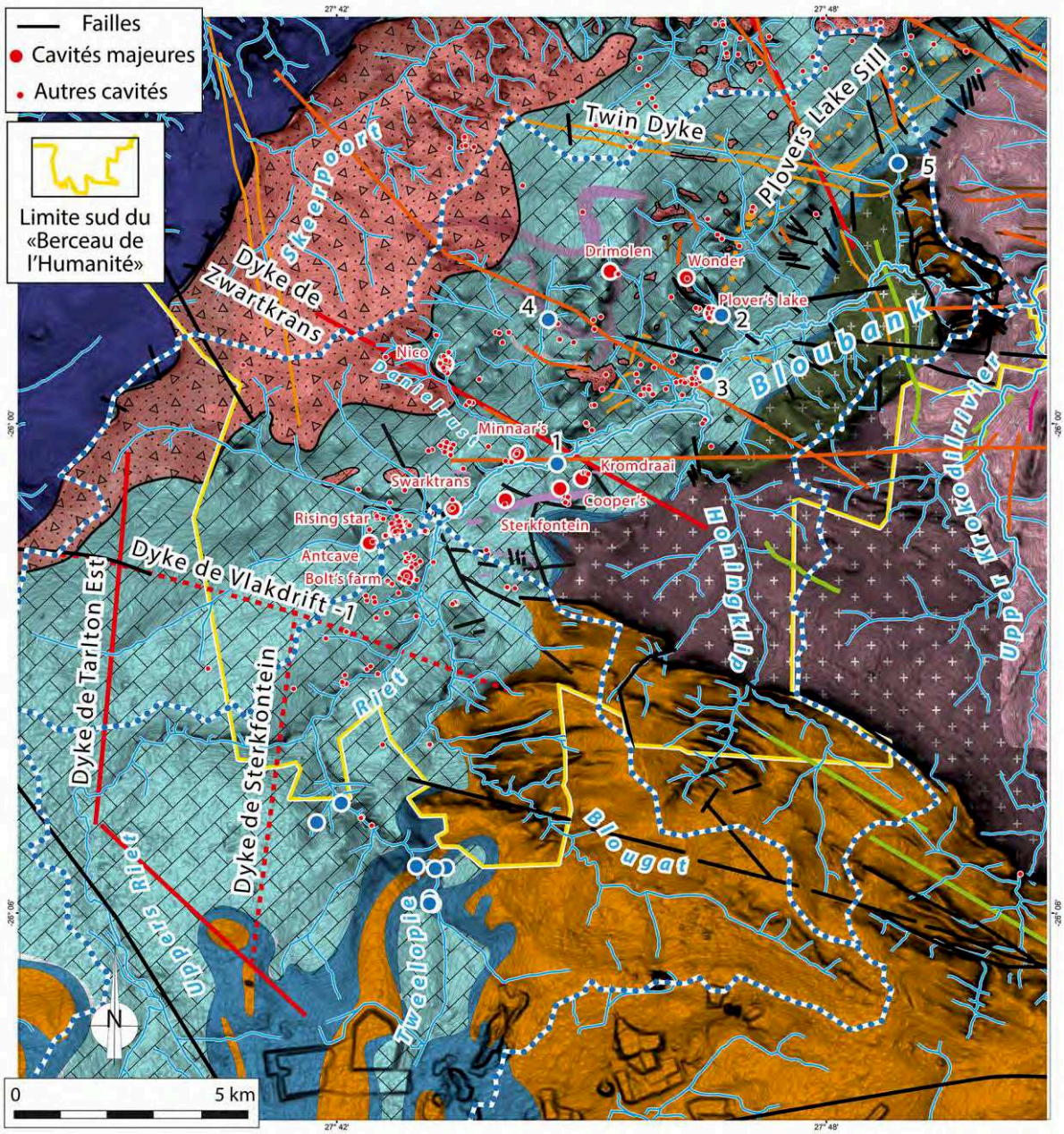


Figure 1166 Carte géologique des roches intrusives du bassin versant de la Bloubank en amont du Swartkop.

En jaune, on a cartographié les limites du Cradle of Humankind et en bleu, la limite du bassin versant de la Bloubank, à partir du knickpoint de Swartkop, avant la confluence avec la Krokodilrivier.

Les sources ont été indiquées (Hobbs et al., 2011). Noms des sources 1 : Zwartkrans, 2 : Plover's lake, 3 : Kromdraai, 4 : Danielrust, 5 : Aquamine.

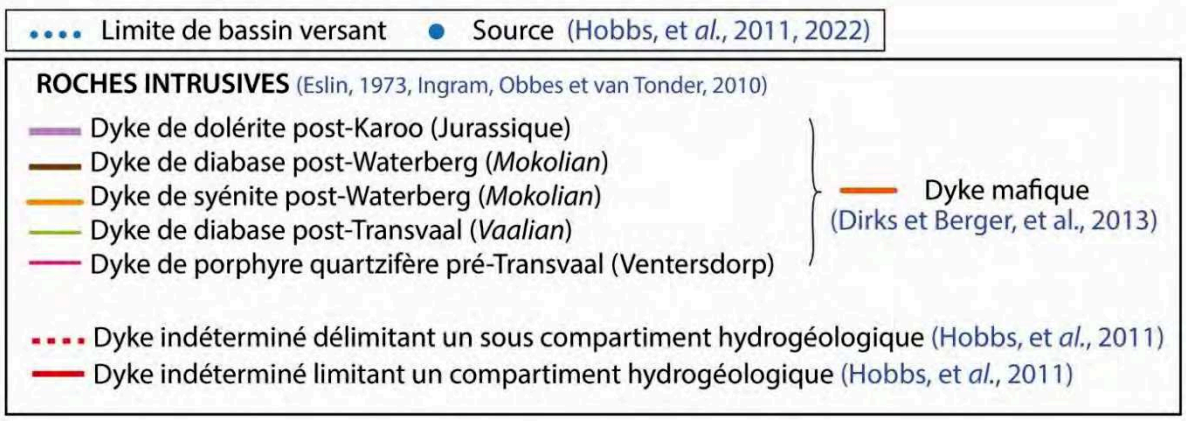


Figure 1167 Légende de la figure précédente : typologie des dykes des roches intrusives paléoprotérozoïques ou jurassiques.

10.1.5.3. A3 Carte géologique des formations des dolomies de Malmani (au nord) et sans les roches intrusives - du bassin versant de la Bloubank en amont du Swartkop

La cartographie des formations qui constituent les dolomies de Malmani n'a pas été faite par le *Council of Geoscience* en amont Kromdraai. Nous l'avons indiqué plus haut.

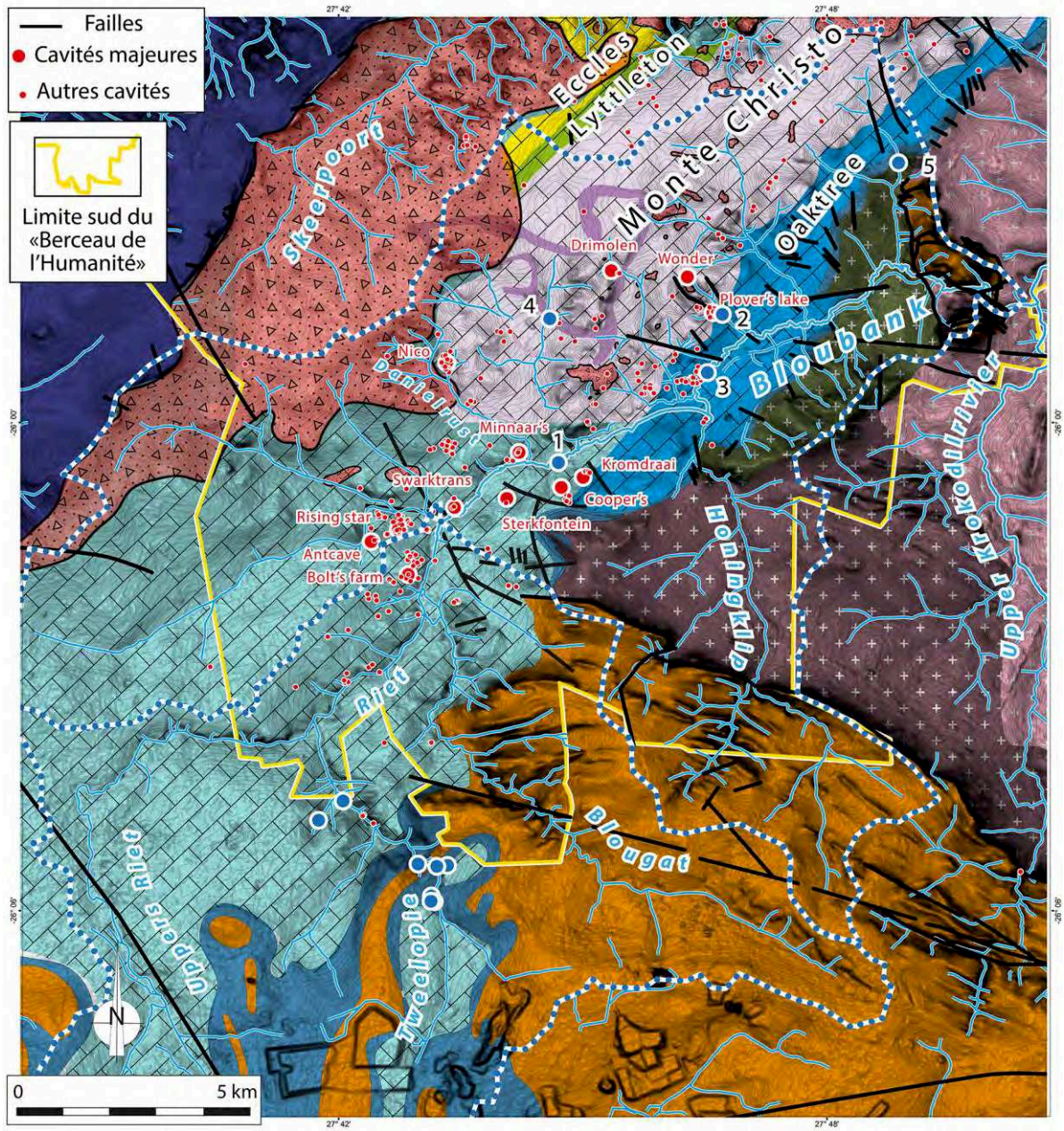


Figure 1168 Carte géologique distinguant les formations Oaktree, Monte-Christo, Lyttelton, Eccles (légende Figure 1154 p.1177).

Cette distinction des dolomies de Malmani n'est proposée qu'au nord du bassin versant de la Bloubank en amont du Swartkop (cartes géologiques 2626).

En jaune, sont cartographiées les limites du *Cradle of Humankind* et en bleu, la limite du bassin versant de la Bloubank, à partir du knickpoint de Swartkop, avant la confluence avec la Krokodilrivier. Le dyke de Danielrust est le seul dyke indiqué sur cette carte.
Les sources ont été indiquées (Hobbs et al., 2011). Noms des sources 1 : Zwartkrans, 2 : Plover's lake, 3 : Kromdraai, 4 : Danielrust, 5 : Aquamine.

10.1.5.4. A3 Carte des compartiments hydrogéologiques du bassin versant de la Bloubank en amont du Swartkop, et la lithologie

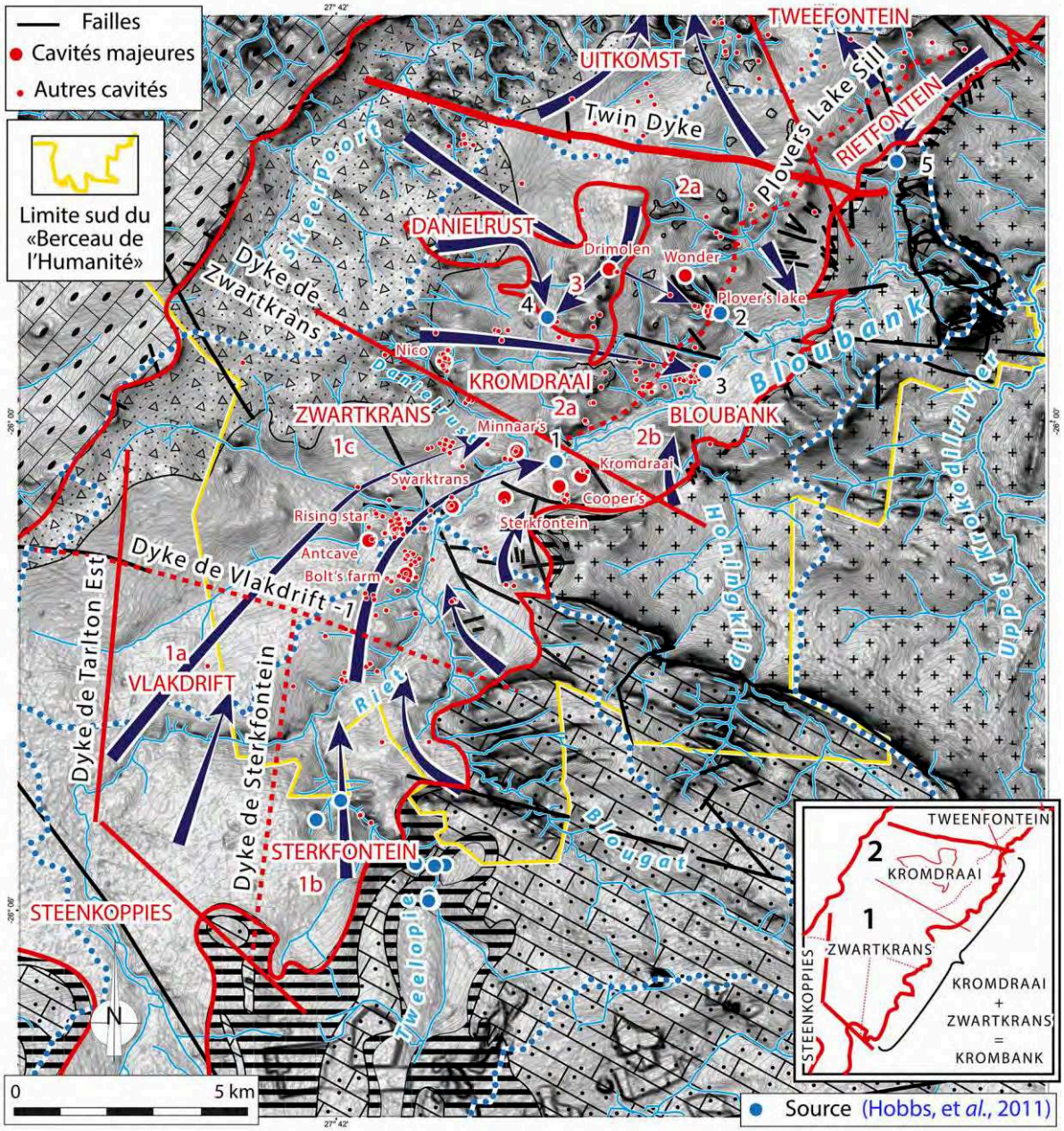


Figure 1169 Carte des compartiments hydrogéologiques du bassin versant de la Bloubank (d'après Hobbs, et al., 2011) et lithologie.

Les sources ont été indiquées (Hobbs et al., 2011). Noms des sources 1 : Zwartkrans, 2 : Plover's lake, 3 : Kromdraai, 4 : Danielrust, 5 : Aquamine.

10.1.5.5. A3 Carte hypsométrique, limites des compartiments hydrogéologiques (et lithologie) du bassin versant de la Bloubank en amont du Swartkop

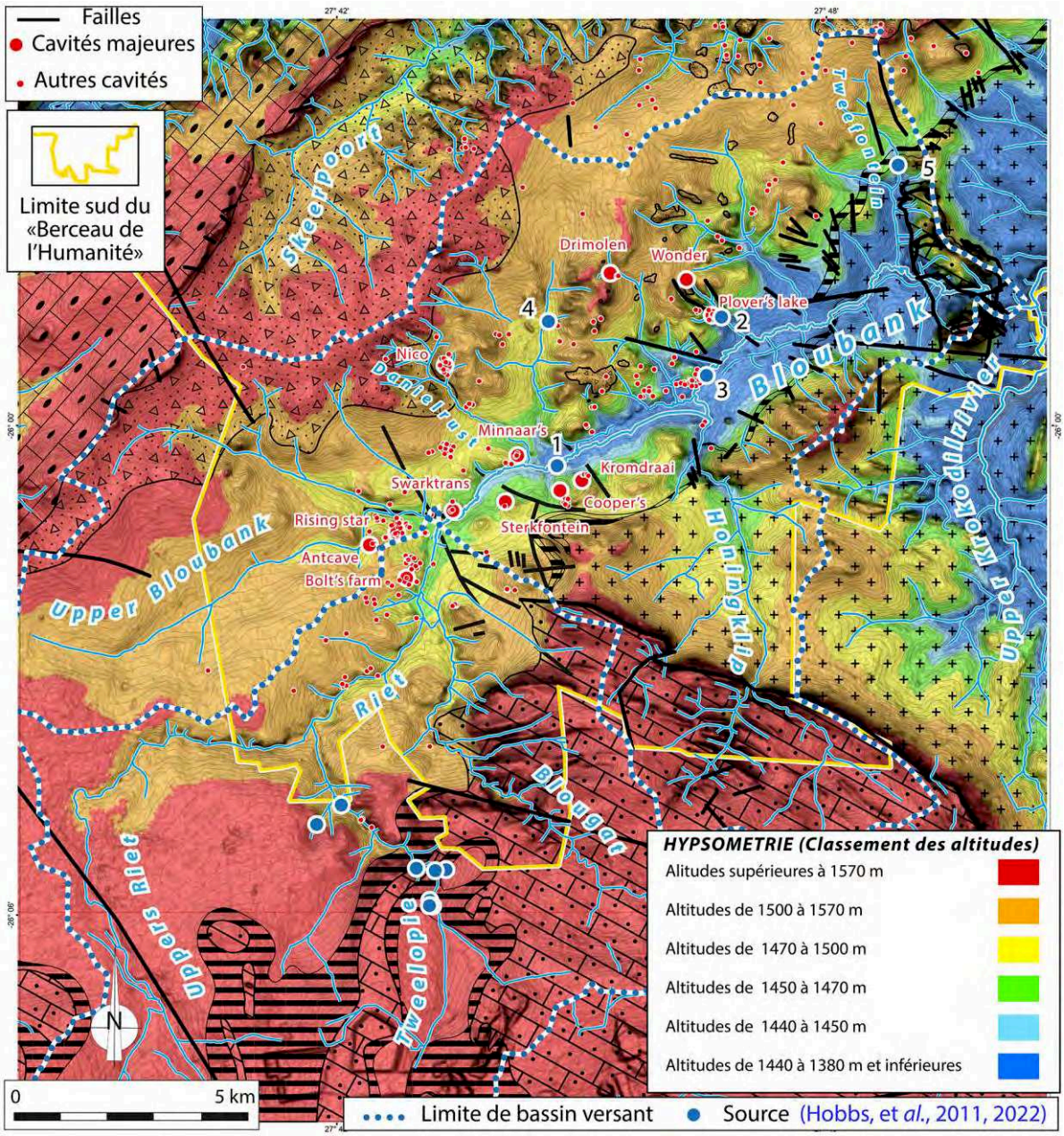


Figure 1170 Carte hypsométrique (par classe d'altitude) du bassin versant de la Bloubank et lithologie.

Les sources ont été indiquées (Hobbs et al., 2011). Noms des sources 1 : Zwartkrans, 2 : Plover's lake, 3 : Kromdraai, 4 : Danielrust, 5 : Aquamine.

10.1.5.6. A3 Carte morphokarstique du bassin versant de la Bloubank en amont du Swartkop et lithologie

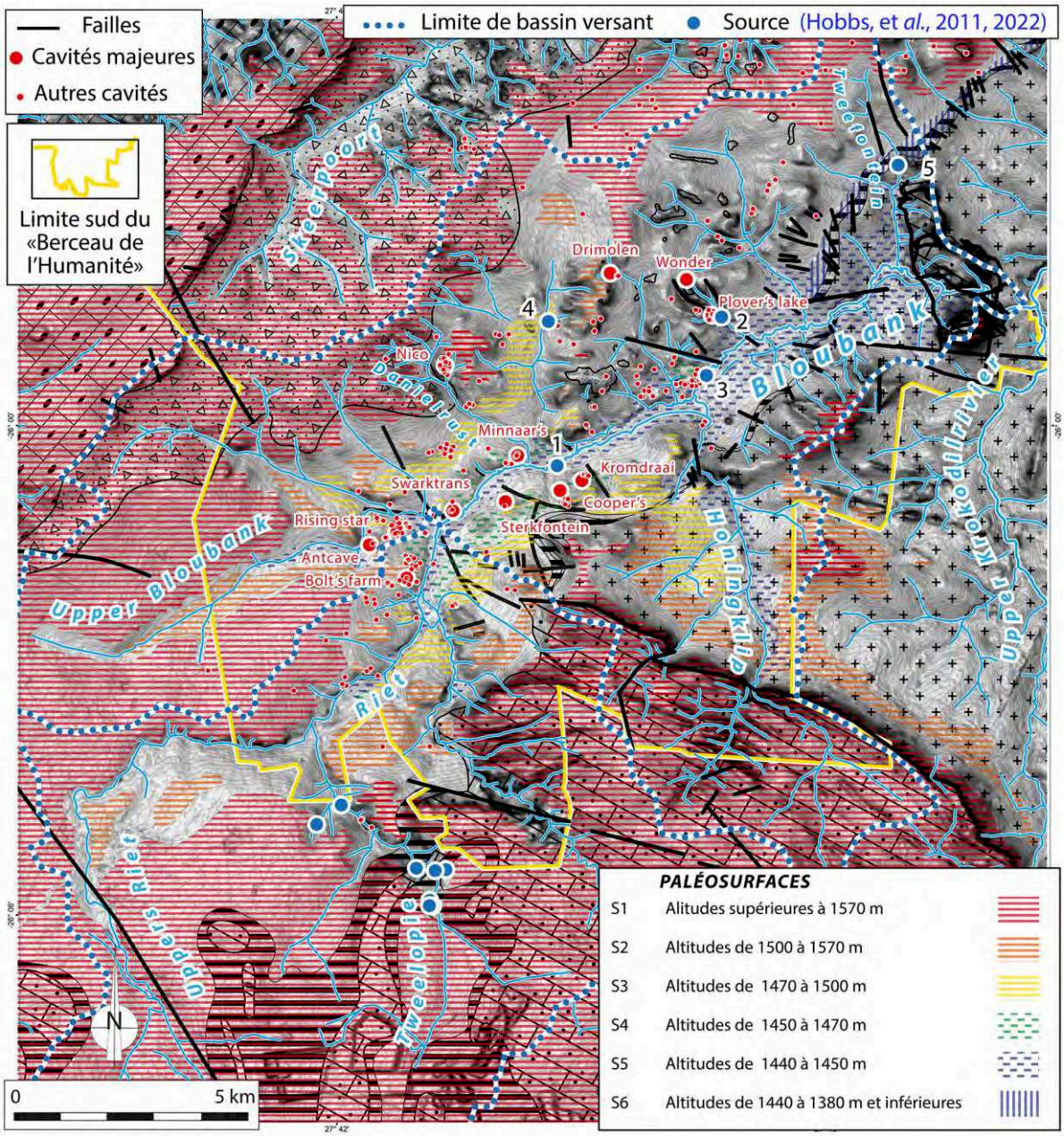


Figure 1171 Carte morphokarstique du bassin versant de la Bloubank et lithologie.

Noms des sources (Hobbs et al., 2011) :
1 : Zwartkrans, 2 : Plover's lake, 3 : Kromdraai, 4 : Danielrust, 5 : Aquamine.

10.1.6. Atlas cartographique n°4 de la Bloubank en amont de la confluence avec la Honingklip

Ces trois cartes, constituant l'atlas cartographique n°4, montrent les cavités de la Bloubank en amont de la confluence avec la Honingklip.



10.1.6.1. A4 Carte topographique (source NGI) du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai

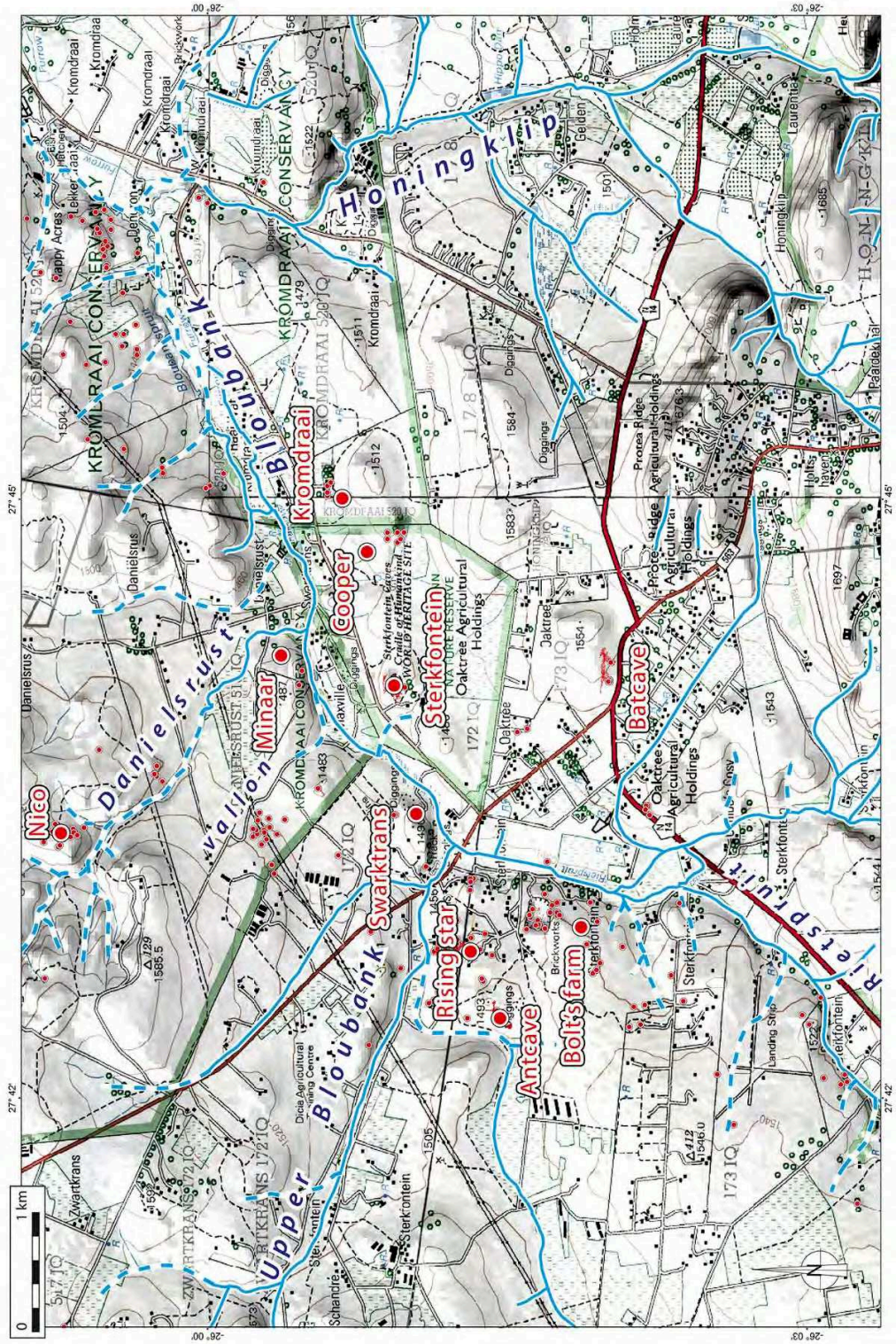


Figure 1172 Localisation des gisements et paléokarsts fossilifères (cercles rouges) de la vallée de la Bloubank du Cradle of Humankind.

Extrait de la carte topographique au 1/25 000

10.1.6.2. A4 Carte satellite du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai

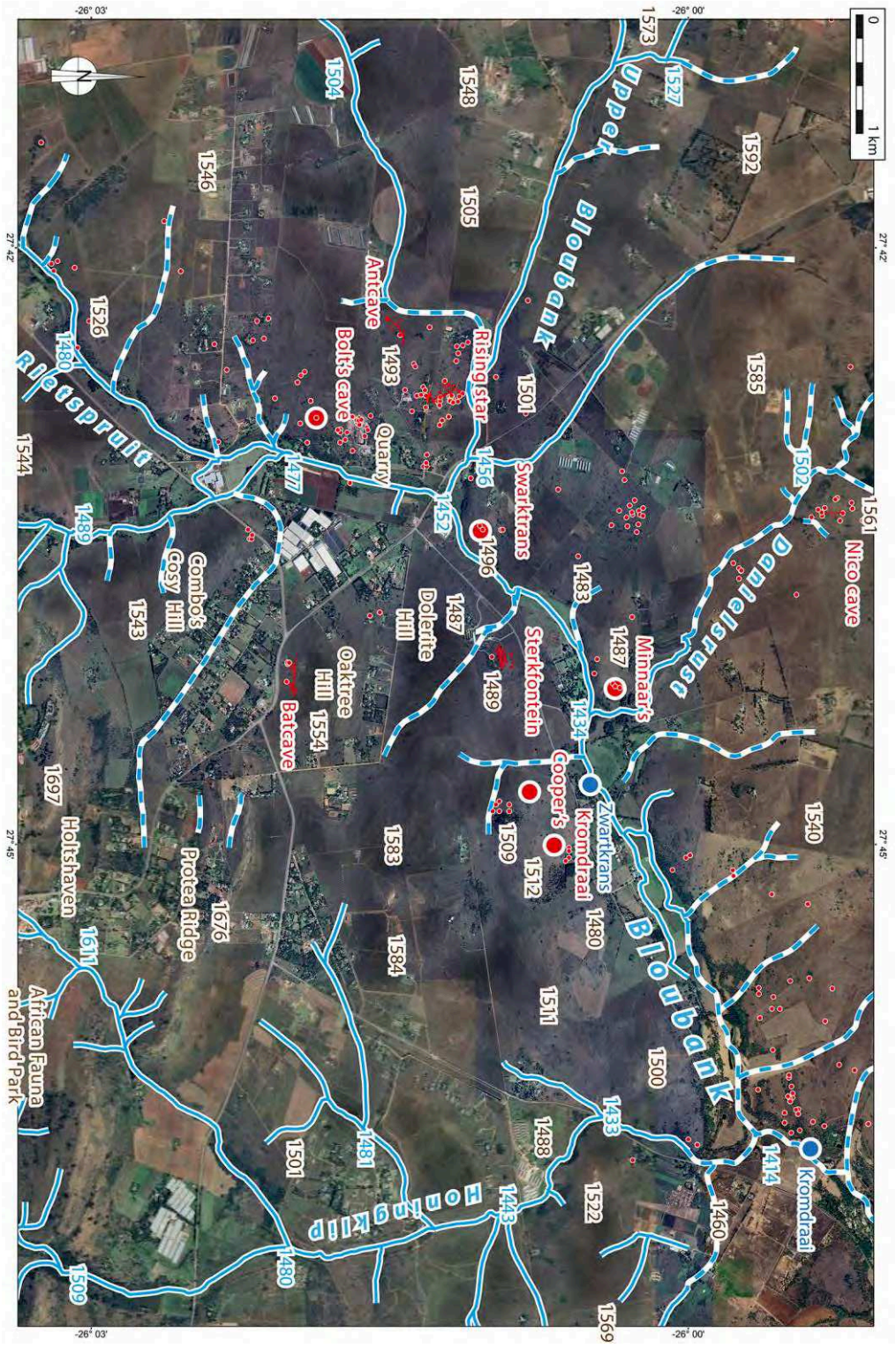


Figure 1173 Carte satellite (Google Maps) du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai.

10.1.6.3. A4 Carte hypsométrique (teinte) du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai



Figure 1174 Carte hypsométrique de localisation des sites archéologiques et des cavités fossilifères de la vallée de la Bloubank.

10.1.6.4. A4 Réalisation de la carte géologique du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai

Pour construire la carte (Figure 1176) de la page suivante, nous avons compilées plusieurs cartes :

- Carte du secteur de Sterkfontein de la thèse de Wilkinson, au 1/10 000 (1973) ;
- Carte du relief de Swartkop, au 1/10 000, par Roering (1984), modifiée par Stanistreet et Mc Cathy (1990) et publiée par Ingram et Van Tonder (2011, Fig.15, p.36) ;
- Hekpoort 2527DC au 1/50 000 (1973) ;
- Broederstroom 2527DD 1/50 000 (2011) ;
- West Rand 2626 1/250 000 (1986).

Pour compiler ces cartes, nous avons dû les géoréférencer (cf. Fiche méthodologique n°15 : Géoréférencer des images raster de cartes géologiques dans ARCMAP (ARCGIS™).1137).

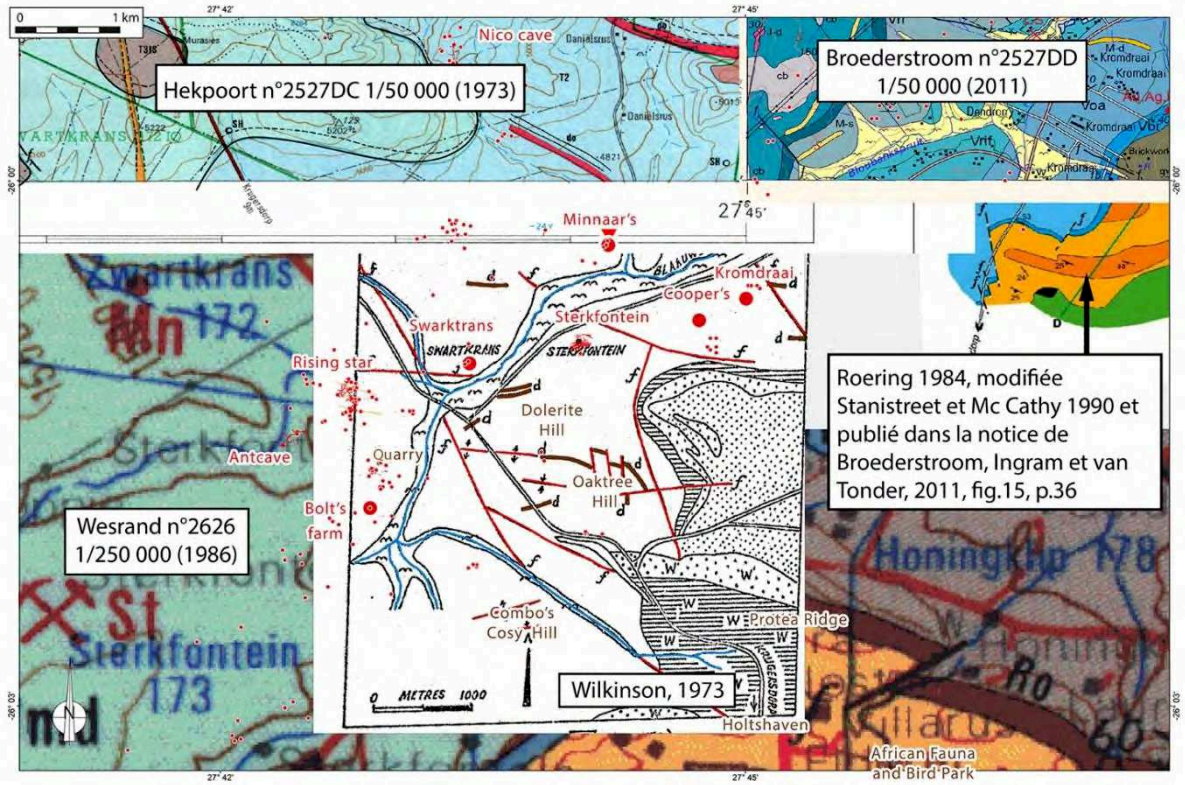


Figure 1175 Différentes cartes géologiques ont été compilées pour faire la carte géologique du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai (page suivante).

10.1.6.5. A4 Carte géologique du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai

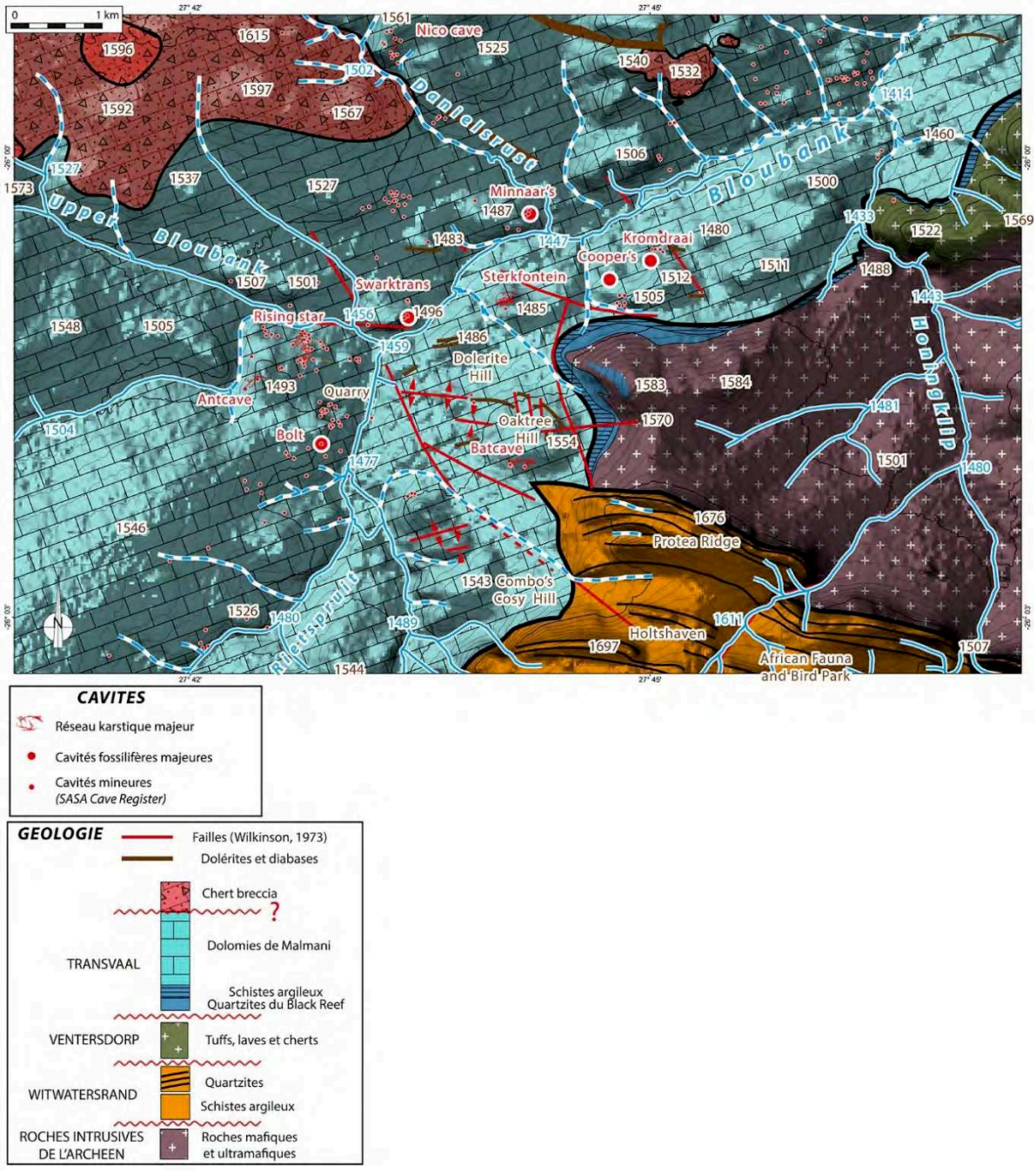


Figure 1176 Géologie de la vallée de la Bloubank et du secteur de Sterkfontein.

10.1.6.6. A4 Carte lithologique et structurale du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai

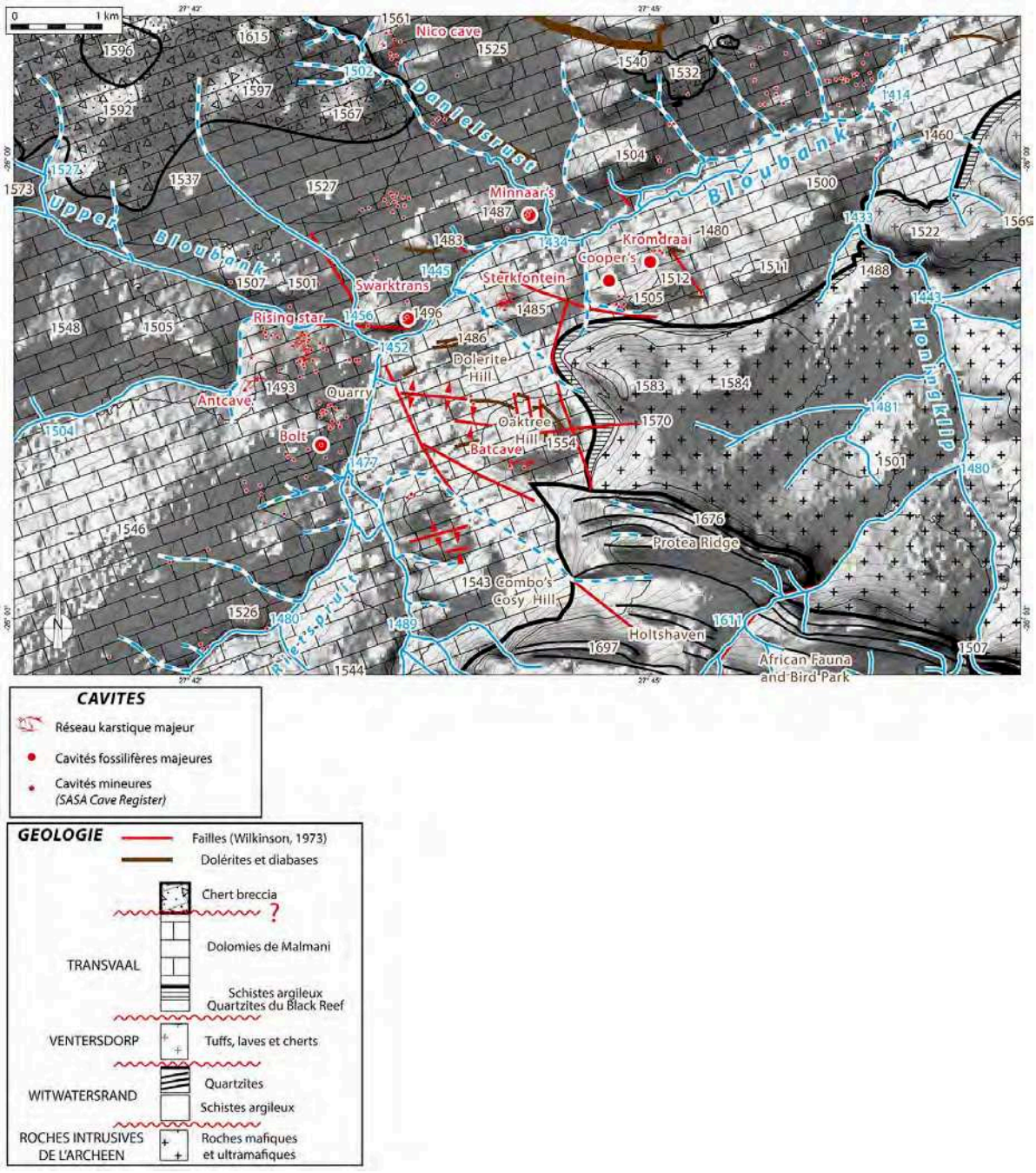


Figure 1177 Lithologie et structurale.

10.1.6.7. A4 Carte hypsométrique et lithologique du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai

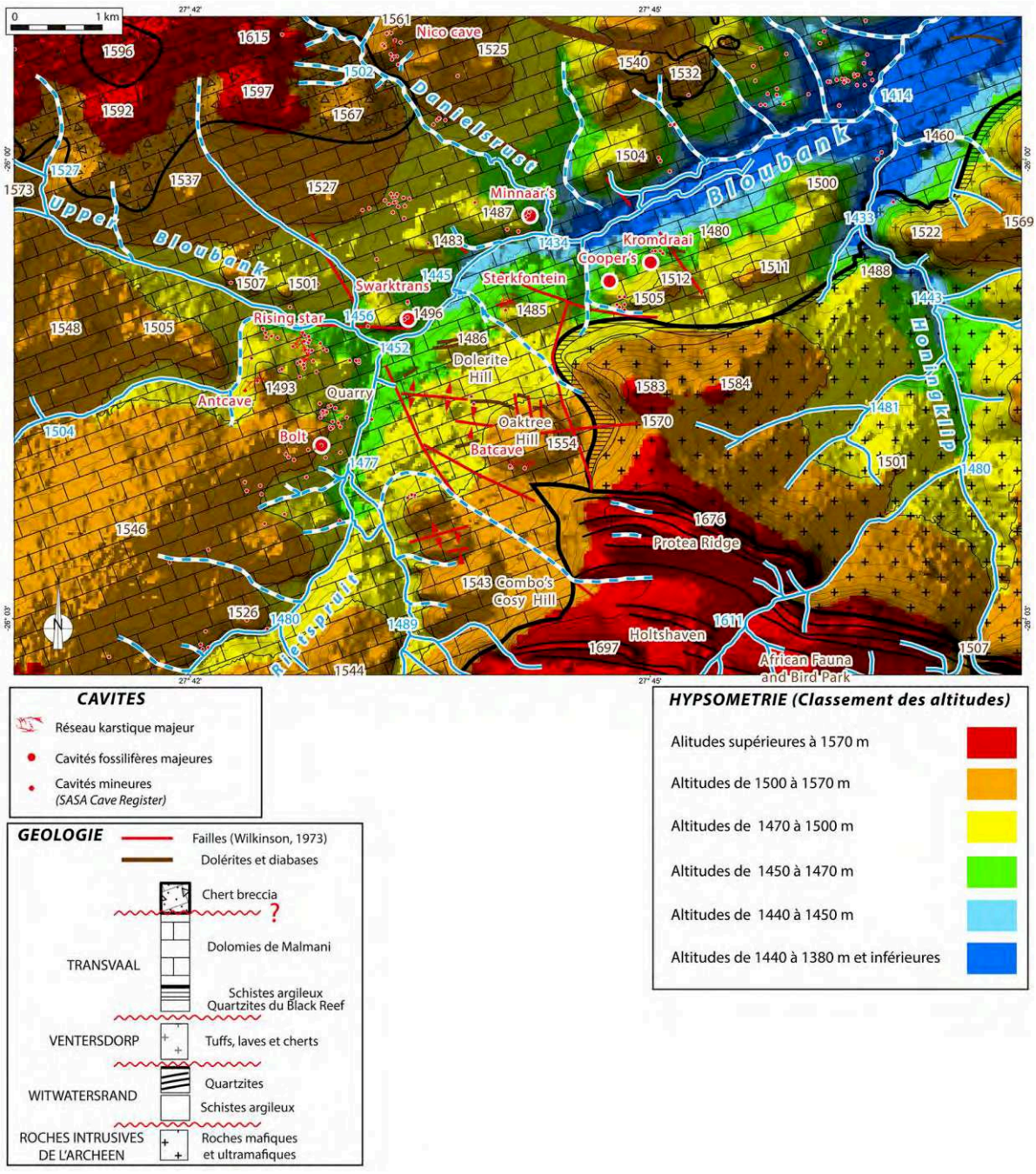


Figure 1178 Carte hypsométrique (par classes d'altitudes) et lithologique du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai.

10.1.6.8. A4 Carte des surfaces morphologiques du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai et lithologie

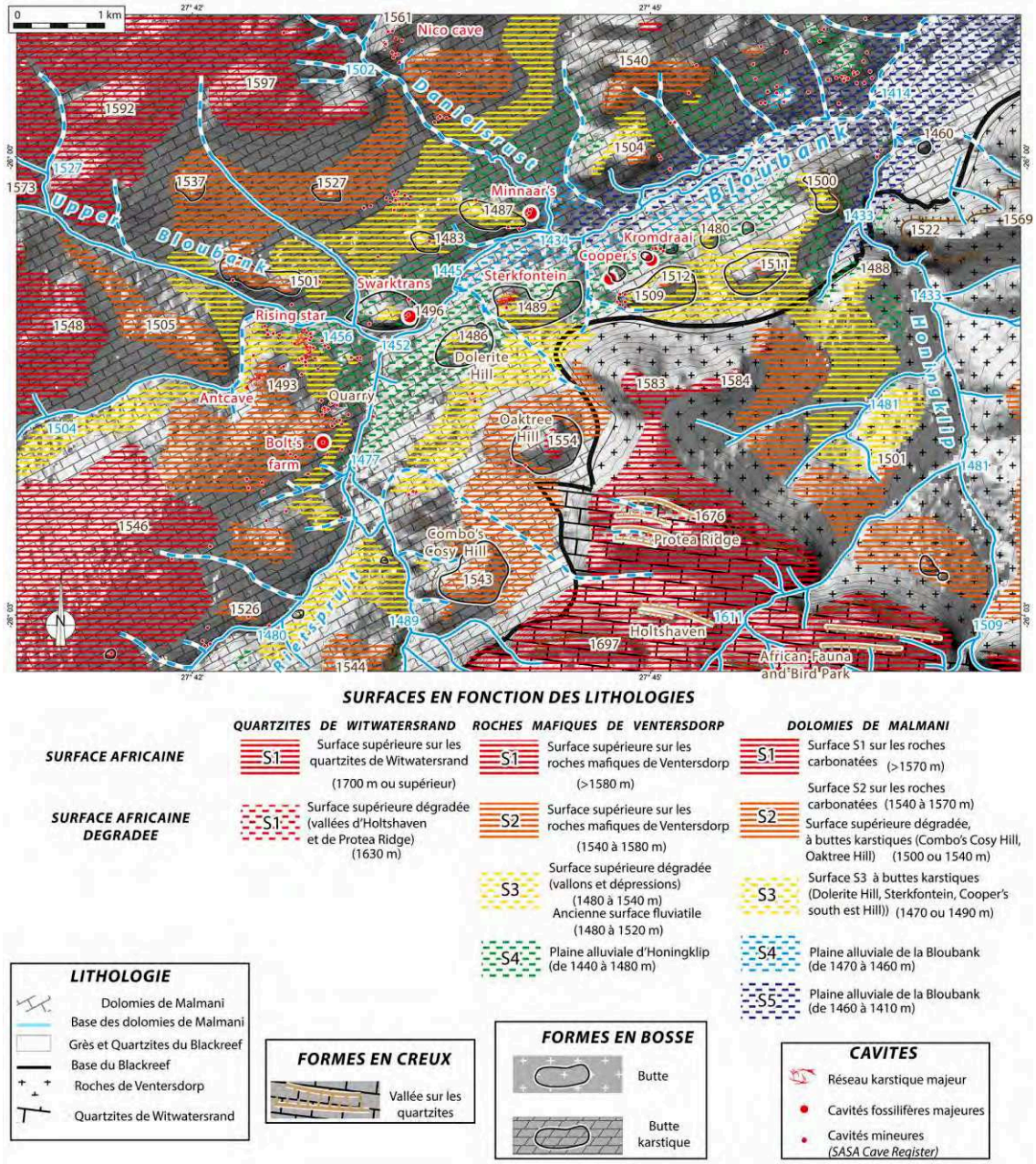


Figure 1179 Carte des surfaces morphologiques du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai et lithologie.

10.1.6.9. A4 Carte des surfaces morphologiques et de l'optimisation de la visualisation des reliefs par la Méthode RRIM appliquée au MNT

Cette méthode (Chiba *et al.*, 2008 et Yokoyama *et al.*, 2002) est décrite dans le Chapitre n°1 et permet de rendre compte des paléo-poljé.

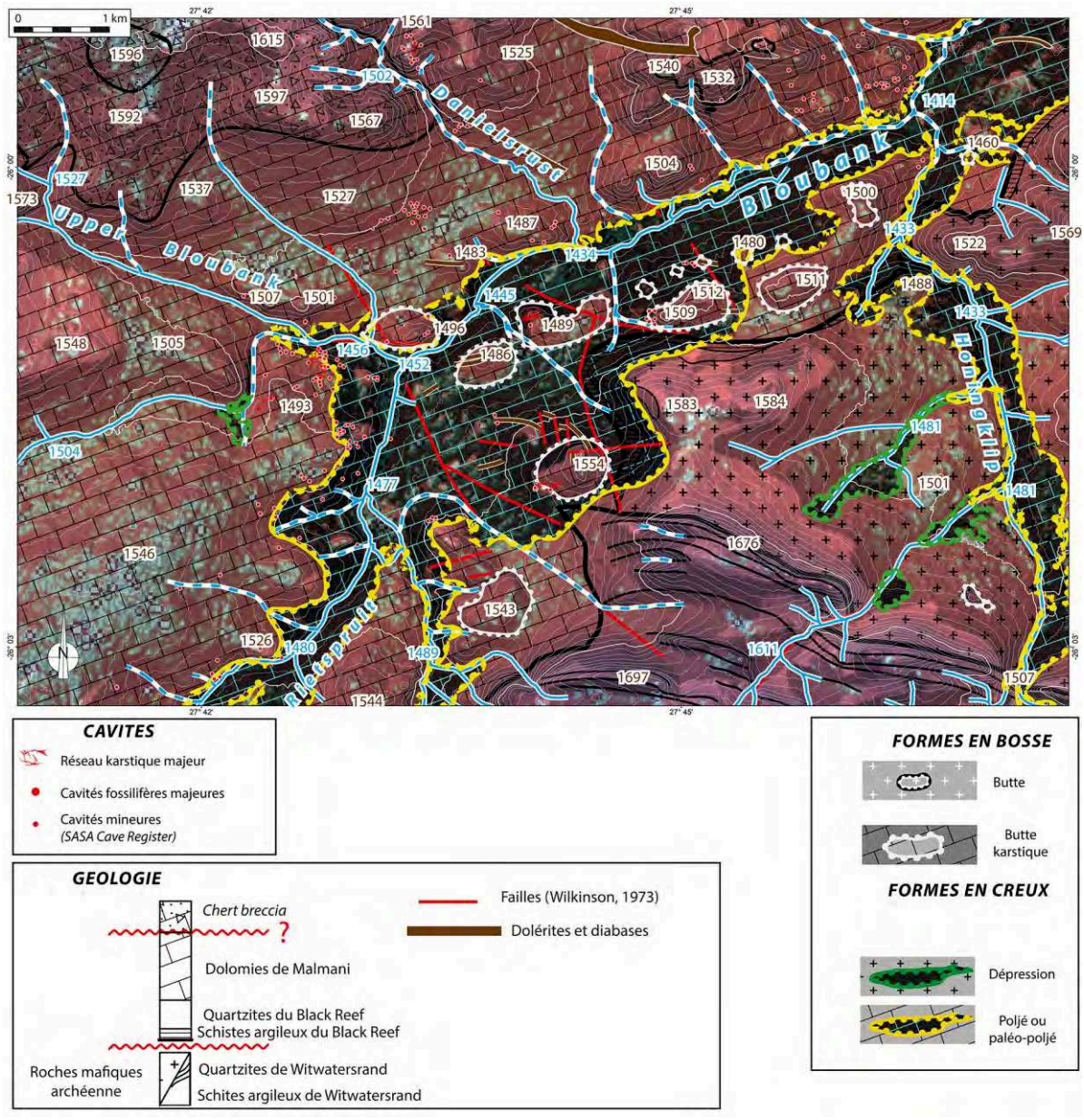


Figure 1180 Méthode RRIM appliquée au Cradle of Humankind.

10.1.7. Atlas cartographique n°5 du secteur des gisements fossilifères de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai

Ces cartes ont été levées durant une mission de trois mois de terrain. Le fond de carte utilisé est le modèle ombré calculé à partir du MNT fourni par Matthew V. CARUANA.

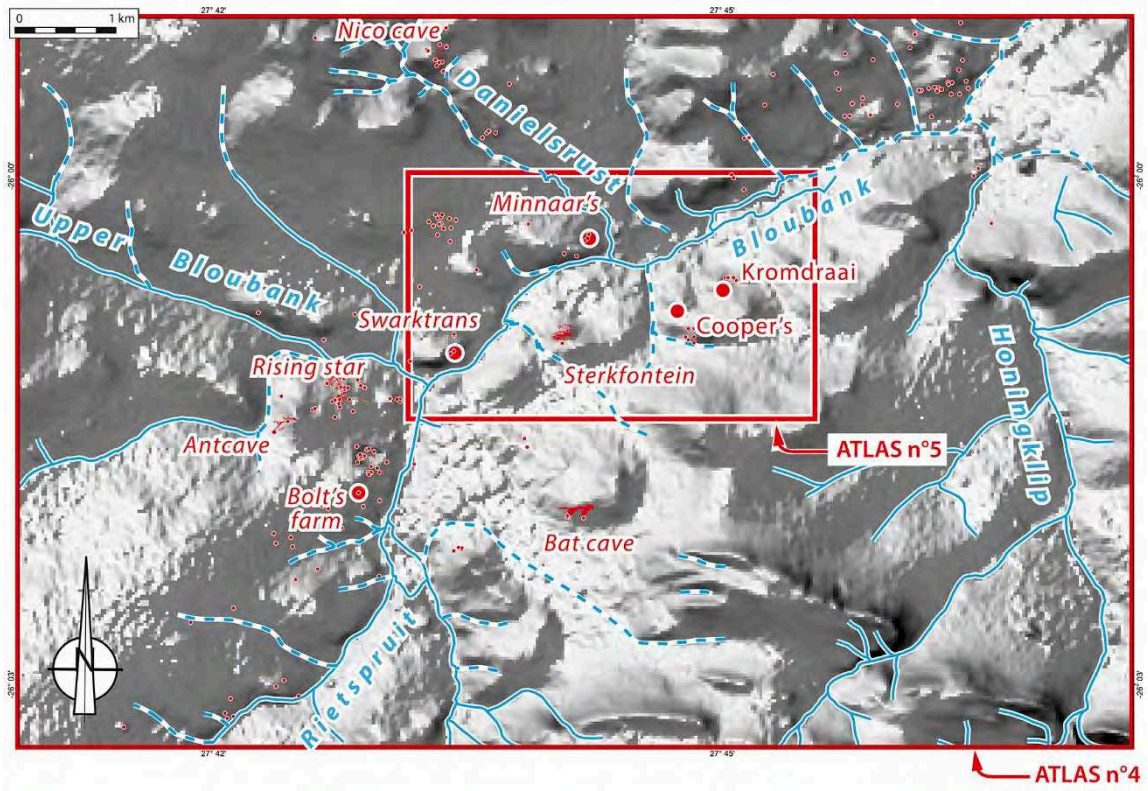


Figure 1181 Localisation des atlas cartographiques n°4 et 5.

10.1.8. Atlas cartographique n°5

Les deux Atlas cartographiques n°5 permettent de localiser les entrées de grottes, les réseaux karstiques et les paléokarsts et de les positionner par rapport à l'image satellite et aux paléosurfaces

10.1.8.1. A5 Carte satellite (Google Maps) du secteur des gisements fossilifères de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai

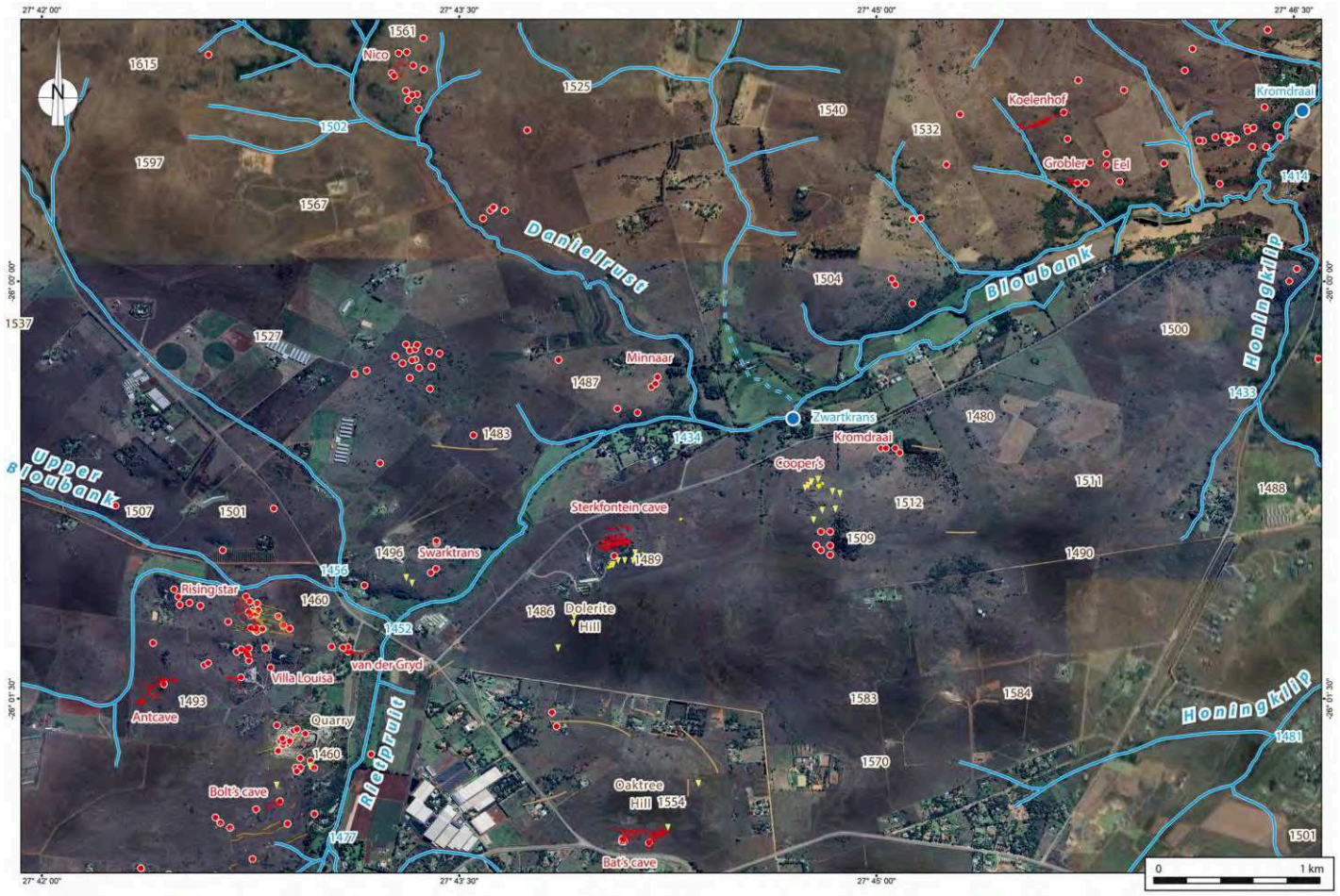


Figure 1182 Carte satellite du secteur des gisements fossilifères de Sterkfontein, Swartkrans.

10.1.8.2. A5 Carte des surfaces des gisements fossilifères de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai

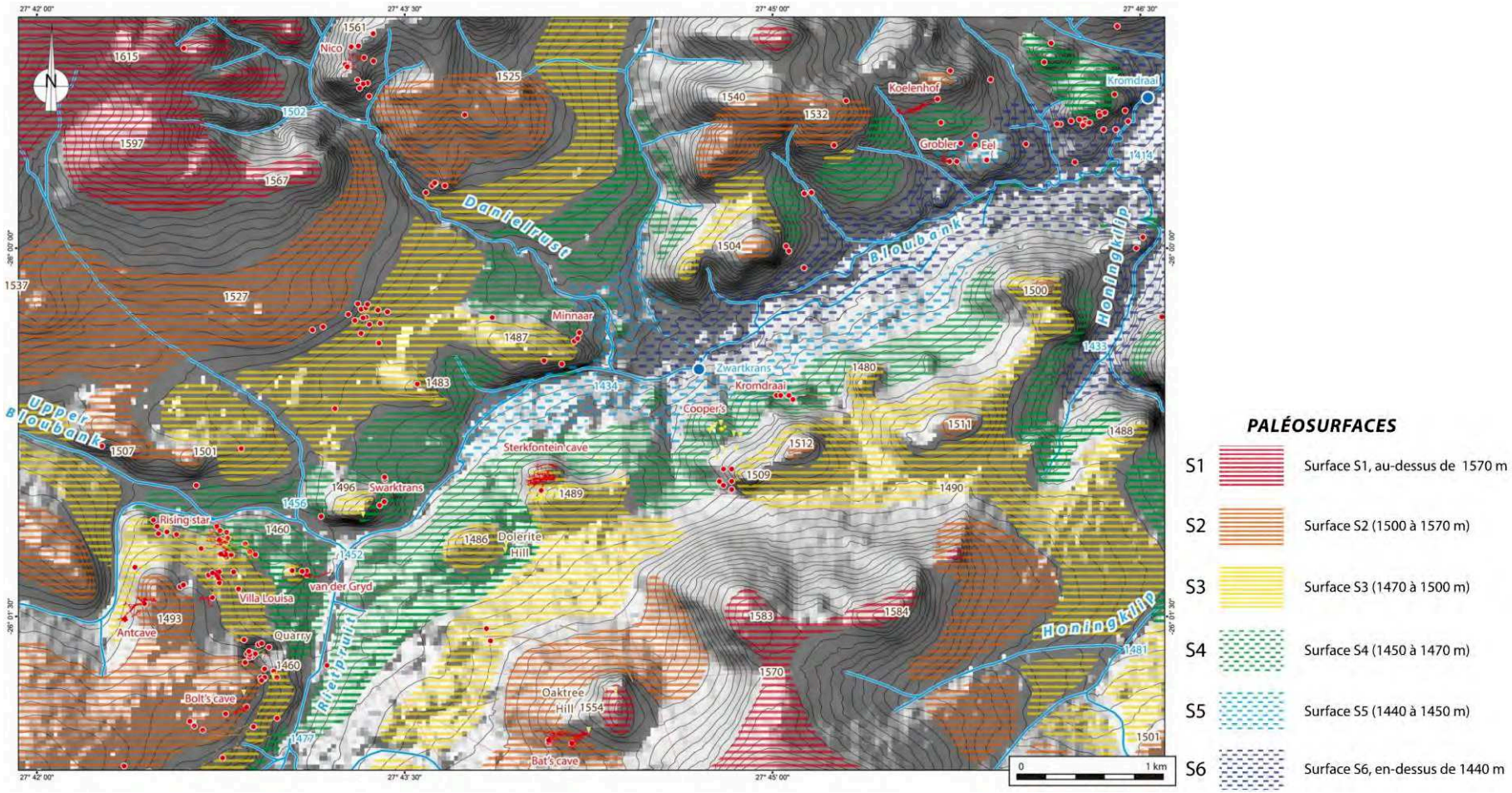


Figure 1183 Carte des surfaces du secteur des gisements fossilifères de Sterkfontein, Swartkrans.

10.1.9. Atlas cartographique n°6 du secteur de Sterkfontein

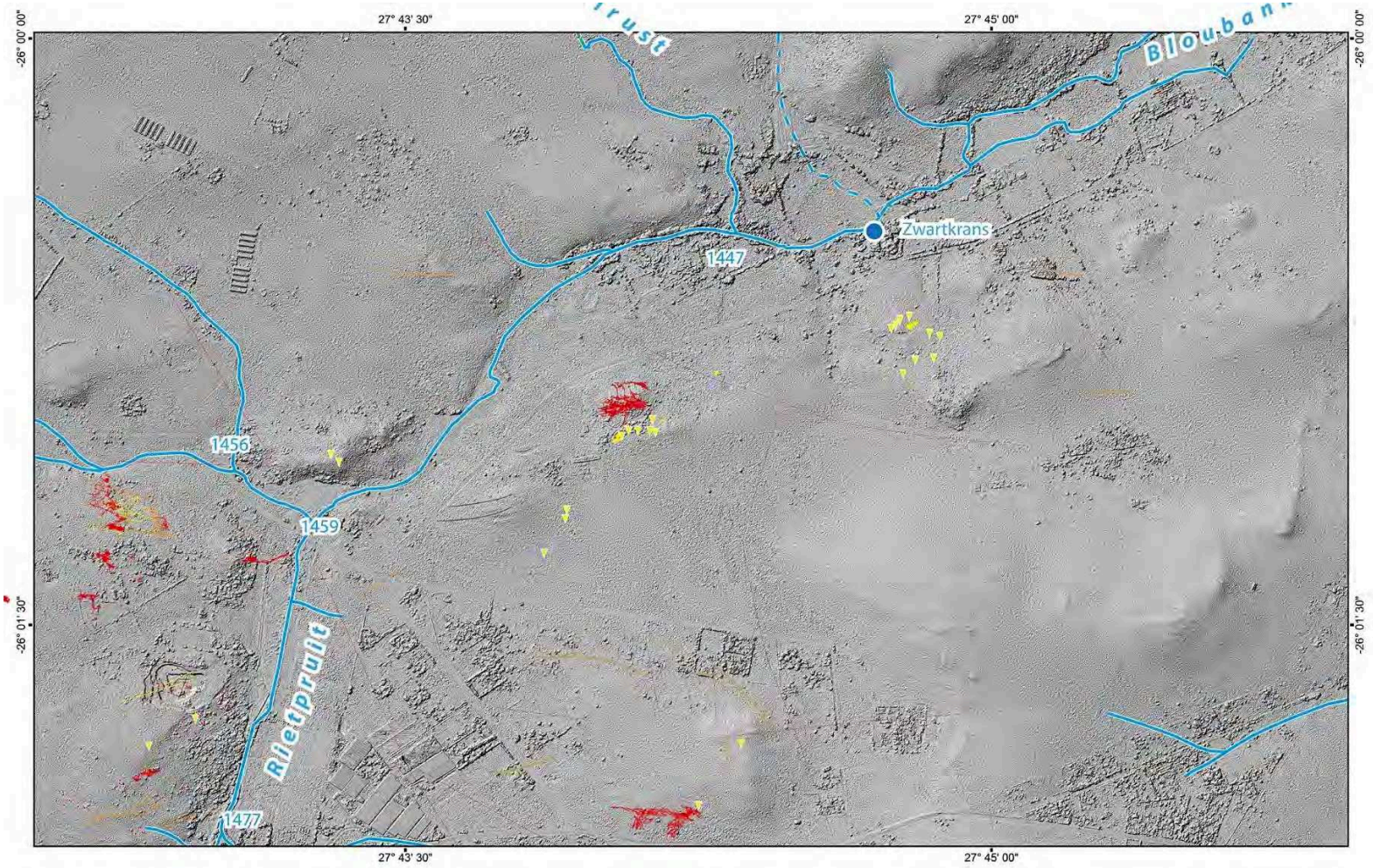


Figure 1184 Réseaux karstiques (en rouge) et entrées de grotte ou paléokarsts (en jaune).

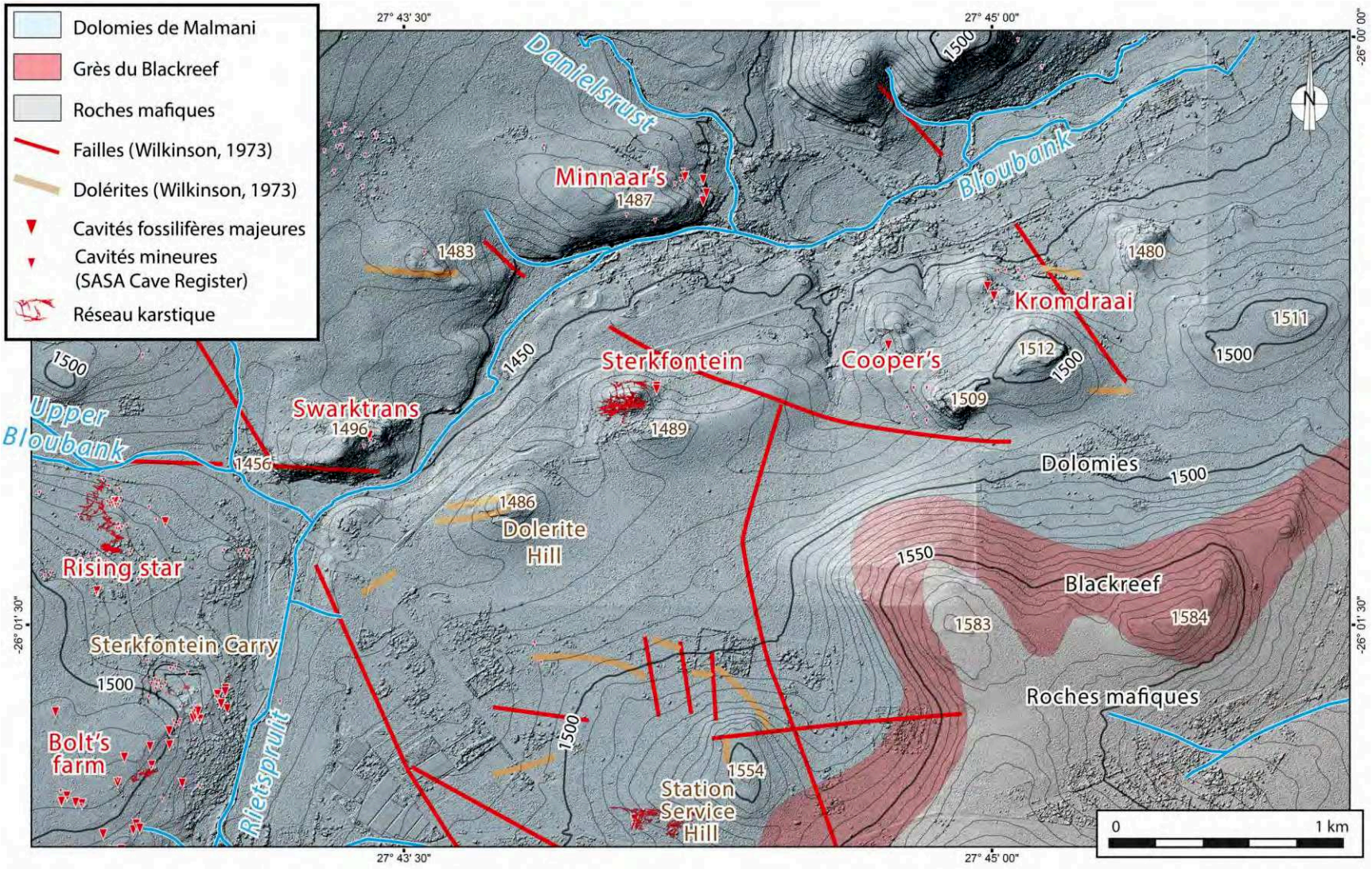


Figure 1185 Ajout des faille (en rouge) et du volcanisme (en marron) d'après Wilkinson (1973).

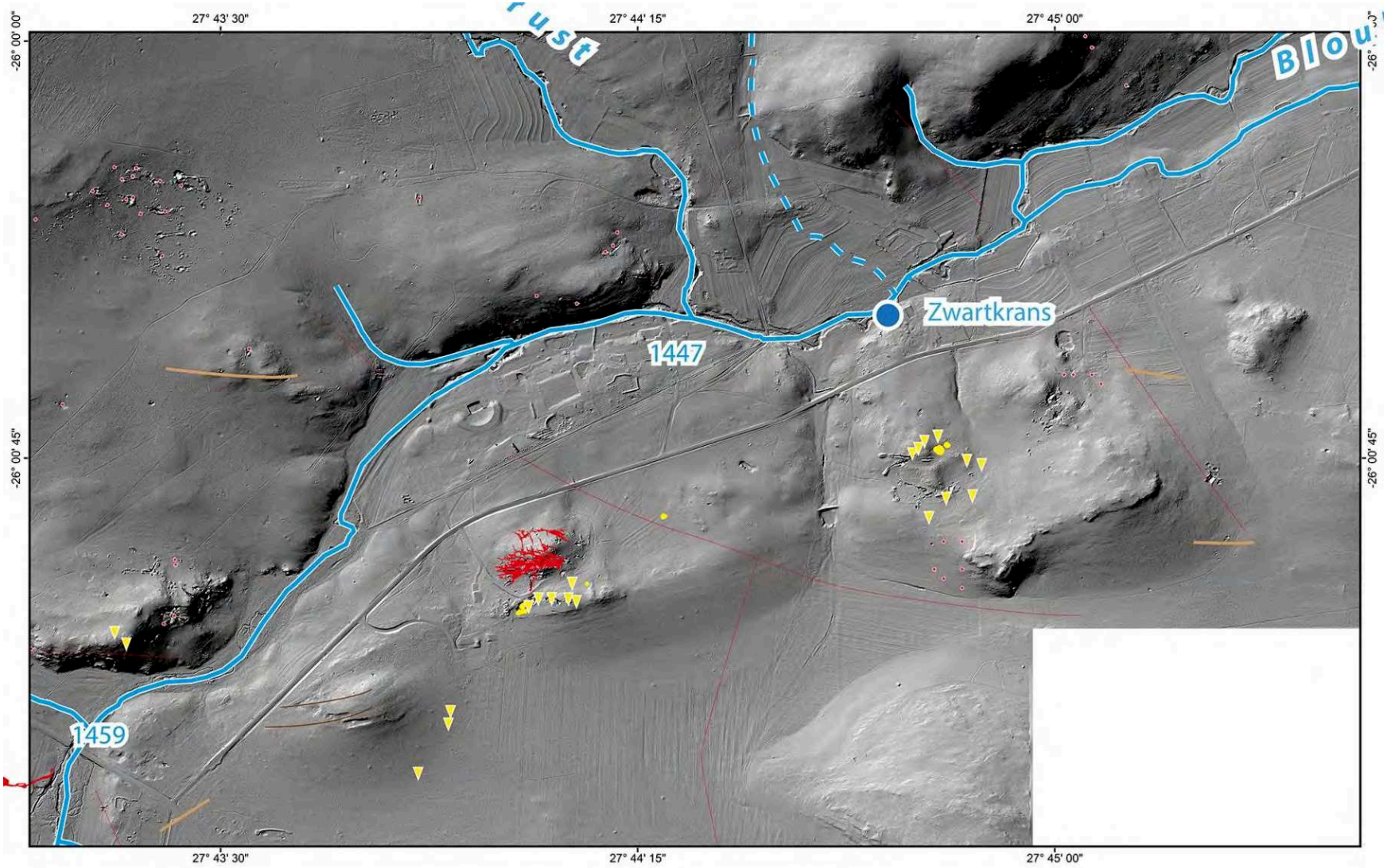


Figure 1186 Détail du MNT (Caruana) du secteur de Sterkfontein.

10.2. ATLAS CARTOGRAPHIQUE DE LA GROTTE DE STERKFONTEIN DANS LE CRADLE OF HUMANKIND EN AFRIQUE DU SUD



Figure 1187 Image satellite de la grotte de Sterkfontein (Google Maps

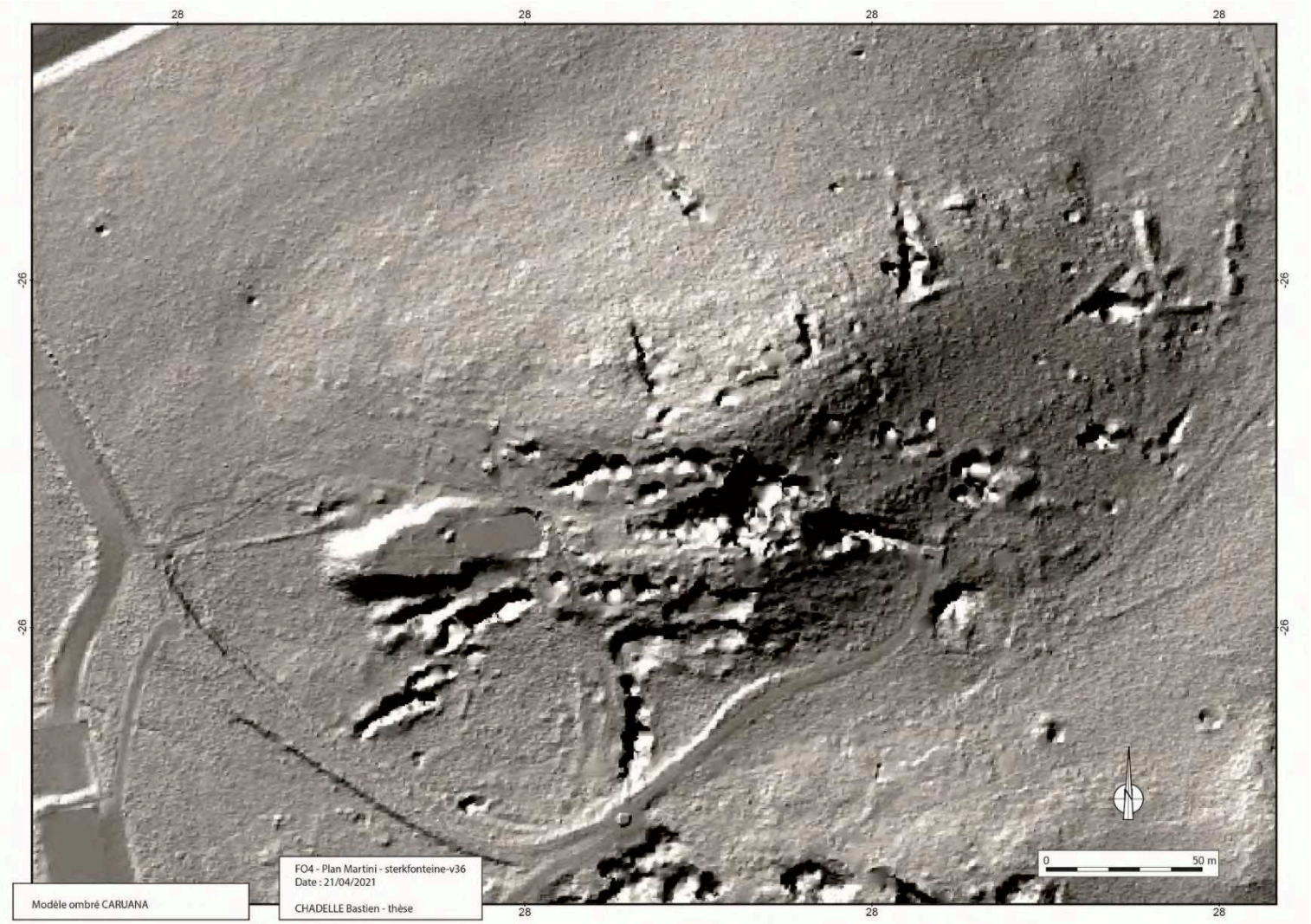


Figure 1188 Modèle ombré (protocole pour réaliser un modèle ombré p.66) issue du modèle numérique de terrain (LIDAR de Matthew V. CARUANA).

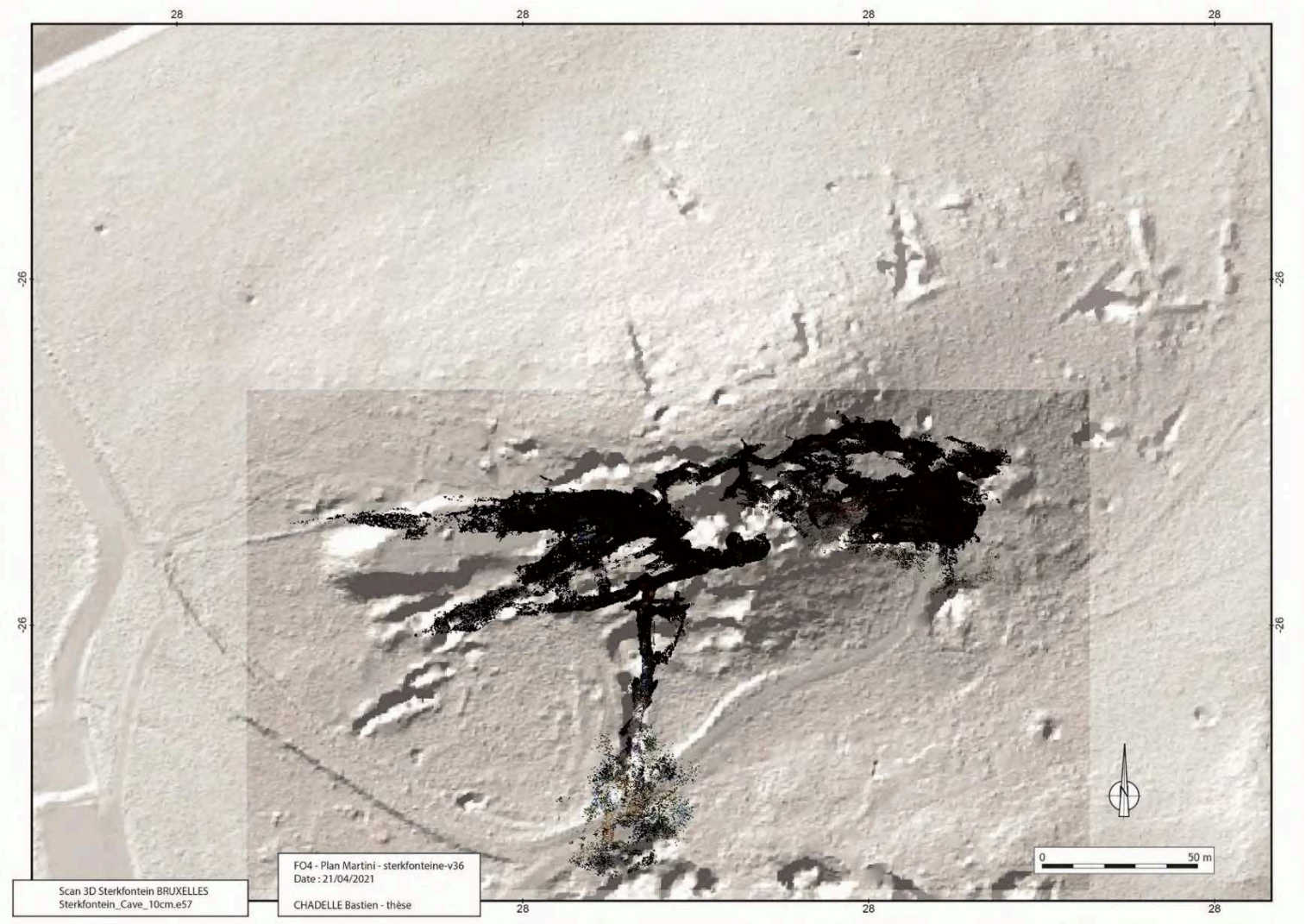


Figure 1189 Report du nuage de points issue du modèle 3D (acquisition Benjamin LANS).

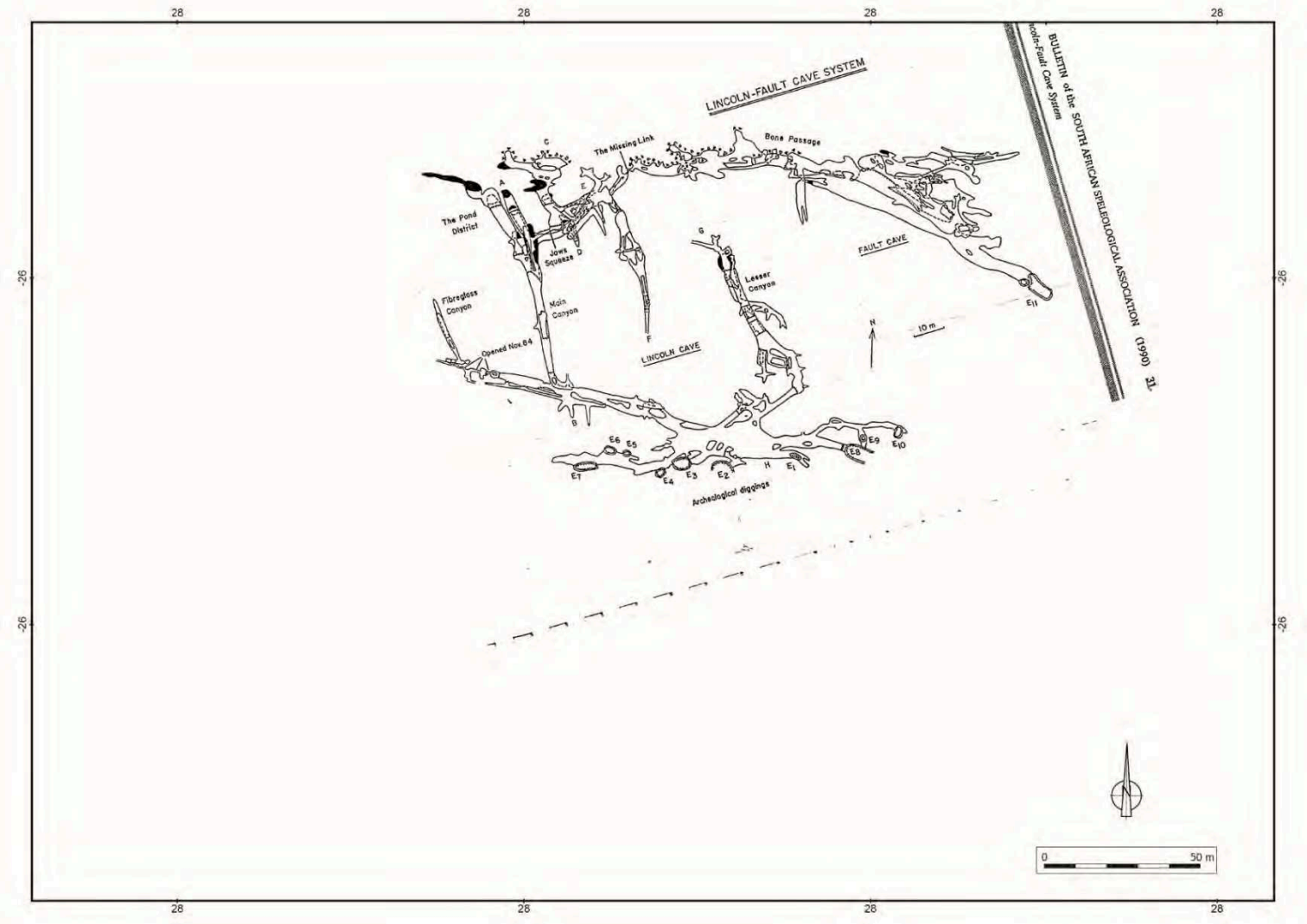


Figure 1190 Report de la topographie du réseau de Lincoln-Fault (Boshoff, 1990).

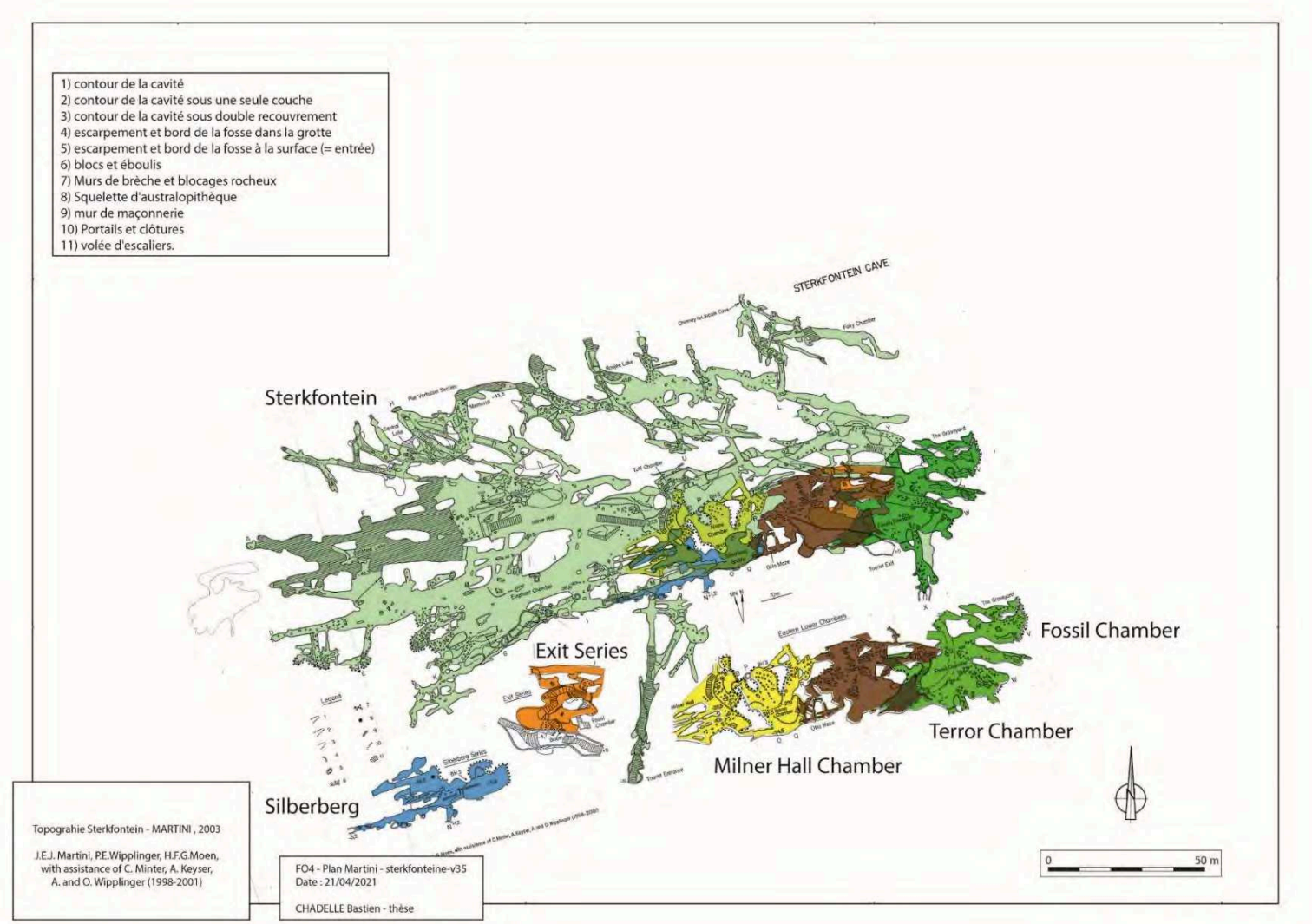


Figure 1191 Différenciation des salles (chamber) de la topographie de Sterkfontein. Elles sont reproduites et décalées vers le bas (Martini et al., 2003).

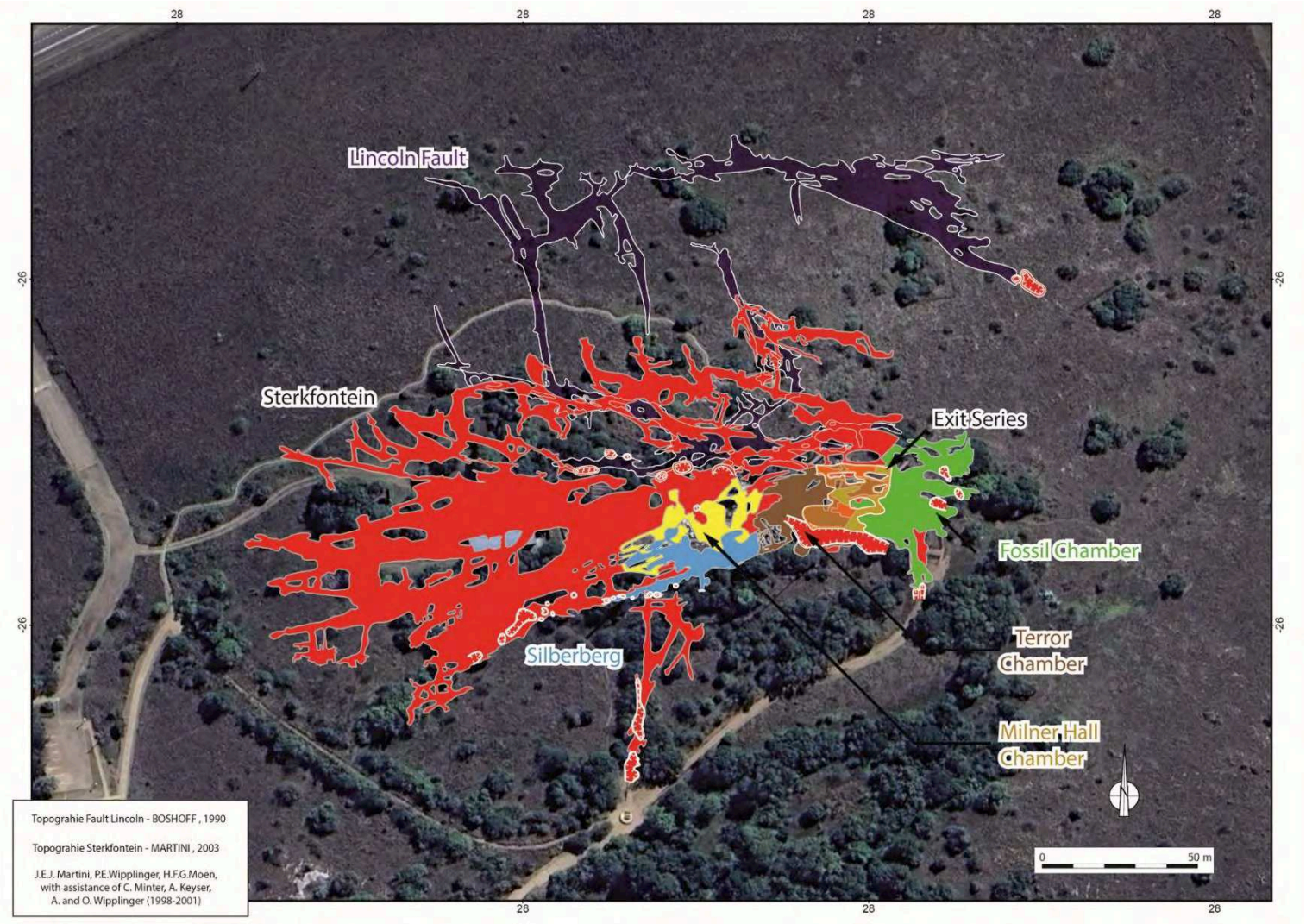


Figure 1192 Différenciation des salles (chamber) (Boshoff, 1990 ; Martini et al., 2003).

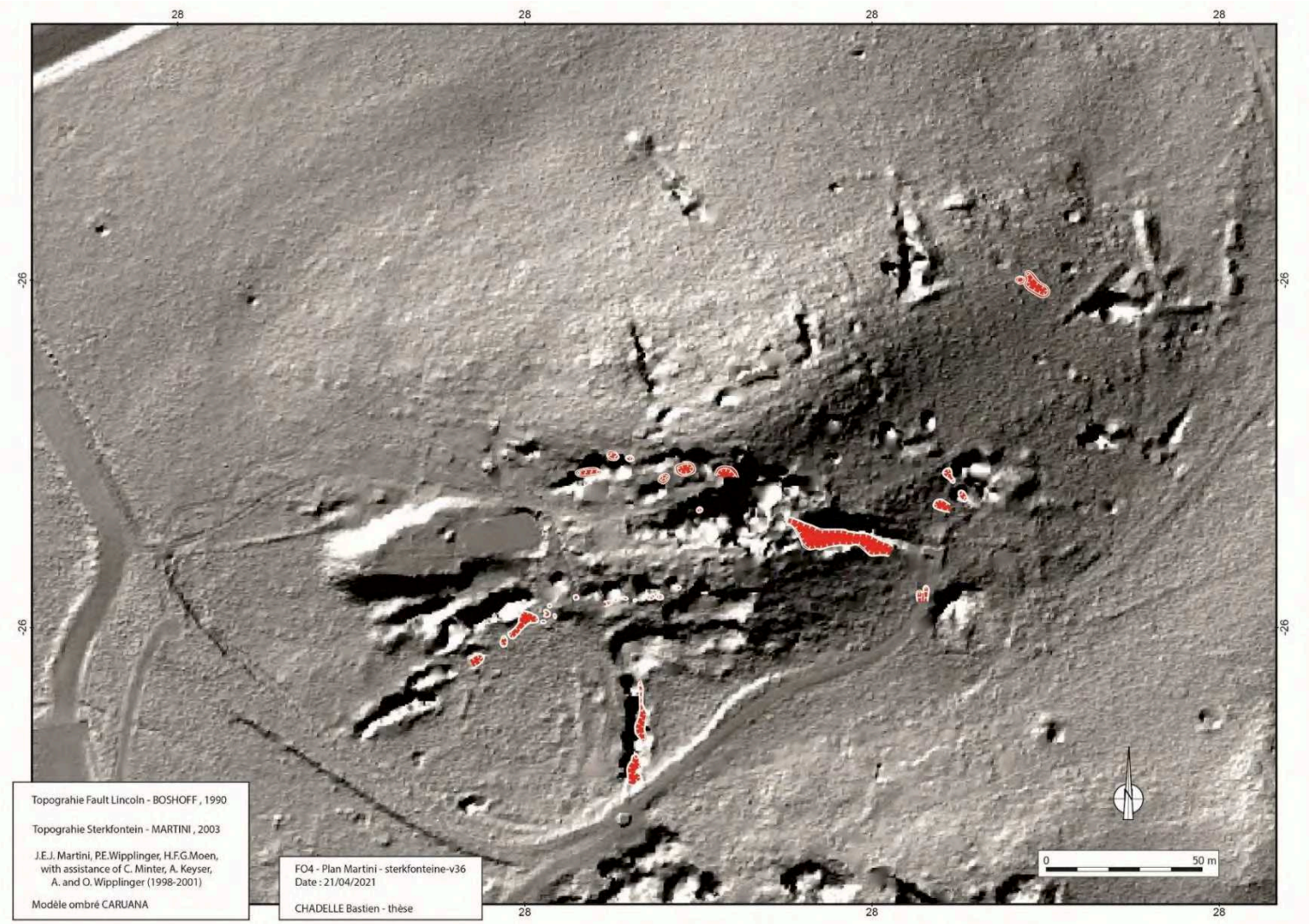


Figure 1193 Report des avens (entrées et puits) issues des topographies de Boshoff (1990) et Martini et al. (2003).

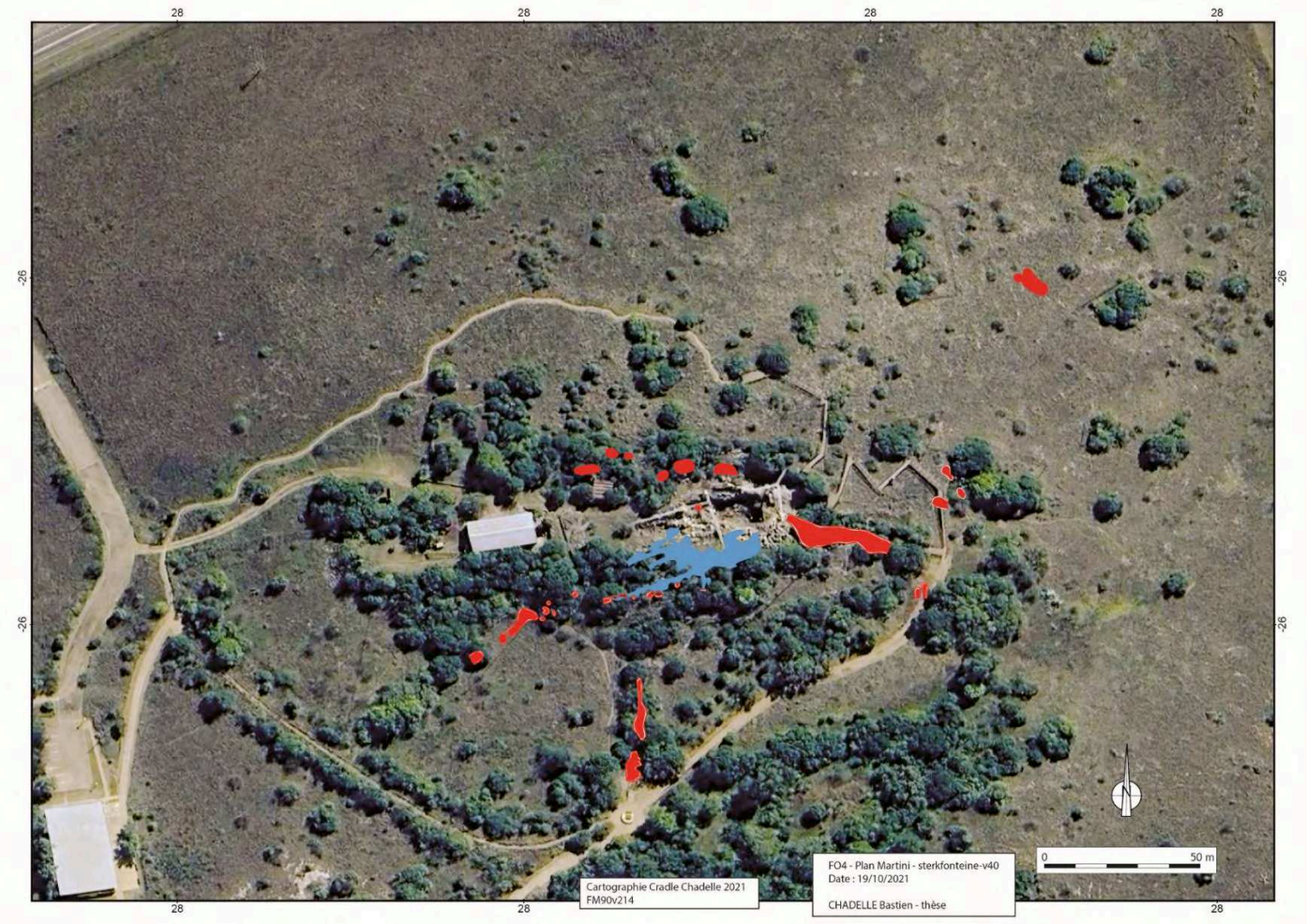


Figure 1194 Report des ouvertures en surface et de la salle de Silberberg où est tombé Little foot.

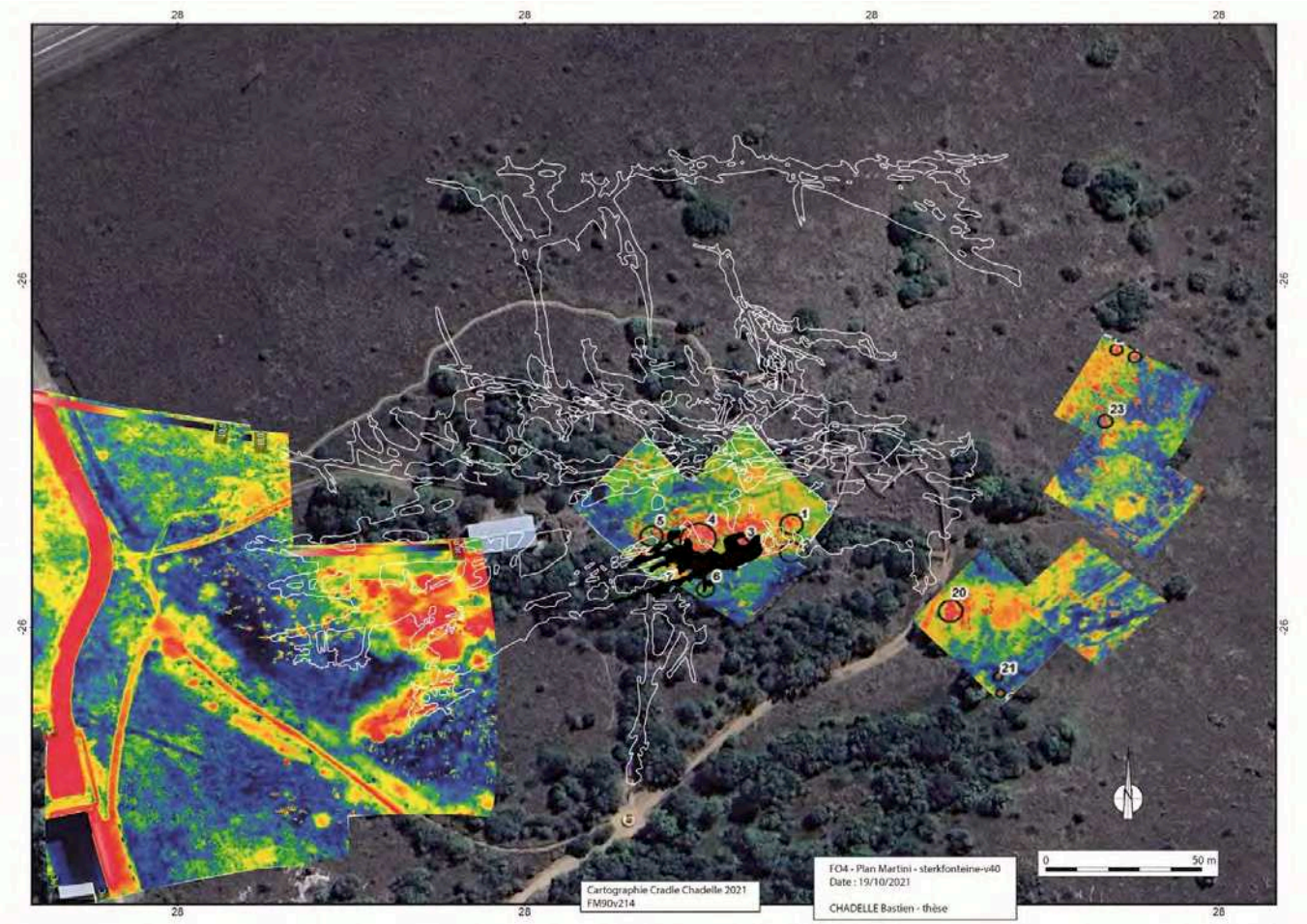


Figure 1195 Superposition des photographies infrarouges, réalisées par Nicolas Poirier (27/06/2012 - drone FLIRT620) au-dessus de la grotte de Silberberg (en noir), où se situait Little Foot. Ces photographies ont permis de localiser l'aven par lequel il était tombé dans la grotte. Le réseau de Sterkfontein et Lincoln Fault sont indiqués en blanc. (Poirier, 2012).

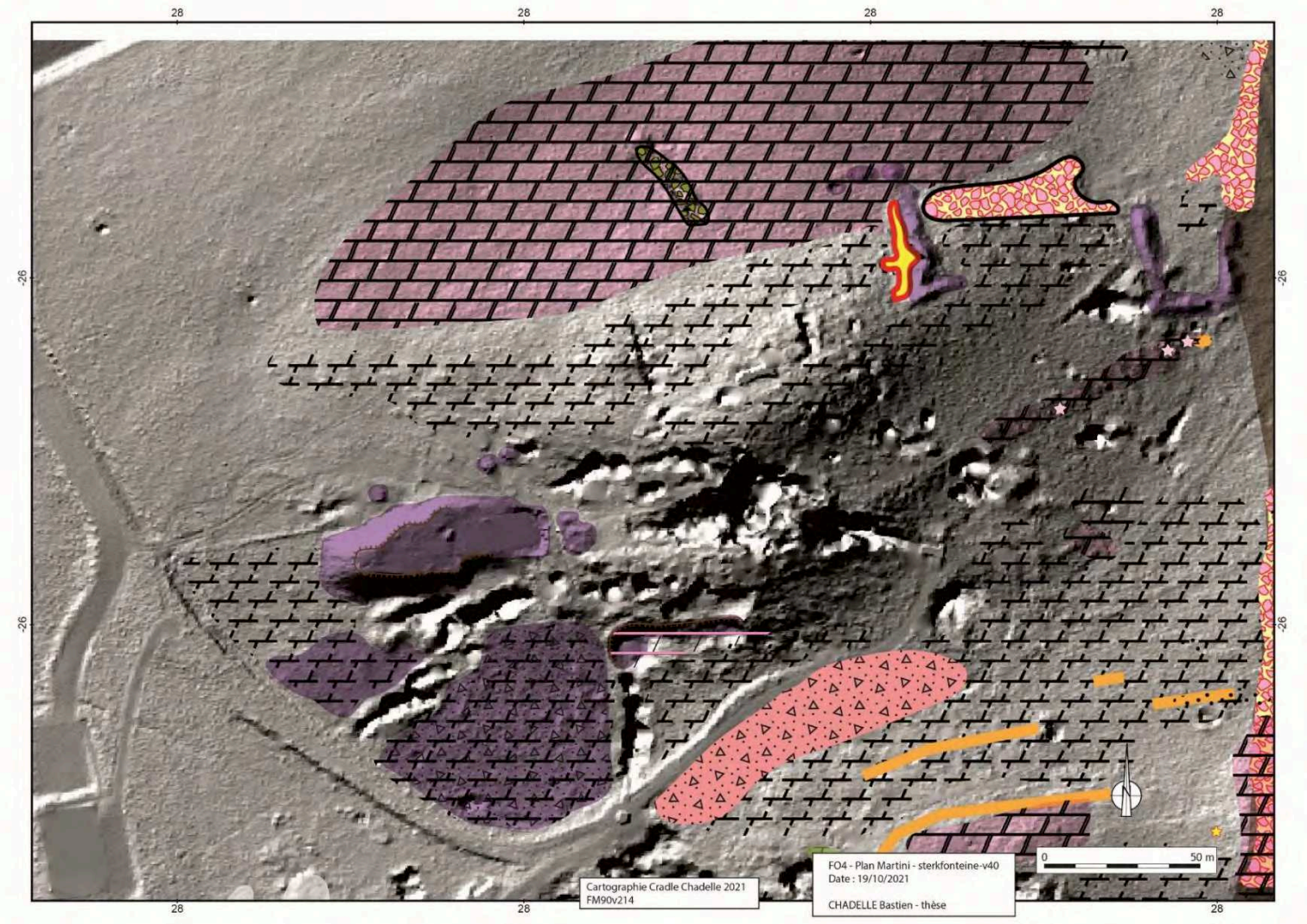


Figure 1196 Dolomies silicifiées (en mauve), formations bréchifiées (en rose), dykes (en orange) et déblais (en violet) au niveau de la grotte de Sterkfontein.

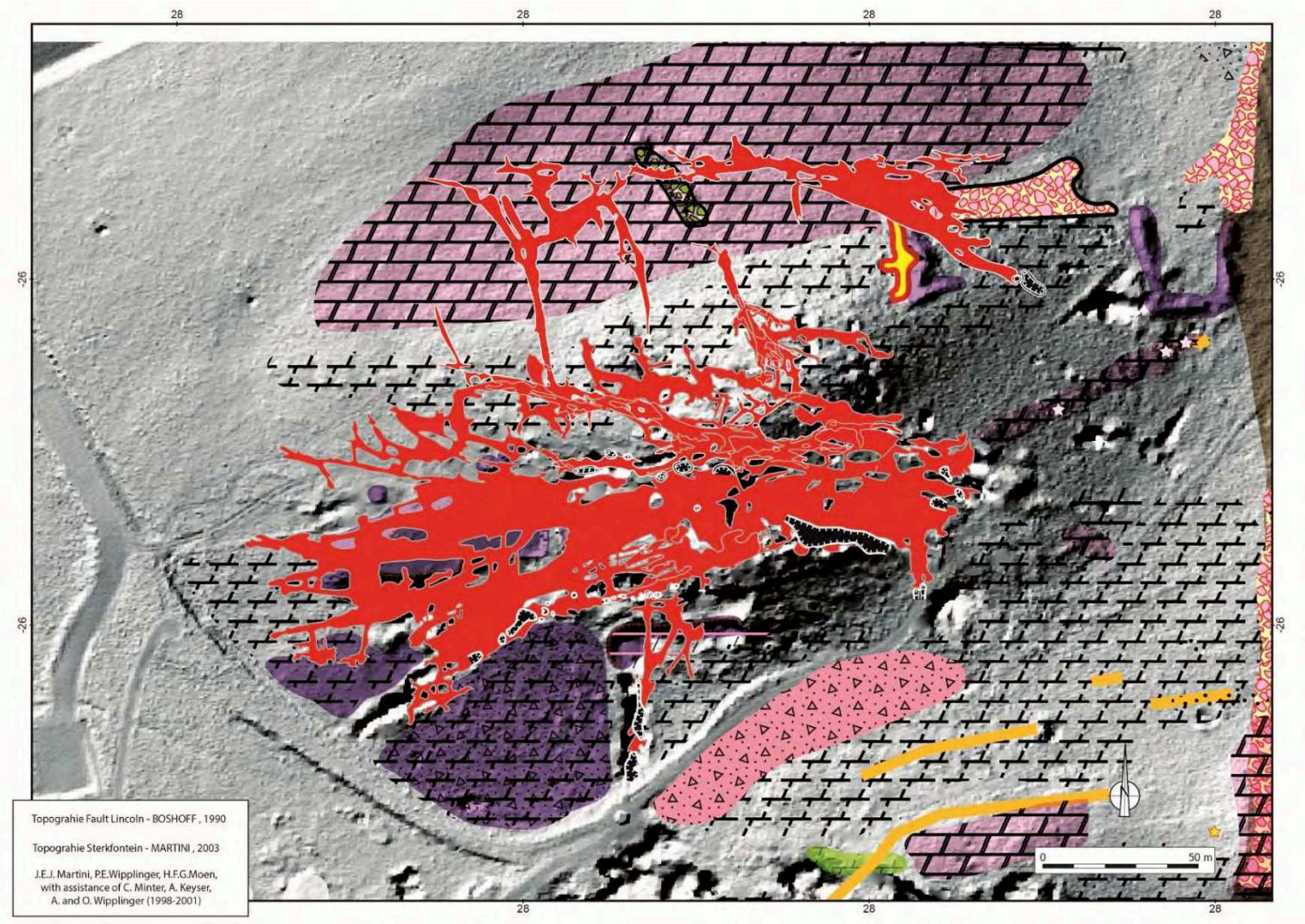


Figure 1197 Report du réseau de la grotte de Sterkfontein et de Lincoln-Fault sur la carte précédente.

10.3. ATLAS CARTOGRAPHIQUE DES GROTTES VERS RISING STAR DANS LE CRADLE OF HUMANKIND EN AFRIQUE DU SUD

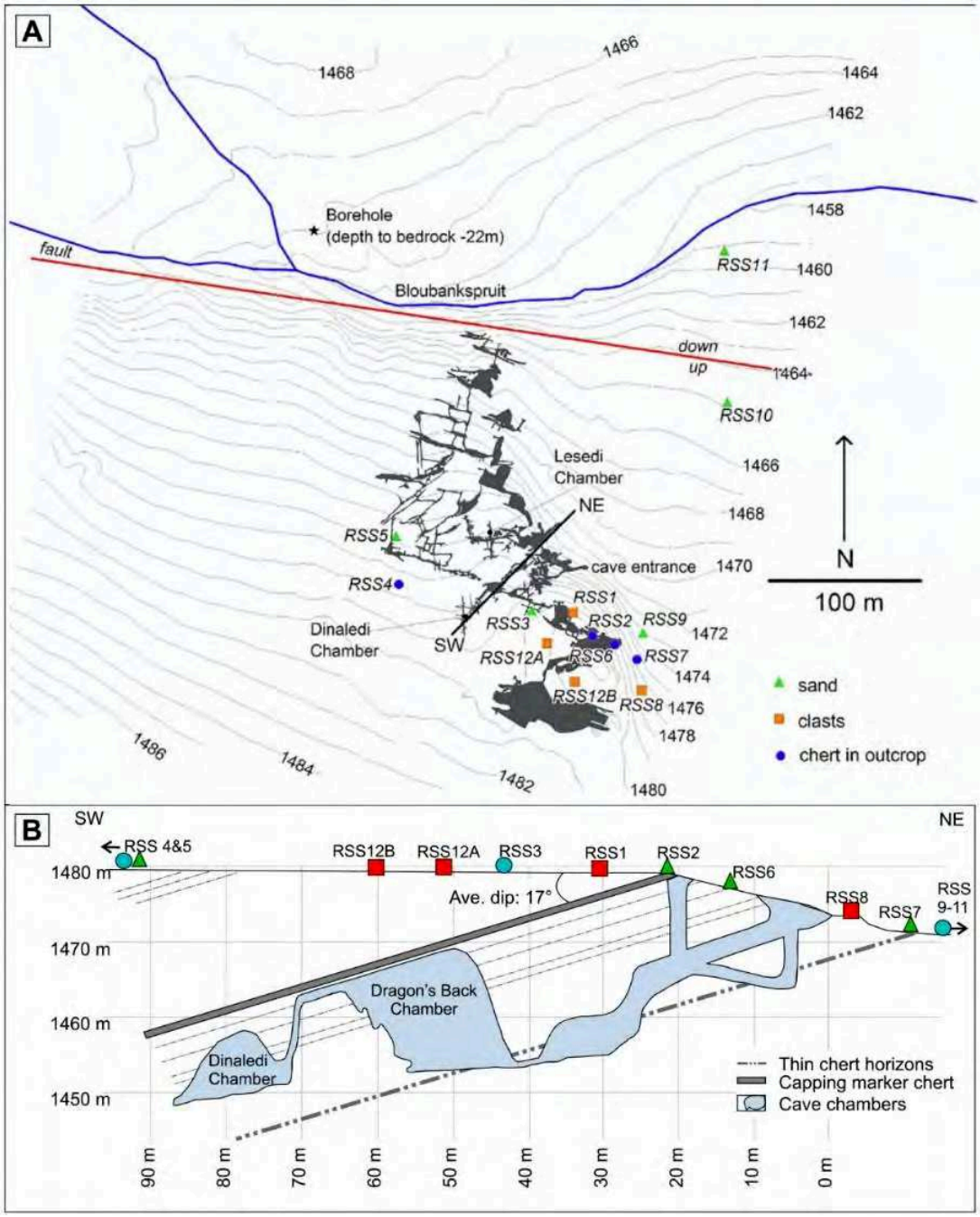


Figure 1198 Report du réseau karstique de Rising Star en plan (en haut) et en coupe (en bas) ,selon Makhubela (2019).

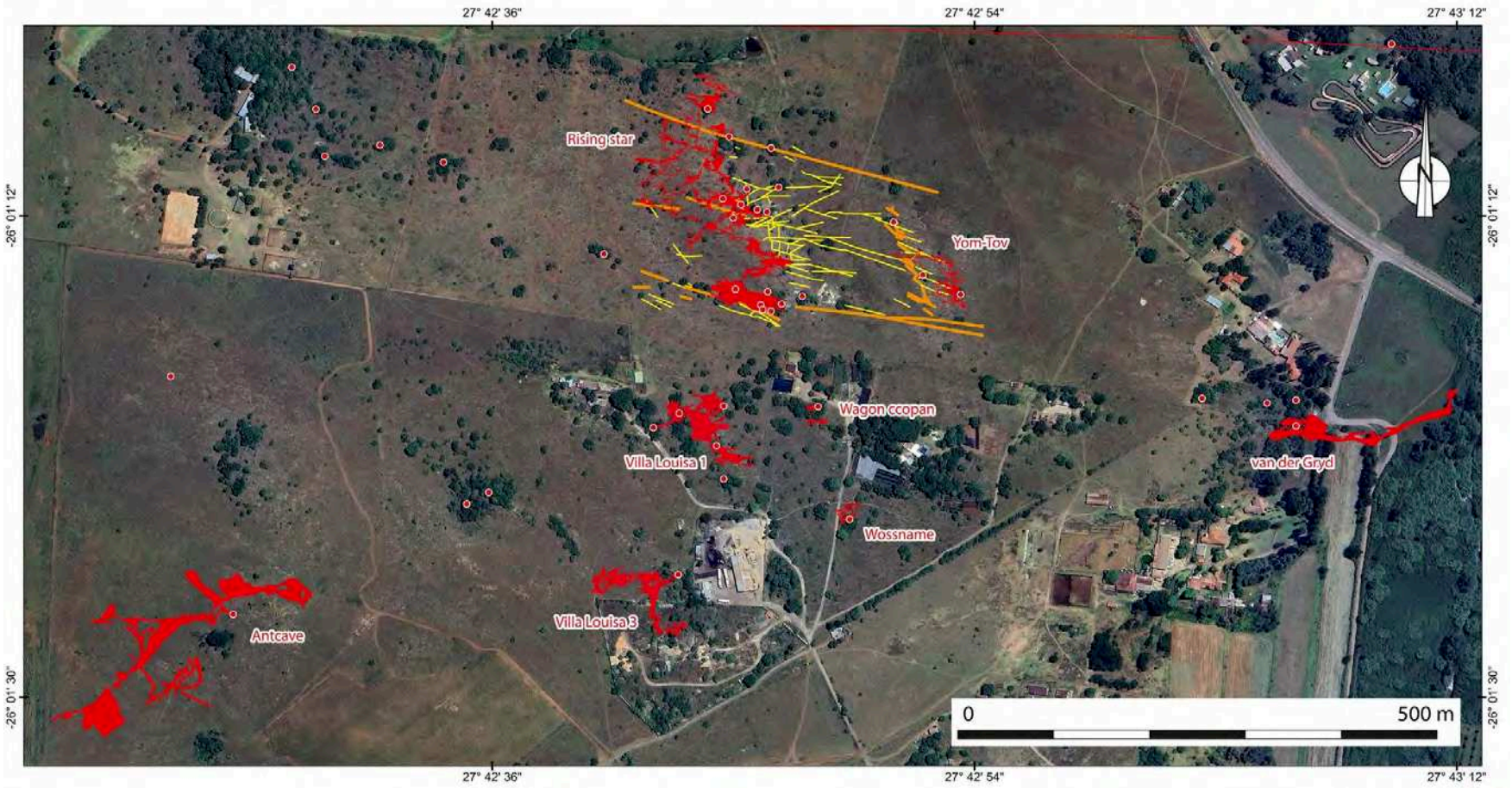


Figure 1199 Report des cavités du secteur de Rising Star (calcul des déclinaison Tableau 60 p.1106). En jaune, la calcite de surface et en orange, les filons hydrothermaux (Chert Stockwork veins) cartographiés par Dirks et al. (2015), seulement autour de Rising Star, il doit exister d'autres filons qui n'ont pas été cartographiés.

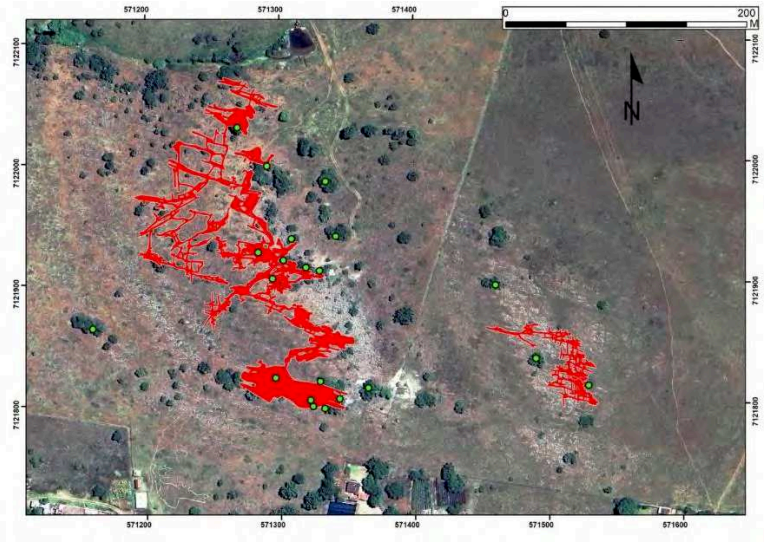


Figure 1200 Report en surface de la grotte de Rising Star (topographie levée par Harris J., Rees D., Möller H., Priddle C., van der Hoodt R. en 1985 et géoréférencée par Dirks et al. (2015, fig.2 p.5) et de la grotte de Yom-Tov (topographie levée par van Rooyen D., Hlophe M., Tucker S., Ramalepa M. en 2016) et image satellite (Google Maps).

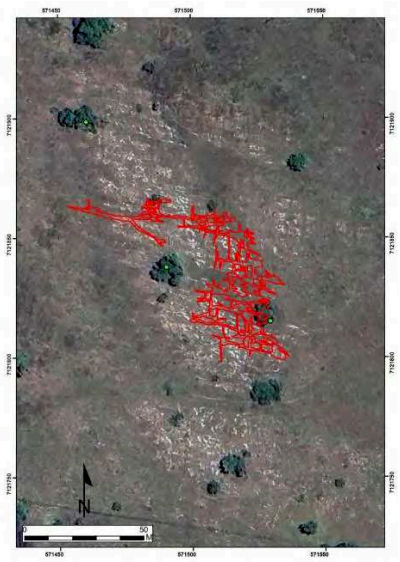


Figure 1201 Report surface de la grotte de Yom-Tov. Sur cette image satellite, on identifie bien les calcaires.

10.4. ATLAS CARTOGRAPHIQUE DES GROTTES DE NICO DANS LE CRADLE OF HUMANKIND EN AFRIQUE DU SUD

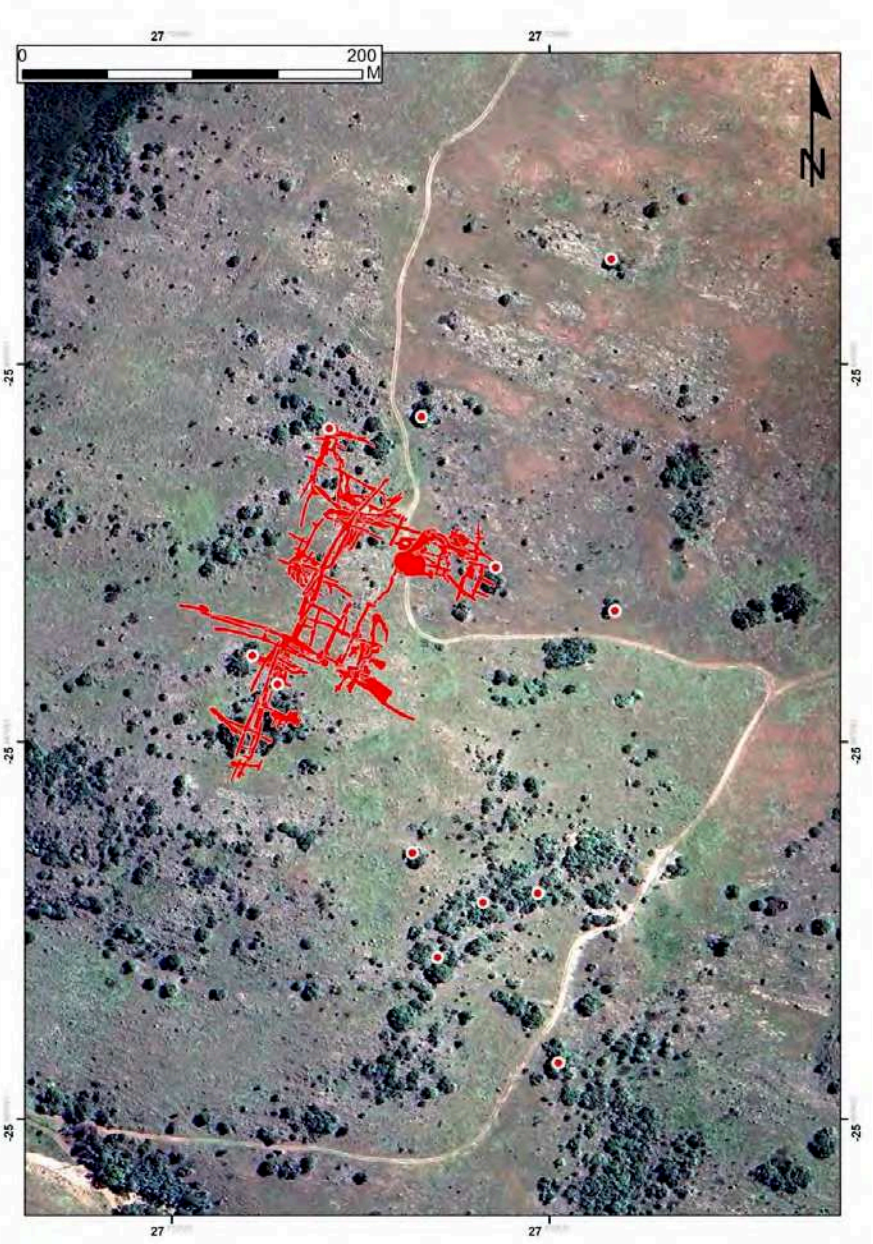


Figure 1202 Report en surface des topographies de la grotte de Nico I, levé par Trucker en 2016, la déclinaison était déjà prise en compte, et de Nico 2, levé par Harris J.M., Kenny P.J., Lloyd T.D., Möller H.O., van der Hooft R.E. en 1993 et dont le calcul de la déclinaison a été estimé via la stratigraphie des bancs carbonatés visibles sur l'image satellite (Google Satellite).



Figure 1203 Cartographie des affleurements carbonatés et mise en valeur des roches intrusives et des zones fantômisées.

11. ANNEXES DU CHAPITRE N°3

11.1. ANNEXE N°1 DU CHAPITRE N°3 : SCHEMA DE SYNTHESE ET RAPPEL DES FORMATIONS DISCORDANTES SUR LES CARBONATES DU CRADLE OF HUMANKIND ET CONCEPT DE FANTOMISATION

En bas de la figure suivante, les numéros font référence aux étapes listées ci-dessous :

1 : Mise en place du Craton du Kaapvaal (~3100 Ma) ;

2 : Intrusion du granite *Halway House* en profondeur, aujourd'hui il affleure à l'est du CoH, au niveau de la ville de Johannesburg (-2710 Ma) ;

3 : Mise en place du bassin de Witwatersrand (-2970 Ma) et du volcanisme de Ventersdorp (-2700 Ma) ;

4 : Mise en place du bassin marin protérozoïque du Transvaal (–2640 à 2080 Ma) et du volcanisme de Rooiberg (-2061 Ma) ;

5 : Intrusion du Pluton du *Bushveld* en profondeur, il affleure aujourd'hui en surface au nord et à l'est du Cradle of Humankind (-2055 Ma, Walraven et Hattingh, 1993) ;

6 : Mise en place des bassins sédimentaires de Waterberg (-1500 Ma) (Callaghan *et al.,* 1991) ;

Hiatus pré-Karoo : surface d'érosion et discordance angulaire d'une durée de 1150 Ma. Peut-être une phase de karstification pour les carbonates qui affleuraient à l'époque.

Rabotage du continent par des glaciers dont témoignent les tillites glaciaires de Dwyka témoignent, en violet foncé (-350 Ma)

Déchirure de la Pangée et ouverture des océans

7 : Dépôts subhorizontaux du bassin sédimentaire du Karoo (Ecca, en violet clair) et volcanisme Karoo en vert (-350 Ma à 183 Ma) (Permien à Jurassique) qui marquent le début du rifting ;

8 : Dépôts continentaux éoliens crétacés, tertiaires et quaternaires du Kalahari (en jaune) ;

F : Episode de fantômisation des dolomies (non daté clairement) ;

E : Episode d'érosion fluviatile et d'érosion régressive (crétacé, tertiaire et quaternaire). La création des vides se déroule pendant cet épisode, mais la fantômisation des carbonates est réalisée bien avant cet épisode.

11.2. ANNEXE N°2 DU CHAPITRE N°3 LOG STRATIGRAPHIQUE SYNTHETIQUE

Le log stratigraphique synthétique du Bassin du Transvaal et du *CoH* ci-dessous (Figure 1204) s'intéresse aux dolomies de Malmani (en bleu ciel et trames). Elles ont été recouvertes par : **(i)** le groupe de Pretoria (en bleu foncé) (semble-t 'il en concordance stratigraphique mais séparés par une phase de karstification supposée, dont la formation de Rooihoogte serait le résultat (Eriksson, 1988 ; Catuneanu et al, 2002a ; Van Niekerk *et al.*, 2006) (p.312), **(ii)** les formations géologiques du bassin de Waterberg (en beige) (-1900 Ma), **(iii)** les formations sédimentaires du bassin du Karoo (en violet et mauve) (-350 Ma) chapeautées par les formations volcaniques du Karoo (en vert clair et vert foncé) et enfin **(iiii)** par les sables éoliens du Kalahari (en jaune) (-65 Ma).
Les formations du Karoo sédimentaire (représentées en violet), Dwyka et Ecca, reposent sub-horizontalement sur une surface d'érosion polygénique (pré-Karoo et post-Waterberg), représentée par le trait rouge ondulé.
Les reliefs structuraux, que forment les reliefs de Magaliesberg et de Witwatersberg (en bleu foncé, groupe Pretoria), du Witwatersrand (en orange) et la petite barre formée par le *Black Reef* sont indiqués. L'érosion par les rivières est indiquée en gris.

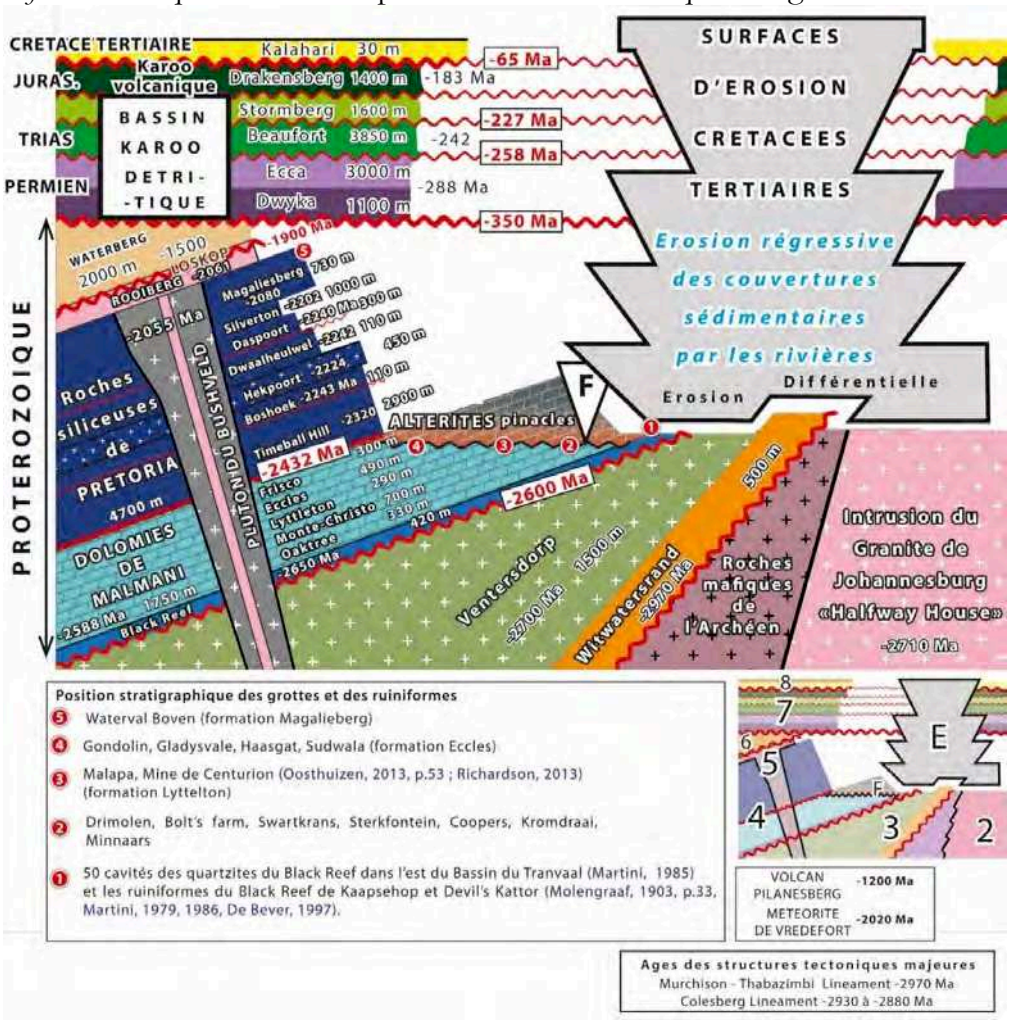


Figure 1204 Log stratigraphique synthétique du Bassin du Transvaal et du CoH.

Les dolomies fantômisées affleurent à la surface après l'érosion des couvertures sédimentaires du Kalahari et du Karoo par les rivières (et du Waterberg s'il s'est déposé, ce qui ne semble pas être le cas dans le CoH). Cette érosion régressive est parfois très récente, vers – 4 Ma, ce que semble indiquer l'âge des fossiles préservés dans les grottes du *Cradle of Humankind*.

Le Karoo a recouvert l'ensemble de l'Afrique du Sud, du Bassin du Transvaal et du *Cradle of Humankind* il y a environ – 288 Ma. Aujourd'hui, le Karoo est très peu conservé, comme l'indiquent les cartes géologiques.

L'érosion et le retrait de cette couverture ont mis à l'affleurement des dolomies fantômisées. Le fantôme s'est alors évacué rapidement, tandis qu'en profondeur, le fantôme de dolomie était évacué par la nappe phréatique lors des mises en charge (p.443).

Mais quand commence la fantômisation des dolomies ? Nous en parlerons en évoquant la Surface Africaine (p.298) et les problèmes de datation des phases de karstification (p.312).

Le document n'est pas à l'échelle. Les épaisseurs des formations sont issues de publications (Ingram et Van Tonder, 2011, fig.36, p.61 ; Button et al, 2015 ; et Eriksson *et al.* (1995) pour Pretoria. L'âge des formations est issu des publications suivantes : Linol et De Wit, 2016 ; voir aussi Ingram et Van Tonder, 2011, Tab.1, p.16.

Dans l'encadré du bas, nous avons résumé l'histoire géologique du Bassin du Transvaal et du Cradle of Humankind en 10 phases majeures :

Remarques :

(1) L'intrusion du granite (en rose) (-2170 Ma) s'est déroulée bien avant le dépôt du bassin du Transvaal ; l'intrusion du Pluton du Complexe du Bushveld (en gris) (-2055 Ma) s'est effectuée après le dépôt du Bassin du Transvaal.

(2) L'absence de la formation de Frisco (formation terminale des dolomies de Malmani) dans le *CoH*, cette formation a été érodée et peut-être altérée pour former notamment les brèches à clastes de chert entre autres.

(3) La présence de la formation altérée de Loskop entre Rooiberg et Waterberg.

12. ANNEXES DU CHAPITRE N°4

12.1. ANNEXE N°1 DU CHAPITRE N°4 : DONNEES GROTTE DU NORD-OUEST DU BOTSWANA

Fichier fournis par Oaitse Ledimo (Géologue du Muséum) contenant des coordonnées GPS des entrées de grottes.

Noms du fichier : **EXISTING CAVES COORDINATES**

CAVE NAMES	**COORDINATES**		**COMMENTS**
	SOUTHINGS(X)	EASTINGS(Y)	
Diviners	20°08'32.2"	021°12'36.5"	Koanaka hill 1
Mongongo	20°08'47.2"	021°12'27.0"	Koanaka hill 1
Fossil	20°08'42.4"	021°12' 29.9"	Koanaka hill 1
Gecko	20°08'27.1"	021°12'46.5"	Koanaka hill 1
Bone	20°09'27.2"	021°11'42.8"	Koanaka hill 2
Main Gcwihaba	20°01'45.6"	021°21'25.8"	Gcwihaba hill 1
Wa!Doum	20°00'55.1"	021°04'49.2"	Gcwihaba hill 3
Dimapo	20°01'14.6"	021°21'22.1"	Gcwihaba hill 3
Blue cave	~~20°09'17.5"~~	~~021°21'15.3"~~	Koanaka hill 3

Tableau 67 Coordonnées GPS des entrées de grottes fournis par Oatse L.

Attention la coordonnée de la grotte de *Blue Cave* est fausse !

Tableau fourni par Ledimo Oaitse (géologue du Muséum) en 2021, contenant les données GPS.
En rouge sont indiquées les entrées de cavités.

Noms du fichiers : App 6 Coordinates of Features

Gcwihaba Caves Project

Main Locations

Xai Xai area:

Xai Xai village - 19°52'55.93"S/ 21° 4'50.57"E

Track to Gcwihaba - 19°52'56.62"S/ 21° 6'48.43"E

Aha Hills - 19°46'45.99"S/ 21° 1'53.16"E

Wahu Cave (North) - 19°43'32.91"S/ 21° 3'30.19"E

Wahu Cave (South) - 19°46'40.70"S/ 21° 2'31.78"E

Wahu Cave (South) cultural campsite - 19°46'37.57"S/ 21° 2'30.22"E

Gcwihaba area:

G1 Hill - 20° 1'22.34"S/ 21°21'18.20"E

G2 Hill - 20° 1'14.85"S/ 21°21'35.96"E

G3 Hill - 20° 0'52.84"S/ 21°21'13.57"E

G4 Hill (no cave) - 20° 0'34.23"S/ 21°21'13.57"E

G5 Hill (no cave) - 20° 0'28.07"S/ 21°22'27.52"E

Gcwihaba Cave (North entrance) - 20° 1'18.48"S/ 21°21'18.34"E

Gcwihaba Cave (South entrance) - 20° 1'27.14"S/ 21°21'15.83"E

Dimapo Cave (tourist borehole entrance) - 20° 1'14.24"S/ 21°21'32.11"E

!WaDoum Cave (natural entrance) - 20° 0'55.17"S/ 21°21'15.39"E

Rocky ridge full of solution tubes - 20° 1'1.72"S / 21°21'32.67"E

G1 and G2 palaeo discharge pan - 20° 1'11.08"S/21°20'23.65"E

G4 and G5 palaeo discharge pan - 20° 0'42.70"S/ 21°22'31.09"E

Gatehouse - 20° 0'50.41"S/ 21°23'10.45"E

Museum camp - 20° 0'27.77"S/ 21°22'5.96"E

Water borehole 1 - 20° 0'44.15"S/ 21°21'56.06"E

Water borehole 2 - 20° 1'17.81"S/ 21°20'59.70"E

Mongongo bush campsite - 20° 1'34.70"S/ 21°21'24.56"E

Motswiri bush camp site - 20° 1'24.56"S/ 21°21'24.83"E

Main campsite - 20° 2'10.57"S/ 21°20'1.77"E

Main campsite staff housing - 20° 2'15.36"S/ 21°19'54.52"E

Main campsite mock bushman village - 20° 2'7.72"S / 21°19'58.58"E

Main campsite viewing deck - 20° 2'5.81"S / 21°20'0.47"E

Entrance to main camp - 20° 2'12.85"S/ 21°20'9.87"E

Pond with viewing deck - 20° 1'37.62"S/ 21°20'0.71"E

Track to Koanaka (Koanaka Highway) - 20° 2'24.41"S/ 21°20'7.04"E

Track to Xai Xai - 20° 0'49.23"S/ 21°20'14.52"E

Track to Tsau - 20° 0'51.90"S/ 21°23'44.80"E 2

En rouge sont indiquées les entrées de cavités.

Koanaka K1, K2 and K3 area:

K1 Hill - 20° 8' 37.80"S/ 21° 12' 29.94"E

Track from Gcwihaba (Koanaka Highway) - 20° 8' 21.84"S/ 21° 13' 26.62"E

Gecko Chamber (borehole entrance) - 20° 8' 27.34"S/ 21° 12' 46.76"E

Diviners Cave (tourist borehole entrance) - 20° 8' 32.09"S/ 21° 12' 36.65"E

Fossil Cave (borehole entrance) - 20° 8' 42.40"S/ 21° 12' 30.06"E

Mongongo Cave (tourist borehole entrance) - 20° 8' 46.97"S/ 21° 12' 27.10"E

Fossil bones and palaeo cave floors - 20° 8' 51.09"S/ 21° 12' 24.16"E (ça correspond au sud-ouest de la colline K1 : lien googlemaps)

K1 palaeo discharge pan - 20° 8' 20.79"S/ 21° 11' 50.02"E

Seasonal pond in pan - 20° 8' 35.72"S/ 21° 11' 42.89"E

Pines water borehole(no pump) - 20° 8' 43.35"S/ 21° 10' 58.70"E

Track from K1 Hill to K2 Hill - 20° 9' 3.09"S / 21° 11' 52.65"E

Track from K1 to K3 Hill - 20° 9' 17.31"S/ 21° 10' 41.86"E

K2 Hill - 20° 9' 28.66"S/ 21° 11' 41.49"E

Bone Cave (natural entrance) - 20° 9' 26.63"S/ 21° 11' 42.85"E

K2 Cave (small cave natural entrance) - 20° 9' 31.47"S/ 21° 11' 39.89"E

Fossil bones and palaeo cave floors - 20° 9' 31.61"S/ 21° 11' 41.82"E (ça correspond à l'est de la colline de Bone Cave : lien googlemaps)

K2 palaeo discharge pan - 20° 9' 38.27"S / 21° 11' 0.23"E

Track to K3 Hill - 20°10' 50.50"S/ 21° 8' 5.23"E

Pond with water borehole pump - 20°11' 38.51"S/21° 6' 31.91"E

K3 Hill - 20° 9' 15.35"S/ 21° 4' 49.19"E

Blue Cave (natural entrance) - 20° 9' 18.06"S/ 21° 4' 49.69"E

K3 palaeo discharge pan - 20° 9' 14.19"S/ 21° 4' 28.95"E

Seretse pan - 20° 10' 16.04"S/21° 4' 28.97"E

Turn off to K3 Hill - 20° 12' 2.14"S / 21° 3' 13.45"E

Track to K3 Hill - 20° 10' 40.72"S/21° 3' 58.68"E

Track to border road - 20° 12' 13.66"S/ 21° 1' 8.98"E

Border road back to Xai Xai - 20° 8' 7.72"S / 20° 59' 58.11"E

Gcwihaba Cave Park Boundary

507126, 7777481

506854, 7766084

520291, 7764425

530872, 7776883

550260, 7784384

536401, 7792156

UTM34S

Tableau 68 Données GPS fournies par le Muséum.

12.2. ANNEXE N°2 DU CHAPITRE N°4 : CARTE DE LA REGION FOURNIE PAR LE *MUSEUM DE GABORONE* EN 2021.

Une carte des pistes de sables permettant de rejoindre les secteurs de *Gcwihaba Hills* et de *Koanaka Hills* nous a été fournie par le Muséum de Gaborone avant la mission.

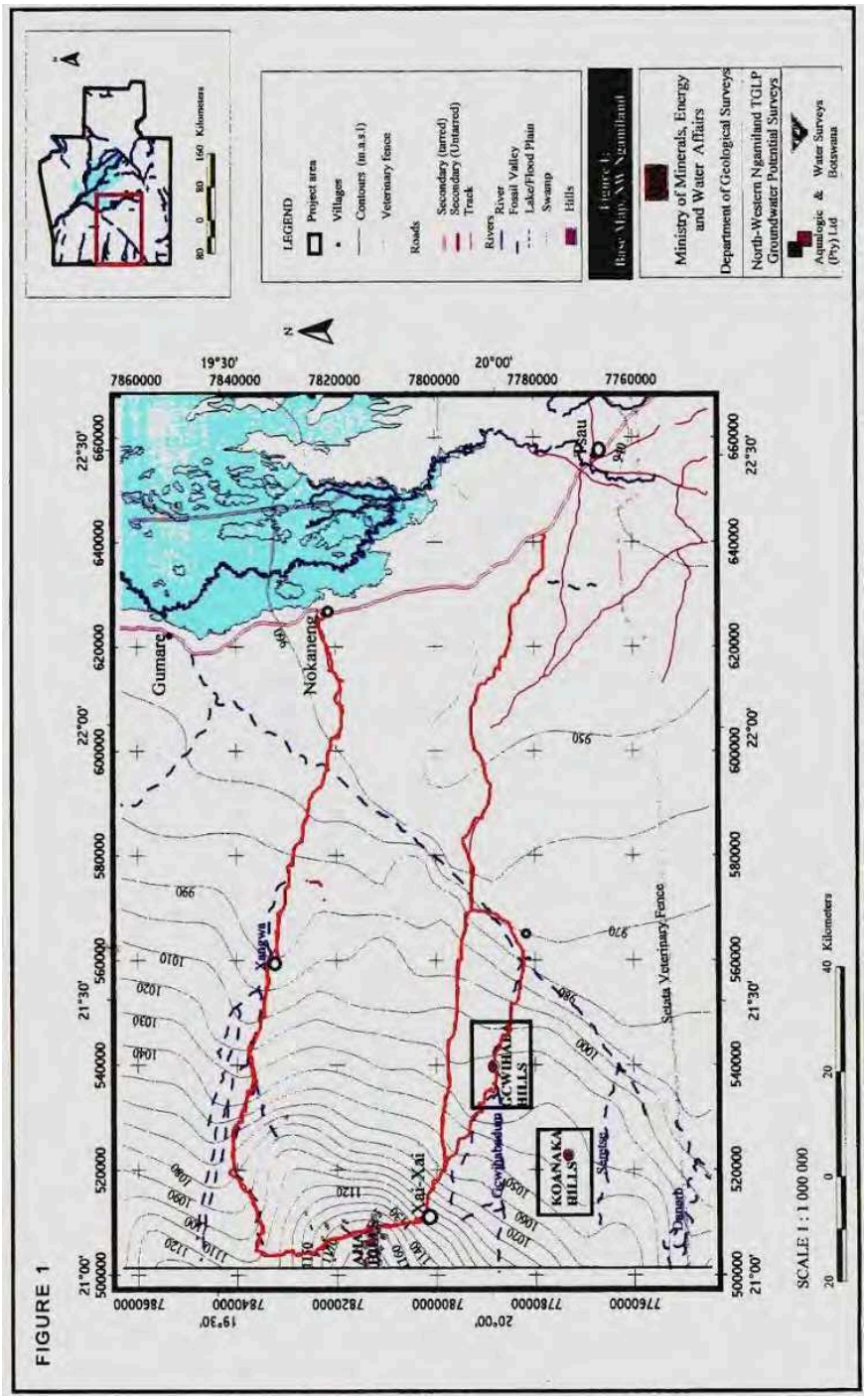


Figure 1205 Carte de la région fournis par le Muséum en 2021.

12.3. ANNEXE N°3 DU CHAPITRE N°4 : CARTE DES PISTES FOURNIE PAR LE MUSEUM.

Une carte détaillée des pistes d'accès aux secteurs de *Gcwihaba Hills* et de *Koanaka Hills* nous a été fournie par le Muséum de Gaborone.

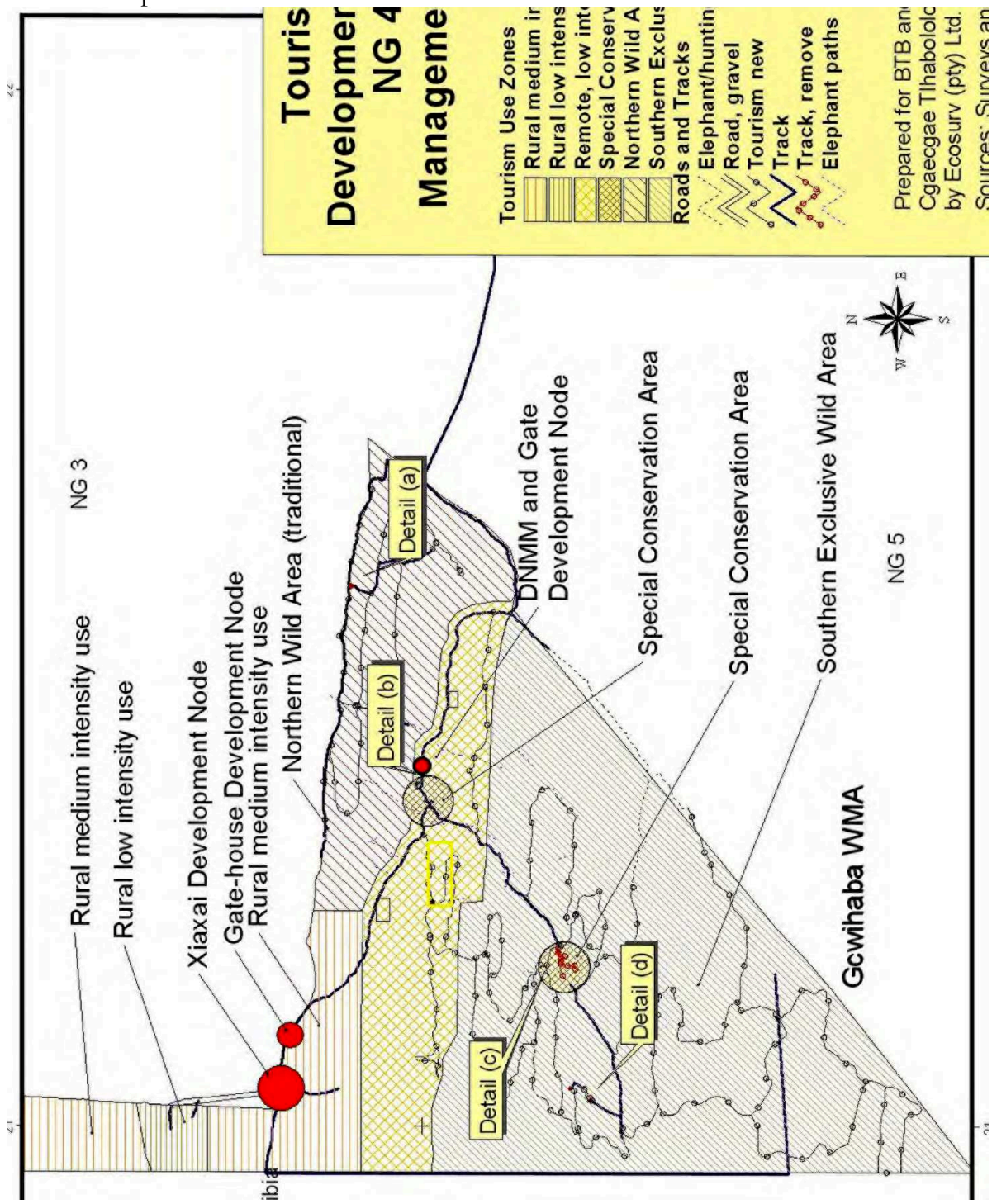


Figure 1206 Pistes d'accès aux secteurs de Gcwihaba Hills et de Koanaka Hills.

12.4. ANNEXE N°4 DU CHAPITRE N°4 : CARTOGRAPHIE DES PALEODRAINAGES

Cartes des paléodrainages de l'Afrique du Sud de De Wit (2009)

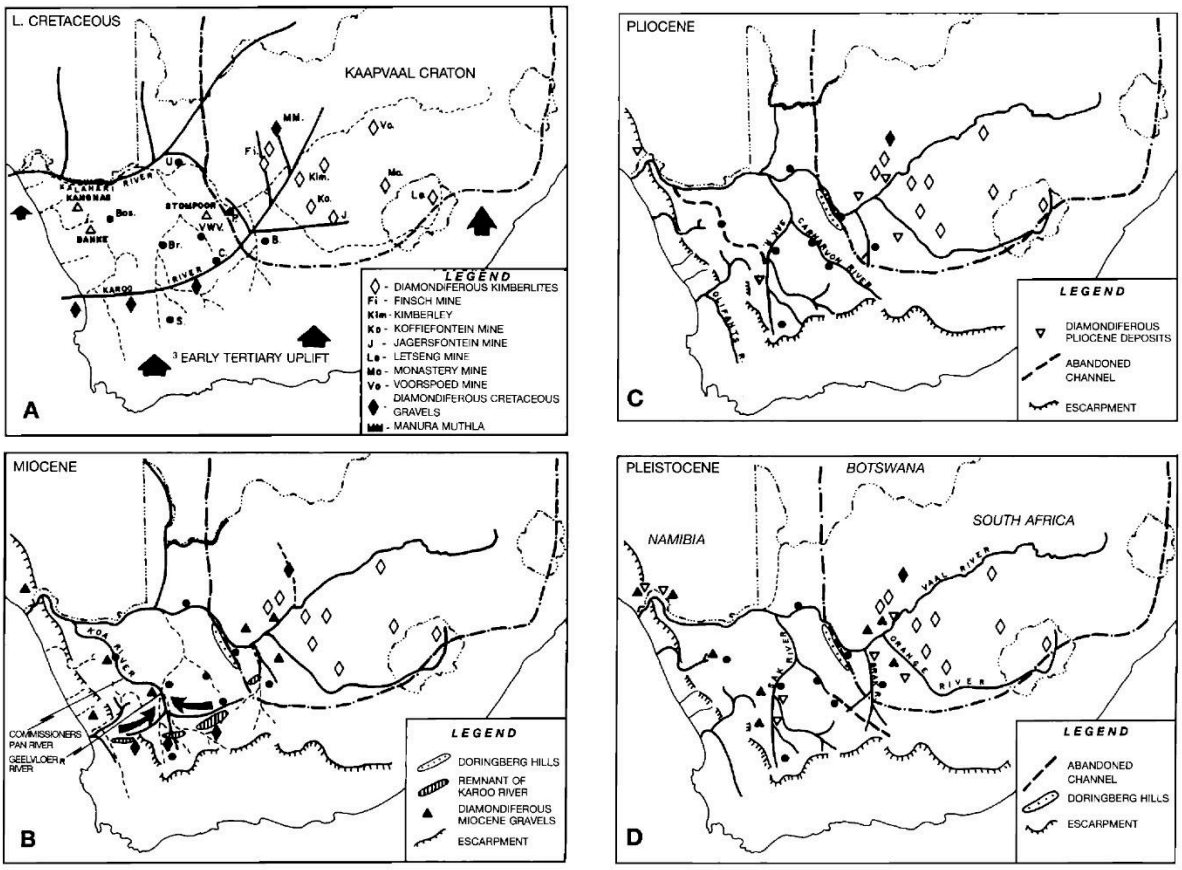


Figure 1207 Reconstitution des paléodrainages (Source : De Wit, 2009).

Cartes des paléodrainages de Moore et Larkin (2001)

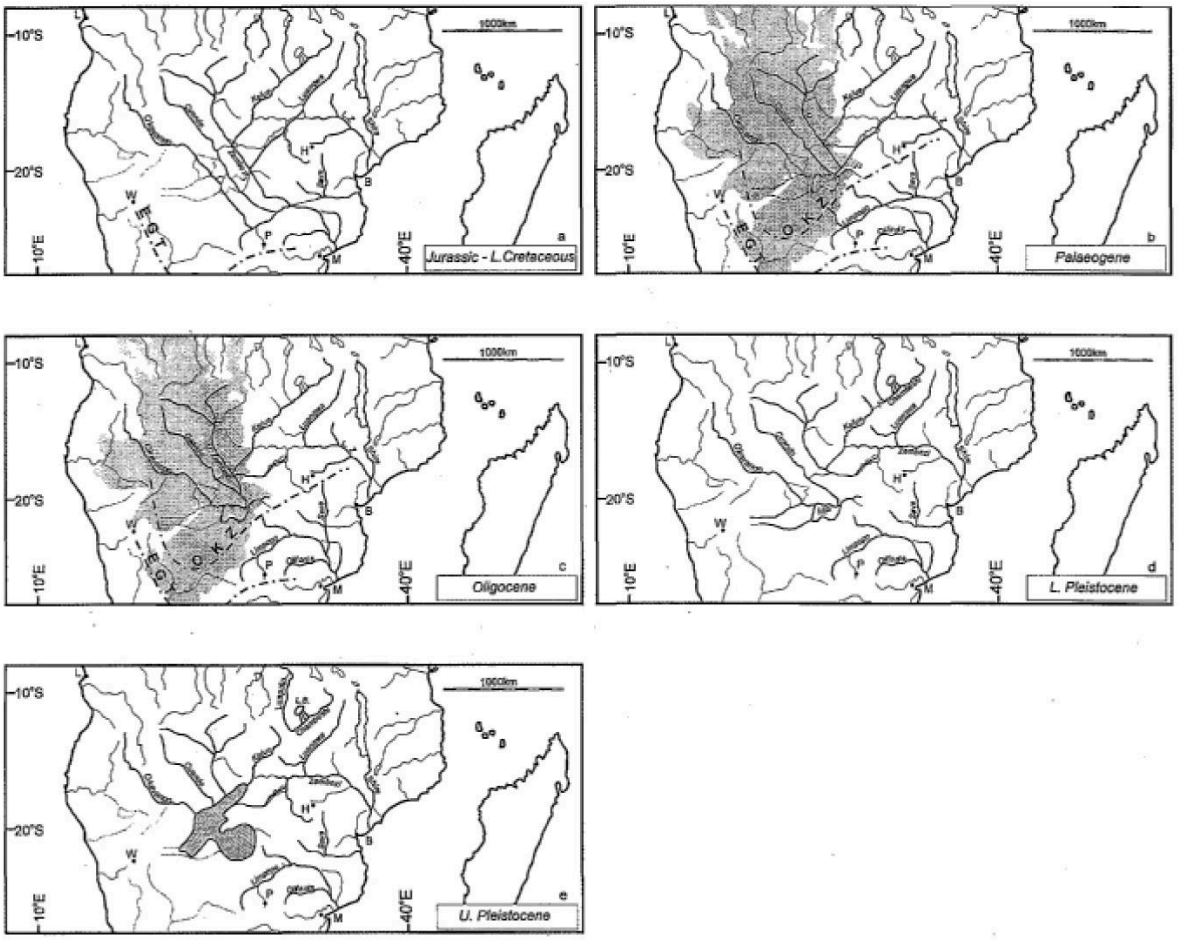


Figure 1208 Reconstitution des paléodrainages (Source : Moore et Larkin 2001).

Cartes des paléodrainages de Cotterill (2006)

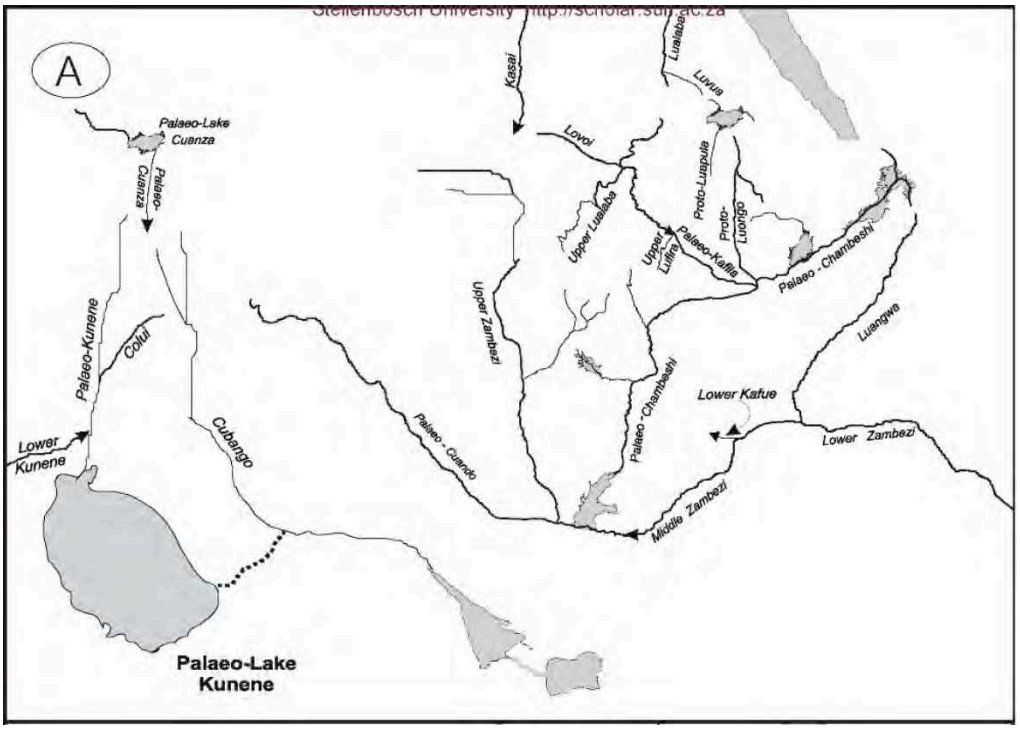


Figure 1209 Drainages au Pliocène supérieur (Source : Cotterill, 2006, p.230).

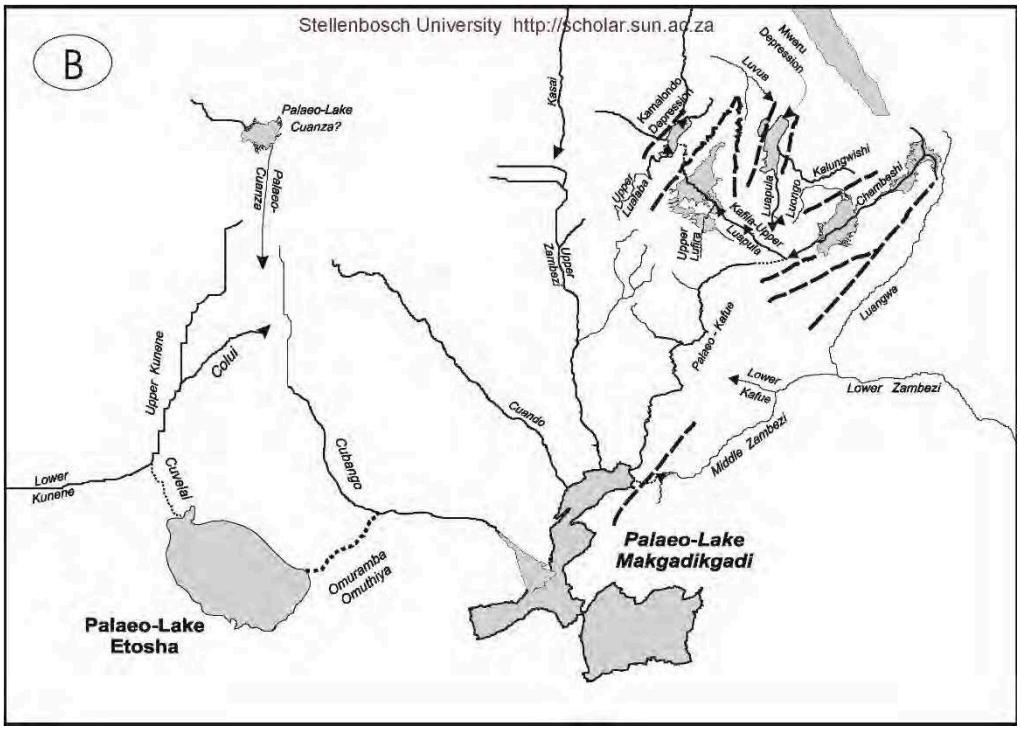


Figure 1210 Drainages au Pléistocène inférieur(Source : Cotterill, 2006, p.232).

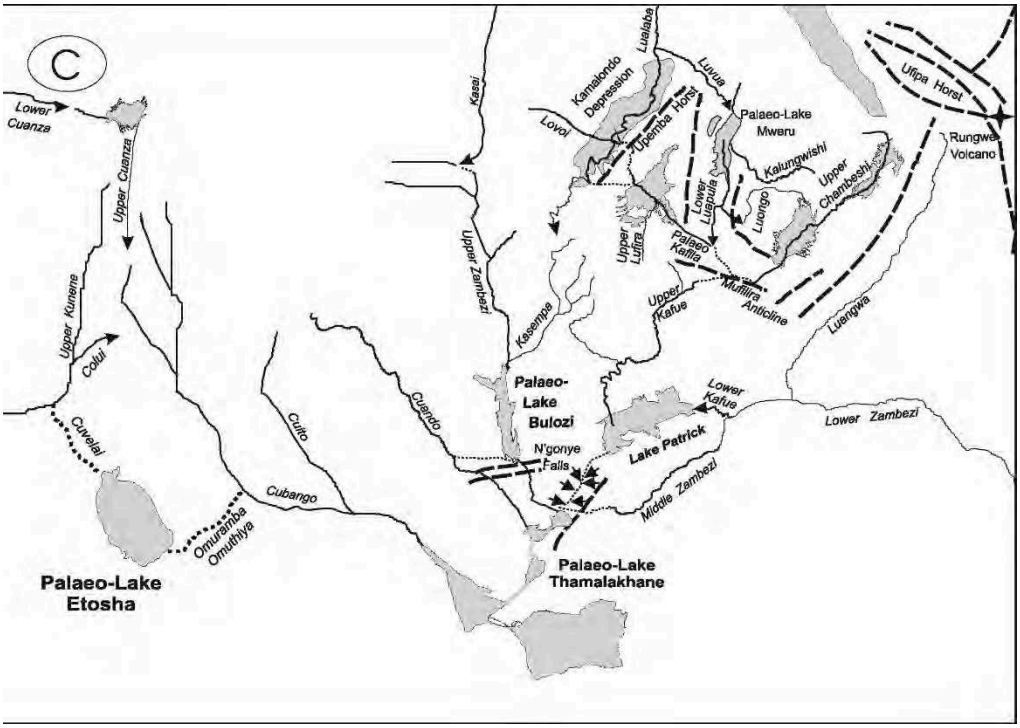


Figure 1211 Drainages au Pléistocène moyen(Source : Cotterill, 2006, p.230).

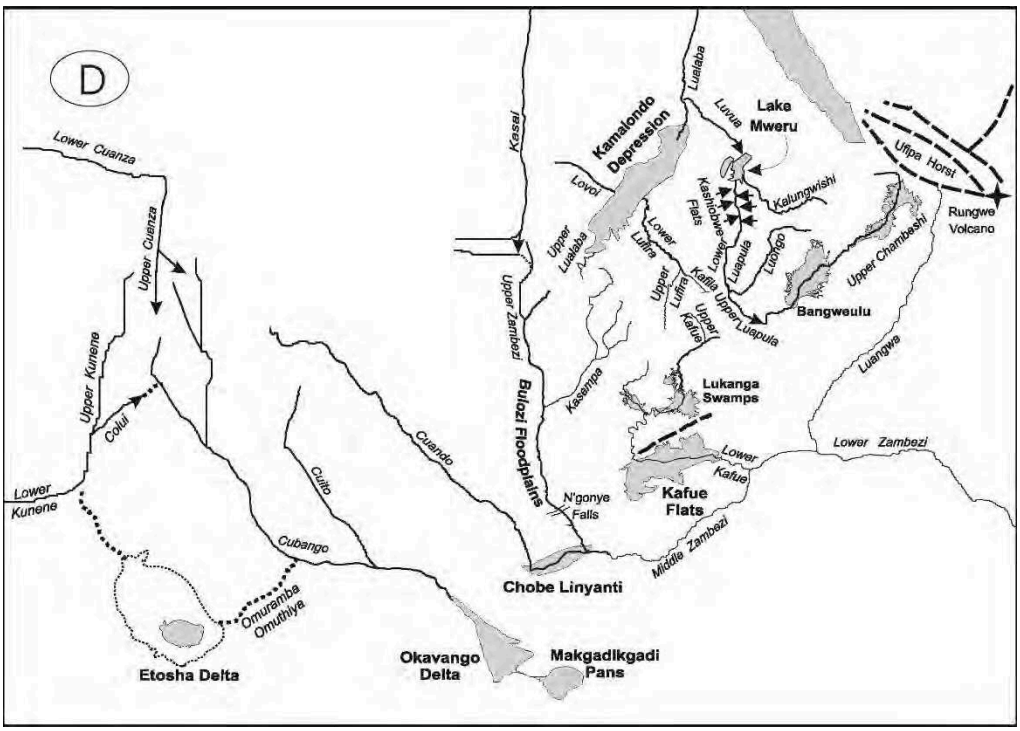


Figure 1212 Drainages au début du Pléistocène supérieur(Source : Cotterill, 2006, p.232).

Cartes des paléodrainages de Moore, Cotterill, Main et Williams (2007)

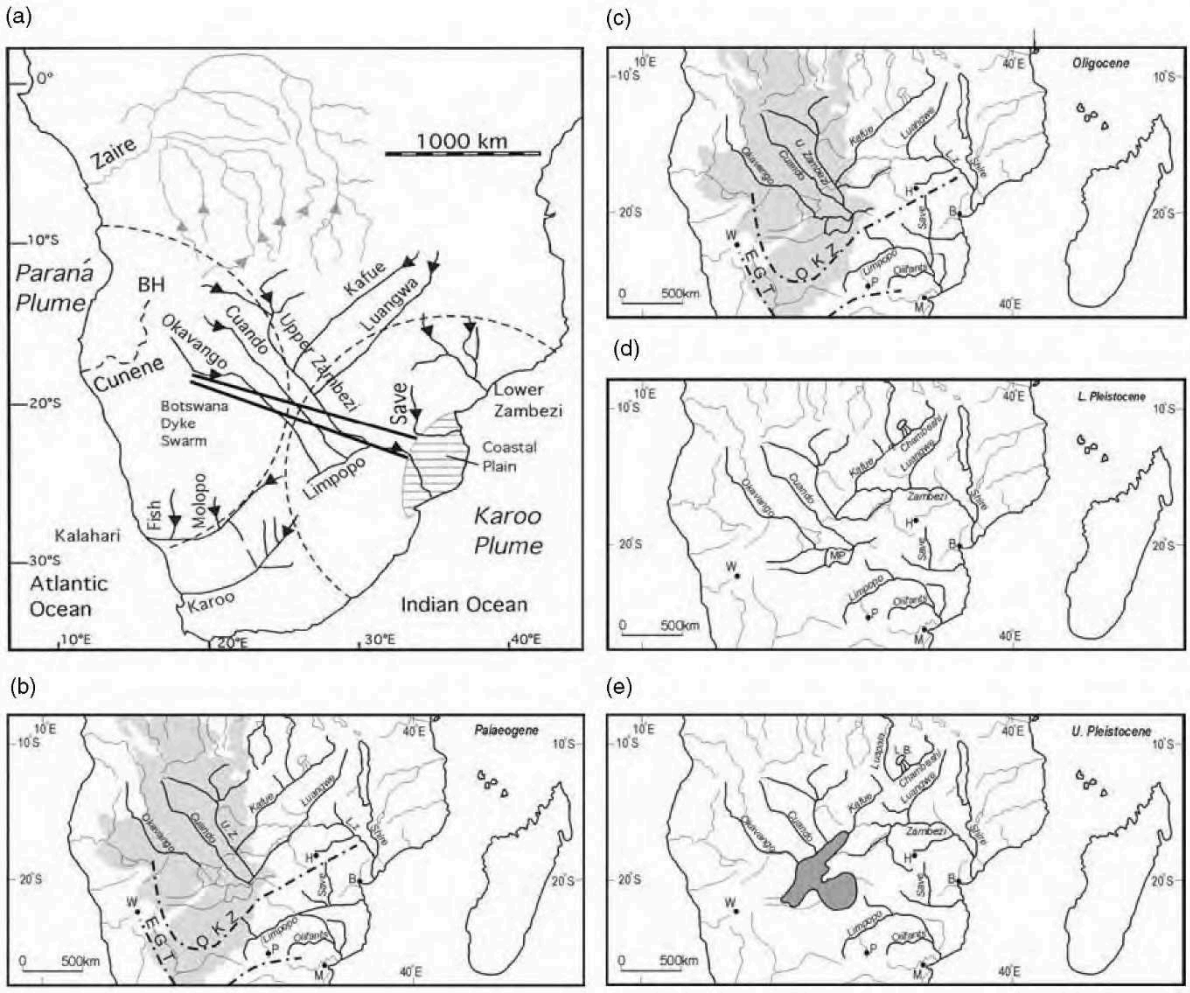


Figure 1213 Reconstitution des paléodrainages (Source : Moore, Cotterill, Main et Williams, 2007, Fig.15.13, p.322).

Cartes des paléodrainages de Goodier (2010)

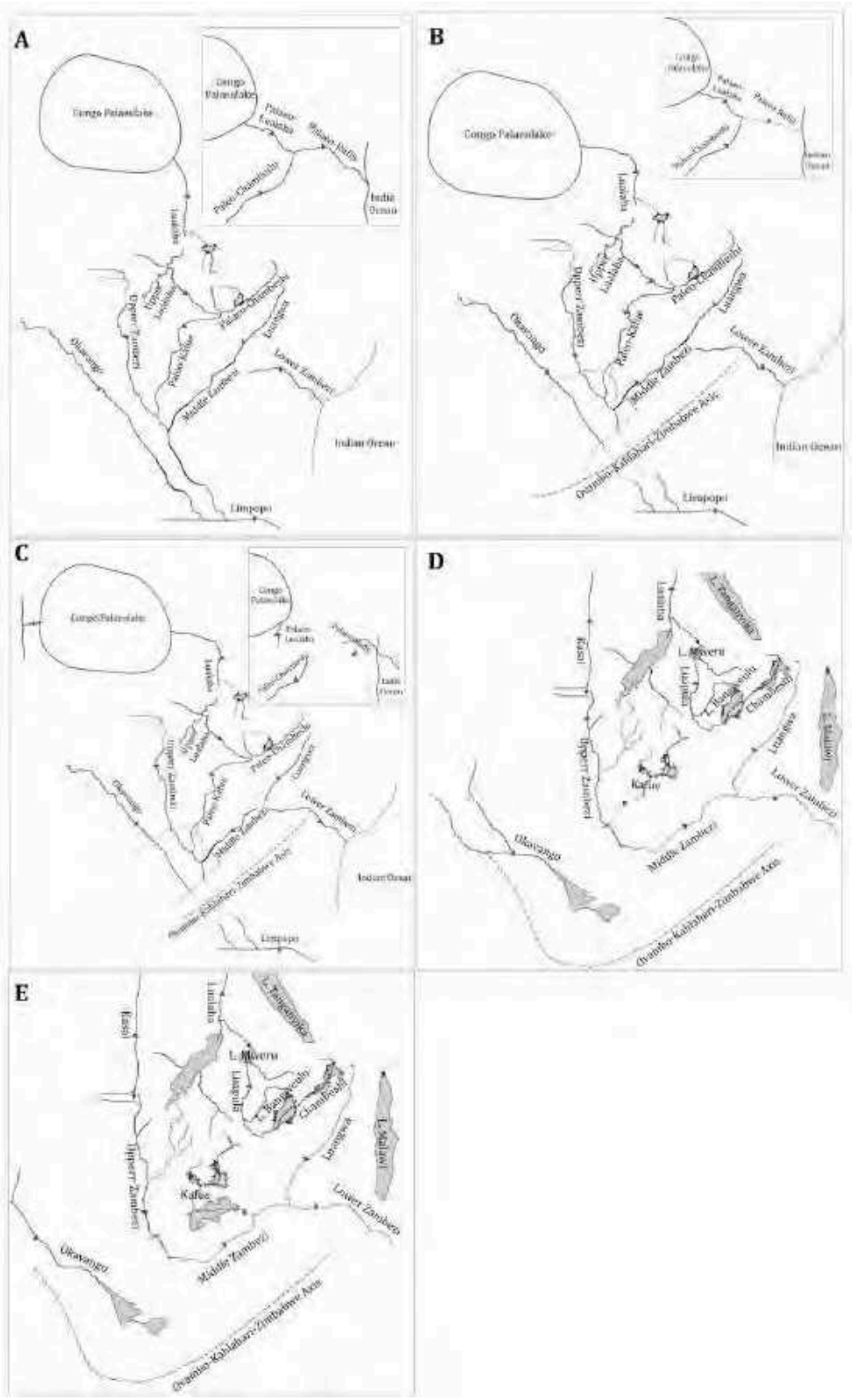


Figure 1214 Reconstitution des paléodrainages (Source : Goodier, 2010).

Cartes des paléodrainages de Moore, Cotterill et Eckardt (2012)

Résumé des principaux épisodes de l'évolution du drainage sur le plateau du Kalahari.

Miocène supérieur.

Le soulèvement du Paléogène supérieur le long de l'axe OKZ rompt le lien entre le système de drainage Paléo-Chambeshi/Haut-Zambèze et le fleuve Limpopo pour initier le dépôt fluvio-lacustre dans le bassin du Kalahari résultant, la sédimentation montrant un chevauchement progressif vers le nord.

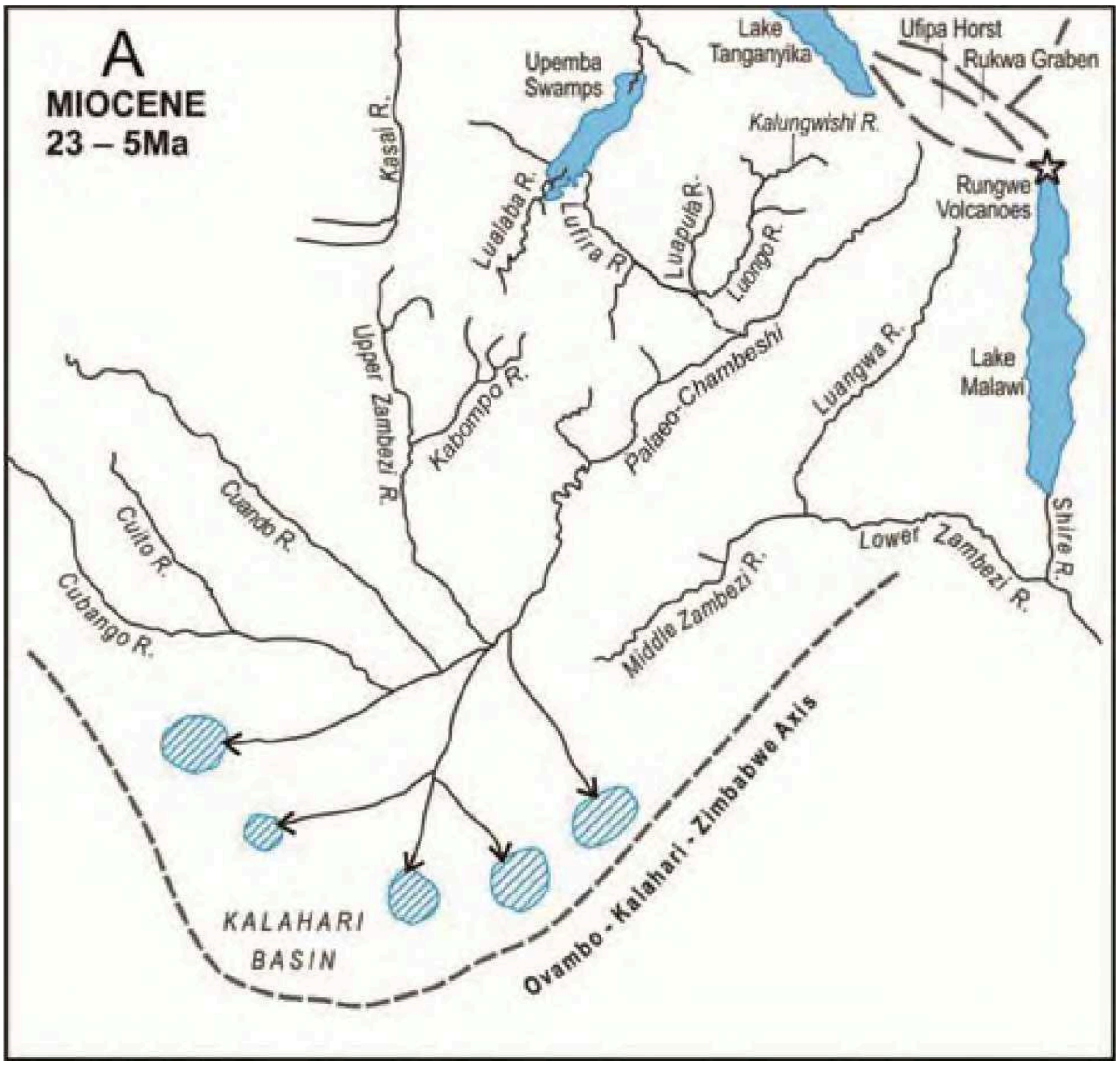


Figure 1215 Drainages au Miocène (Source : Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Fig.7, p.15).

Pliocène supérieur.

Le milieu du Zambèze capture le Paléo-Chambeshi/Proto-Kafue/le Haut-Zambèze, coupant la principale source d'approvisionnement en sédiments du bassin du Kalahari, laissant les rivières Cuito-Cubango comme des reliques de l'ancien système de drainage endoréique. La rivière Paléo-Chambeshi redirigée initie l'incision de la gorge orientale de Batoka (13).

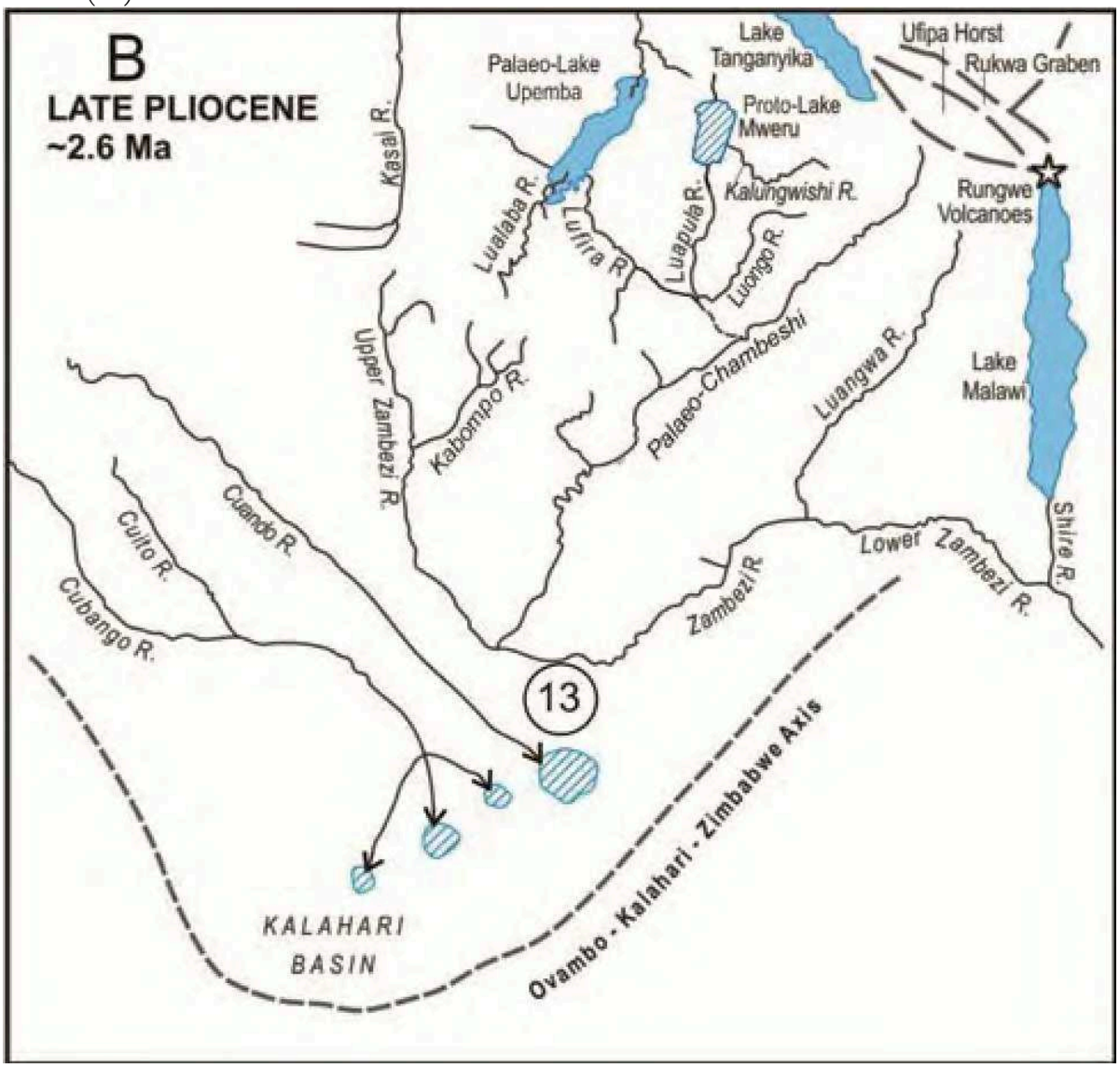


Figure 1216 Drainages au Pliocène supérieur (Source : Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Fig.7, p.15).

Pléistocène inférieur.

Le soulèvement le long du cours du Zambèze supérieur le long de la faille de Chobe associé à la propagation sud-ouest du Rift est-africain détourne le système de drainage Paléo-Chambeshi/Haut-Zambèze vers le nord du Botswana pour initier la mise en place du Paléolac *Deception* avec une élévation du rivage de 990 à 1000 m. Les premières liaisons entre le Chambeshi supérieur et le Proto-Kafue (11), et le second système de drainage et le Paléolac *Deception* existaient tous à cette époque, bien avant la formation du bassin versant Kafue-Machili (18).

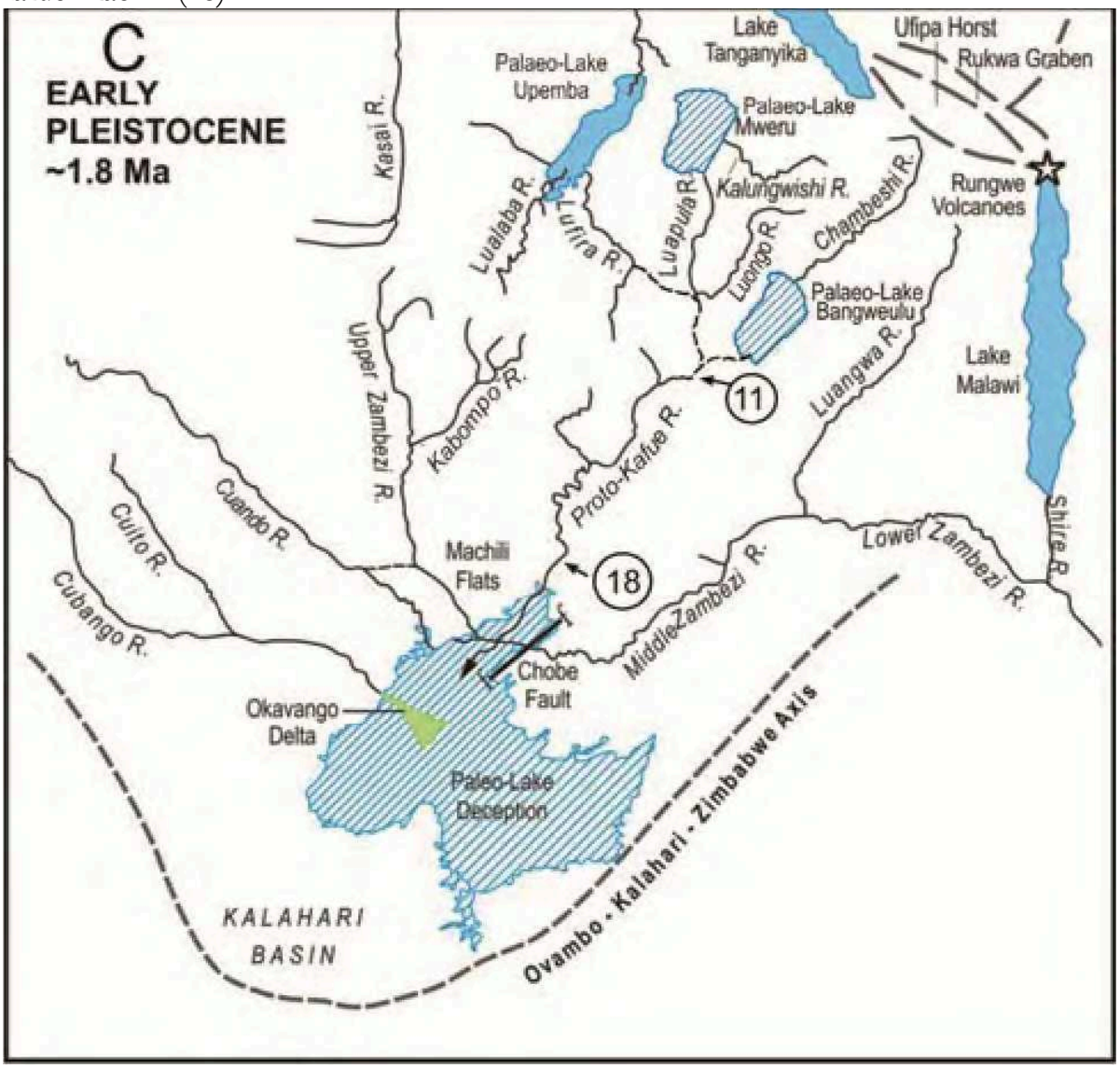


Figure 1217 Drainages au Pléistocène inférieur (Source : Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Fig.7, p.15).

Début du Pléistocène moyen

Les perturbations du drainage du début au milieu du Pléistocène (lignes pointillées) ont suivi la séquence chronologique pour remodeler un archipel de zones humides : la liaison entre le Chambeshi supérieur et le Kafue est rompue par le soulèvement du bassin versant du Congo-Zambèze (11).
Le **Paléolac Déception**, qui a un rivage à **995 m**, se contracte à l'altitude de **945 m** pour devenir le **Paléolac Makgadikgadi**.
La rupture de la liaison entre le Kafue et le Haut-Zambèze (18) a initié le **Paléolac Patrick** dans le graben du Kafue (9), avec contraction du **lac Thamalakane** à **936 m** dans le bassin de Makgadikgadi**.**
Le **Paléolac Bulozi** (10) mis en eau dans les environs des **chutes N'gonye.**
Le **Paléolac Thamalakane à 936 m** se rapproche d'une ligne de rivage à 920 m.
La liaison entre le Cuando supérieur et le Zambèze a été rompue pour isoler la **plaine de Matabele-Mulonga** (22).
Le haut et le milieu du Zambèze se reconnectent (20).
Le lac de 920 m se réduit à 912 m de rivage.
Le **Paléolac Patrick** (9) est drainé par un affluent du Zambèze moyen et établit le cours moderne de la rivière Kafue inférieure (23) » Moore, Cotterill et Eckardt (2012).

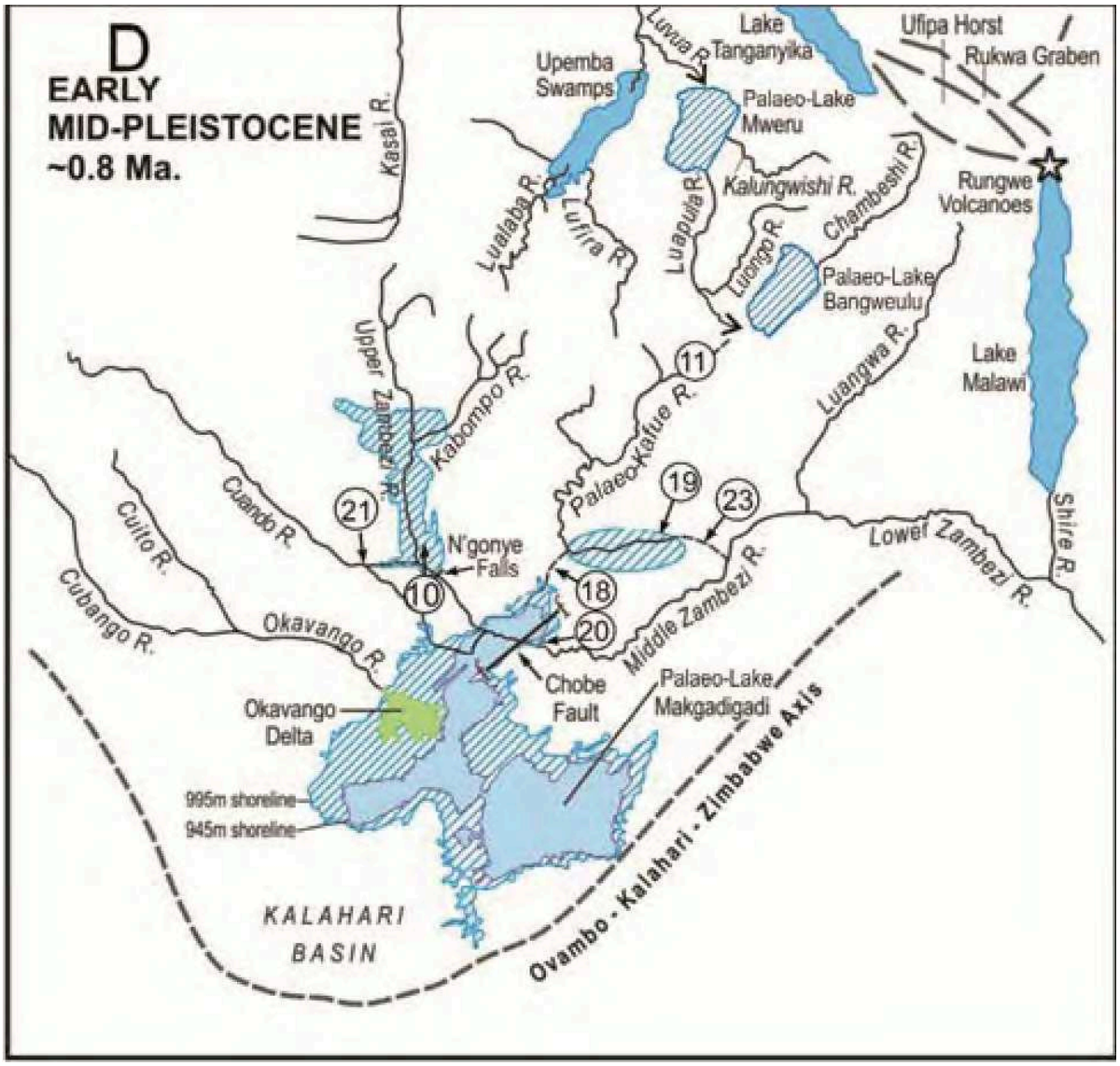


Figure 1218 Drainages au Pléistocène moyen (Source : Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Fig.7, p.15).

Cartes des paléodrainages de Ponte (2018, Fig.2.20)

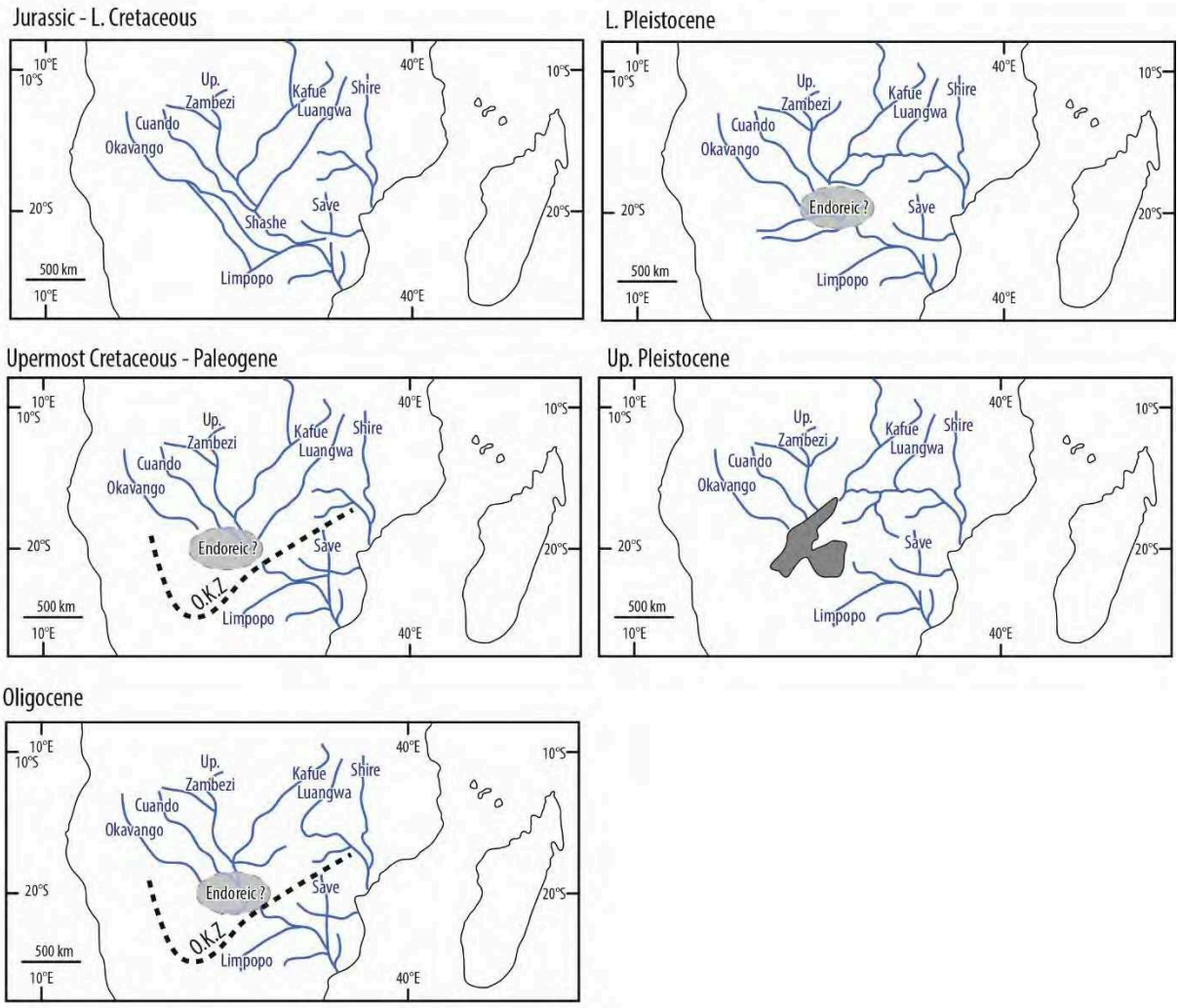


Figure 1219 Reconstitution des paléodrainages (Source : Ponte, 2018, fig.2.20).

Cartes des paléodrainages de Fierens (2019)

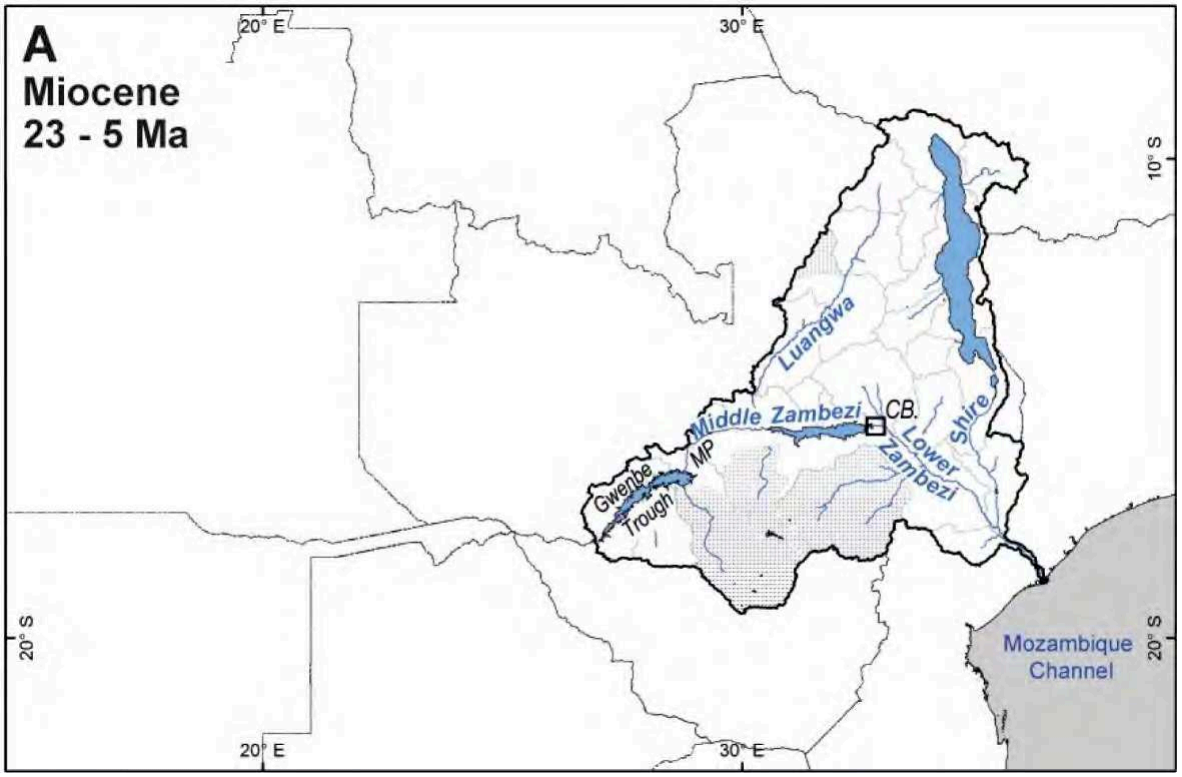


Figure 1220 Drainages au Miocène (Source : Fierens, 2019).

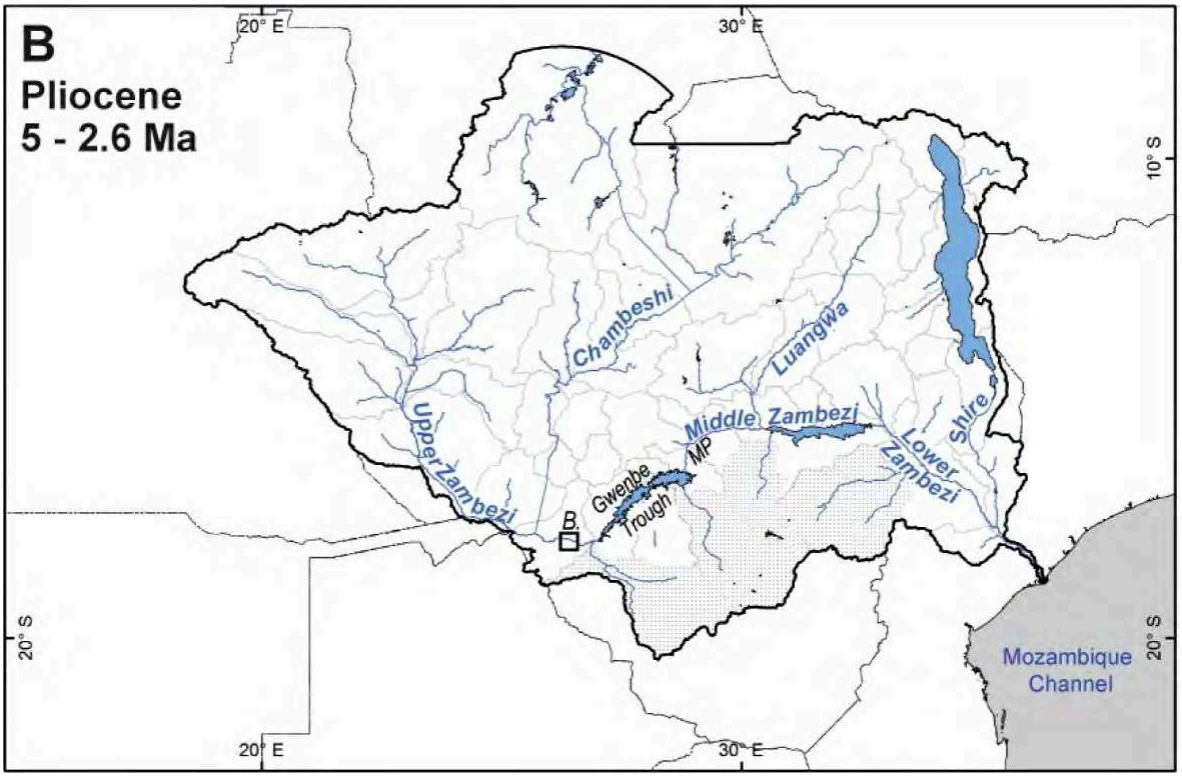


Figure 1221 Drainages au Pliocène (Source : Fierens, 2019).

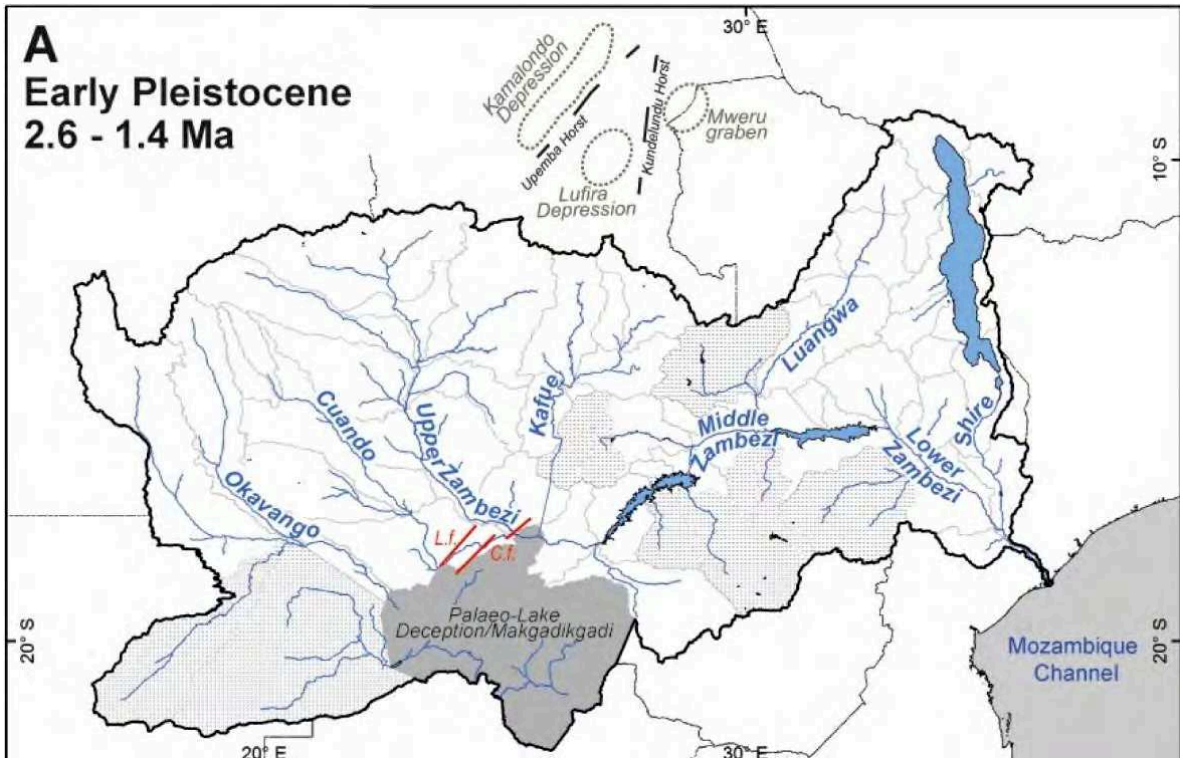


Figure 1222 Drainages au Pléistocène inférieur (Source : Fierens, 2019).

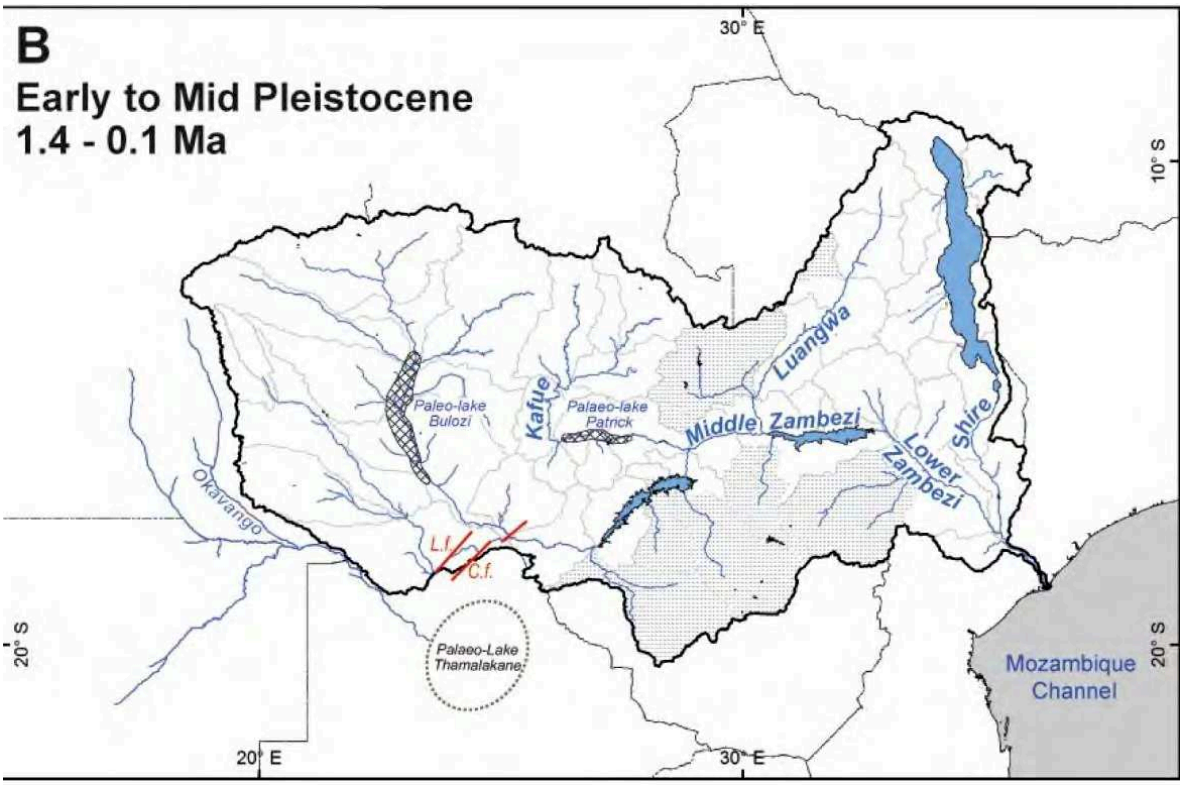


Figure 1223 Drainages du Pléistocène inférieur à moyen (Source : Fierens, 2019).

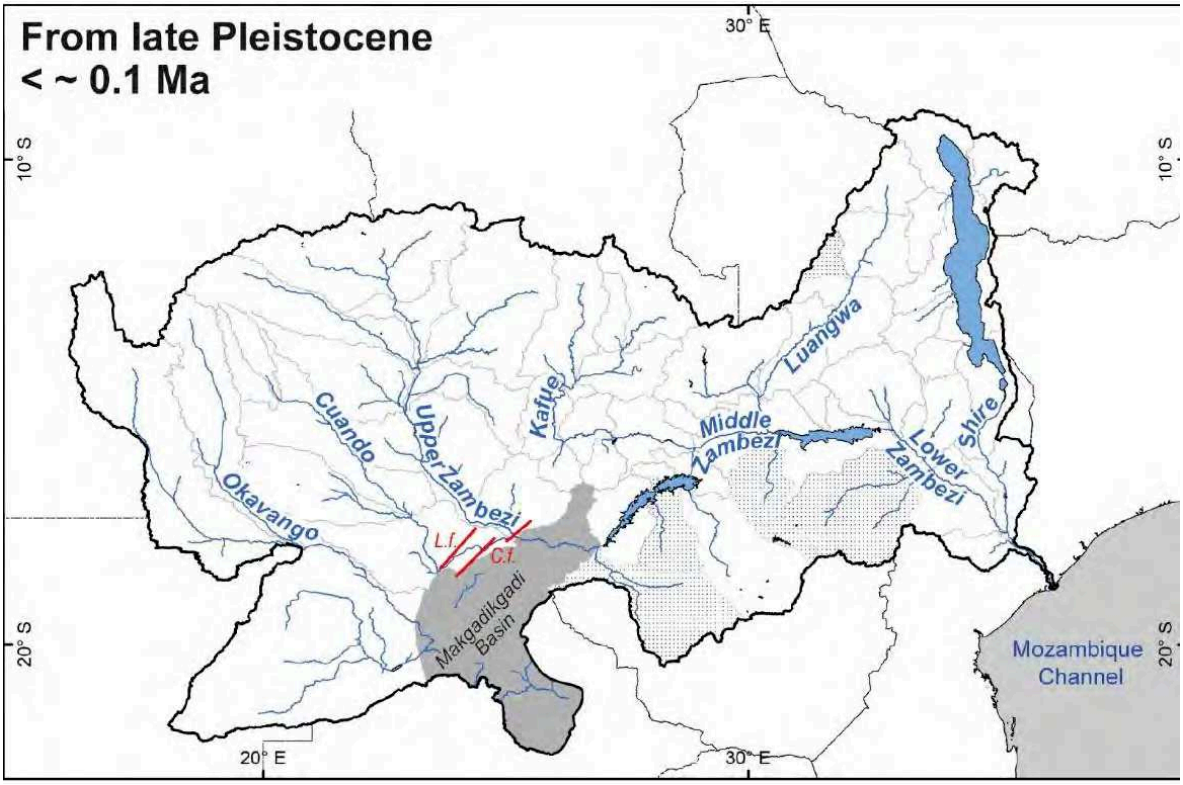


Figure 1224 Drainages au Pléistocène terminal (Source : Fierens, 2019).

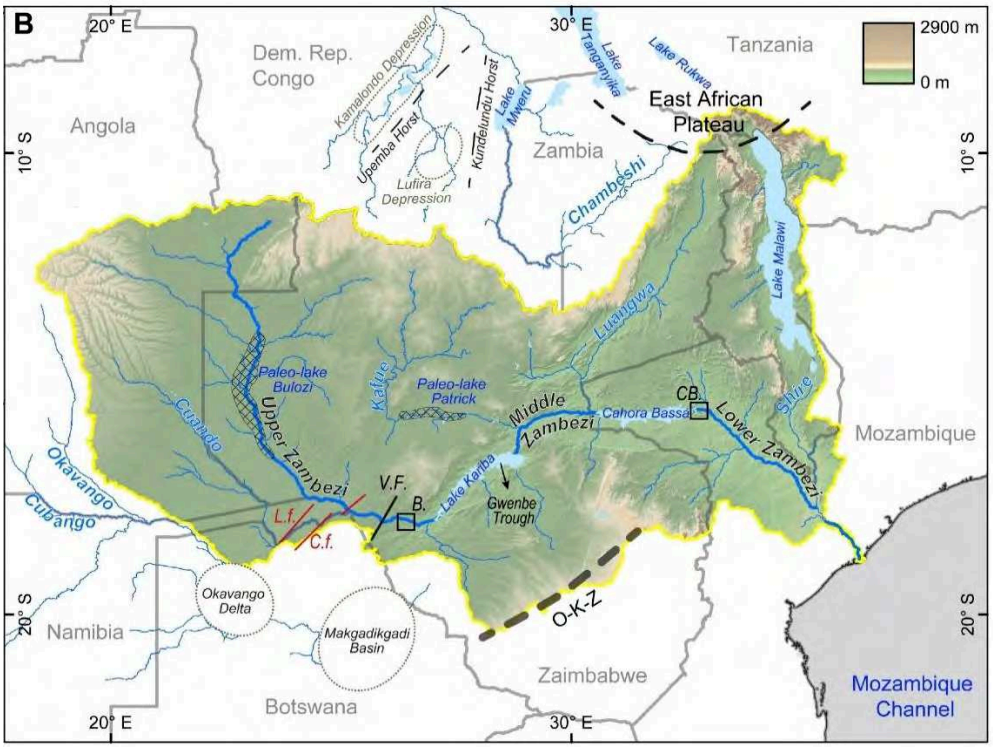
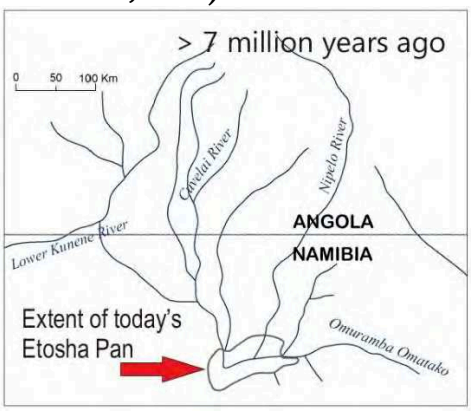
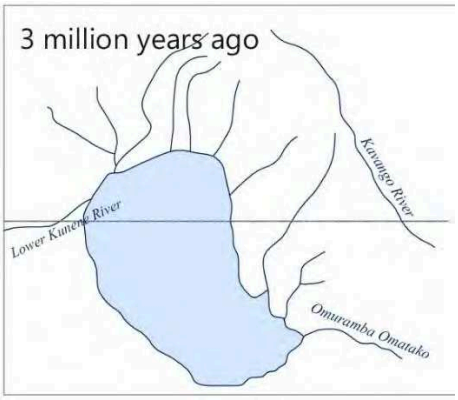
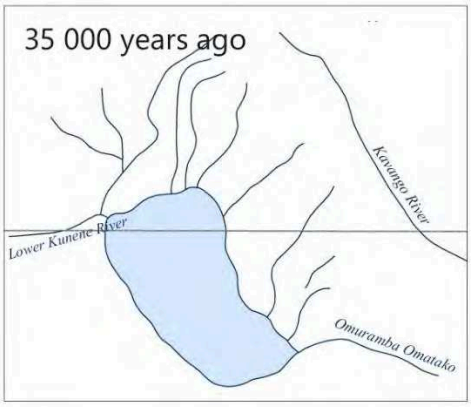


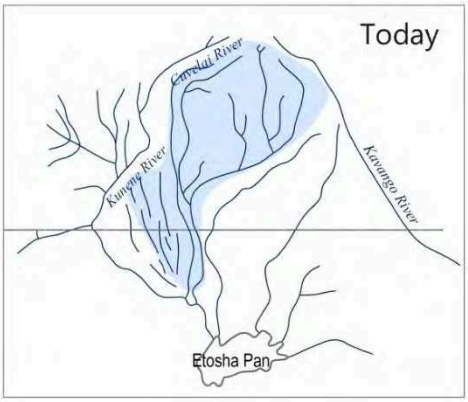
Figure 1225 Drainage actuel (Source : Fierens, 2019).

Carte du secteur du lac d'Etosha (Source : Haddon 2015 p.201 d'après Stuart-Williams, 1992)









12.5. ANNEXE N°5 DU CHAPITRE N°4 : TRADUCTION DES TABLEAUX CHRONOLOGIQUES DES EVENEMENTS TECTONIQUES ET DES CHANGEMENTS HYDROLOGIQUES (MOORE, COTTERILL ET ECKARDT, 2012)

Tableau 1 traduit de Moore, Cotterill et Eckardt (2012, p.388).
Contexte plio-pléistocène des principales formes de relief lacustres et fluviatiles et leurs associations avec les évènements géomorphologiques sur le plateau du Kalahari en Afrique centrale et méridionale.

n	Formes lacustres	Age (Ma)	Preuve	Interprétation géomorphologique
1	Champ de dune Alad	Pliocène supérieur et avec un âge minimum du Pléistocène inférieur *Late Pliocene Early Pleistocene*	les dunes linéaires sont les plus anciennes formes de relief fossiles tronquées par la faille de Gumare, coïncidant avec le littoral du paléolac Deception de 995 m	Plus ancien que le paléolac Deception, âge minimum absolu contraint par des artefacts de l'ESA d'après Miller 2008
2	**Paléolac Deception**	Age minimum **entre 2.2 à 1.8 Ma**	Antérieur au **Paléolac Makgadikgadi** (Mc Farlane et Eckardt (2008) La datation moléculaire pour l'initiation du **Paléolac Bulozi** limite l'afflux de la rivière **Paléo-Chambeshi**	Le champ de dunes du Pliocène tardif est antérieur au **Paléolac *Deception*** jusqu'à la formation du **Paléolac Bulozi**, soutenue par l'afflux de la rivière **Paleo-Chambezi**. Étendue approximative jusqu'au **Paléolac *Deception*** = 175 000 km.
3	Deception Ridge		Barre offshore lié au Paléolac Deception	
4	Ligne de rivage fossile à 945 m du **Paléolac Makgadikgadi**	Au minimum d'un âge moyen de 800 000 ans	Datation moléculaire de l'expansion démographique chez *Crocodylus*.	Plus jeune que le **Paléolac *Deception*** avec une superficie estimée à 65 000

		et entre **1.5 Ma et 500 000 ans**	Radiation adaptative des poissons-chats Synodontis	km mais auparavant estimée à 34 000 km
5	Gidikwe Ridge		Barre offshore reliée au PLM de 945 m.	Formé au sein de Paléolac Deception et paléolac Makgadikgadi.
6	Transverse Dunes		Sable retravaillé et repositionné sur le fond du lac abandonné	Contemporain avec Paléolac Makgadikgadi
7	936 m shoreline of **Paleolac Thamalakane**	Age minimum de 500 000 ans mais sûrement Pléistocène inférieur *Early Pleistocene*	Un site ESA à 6 km au nord de Gweta, daté plus ancien que 500 000 Ma	Antérieur au Paléolac Makgadikgadi et aux Dunes Transverses Le Paleolac Thamalakane est antérieur à la fin de l'ESA
8	Ligne de rivage fossile à 920 m et à 912 m	Age minimum au Pléistocène moyen *Mid-Pleistocene*	La ligne de rivage fossile est contrainte par des artefacts MSA et LSA	Les artefacts MSA limitent les âges minimums sur les rivages de 920 et 912 m, respectivement
9	Calcite recouvrant les sédiments lacustre près de Twin Rivers, au nord est de la plaine de Kafue	Age minimum: 0.5 Ma	Les datations Uranium sur les coulées stalagmitiques au-dessus des sédiments lacustres fixent un âge minimum de 200 000 ans, mais les sédiments lacustres sont peut-être plus vieux que 500 000 ans	Les datations Uranium limitent la durée de vie du Paléolac Patrick au Pléistocène moyen
10	Graben comblé par les plaines inondables de	Pléistocène moyen avec un âge	Failles délimitant un fossé rempli de sédiments. Le	Le débit du Haut Zambèze (et du Cuando ?) est

	Bulozi, Barotseland, ouest de la Zambie	minimum de 140 000 ans *Mid-Pleistocene*	Ferricrete pédogénique 1 s'est formé sous les sables du Kalahari, dans le lit de la rivière, en aval des chutes de N'gonye, lors de la mise en eau de la ZU.	retenu dans le fossé de Bulozi, en amont des chutes de N'goye, pour entretenir le paléolac Bulozi
11	Bassin versant du Congo-Zambèze	2.2 à 1.8 Ma (3.4 à 0.6 Ma)	Coupe-vent sur le bassin versant Congo-Zambezi. Affinités biogéographiques de la biodiversité aquatique.	La formation du bassin versant Congo-Zambèze a isolé le Lac Bangweulu (incluant la rivière du Haut Chambeshi) qui a maintenu le Paleolac Deception
12	Dépression de Bangweulu	2.2 à 1.8 Ma	La datation moléculaire des événements phylogénétiques chez les poissons limite l'initiation de Bangweulu.	La liaison avec la rivière Proto-Kafue a été interrompue après la formation de Bangweulu.
13	Gorge est de Batoka	3 à 2.5 Ma	Faible gradient et chenal élargi du Zambèze ; par rapport à l'ouest de Batoka, les flancs de la gorge sont plus découpés.	L'écoulement antérieur du fleuve Paléo-Chambeshi a entaillé l'est de Batoka, avec un débit et une érosion bien plus importants que l'incision plus récente du fleuve Zambèze supérieur.
14	Rapides de Chimamba	1.1 Ma à 650 000 ans	Ce *knickpoint* de 6 m délimite l'étendue en amont d'une terrasse abandonnée préservée sous forme de bancs proéminents le	La limite géomorphologique délimite une rupture significative du débit du fleuve et/ou une période de débit réduit du

			long de la base de l'est de Batoka	fleuve, un chenal abandonné de gorge héritée, pauvrement incisé par un fleuve Zambèze sous-équipé
15	Gorge ouest de Batoka	1.1 Ma à 650 000 ans	Flancs profondément encaissés, presque verticaux ; de courts affluents profondément encaissés ont creusé une plaine basaltique latérale. Les graviers plus récents contiennent des artefacts lithiques MSA (Mode 3) qui limitent les taux d'érosion sur environ 29 km de la partie occidentale des gorges de Batoka.	Gorge creusée à 40,7 km en amont des rapides de Chimamba (discordance de Batoka)
16	Plaine de Machili	Age minimum = Pléistocène inférieur *Early Pleistocene*	Structure contrôlée par une faille. Des graviers fluviaux enfouis sous des alluvions (Kafue Flats et Machili Flats) témoignent de l'écoulement sud-ouest du plateau du Kalahari vers le delta de l'Okavango et le fleuve Cubango et/ou le Haut-Zambèze.	Megadelta où la rivière Paléo-Chambeshi débouche dans la dépression de l'Okavango ; succédé par le plateau du Kalahari jusqu'à ce que le soulèvement forme un bassin versant entre les plaines de Kafue et de Machili
17	Crête de Simamba	Pléistocène moyen *Mid-Pleistocene*	Les sables du Kalahari sont postérieurs à la formation du graben de Machili	Les sables du Kalahari sont antérieurs à la formation du Paléolac Patrick ;

			et de l'écoulement du plateau du Kalahari, mais antérieurs au soulèvement du bassin versant de Kafue-Machili qui a perturbé le plateau du Kalahari	ils témoignent d'un tectonisme récurrent dans les fossés de Machili et de Kafue.
18	Bassin versant du Kafue-Machili	Pléistocène moyen *Middle Pleistocene*	Le foyer de soulèvement le long de l'axe nord-ouest-sud-est de la crête de Simamba a perturbé le plateau du Kalahari	Post-daté de l'ESA et du dépôt des sables du Kalahari, et associé à l'initiation du Paléolac Patrick
19	Plaine de Kafue	Age minimum 200 000 ans	Les datations de la série U sur les coulées stalagmitiques près de Twin Rivers établissent un âge minimum de 200 000 ans, mais les sédiments lacustres sont peut-être plus vieux que 500 000 ans.	Formé après l'établissement du Paléolac Patrick dans le fossé de Kafue entretenu par l'afflux du Plateau Kalahari
20	Haut Zambèze	Pléistocène moyen *Mid-Pleistocene*	En aval de Bulozi, le cours supérieur du fleuve Zambèze a entaillé le Horst de Sioma surélevé (au nord-ouest de la plaine de Machili) ; les rapides du lit du fleuve coïncident avec des failles nord-nord-est à sud-sud-ouest parallèles à la faille de Chobe.	Les *Knickpoints* (rapides) dans le profil de la rivière entre Mambova et les chutes Victoria représentent des failles orientées nord-sud associées au horst de Linyanti ; les rapides de Mambova et de Katombora délimitent des blocs faillés du horst de Chobe
21	Ferricretes 1 du channel du Haut Zambèze	Pléistocène moyen	Ferricrete pédogénique préservé en	La mise en eau du Haut-Zambèze, en amont du Paléolac

		Mid-Pleistocene	discordance dans le chenal du Haut-Zambèze, entre les chutes Victoria et N'gonye	Bulozi, coïncide avec la formation de ferricrète pédogénique sous les sables du Kalahari
22	Plaine de Matebele-Mulonga	Pléistocène moyen (?) *Mid-Pleistocene (?)*	Les carottes de forage ont révélé des graviers fluviaux diamantifères enfouis sous des alluvions	L'ancien chenal de Paléo-Cuando était un affluent de la rive ouest du Zambèze
23	Lower Kafue River	Pléistocène moyen *Mid-Pleistocene*	Terminaison du paléolac Patrick	Capture de la plaine de Kafue (Paléo-rivière Kafue) par la source du Zambèze moyen
24	Chute Victoria (Mosi-wa-Tunya)	Pléistocène terminal *Late Pleistocene*	Point de rupture le plus profond du Zambèze, témoin de l'érosion de la partie occidentale des gorges de Batoka. Sa position actuelle reflète un recul de 40,7 km.	Les taux de recul des points de rupture sont limités par les preuves archéologiques

Tableau 69 Tableau 1 traduit de Moore, Cotterill et Eckardt (2012, p.388).

Les informations relatives au Paléolac *Deception* sont indiquées en bleu, celles du Paléolac Makgadikgadi en vert et celles du Paléolac Thamalakane en orange (Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, p.388).

Table 1. Plio-Pleistocene context of principal lacustrine and fluvial landforms, and their associations with geomorphological events on the Kalahari Plateau, south-central Africa. Inferred formative events and evidence correspond to respective landforms; their numbering follows a chronological sequence, corresponding to mapping of their geographical context in Figures 2 and 7. Abbreviations: Early Stone Age (ESA); Middle Stone Age (MSA); Late Stone Age (LSA); Kalahari Plateau (KP); Lake Bangweulu including Upper Chambeshi River (Bw); Okavango Delta and Cubango River (Ok); Palaeo-Chambeshi River (PC); Palaeo-Lake Deception (PLD); Palaeo-Lake Makgadikgadi (PLM); Palaeo-Lake Patrick (PLP); Palaeo-Lake Thamalakane (PLT); Palaeo-Lake Bulozi (PLB); Proto-Kafue River (PK); Upper Kafue River (UK); and Upper Zambezi River (UZ). Data Sources are ordered chronologically: [1]Dixey (1944); [2]Clark (1950); Dixey (1950); [3]Grove (1969); [4]Grey (1976); [5]Grey and Cooke (1977); [6]Cooke and Verstappen (1984); [7]Mallick et al. (1981); [8]Jackson (1986); [9]Skelton (1994); [10]Simms (2000); [11]McFarlane and Segadika (2001); [12]Moore and Larkin (2001); [13]Cotterill (2006); [14]Motapa Diamonds Ltd. (2006); [15]Bishop et al. (2007); [16]McFarlane and Eckardt (2008); [17]Miller (2008); [18]Day et al. (2009); [19]Riedel et al. (2009); [20]Moore and Cotterill (2010); [21]Cotterill and de Wit (2011); [22]Goodier et al. (2011); [23]Cotterill et al unpublished data; [24]This Study.

Lacustrine landform	Age (Ma)	Evidence	Geomorphological interpretation
1. Alab dune fields	Late Pliocene Early Pleistocene (minimum age)	Linear dunes are the oldest of the fossil landforms[17] are truncated by the Gomare Fault, coinciding with 995 m PLD shoreline[24]	Older than PLD, absolute minimum age constrained by ESA artefacts[17]
2. Palaeo-Lake Deception (PLD)	Minimum age 2.2 to 1.8 Ma	Predates PLM[9,10] Molecular dating for initiation of PLB constrains PC inflow[21,22,23]	Late Pliocene dune field[17] predates PLD[16,24] until formation of PLB sustained by PC inflow[21,22,23]. Approximate extent of PLD = ~175 000 km²(Table 4)
3. Deception Ridge		Offshore bar related to PLD[16,24]	
4. 945 m shoreline of Palaeo-Lake Makgadikgadi (PLM)	Minimum age 1.5 to 0.8 to 0.5 Ma	Molecular dating of demographic expansion in crocodiles[15] Adaptive radiation of *Syndontis* catfishes[18,21]	Younger than PLD with estimated area of ~65 000 km², but formerly estimated[5] as ~34 000 km²(Table 4)
5. Gidikwe Ridge		Offshore bar linked to the 945 m PLM[1-7,12,24]	Formed within PLD and PLM[12]
6. Transverse Dunes		Reworked and repositioned sands across abandoned lake floor	Postdate desiccation of PLM[24]
7. 936 m shoreline of Palaeo-Lake Thamalakane (PLT)	Minimum age of 500 ka but likely Early Pleistocene,	ESA factory site,~6 km to the north of Gweta[11], dated older than 0.5 Ma[20,24]	Postdates PLM and Transverse Dunes Tenure of PLT predates end of the ESA[11,20,24]
8. Fossil shorelines at 920 m and 912 m	Mid-Pleistocene minimum age	Reconstructed fossil shorelines[4-7,24] constrained by MSA and LSA artefacts[24]	MSA artefacts constrain minimum ages on 920 and 912 m shorelines, respectively[20,24]
9. Flowstone capping lake sediments near Twin Rivers, northeast Kafue Flats	Minimum age = 0.5 Ma	U-Series dates on flowstone above lake sediments set minimum age of 200 ka, but lake sediments are possibly older than 500 ka[10,13,20]	U-Series dates constrain tenure of Palaeo-Lake Patrick within Middle Pleistocene[10,13,20]
10. Graben infilled by Bulozi floodplains, Barotseland, west Zambia	Mid-Pleistocene for minimum 140 ka	Faults bounding sediment-infilled graben (Figure 1). Pedogenic Ferricrete I formed under Kalahari Sands[2] in river channel, downstream of N'gonye Falls when UZ was impounded upstream[13,20]	UZ flow (and Cuando?) impounded in Bulozi graben, upstream of N'gonye Falls, to maintain Palaeo-Lake Bulozi (PLB)

DECEPTION

MAKGAD-
-IKGADI

THAMA-
-LAKANE

Tableau 2 de Moore, Cotterill et Eckardt (2012, p.390).
Résumé du modèle de drainage révisé pour l'Afrique centrale-sud, centré sur l'évolution géomorphologique du nord du Botswana et des gorges de Batoka (chutes Victoria) au cours du Cénozoïque supérieur. L'accent est mis sur les systèmes lacustres de la zone de Rift de l'Okavango, au nord du Botswana. Ce tableau estime les dates des principaux événements tectoniques ou géomorphologiques qui ont influencé les régimes lacustres et les grands cours d'eau du plateau du Kalahari.

	Age estimée	Evènement tectonique ou géomorphologique	Niveau du Megalac
Paléogène tardif *Late Palaeogene*	~25 Ma	Surrection de l'axe Okavango-Kalahari-Zimbabwe (OKZ)	Début du système de drainage endoréique et dépôt de la formation du Kalahari dans le nord du Botswana
Pliocene	3 à 2.5 Ma	Détournement du Paléo-Chambèshi/Haut Zambèze vers le Milieu du Zambèze. Incision de l'est des gorges de Batoka	Diminution spectaculaire de l'apport de sédiments dans le nord du bassin du Kalahari botswanais
Pléistocène inférieur *Early Pleistocene*	Age mal contraint mais avant **2.5 Ma** à **1.4 Ma** à **600 000 ans** *Not tightly constrained, but prior to 2.5 to 1.4 to 600 000 y.*	Soulèvement le long de la faille de Chobe	La rivière Paléo-Chambeshi a été détournée vers le nord du Botswana pour initier le **Paléolac Déception** délimité par un rivage de 990 à 1000 m
Pléistocène inférieur *Early Pleistocene*	**Entre 2.2 et 1,8 Ma** et dans un intervalle de confiance de 95 % entre **3,4 Ma et 600 000 ans**	Le lien entre le Haut Chambeshi et le Kafue a été rompu par le soulèvement du bassin versant Congo-Zambezi pour former le système paléolac du fleuve Proto-Kafue soutenu par les fleuves Haut Zambèze, Proto-Kafue, Cuando et Okavango	Le lac se contracte avec un rivage à 945 m du **lac Paléo Makgadikgadi**

Pléistocène inférieur-moyen *Early Mid-Pleistocene*	**1.1 Ma à 649 000 ans**	Initiation de l'incision de l'ouest des gorges de Batoka	Passage du Paléolac Makgadikgadi au milieu du fleuve Zambèze (lac Patrick?)
Pléistocène inférieur-moyen *Early Mid-Pleistocene*	>500 000 ans pas bien contraint	Isolement du Proto-Kafue du système paléolac du fleuve Zambèze supérieur soutenu par les fleuves Zambèze supérieur, Cuando et Okavango	Contractions du lac à l'altitude de 936 m du Paléolac **Thamalakane**
Pléistocène moyen *Mid-Pleistocene*	>500 000 ans	Retenue du paléolac Bulozi, réduisant l'apport en eau du haut Zambèze	Le lac se contracte jusqu'à 920 m de rivage
Pléistocène moyen *Mid-Pleistocene*	>500 000 ans	Détournement du Haut Zambèze dans le fossé de Bulozi	Le lac se contracte jusqu'à 912 m de rivage, soutenu par les rivières Okavango et Cuando
Pléistocène moyen *Mid-Pleistocene*	600 000 <300 000<60 000 ans	Le paléolac Bulozi s'est rompu et le Zambèze supérieur a atteint le statut exoréique, ce qui a réactivé l'érosion de la gorge occidentale de Bakota	Le Zambèze établit une topologie moderne
Milieu du Pléistocène supérieur *Mid-Late Pleistocene*	100 000 ans à actuel	Activation de la faille de Thamalakane, formation du delta de l'Okavango et de la rivière Boteti	Dessiccation progressive de Makgadikgadi

Tableau 70 Tableau 2 de Moore, Cotterill et Eckardt (2012, p.390).

Tableau 1 Cotterill et De Wit (2011)

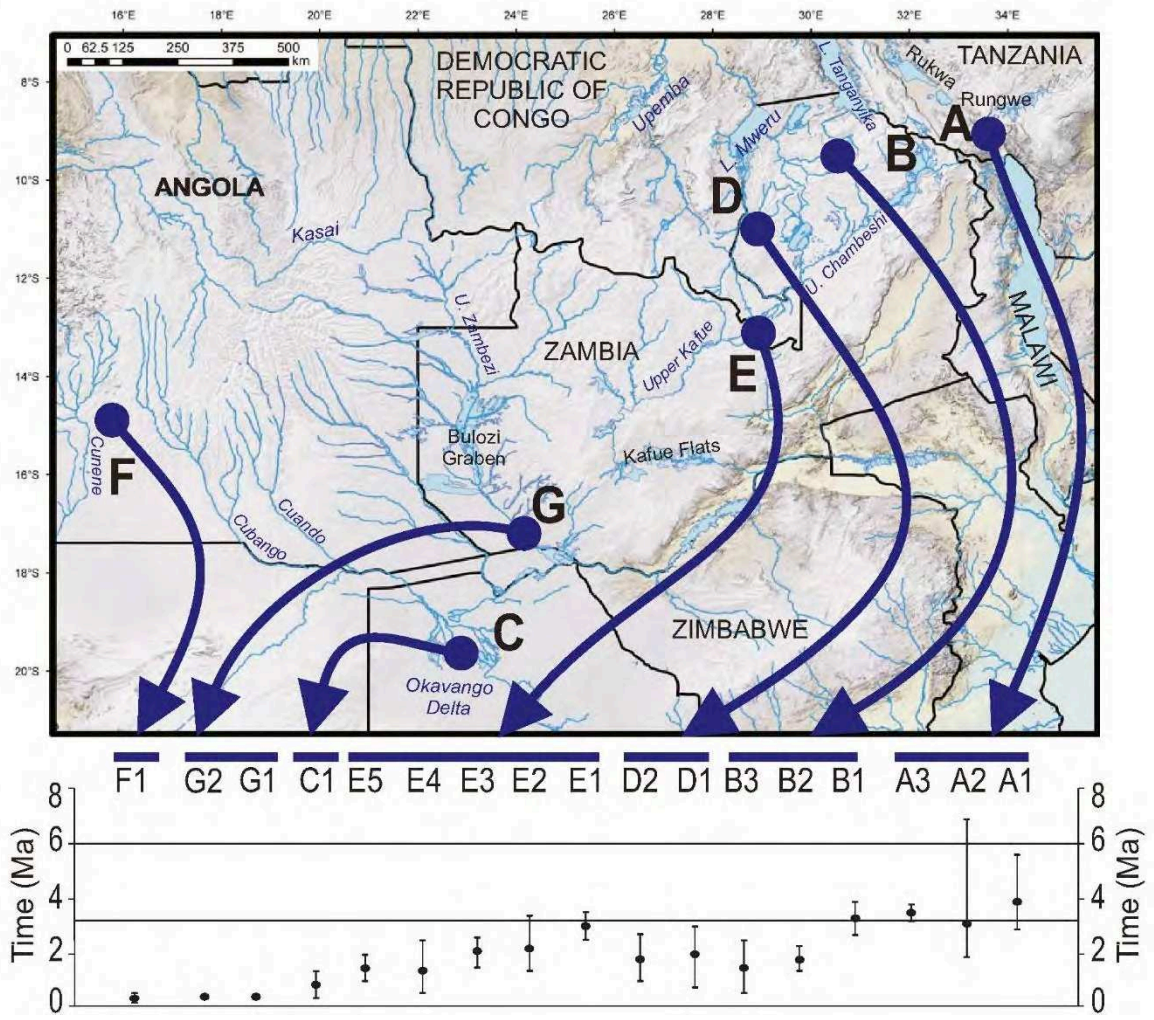


Figure 1226 Les sept épisodes tectoniques (A à G) et les 17 évènements phylogéographiques et leurs datations moléculaires (Source : Cotterill et De Wit, 2011, Fig.4, p.495).

Les données, ci-contre (Tableau 71), sont classées par contexte géographique et temporel, et interprétées « comme des **événements géobiotiques** présentant des réponses congruentes attribuées au contrôle spatial d'un événement tectonique ».

Légende des reliefs : Plateau du Kalahari (KP) ; Lac Bangweulu et Haut Chambeshi (Bw) ; Lac Malawi (LM) ; Lac Tanganyika (LT) ; Cours inférieur de la Luapula, y compris le fossé de Mweru (Lu) ; Rivière Lufubu (Lf) ; Delta de l'Okavango et Rivière Cubango (Ok) ; Rivières Rufiji-Kilombero (R-K) ; Cours supérieur de la Cunene (UC) ; Rivière Paléo-Chambeshi (PC) ; Rivière Proto-Kafue (PK) ; Rivière Kafue supérieure (UK) ; et Rivière Zambèze supérieure et fossé de Bulozi (UZ).

Species Complexes (with location)	Molecular Time (Ma)	Biogeographical Landform(s)	Biogeographical Interpretation	Data Source
A1 *Mastocembelus frenatus* (LT) diverges from M. *shiranus* (LM)	5.6 > 3.9 < 2.9	Mbeya Triple Junction	Allopatric speciation centered on LT and LM, respectively	Brown *et al.*2010
A2 *H. tanzaniae* (R-K) diverges from *H. vittatus* complex (KP)	6.9 > 3.1 < 1.9		Allopatric speciation of *H. tanzaniae* in R-K from *H. vittatus* complex on KP	Goodier *et al.* 2011
A3 *Fukomys* cladogenesis	3.8 > 3.5 < 3.2		Allopatric speciation of Tanzanian molerat clade from *Fukomys* complex on KP	Faulkes *et al.* 2010
B1 *Mastocembelus* sp nov 3 (Ok) vs *M. stappersi* (Luongo-Kalungwishi-Lufubu)	3.9 > 3.3 < 2.7	Lufubu - Kalungwishi Watershed, margins of Bangweulu Basin and Lake Mweru	Allopatric speciation isolates Lf endemics from Ok, Lu and Bw species	Brown *et al.*2010
B2 *Pseudocrenilabrus* "lufubu" speciation (Lf)	2.3 > 1.8 < 1.4			Koblmüller *et al.* 2008
B3 *Hydrocynus* "Clade B" (Lf) diverges from "Clade C" (Lu)	2.5 > 1.5 < 0.6			Goodier *et al.* 2011
C1 Radiation of *Synodontis* catfishes(Ok, PC, UZ)	1.4 > 0.89 < 0.42	Okavango graben	Adaptive radiation of mockhid catfishes – extant species occur in Bw, Cu, UC, UK, UZ	Day *et al.* 2009
D1 Founding of *Hydrocynus* "Clade B" (Lf) and "Clade C" (Lu) diverges from "Clade D" (Bw) and *H. vittatus*	3.0 > 2.0 < 0.8	Luapula river and Lake Mweru	Allopatric Speciation in Bw isolated from Lu	Goodier *et al.* 2011
D2 *S. nigromaculata2* (Lu) diverges from *S. nigromaculata*3 (Bw)	2.7 > 1.8 < 1.0			Day *et al.* 2009
E1 *Mastocembelus* cf *frenatus* (UZ) vs *M.* cf *frenatus* (Lu)	3.5 > 3.0 < 2.5	Congo-Kafue watershed	Allopatric Speciation in Proto-Kafue and UZ from Lu and Bw	Brown *et al.*2010
E2 *S. nigromaculata* (Lu, Bw) vs *S. nigromaculata*1(Ok)	3.4 > 2.2 < 1.4			Brown *et al.*2010
E3 Serranochromine cladogenesis	2.6 > 2.1 < 1.5			Koblmüller *et al.* 2008
E4 *Hydrocynus* "Bangweulu Clade D" (Bw) diverges from *H. vittatus* (PK)	2.5 > 1.4 < 0.6			Goodier *et al.* 2011
E5 Baboons, *Papio kindae* (CA) vs *P.* cf. *cyanocephalus* / *P. griseipes* Clade (CA and Lg)	1.98 > 1.49 < 1.0		Allopatry NW and SE, respectively, of Upper-Chambeshi and Upper Kafue rivers, after pulse of gene flow across Congo-Kafue watershed corresponds to drainage disruption southwest of Bangweulu basin	Sithaleeden *et al.* 2009; Zinner *et al.* 2009, Keller *et al.* 2010
F1 Serranochromine (Kunene Flock) dispersal and speciation (UC)	0.6 > 0.4 < 0.2	Colui-Cubango watershed	Dispersal and speciation from Ok and UZ into UC	Koblmüller *et al.* 2008
G1 Serranochromine Zambezian radiation (PK, UZ)	0.4	Zambezi river and tributaries	Zambezian rivers seeded from ancestral refuge by cichlid fishes, which underwent rapid adaptive radiation in new habitats	Koblmüller *et al.* 2008
G2 *Pseudocrenilabrus* dispersal (PK, UZ)	0.4			Joyce *et al.* 2005; Katongo *et al.* 2007; Koblmüller *et al.* 2008

Tableau 71 Les 17 enregistrements phylogéographiques (de A1 à G2) de vertébrés d'Afrique centrale et du Sud et leurs datations moléculaires des temps de divergence.

L'enregistrement phylogéographique E5, correspondant à des espèces de babouins, donne un âge moyen de **1.49 Ma**, situé dans l'intervalle (à 95% d'indice de confiance) : **1.98 Ma** à **1.03 Ma (Sithaleeden *et al.*, 2009 ; Zinner *et al.*, 2009 et Keller *et al.*, 2010 in** Cotterill et De Wit, 2011**)**.

> *« L'allopatrie au nord-ouest et au sud-est, respectivement, des rivières Haute Chambeshi et Haute Kafue, après une impulsion de flux génétique à travers le bassin versant Congo-Kafue correspond à une perturbation du drainage au sud-ouest du bassin de Bangweulu » (Cotterill et De Wit, 2011, Table 1, p.505).*

Rappelons que des fossiles de babouins ont été trouvés dans la grotte de *Bone Cave* (Williams *et al.*, 2012).

Tableau 2 Cotterill et de Wit (2011)

Dans le cadre bleu en bas du tableau, les différents intervalles d'âge (E1 à E5) provenant des âges moléculaires (dont ceux des babouins en E5) qui permettent de déterminer l'âge du **Paléolac Makgadikgadi**. En fait ils datent la formation du bassin versants du Kafue – Congo diminuant la quantité d'eau alimentant le Paléo-Chambeshi qui isole le Paléolac Bangweulu dans le bassin endoréique. Le **Paléolac Makgadikgadi** est alors entretenu par la Proto Kafue, le Haut Zambèze et les rivières de l'Okavango) comme indiqué sur la Figure 863 (p.838).

Abréviations des reliefs en plus du tableau 1 : Paléolac Bangweulu (PLBw) ; Paléolac Deception (PLD) ; Paléolac Makgadikgadi (PLM) ; Paléolac Mweru (PLMw) ; Paléo-Chambeshi (PC) et cours supérieur du fleuve Chambeshi (UC).

Geobiotic Event	Estimated Time of biotic events (Ma)	Geomorphological Interpretation	Tectonic Episode	Data Source
A1	5.6 > 3.9 < 2.9	L. Tanganyika drainage isolated from Proto-Malawi drainage		
A2	6.9 > 3.1 < 1.9	Proto Rufiji-Kilombero drainage isolated east of PC drainage net	**A** Focus in Mbeya Triple Junction	Ebinger et al 1989 Delvaux et al 1992, 1998
A3	3.8 > 3.5 < 3.2	Uplift of Ufipa Horst		
B1	3.9 > 3.3 < 2.7			
B2	2.3 > 1.8 < 1.4	Isolation of Proto-Lufubu drainage, centred on Lufubu graben, from Luongo-Kalungwishi, and Bangweulu and Mweru depressions	**B** Rifting propagates west from Mpulungu basin	Mondeguer et al 1989
B3	2.5 > 1.5 < 0.6			
C1	1.4 > 0.89 < 0.42	Megalake in Okavango graben (PL Makgadikgadi) – PLD and PLM stages	**C** Initiation of Okavango-Kafue graben	
D1	3.0 > 2.0 < 0.8	PL Mweru formed, and Luapula isolated from Bangweulu – PLBw stage	**D** Mweru Rifting and Formation of Lufubu graben	Mondeguer et al 1989
D2	2.7 > 1.8 < 1.0			
E1	3.5 > 3.0 < 2.5	Formation of Kafue-Congo watershed shrinks PC drainage net to isolate PL Bangweulu in endorheic basin. PLM maintained by Proto Kafue, Upper Zambezi, and Okavango rivers	**E** Uplift (flexure) across S margin of Bw basin and Mweru graben	
E2	3.4 > 2.2 < 1.4			
E3	2.6 > 2.1 < 1.5			
E4	2.5 > 1.4 < 0.6			
E5	1.98 > 1.49 < 1.03			
F1	0.6 > 0.4 < 0.2	Change to Cunene-Cubango watershed by headwater piracy of Colui river	**F** Tectonism	Moore and Larkin 2001
G1	0.4	Impoundment of UZ in Bulozi graben (Barotseland) and subsequent reconnection with mid-Zambezi	**G** Formation of Bulozi graben	Cotterill 2006; Moore and Cotterill 2010
G2	0.4			

Tableau 72 Chronologie des épisodes tectoniques (A à G) à l'origine des 17 enregistrements phylogéographiques sélectionnés de vertébrés d'Afrique centrale et du Sud (A1 à G2) du tableau précédent. (Source : Cotterill et De Wit, 2011, Table 1, p.506).

Tableau de Ringrose (2022)

Table 4.1 Drainage evolution and the development of ORZ palaeo-lakes (modified after Moore et al. 2012 and McCarthy 2013 and references therein)

Approximate age	Causal Event	Consequence	End result	*LN and MD
Miocene/Late Palaeogene	Uplift along the Ovambo-Kalahari-Zimbabwe Axis	Link severed between the Palaeo-Chambeshi/Upper Zambezi drainage system and the Limpopo River	Endoreic drainage and fluvio-lacustrine deposition within the resultant mid-Kalahari basin	
Late Pliocene	Mid-Zambezi captured the Palaeo-Chambeshi/Proto-Kafue/Upper Zambezi	Major source of water/ sediment to the mid-Kalahari basin cut-off,	Cuito-Cubango Rivers relics of the earlier endoreic drainage system	
Early Pleistocene	Uplift across the course of the Upper Zambezi along the NE-SW Chobe Fault associated with the SW propagation of the EARS	Diversion of considerable flow of the Palaeo-Chambeshi/Upper Zambezi drainage system into northern Botswana	Palaeo-Lake Deception initiated at 990–1000 m asl	Initiation of early NE-SW faulting Early Okavango and LN and MD depressions submerged
Early Pleistocene	Deepening of ORZ leads to inflow and sedimentation	Development of early Okavango	Cuito-Cubango Rivers form Okavango River which flows south over the Gumare fault	Early inflow-deposition into MD from Linyanti fan and some deposition into LN from Groote Laager fan
Early to Mid-Pleistocene	Link between the Upper Chambeshi and Kafue severed by uplift of Congo-Zambezi watershed	Inflow into Kalahari basin diminished	Later contraction to lower 945 m shoreline Palaeo-Lake Makgadikgadi (PLM)	Extensive PLM submerged LN. MD to Linyanti with Magikwe ridge forming islands
Later in Mid Pleistocene	Link between the Kafue and Upper Zambezi was severed	Palaeo-Lake Patrick initiated in the Kafue graben	Contraction of former PLM to the 936 m level or Palaeo-Lake Thamalakane (PLT)	PLT dated using ESA-early MSA tools to 200–500 ka. Formation of palaeo-shorelines s around LN and MD
Later in Mid-Pleistocene	Palaeo-lake Bulozi impounded in the vicinity of N'gonye Falls	Further reduction of inflow into the Kalahari basin	Contraction of the 936 m (PLT) level to the 920 m shoreline	Lowest recorded palaeo-lake levels on LN and MD at ca. 920 m
Later in Mid-Pleistocene	Link between the Upper Cuando and Zambezi severed and Upper and Mid-Zambezi reconnected	Further reduction of inflow into the Kalahari basin	Contraction of the 920 m level to the 912 m shoreline	

*LN = Lake Ngami MD = Mababe Depression

Figure 1227 Tableau récapitulatif de l'histoire de ces paléolacs (Source : Ringrose, 2022, Table 4.1 p.63).

12.6. ANNEXE N°6 DU CHAPITRE N°4 : LEVES AEROMAGNETIQUES DU NORD-OUEST DU BOTSWANA.

Lehmann (2015, Fig.7, p.179) (Figure 1230 et **Figure 1253** p.1300) et Chisenga *et al.* (2020, Fig.2) (Figure 1228 et Figure 1229) proposent plusieurs types de levés aéromagnétiques (*Total Magnetic Intensity* et Anomalies de Bouguer) que nous avons reportés sur nos ATLAS n°2 et n°3.

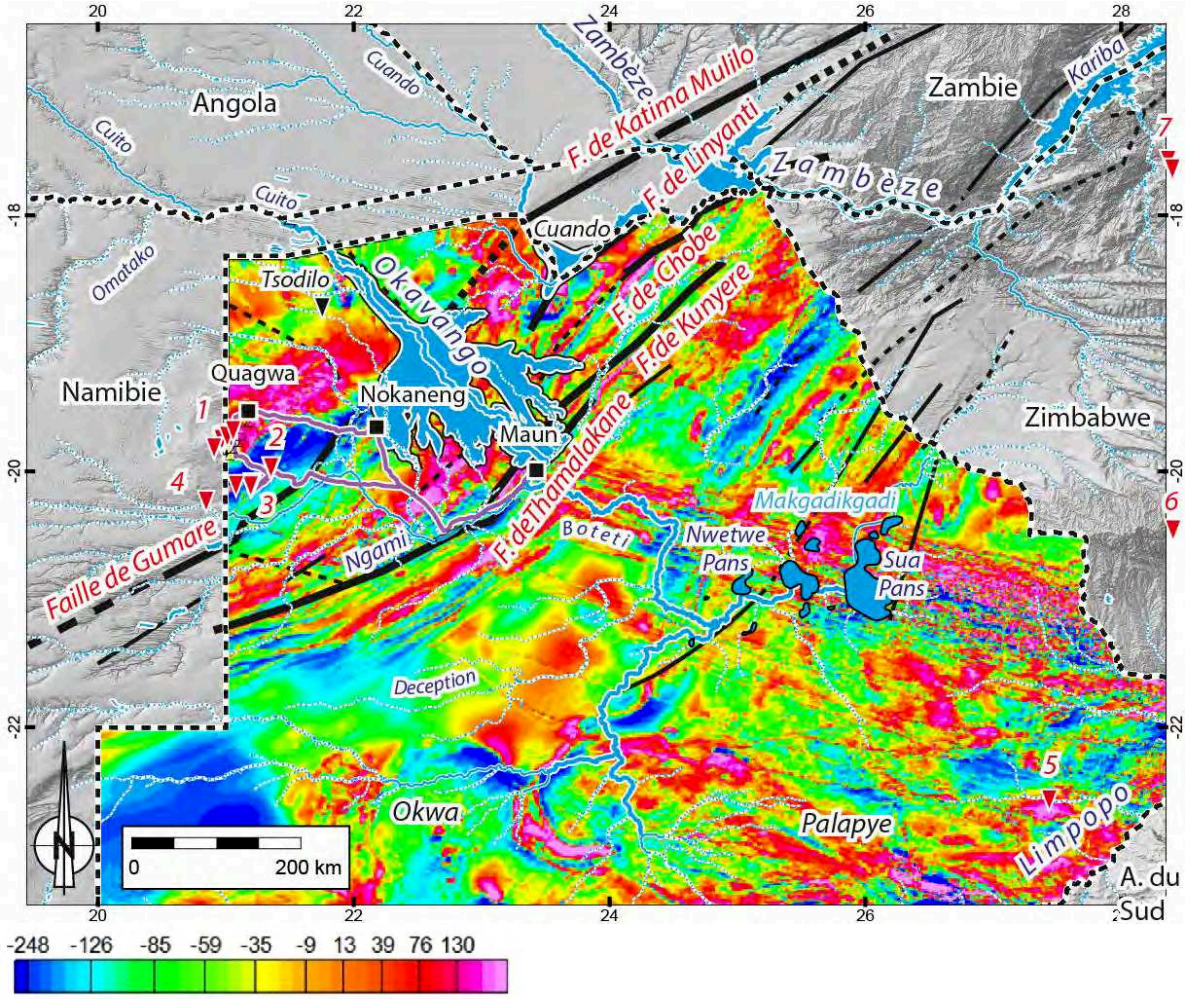


Figure 1228 ATLAS n°2 : Levés aéromagnétiques (Total Magnetic Intensity) d'après Chisenga et al. (2020, Fig.2).

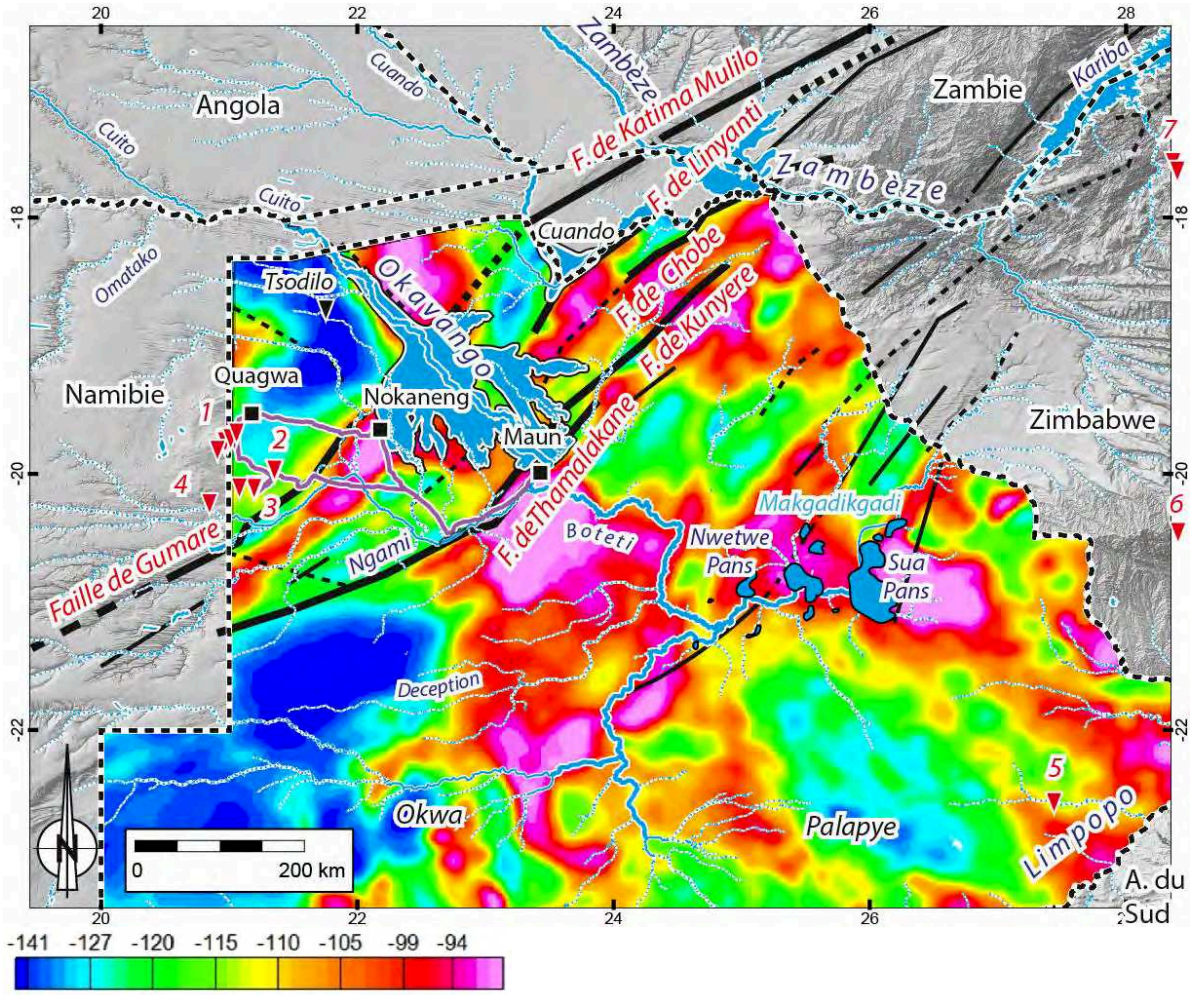


Figure 1229 ATLAS n°2 : Anomalies magnétiques de Bouguer d'après Chisenga et al. (2020, Fig.2).

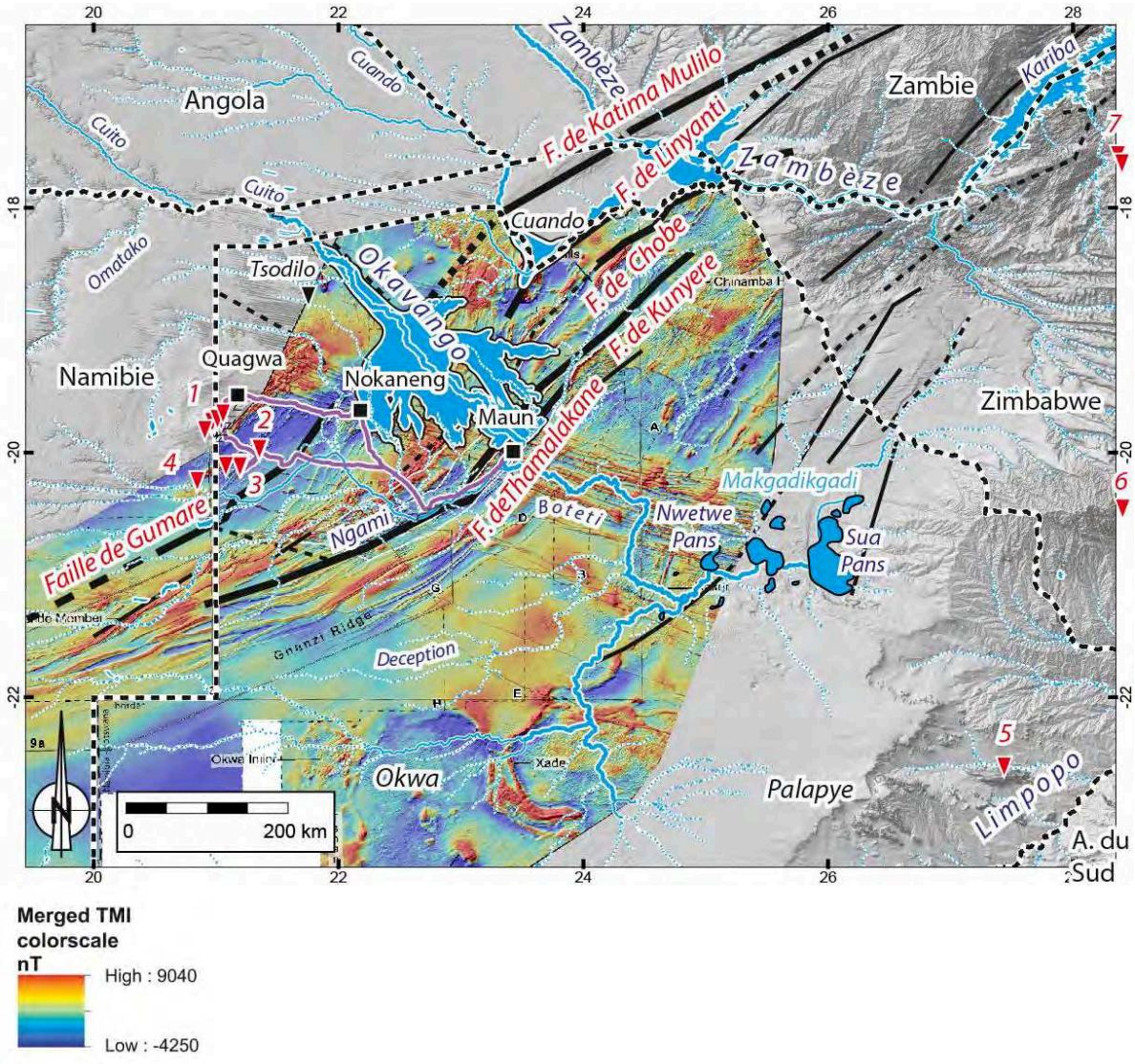


Figure 1230 ATLAS n°2 Levés aéromagnétiques (Total Magnetic Intensity) d'après Lehmann et al. (2015, Fig.7).

12.7. ANNEXE N°7 CORRELATION ENTRE OTAVI HILLS, AHA HILLS, GCWIHABA HILLS ET KOANAKA HILLS

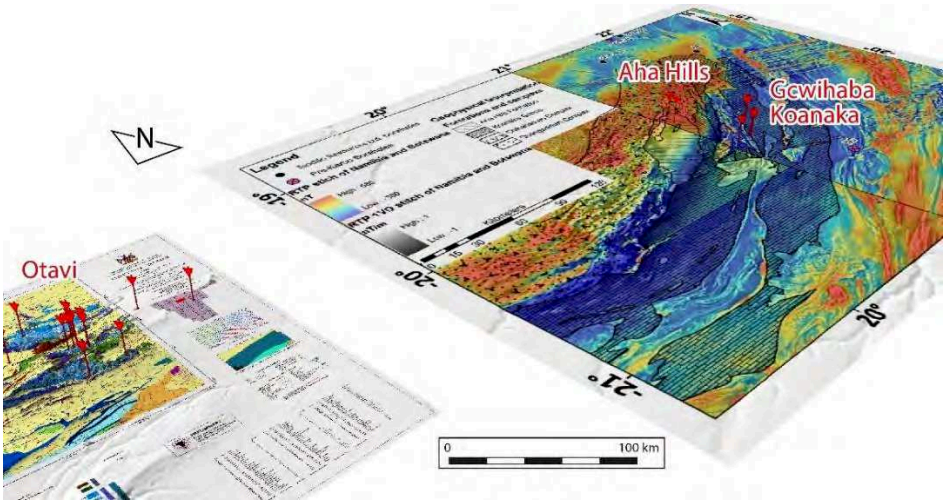


Figure 1231 Corrélation des cartes géologiques de Tsumke (karst d'Otavi) et de la carte aéromagnétique de Rankin (2015, Fig.6.19, p.190) où se situent les karsts du Nord-Ouest du Botswana.

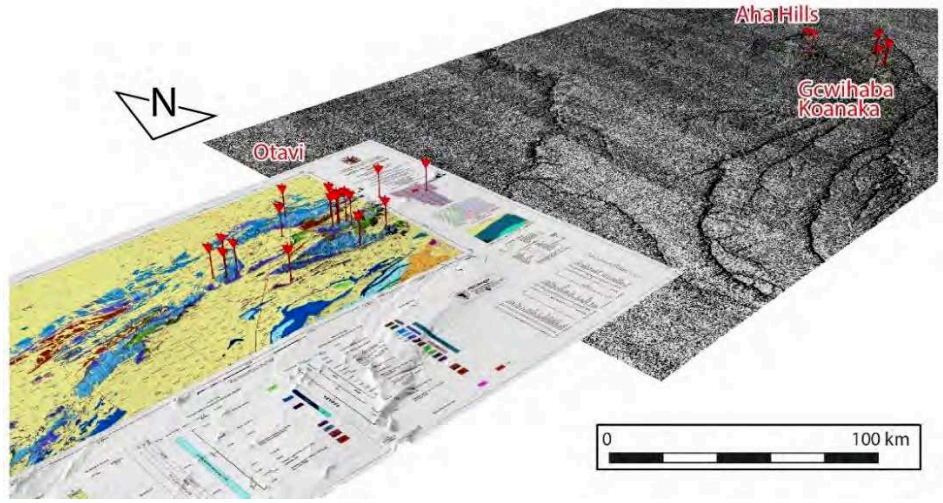


Figure 1232 Corrélation des cartes géologiques de Tsumke (karst d'Otavi) et du modèle ombré JAXA, où se situent les karsts du Nord-Ouest du Botswana.

12.8. ANNEXE N°7 DU CHAPITRE N°4 : DIFFERENTES CARTES GEOLOGIQUES DU NORD-OUEST DU BOTSWANA.

Sur la carte du nord-ouest du Botswana (Figure 439), les dolomies néoprotérozoïques (en rose) affleurent localement en surface et émergent à travers les formations récentes du groupe du Kalahari (en jaune) : ce sont les *Aha Hills*, *Gcwihaba Hills* et *Koanaka Hills* que nous étudierons. En revanche, au nord de Quagwa, d'autres roches carbonatées sont présentes mais restent masquées par les dépôts sableux du Kalahari (groupe du Kalahari). Leur présence est signalée sur la carte par des trames spécifiques. Ce contexte particulier, où les formation carbonatées sont enfouies sous couverture et favorables au développement du karst. Lorsque nous aborderons le contexte morphokarstique des grottes connues de cette région (*Aha Hills*, *Gcwihaba Hills* et *Koanaka Hills*), nous verrons que ces calcaires sous couverture peuvent abriter des cavités karstiques, parfois connectées à la surface, ainsi que des buttes résiduelles karstifiées qui émergent ponctuellement des sables du Kalahari.

12.8.1. Explication sur la réalisation des cartes géologiques à partir des levés magnétiques

Du fait de la présence du **Désert du Kalahari** (groupe géologique du Kalahari), les cartes géologiques de la région n'ont pas été établies de façon classique par des prospections sur le terrain, mais à partir de levées aéromagnétiques. Le magnétisme des roches a été mesuré par avion, puis corrélé grâce aux forages et aux rares affleurements existants.

Par exemple, la colline de K1 à *Koanaka Hills* est constituée par des dolomies et des schistes dont nous suivons le contact sur le flanc nord est au niveau du forage de Gecko. Ce forage rencontre les dolomies puis des schistes. La visite de la grotte montre que la grotte se développe le long de ce contact. Pour ces raisons, les cartes géologiques montrent au nord-ouest de cette colline K1 le contact entre ces deux formations géologiques. Comme les affleurements sont rares et que le signal magnétique ne montre pas de variations ces schistes ont été prolongées loin vers le nord-ouest. C'est pour cette raison que la colline dolomitique K3 de *Koanaka Hills* n'est pas indiquée sur les cartes géologiques.

L'industrie minière est en effet extrêmement bien développée au Botswana (découverte du plus gros diamant au monde en 2024), ce qui a favorisé la réalisation de nombreux forages, tant pour la recherche de kimberlites (diamants) que pour la recherche en eau. Ces forages ont permis de corréler les signaux magnétiques des roches du sous-sol mesurés par avion, et notamment, d'identifier les roches situées sous le Désert du Kalahari ou subaffleurantes. Nous disposons ainsi de **cartes de levés aéromagnétiques** fournies par Lehmann (2015, Fig.7, p.179) (Figure 1230 p.1300) et Chisenga *et al.* (2020, Fig.2) (Figure 1228 et Figure 1229), dont un extrait concernant la région étudiée est reproduit ci-dessous. Différentes interprétations de ces levés aéromagnétiques ont été proposées par les auteurs, donnant lieu à plusieurs cartes géologiques, comme celle de Rankin (2015, Fig.6.19, p.190) (Figure 1240 et Figure 1241 p. 1287 et Figure 1233 p.1281).

Toutefois, ces documents ne présentent pas une résolution suffisante pour cartographier, par exemple, les petites collines dolomitiques karstifiées, de faible superficie, telles que celle de *Blue Cave* à *Koanaka Hills* comme nous venons de le dire. Ces différentes cartes ont été ajoutées en annexe. Les cartes géologiques disponibles sont :

- *The Pre-Kalahari Geological Map of the Republic of Botswana* (Machacha, 1997) (en annexe p.1282), à l'échelle 1/ 1 500 000 ;
- *The Pre-Kalahari Geophysical Interpretation Northern Botswana* (BGI, 2022) (en annexe p.1282), à l'échelle 1/100 000 ;
- *Aeromagnetic interpretation* de Rankin (2015, Fig.6.19, p.190) (Figure 1240 et Figure 1241 p. 1287 ; Figure 1233 p.1281) ;
- *BGI* (2022) (Figure 1234 et Figure 1235 p.1282) ;
- Water Surveys Botswana et Aqualogic (2001, Fig.2) (Figure 1237 p.1284) ;
- Water Surveys Botswana et Aqualogic (2003, Fig.5) (Figure 1238 p.1285) ;
- Key & Ayres (2020) (Figure 1242 p.1289) ;
- Pryer (1997) (Figure 1245 p.1292) ;
- Mondillon (2020) (Figure 1239 p.1286)

Nous avons également pu consulter le portail du Service Géologique du Botswana (*BGI*), accessible à l'adresse suivante : https://geos.bgi.org.bw/GDP/Search

12.8.2. Carte géologique interprétée par Rankin (2015) à partir des levés aéromagnétiques

Sur les cartes géologiques, la cavité *Blue Cave* est située sur les roches ignées qui appartiennent au Complexe de Chihabadum alors que la colline dans laquelle est nichée la cavité, est constituée de dolomies comme les grottes et les collines de Koanaka et Gcwihaba : les dolomies de couleur bleue qui ont donné le nom à la grotte. L'échelle de la carte au 1/500 000 et le fait que ça soit une carte interprétative des levés aéromagnétiques ne permet pas de distinguer la colline de Blue Cave qui est de faible superficie. Un autre problème est que le Complexe de Chihabadum n'aurait pas encore été prouvé par forage selon le *Water Surveys Botswana et Aqualogic* (2001, p.13). Il en résulte qu'il pourrait donc exister d'autres collines dolomitiques et d'autres grottes au niveau du « Complexe de Chihabadum ». Cela nous pousse donc à rechercher des collines sur cet ensemble.

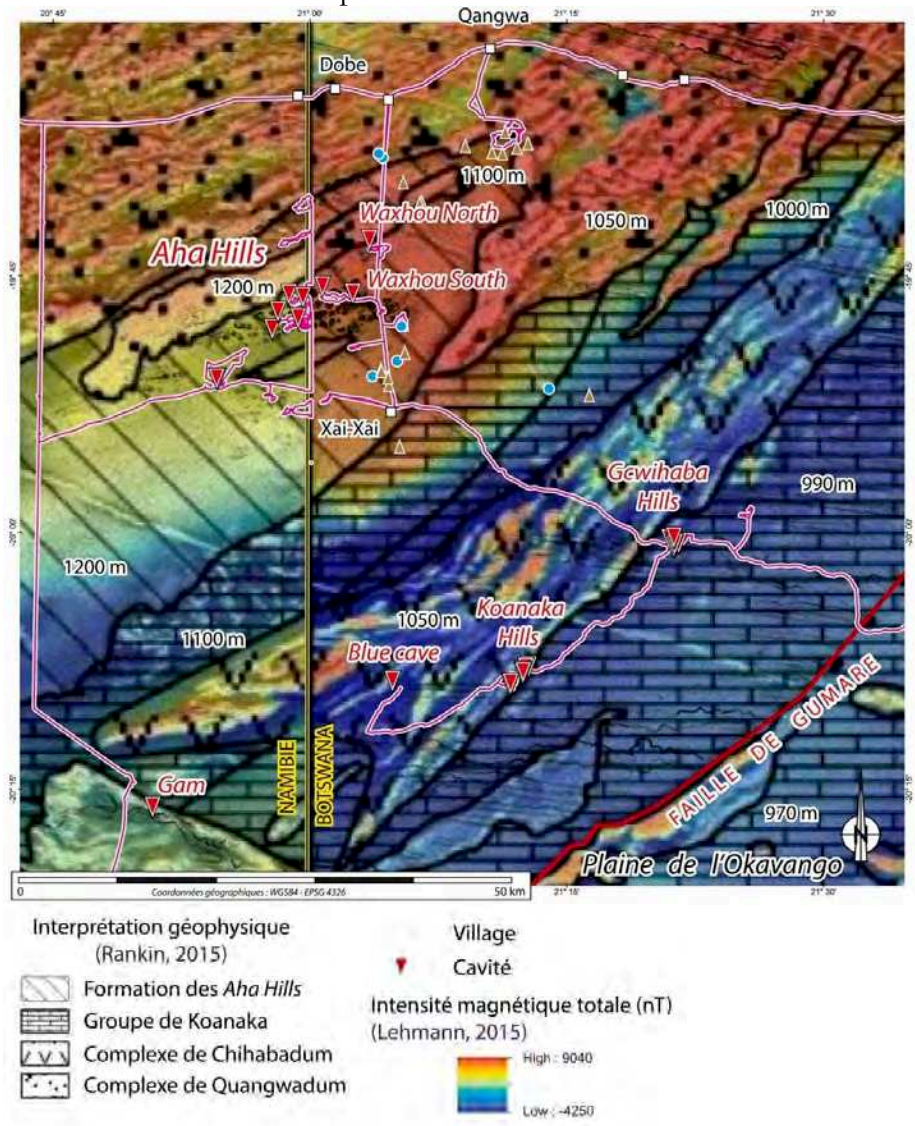


Figure 1233 Interprétation de la carte aéromagnétique de Rankin (2015, Fig.6.19, p.190) que nous allons réinterpréter pour rendre compte des dolomies de la colline K3 de la grotte de Blue Cave à Koanaka.

The Pre-Kalahari Geophysical Interpretation Northern Botswana du BGI(2022).

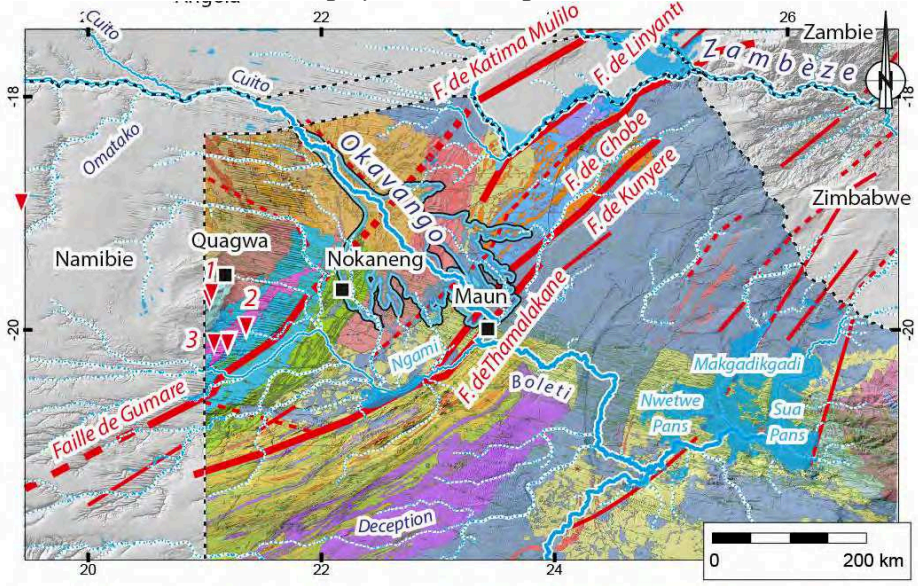


Figure 1234 ATLAS n°2 : Carte géologique pré-Kalahari (sans le groupe du Kalahari) selon le BGI (2022).

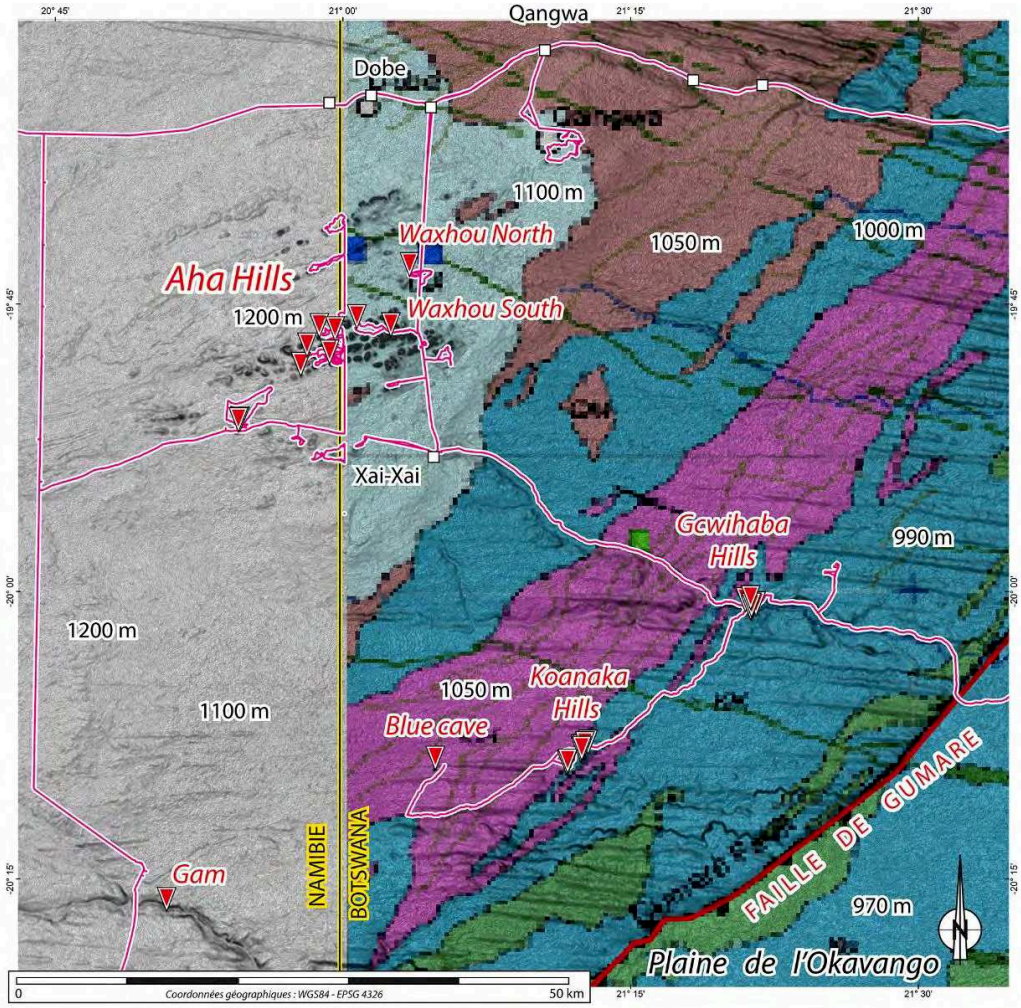


Figure 1235 ATLAS n°3 : Carte géologique pré-Kalahari (BGI, 2022, modifié).

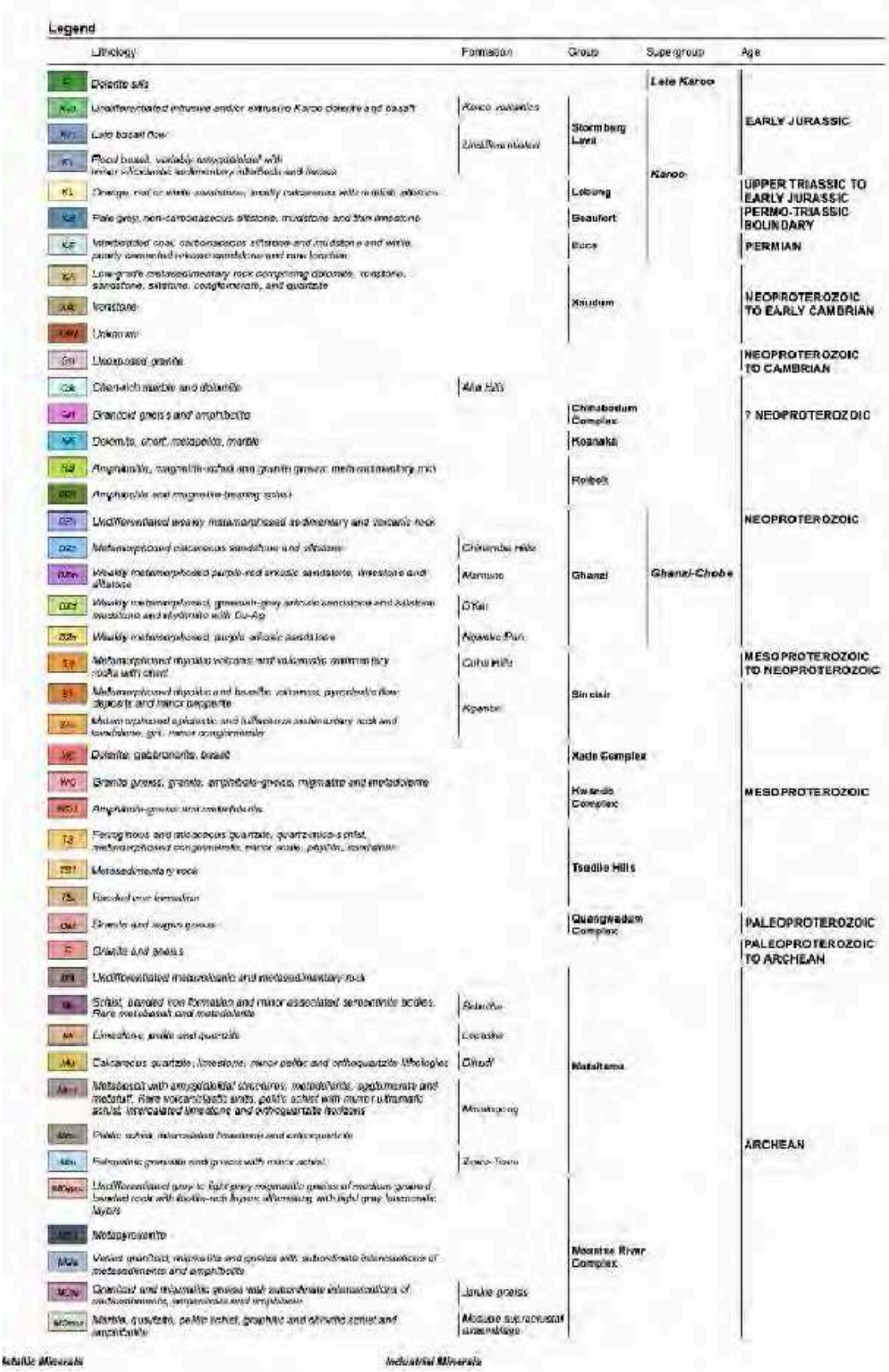


Figure 1236 Légende de la carte (BGI, 2022).

12.8.3. Carte géologique du Water Surveys Botswana et Aqualogic (2001, Fig.2)

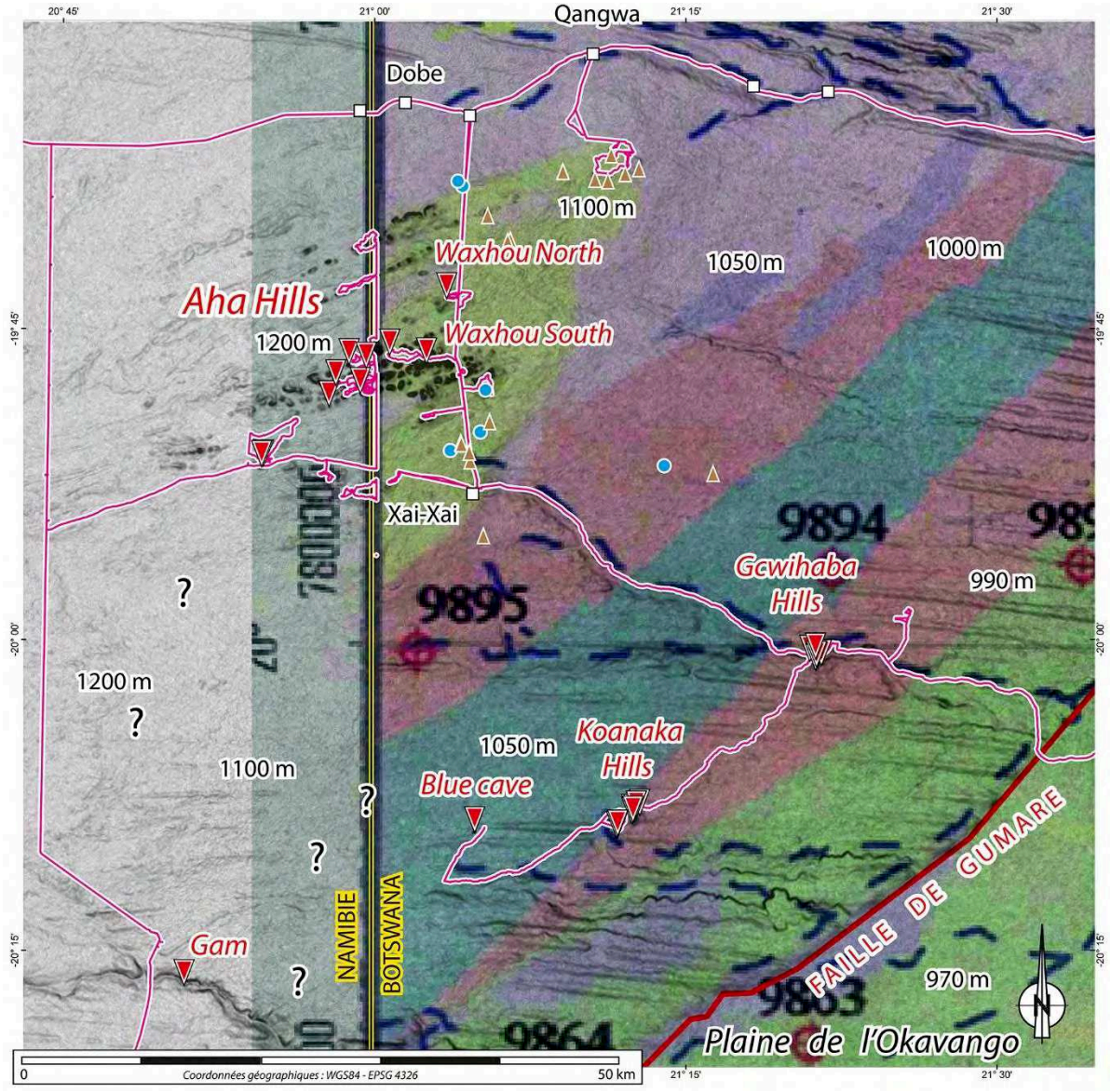


Figure 1237 Carte géologique du Water Surveys Botswana et Aqualogic (2001, Fig.2).

12.8.4. Carte géologique du Water Surveys Botswana et Aqualogic (2003, Fig.5)

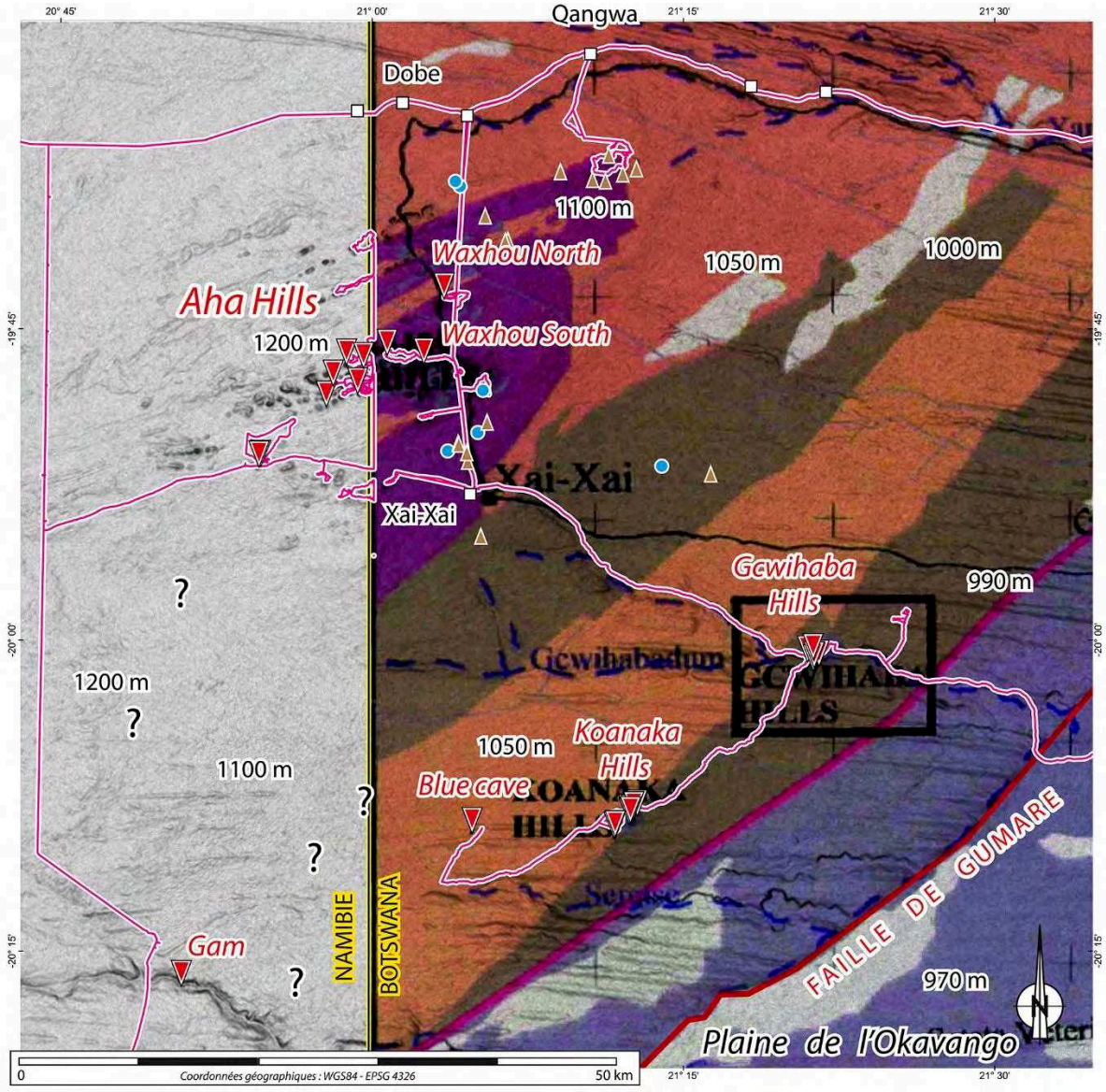


Figure 1238 Carte géologique du Water Surveys Botswana et Aqualogic (2003, Fig.5).

12.8.5. Cartes géologiques de Mondillon (2020).

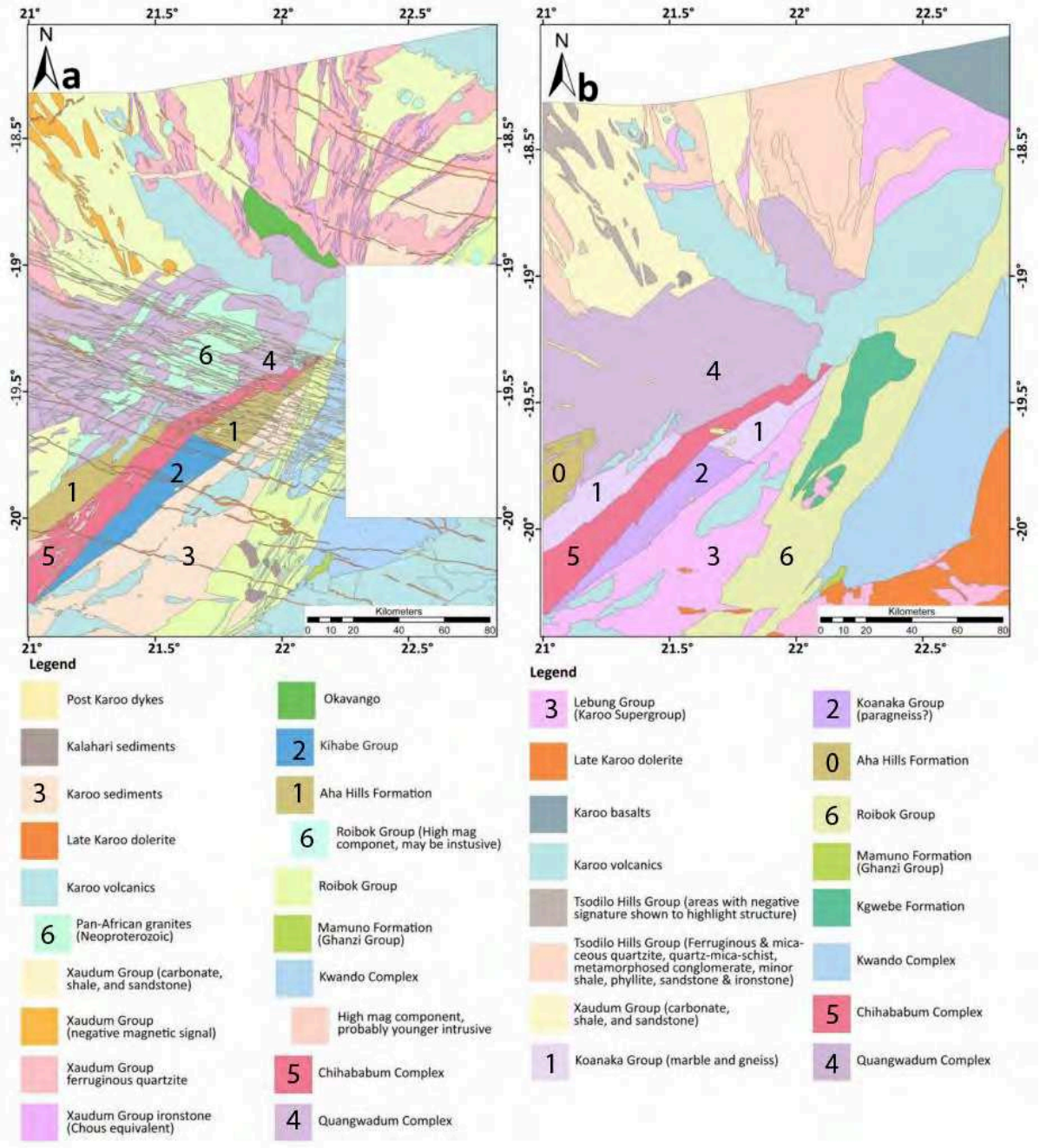


Figure 1239 Cartes géologiques du nord-ouest du Botswana selon Mondillon (2020).

12.8.6. Carte géologique de Rankin (2015)

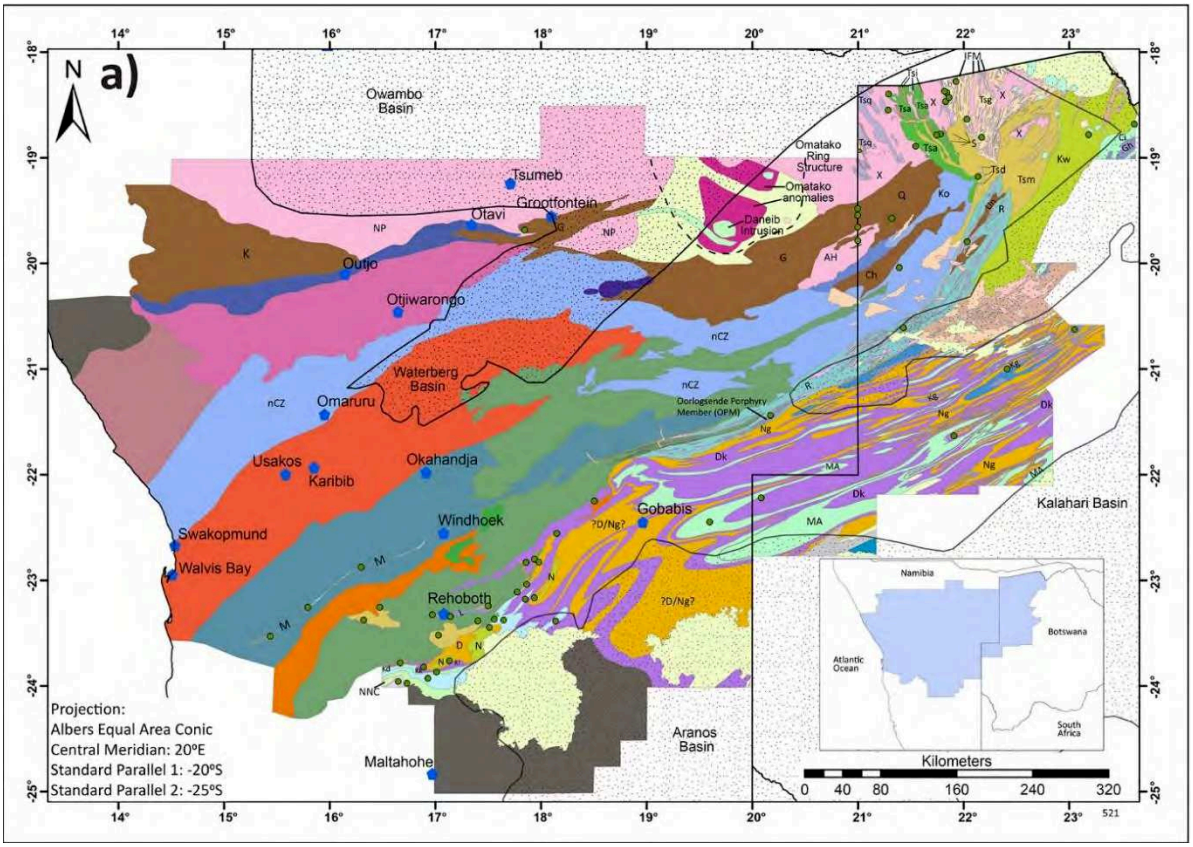


Figure 1240 Cartes géologiques du nord-ouest du Botswana selon Rankin (2015).

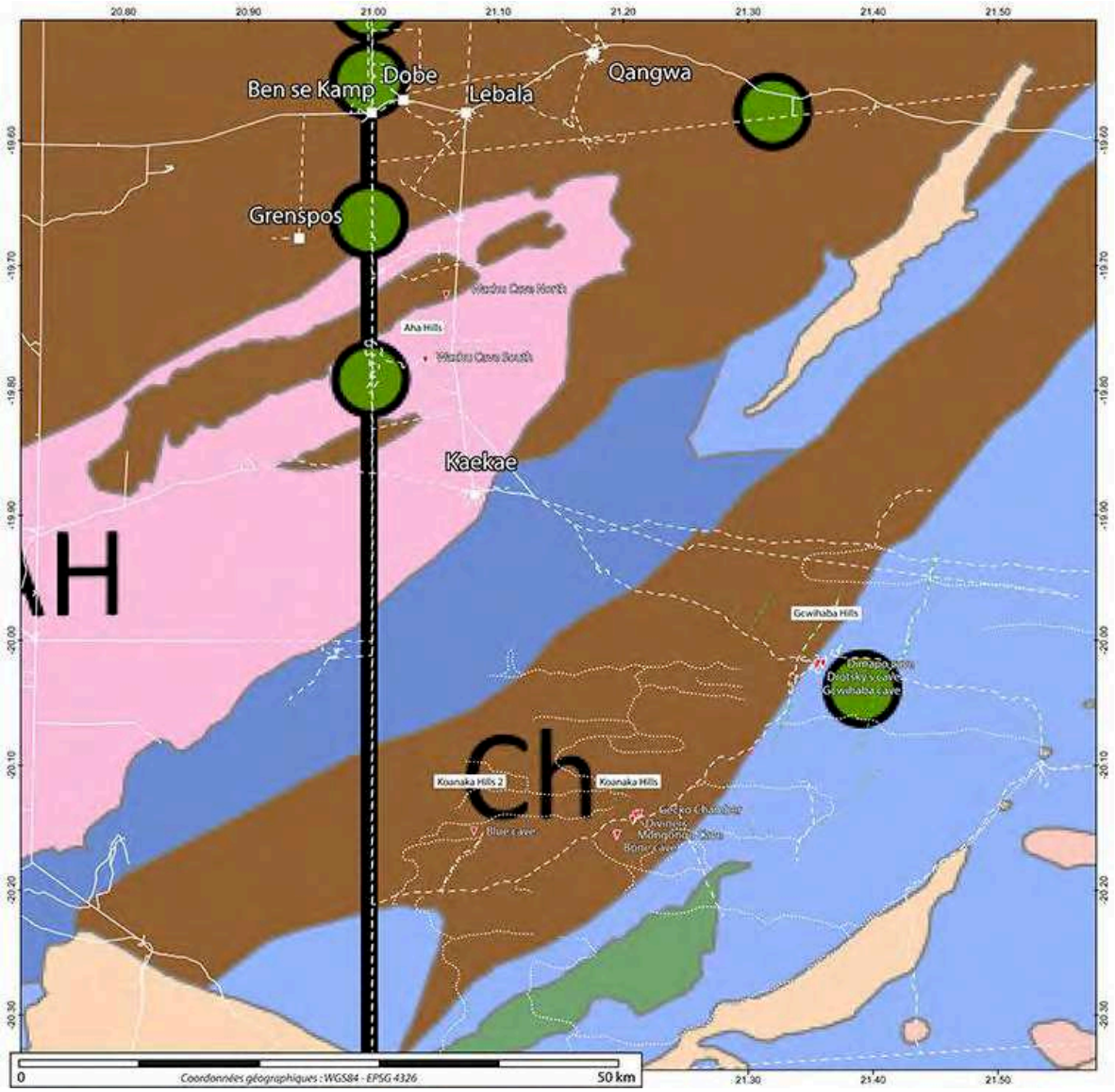


Figure 1241 Détail de la carte géologique de Rankin (2015) sur le secteur d'étude.

Carte géologique de Key & Ayres (2020)**.**

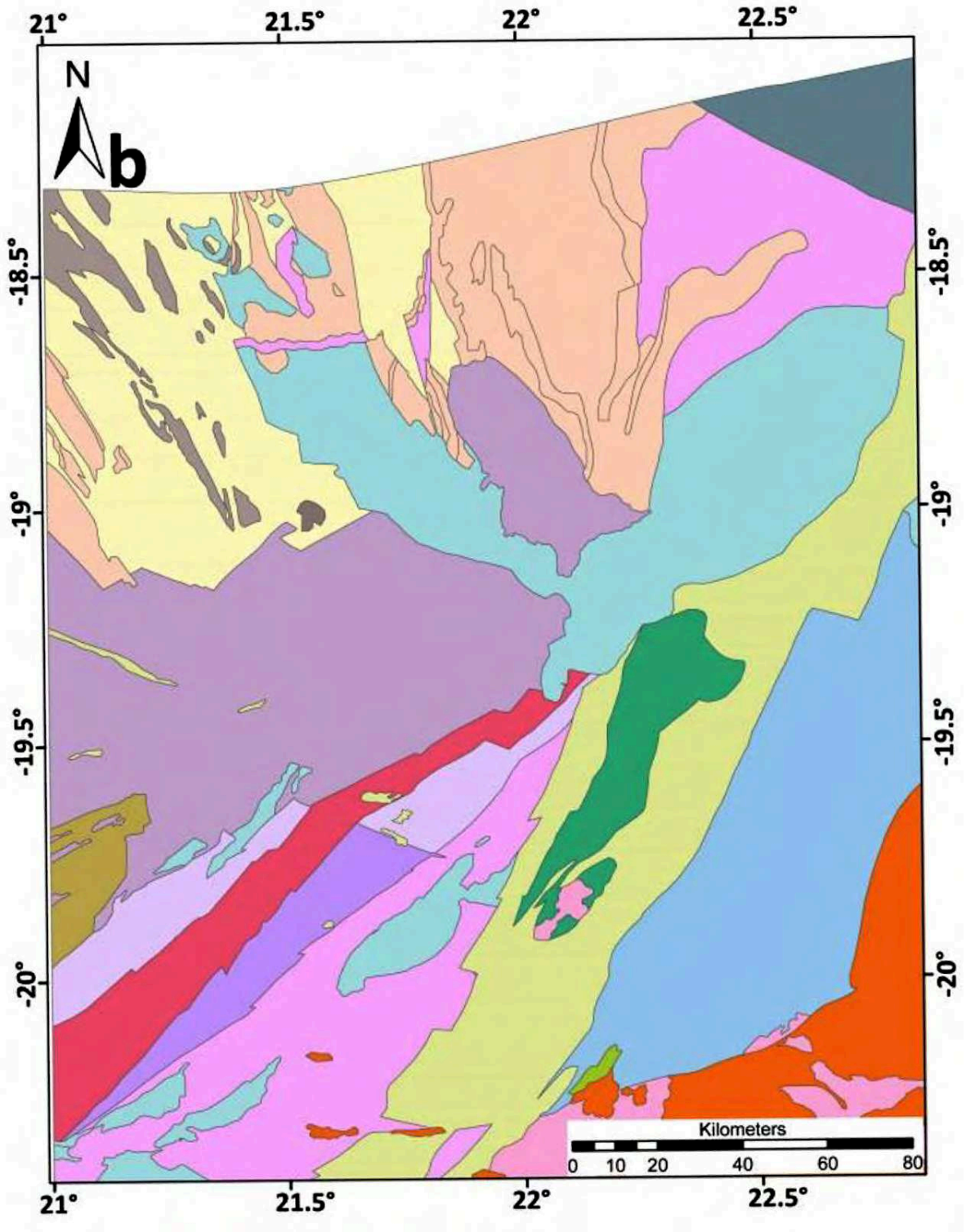


Figure 1242 Carte géologique selon Key & Ayres (2020).

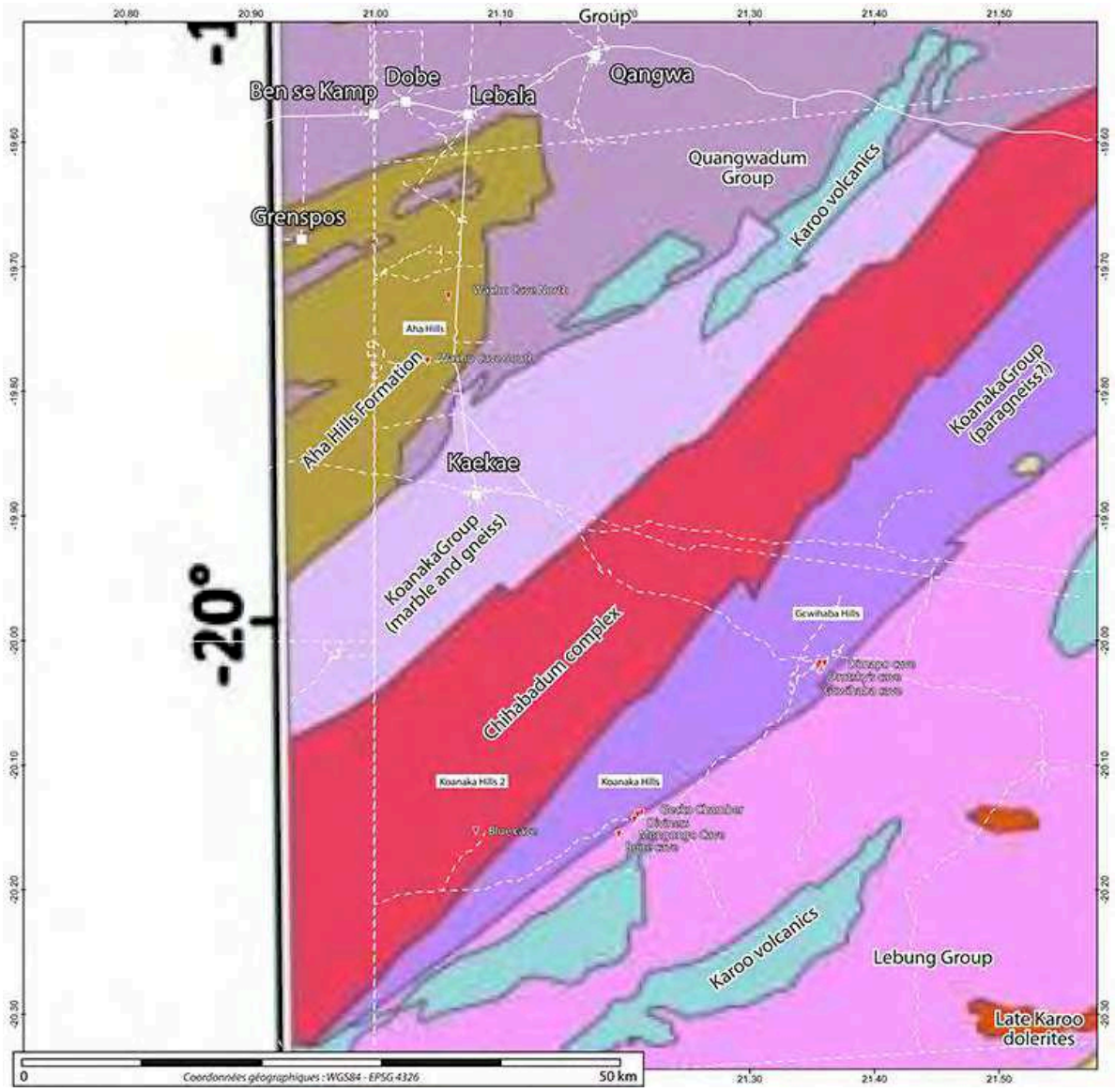


Figure 1243 Détail de la carte géologique de Key & Ayres (2020). sur le secteur étudié.



Figure 1244 Légende de la carte de Key & Ayres (2020).

Carte géologique de Pryer (1997).

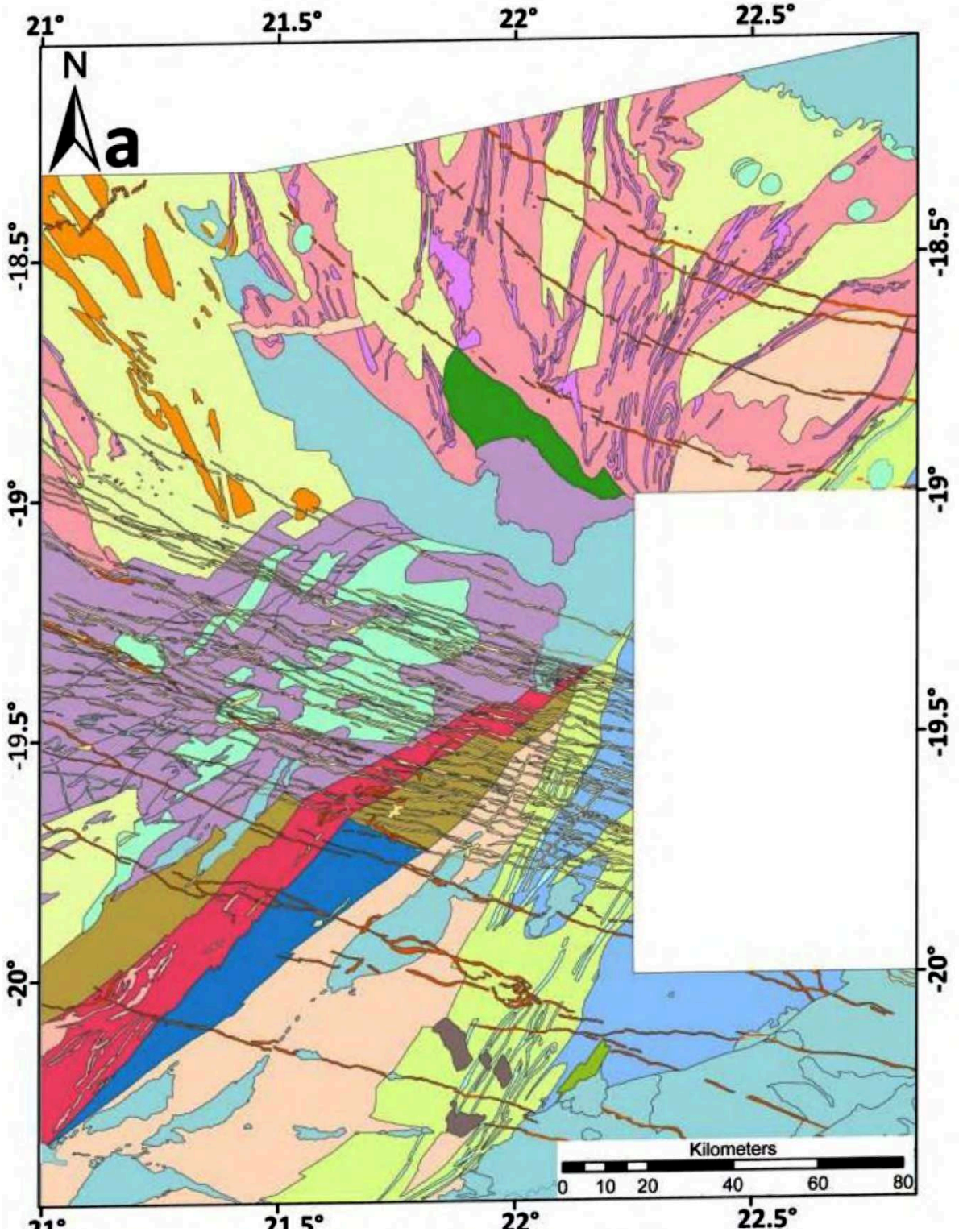


Figure 1245 Carte géologique selon Pryer (1997).

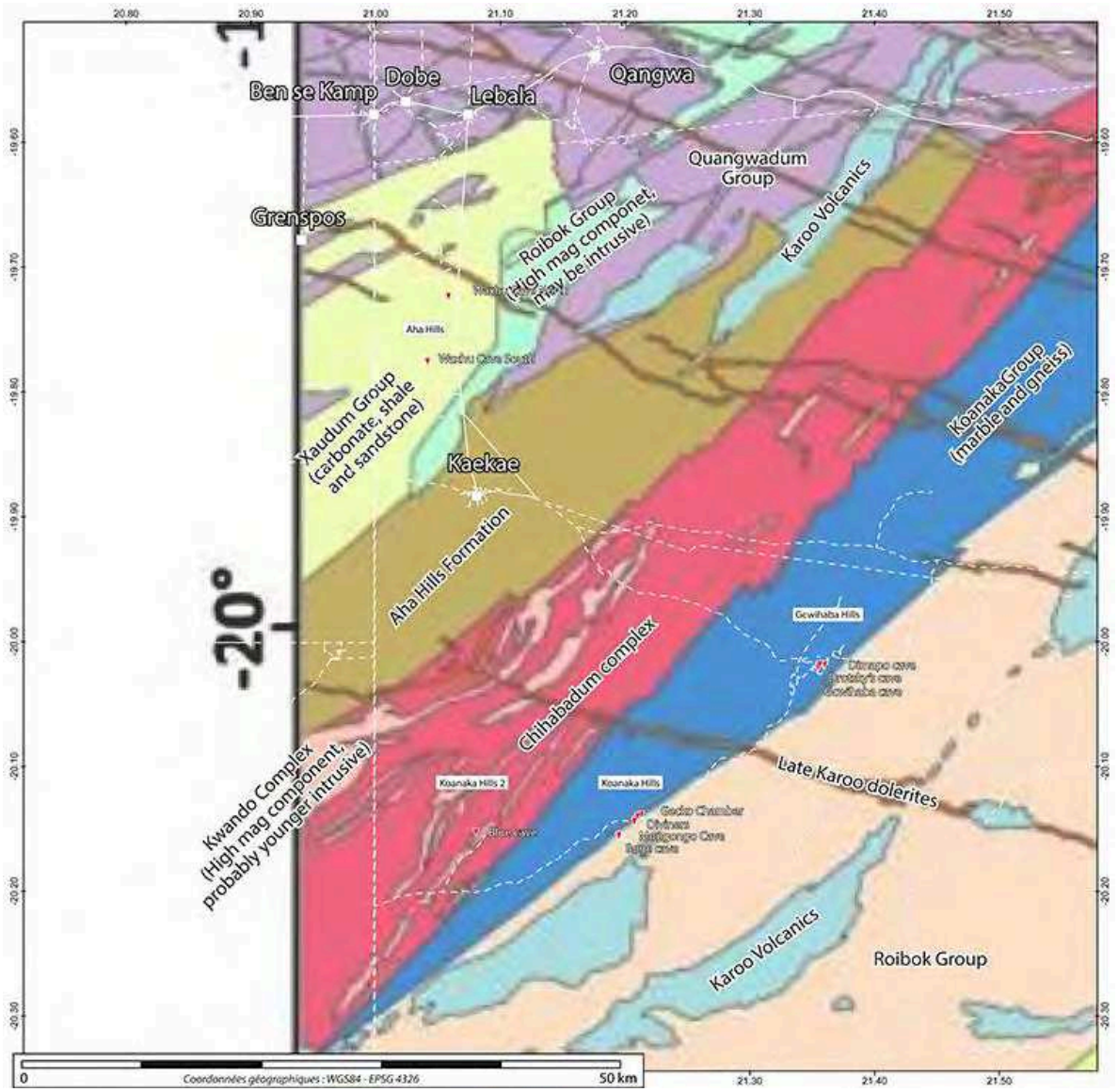


Figure 1246 Carte géologique du secteur d'étude selon Pryer (1997).



Figure 1247 Légende de la carte de Pryer (1997).

Carte géologique du nord est du Botswana (Mondillon ; 2020).

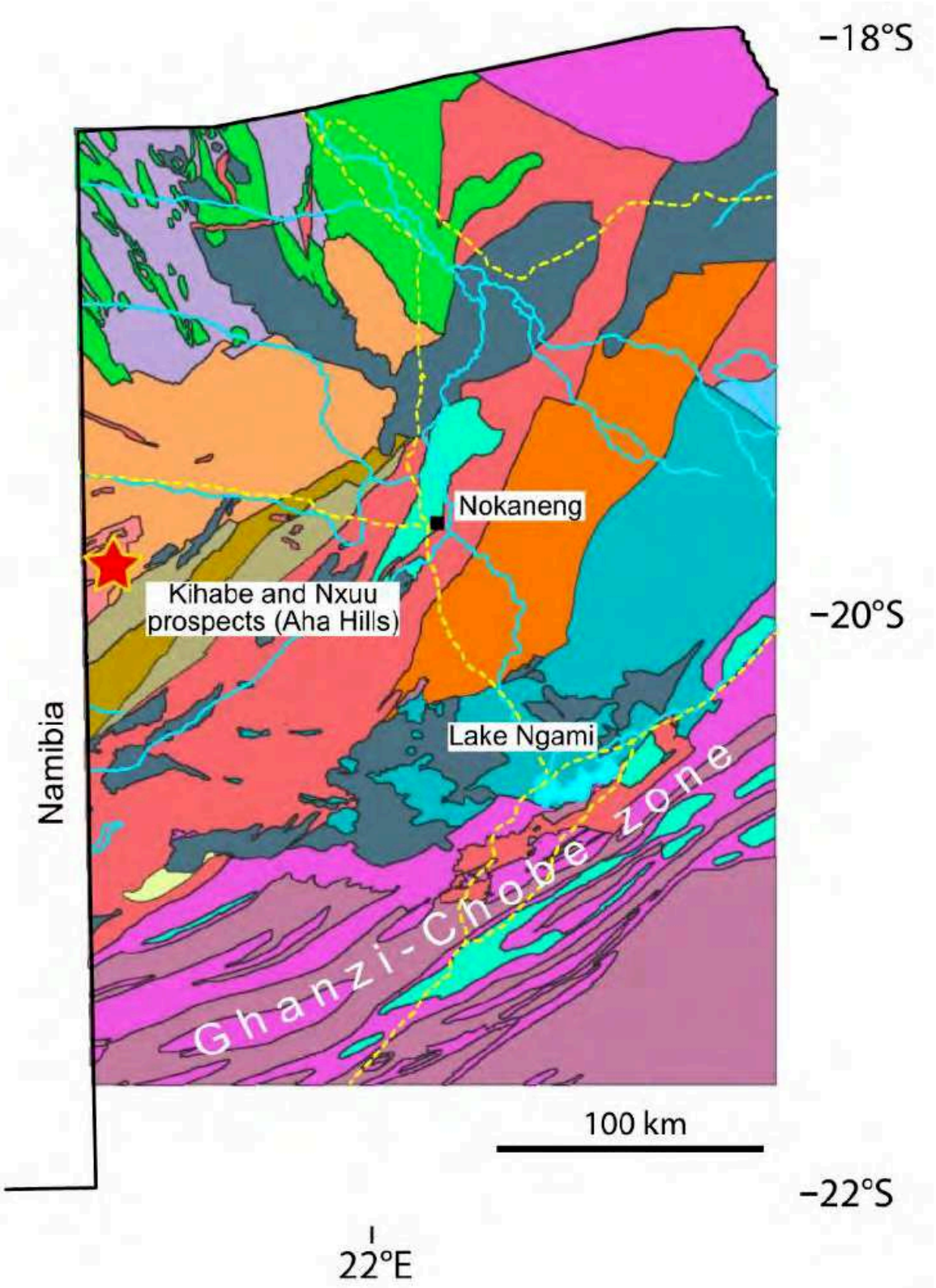


Figure 1248 Carte géologique de Mondillon (2020).

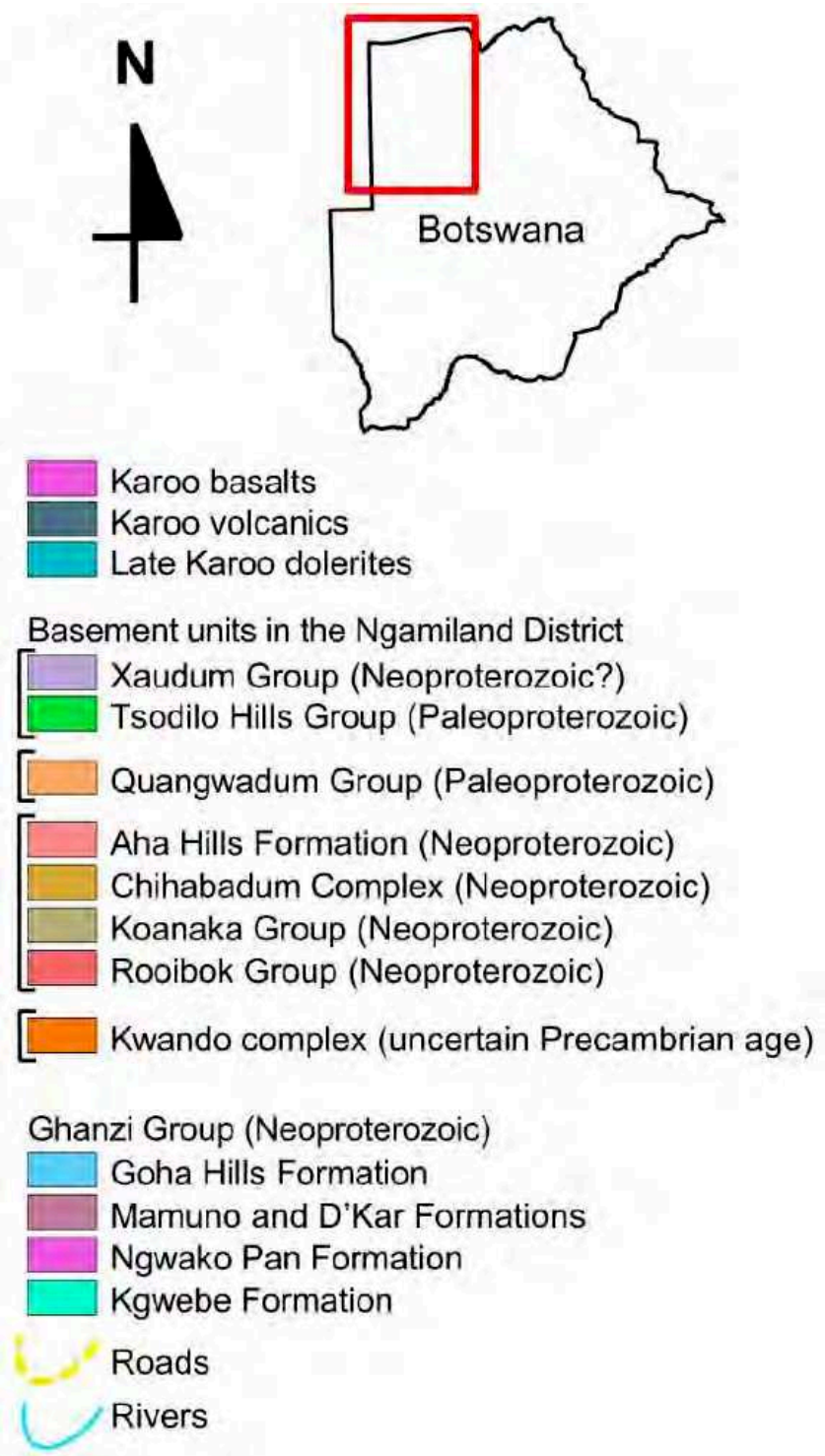
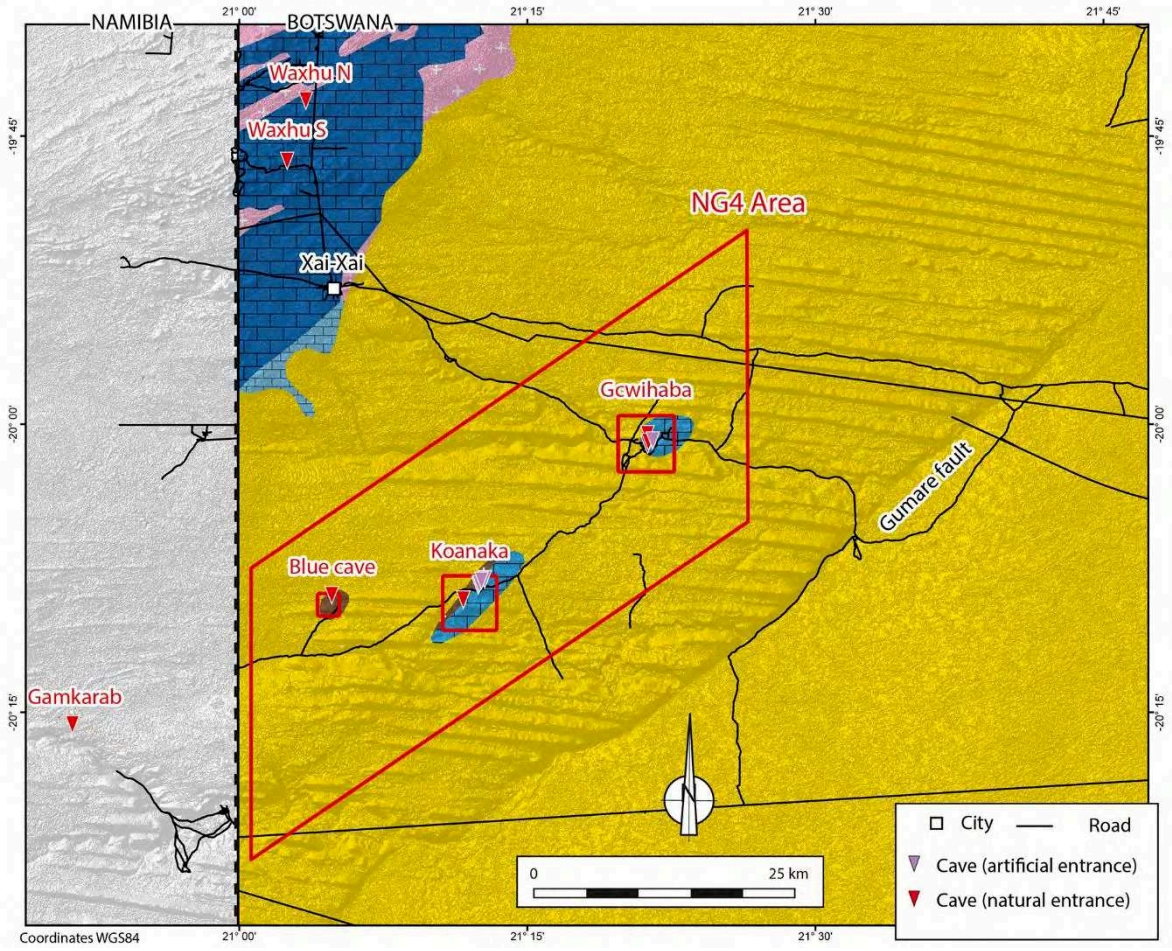


Figure 1249 Légende de la carte géologique de Mondillon (2020).

12.9. ANNEXE N°8 DU CHAPITRE N°4: NOUVELLE CARTOGRAPHIQUE DES AFFLEUREMENTS CARBONATES DU NORD-OUEST DU BOTSWANA.



Kalahari sedimentary rocks

Kalahari Beds	Dune sands of linear type and of barchan type. Pan and lake sendiments and deltaic and swamp sediments and undifferentiated sands and subordinate gravels, marls, calcretes, silcretes.	Tertiairy to recent

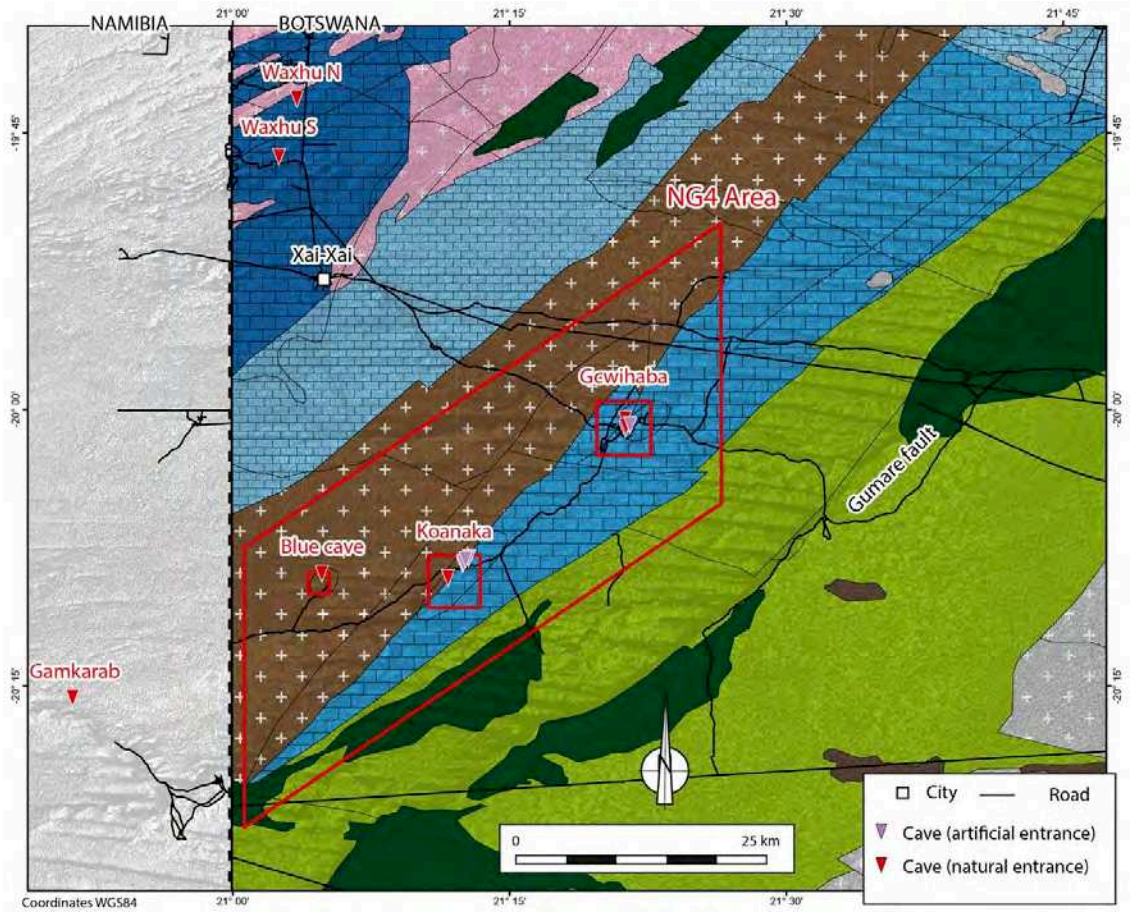
Metamorphic rocks (altered extrusive rocks and intrusive rocks as well as metamorphic rocks of uncertain origin)

Aha Hills Fm	Dolomitic marble and chert	? Neoproterozoic
Koanaka Group	Paragneiss?	? Neoproterozoic
Koanaka Group	Dolomitic marble	? Neoproterozoic
Koanaka Group (marbre and gneiss)	Dolomitic marble and poorly exposed granitic gneiss	? Neoproterozoic
Quangwadum Group	Granitic gneiss	? Palaeoproterozoic

Structural (Mc Donald, 2008)

Figure 1250 Carte géologique adaptée de celle de Machacha (1997).

Ci-dessous, la carte géologique sans la couverture des Sables du Kalahari (Figure 1251), inspiré de *The Pre-Kalahari Geological Map of the Republic of Botswana* de Machacha 1997, à l'échelle 1/1 500 000.



Failles (BGI, Geology Pre-Kalahari) ———

Roches volcaniques

Volcanisme Karoo tardif	Dykes et filons de dolérites	Jurassique (210 à 140 Ma)
Volcanisme Karoo supérieur	Basaltes et intrusions indifférenciées de dolérites intrusives (formées en profondeur) ou extrusives (formées en surface) (équivalent au Drakensberg en Afrique du Sud)	Jurassique (210 à 140 Ma)

Roches métamorphiques (roches extrusives et roches intrusives altérées et roches métamorphiques d'une origine incertaine)

Complexe de Chihabadum	Roches ignées et méta-ignées (produites par le métamorphisme de roches volcaniques)	Néoprotérozoïque (1000 à 590 Ma)
Groupe de Rooibok	Amphibolites, magnétites - gneiss schisteux et granitiques	Néoprotérozoïque (1000 à 590 Ma)
Groupe de Koanaka métamorphisé	Paragneiss (issues du métamorphisme des marbres dolomitiques)	Néoprotérozoïque (1000 à 590 Ma)
Groupe de Quangwadum	Gneiss granitiques	Paléoprotérozoïque (2500 à 1600 Ma)

Roches sédimentaires

Karoo supérieur sédimentaire Groupe de Lebung	Grès orangers, rouges ou blanc, localement carbonatées avec des passées de siltites rougeâtres de plus en plus fréquentes vers le bas de la séquence (éq. au Stormberg en AfS)	Trias - Jurassique (250 à140 Ma)
Formation des Aha Hills	Marbres dolomitiques et silex	Néoprotérozoïque (1000 à 590 Ma)
Groupe de Koanaka	Marbres dolomitiques	Néoprotérozoïque (1000 à 590 Ma)
Groupe de Koanaka (marbres et gneisss)	Marbres dolomitiques et rares affleurements de gneiss granitiques	Néoprotérozoïque (1000 à 590 Ma)

Figure 1251 Carte géologique sans la couverture sédimentaire des Sables du Kalahari.

Sur la carte précédente, la cavité *Blue Cave* est située sur le Complexe de Chihabadum, qui sont des roches ignées, alors que la colline dans laquelle est nichée la cavité est constituée par des dolomies comme le révèlent nos nombreuses visites dans cette grotte et sur cette colline.

L'échelle de la carte au 1/500 000 et le fait que ça soit une carte interprétative des levés aéromagnétiques ne permet pas de distinguer la colline de Blue Cave qui est de faible superficie.

De plus, le Complexe de Chihabadum n'a pas encore été prouvé par forage (WATER SURVEYS BOTSWANA & AQUALOGIC (PTY) LTD, 2001, p.13).

Il en résulte qu'il pourrait donc exister d'autres collines dolomitiques et d'autres grottes dans ce « Complexe de Chihabadum ». Cela nous pousse donc à rechercher des collines sur cet ensemble.

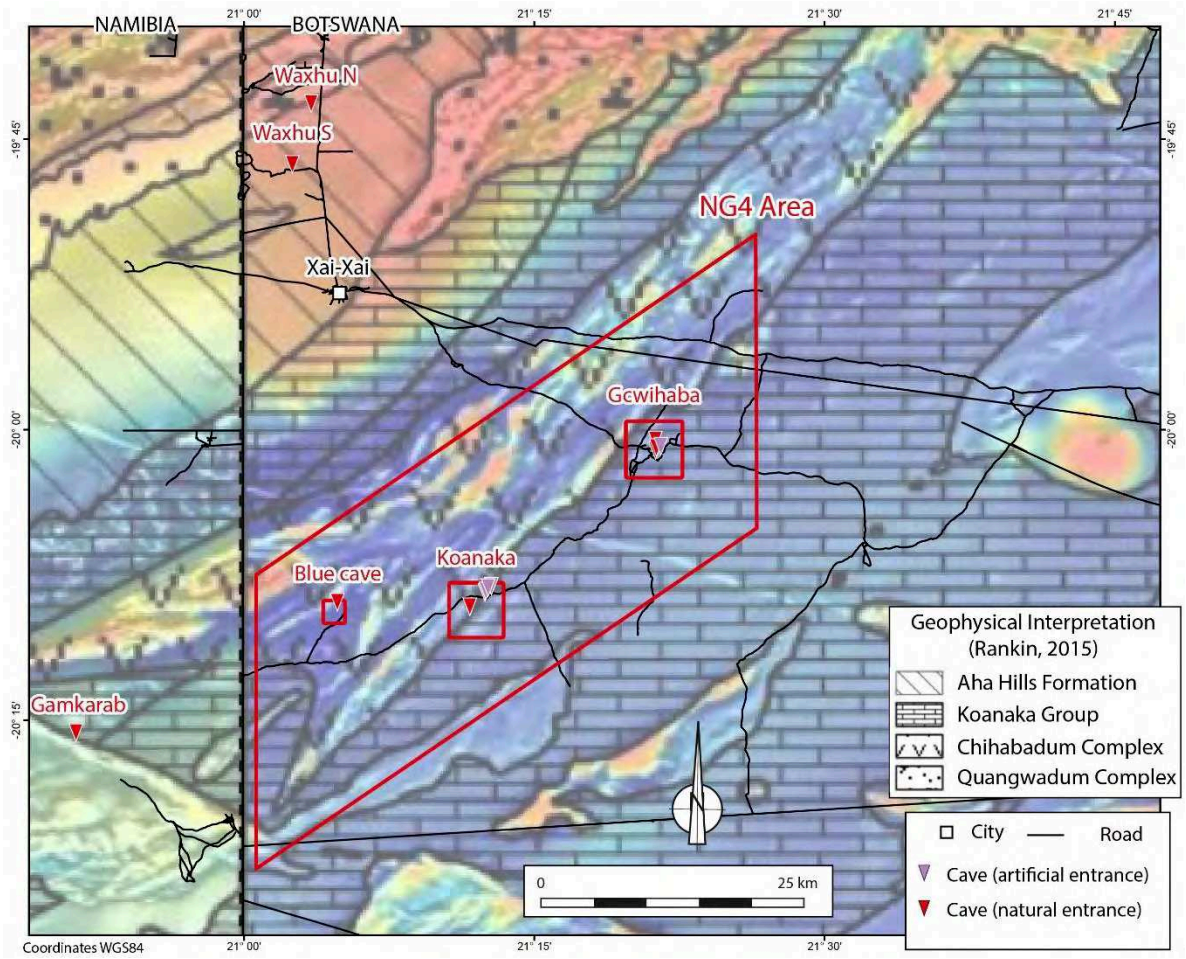


Figure 1252 Carte aéromagnétique de Rankin (2015, Fig.6.19, p.190) que nous allons réinterpréter pour rendre compte des dolomies de la colline K3 de la grotte de Blue Cave à Koanaka.

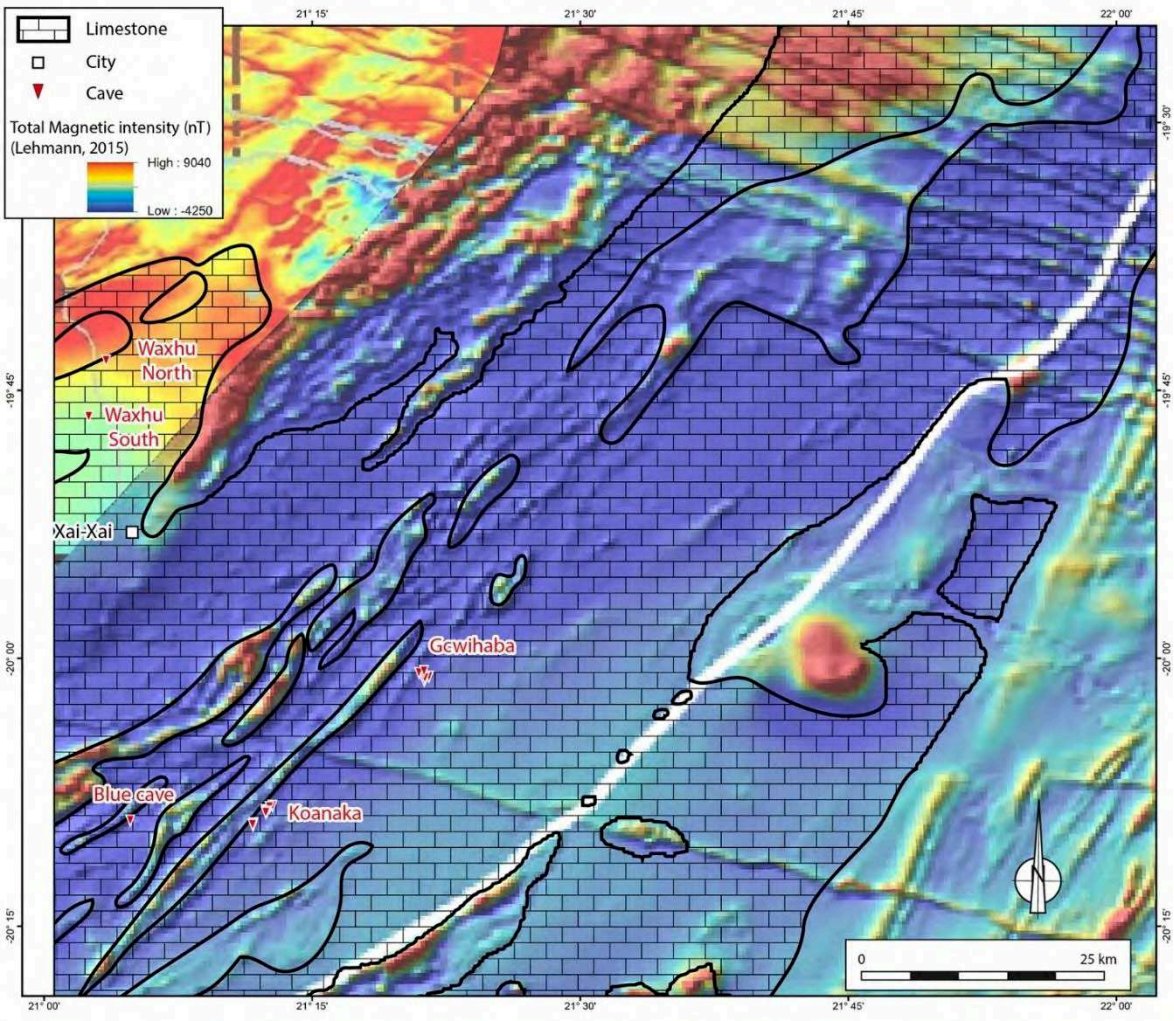


Figure 1253 Réinterprétation de la carte aéromagnétique de Lehmann (2015, fig.7, 179, modifié) pour prendre en compte la colline dolomitique de Blue Cave *que nous avons prospectée.*

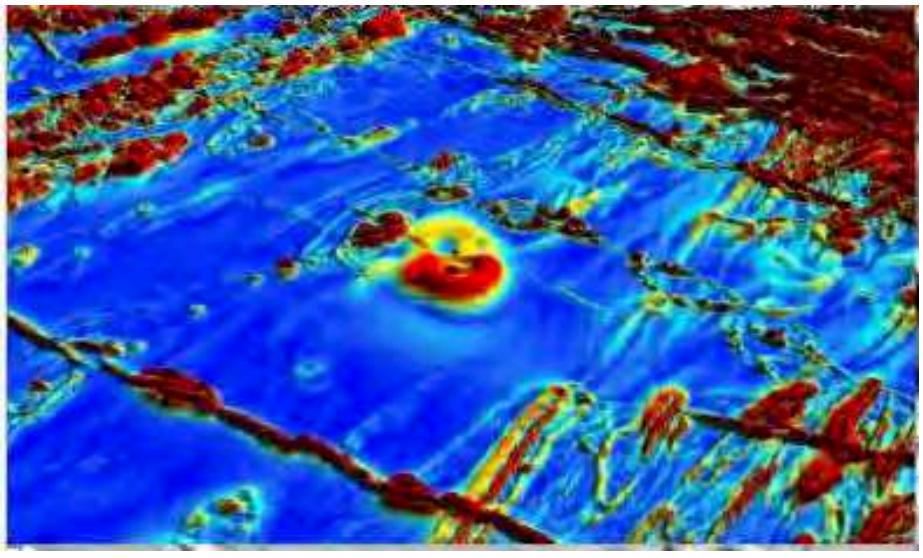
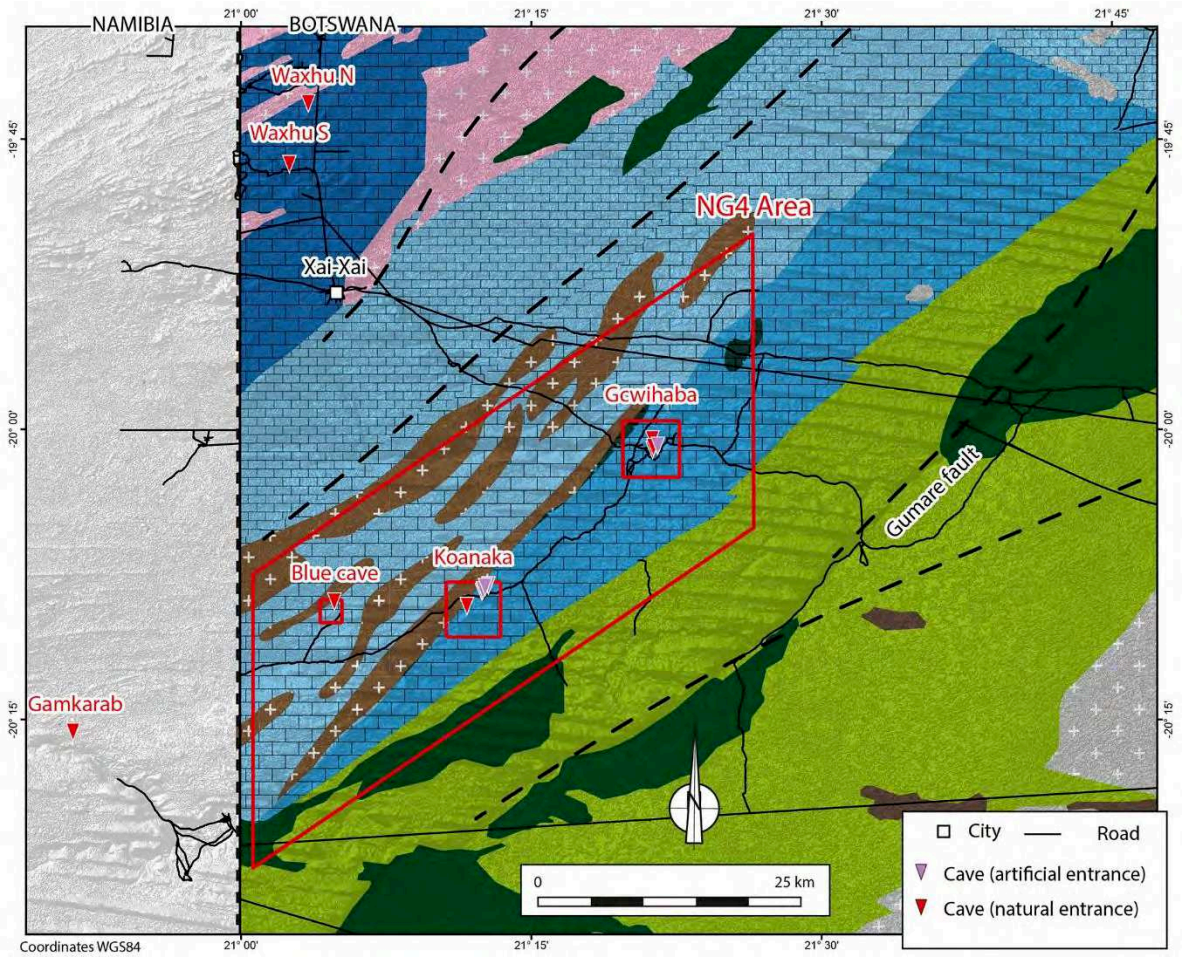


Figure 1254 Détail sur l'anomalie située à l'est de notre secteur d'étude, et sur les dykes de dolérites qui apparaissent en relief sur cette carte géophysique en 2.5D (Source : De Wit Tsodilo Resources).



Failles (BGI, Geology Pre-Kalahari) ———

Roches volcaniques

Volcanisme Karoo tardif	Dykes et filons de dolérites	Jurassique (210 à 140 Ma)
Volcanisme Karoo supérieur	Basaltes et intrusions indifférenciées de dolérites intrusives (formées en profondeur) ou extrusives (formées en surface) (équivalent au Drakensberg en Afrique du Sud)	Jurassique (210 à 140 Ma)

Roches métamorphiques (roches extrusives et roches intrusives altérées et roches métamorphiques d'une origine incertaine)

Complexe de Chihabadum	Roches ignées et méta-ignées (produites par le métamorphisme de roches volcaniques)	Néoprotérozoïque (1000 à 590 Ma)
Groupe de Rooibok	Amphibolites, magnétites - gneiss schisteux et granitiques	Néoprotérozoïque (1000 à 590 Ma)
Groupe de Koanaka métamorphisé	Paragneiss (issues du métamorphisme des marbres dolomitiques)	Néoprotérozoïque (1000 à 590 Ma)
Groupe de Quangwadum	Gneiss granitiques	Paléoprotérozoïque (2500 à 1600 Ma)

Roches sédimentaires

Karoo supérieur sédimentaire Groupe de Lebung	Grès orangers, rouges ou blanc, localement carbonatées avec des passées de siltites rougeâtres de plus en plus fréquentes vers le bas de la séquence (éq. au Stormberg en AfS)	Trias - Jurassique (250 à140 Ma)
Formation des Aha Hills	Marbres dolomitiques et silex	Néoprotérozoïque (1000 à 590 Ma)
Groupe de Koanaka	Marbres dolomitiques	Néoprotérozoïque (1000 à 590 Ma)
Groupe de Koanaka (marbres et gneisss)	Marbres dolomitiques et rares affleurements de gneiss granitiques	Néoprotérozoïque (1000 à 590 Ma)

Figure 1255 Réinterprétation selon la carte de Lehman (2015) (Figure 1253).

12.10. ANNEXE N°8 DU CHAPITRE N°4 : CARTES GEOLOGIQUES DE GCWIHABA

Nous avons redessiné cette carte (Figure 710 p.719) et nous l'avons projeté sur la Figure 741 (p.739). A l'époque, la grotte de Dimapo sur la colline B et la grotte de Wadum, sur la colline D, n'étaient pas connues.

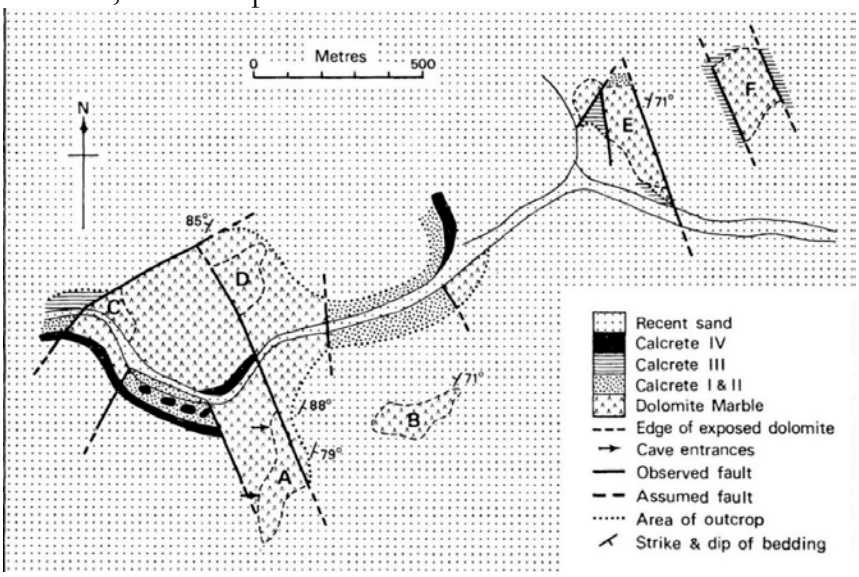


Figure 1256 Carte géologique de Gcwihaba levée par Baillieul et publiée par Cooke (1975, fig.3).

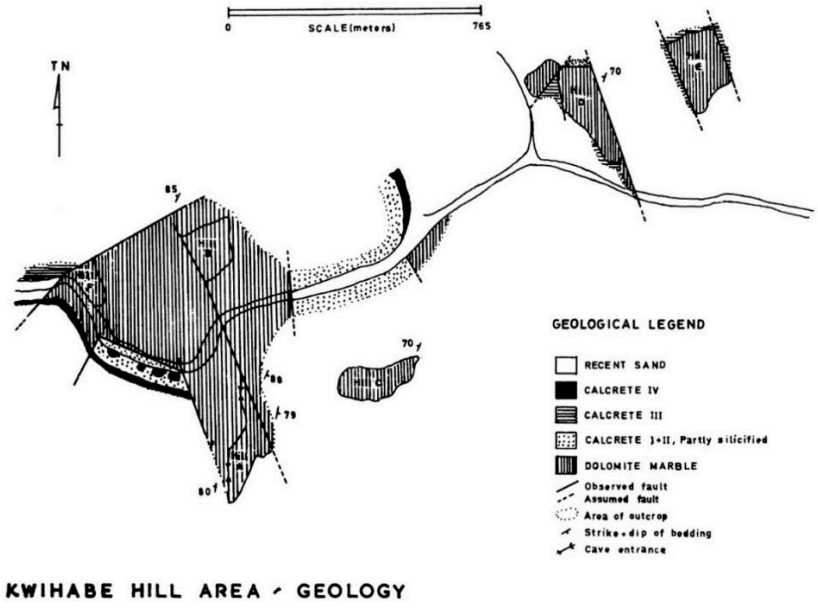


Figure 1257 Carte géologique de Gcwihaba levée par Baillieul et publiée par Cooke et Baillieul (1974, Fig.3).

12.11. ANNEXE N°9 DU CHAPITRE N°4 : IMAGE SATELLITE DU NORD-OUEST DU BOTSWANA

Cette image satellite du nord-ouest du Botswana (Figure 1258) montre l'étendue du delta actuel de l'Okavango et la faible superficie des étendues d'eau de Makgadikgadi : *Nwetwe Pans* et *Sua Pans*. Par rapport aux cartes précédentes, nous avons ajouté ici les trajets effectués en 2022 pour aller aux Chutes de *Victoria Falls* et en 2024 pour se rendre à *Moremi*. Ces trajets nous ont permis de caractériser les surfaces topographiques du nord-ouest du Botswana, notamment la surface à 1000 m et celle à 945 m qui correspondent, comme nous le verrons, à d'anciens fonds de lacs aujourd'hui asséchés.

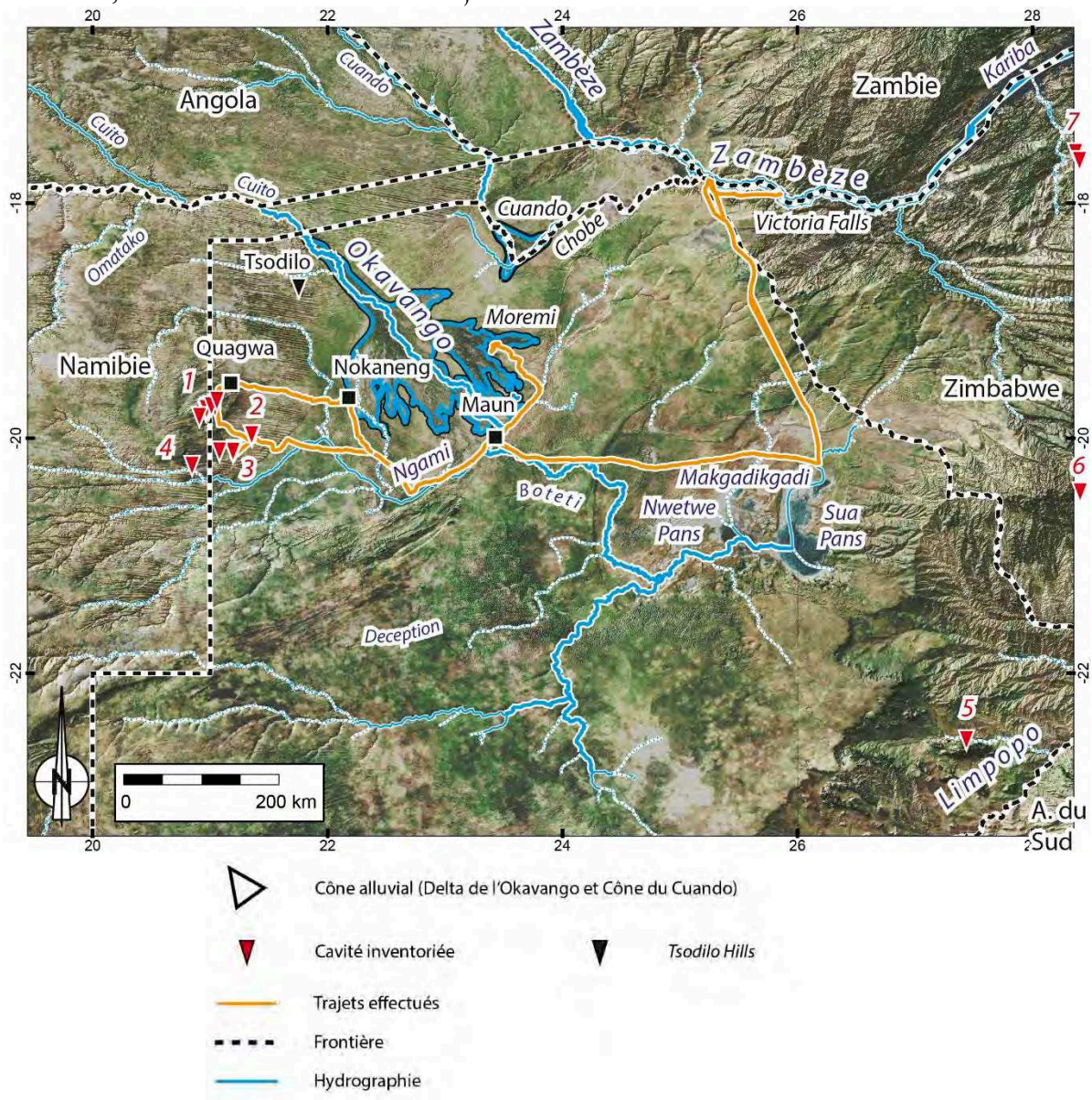


Figure 1258 ATLAS n°2 D : Image satellite du nord-ouest du Botswana.

Numéro des karsts : 1: *Aha Hills*, 2 : *Gcwihaba Hills*, 3 : *Koanaka Hills* (K1 et K2 à l'est) et *Blue Cave* (K3 à l'ouest), 4 : Gam (Namibie), 5 : *Cave in Phato Ye Sebilo Gorge*, 6 : Bamata (Zimbabwe) et 7 : Chirisa et Chitita (Zimbabwe).

12.12. ANNEXE N°10 DU CHAPITRE N°4 : DONNEES MNT POUR GCWIHABA ET KOANAKA HILLS POUR ETUDIER DES RELIEFS

Pour étudier les formes de relief de la région, nous disposons des données altimétriques du satellite DAICHI/ALOS (JAXA) de résolution 1 arc seconde soit 30 m qui a des incertitudes sur l'altitude de 5 m (Takahu *et al.*, 2014). Nous avons traité l'ensemble de ces données pour l'Afrique subsaharienne (Cf. Chapitre 1).

Nous disposons aussi des données de mesure des reliefs de la navette spatiale (*Shuttle Radar Topographie Mission*) SRTM3v2 (Cf. Chapitre 1) de résolution 1 arc second soit 30 m et pour laquelle l'imprécision de l'altitude est de 4 m en Afrique (Rodriguez *et al.*, 2006).

Pour étudier le secteur de Gcwihaba Hills et le secteur de Koanaka Hills (K1 et K2) (Figure 1259) (Selfe / GRS Consulting, 2005a, p.15 ; 2005b, p.15 et 2013) nous avons utilisé les données mesurées par le *GRS Consulting* avec un GPS différentiel. C'est la donnée la plus précise que nous disposons pour l'intégralité de ces deux secteurs avec une résolution au centimètre. Une deuxième unité est placée sur une colline, comme station de base, et elle y reste pendant toute la durée du relevé. Elle transmet une correction de hauteur à l'unité de terrain par radio, en permanence. On appelle cela une correction RTK. C'est-à-dire une correction cinétique en temps réel.

Cependant l'incertitude de la mesure de l'altitude reste la même que celle avec un GPS non différentiel, autour de 20 m (comm. orale Gavin) à défaut d'avoir des points géodésiques[1] dans ces secteurs. La machine utilise donc son propre GPS pour se caler et non un point géodésique possédant des données précises.

Nous avons donc harmonisé les altitudes des données du GPS différentiel indiquées ci-dessous (Figure 1259) avec les données du MNT fourni par le satellite JAXA et le SRTM3V2. L'altitude minimale des données GPS différentiel est de 1039 m et le maximum autour de 1067 tandis que l'altitude minimale des données du MNT JAXA est de 1028 m et le maximum de 1091.

[1] En Afrique du Sud, on parle de *trigonometric beacon ou Trig Beacons*.

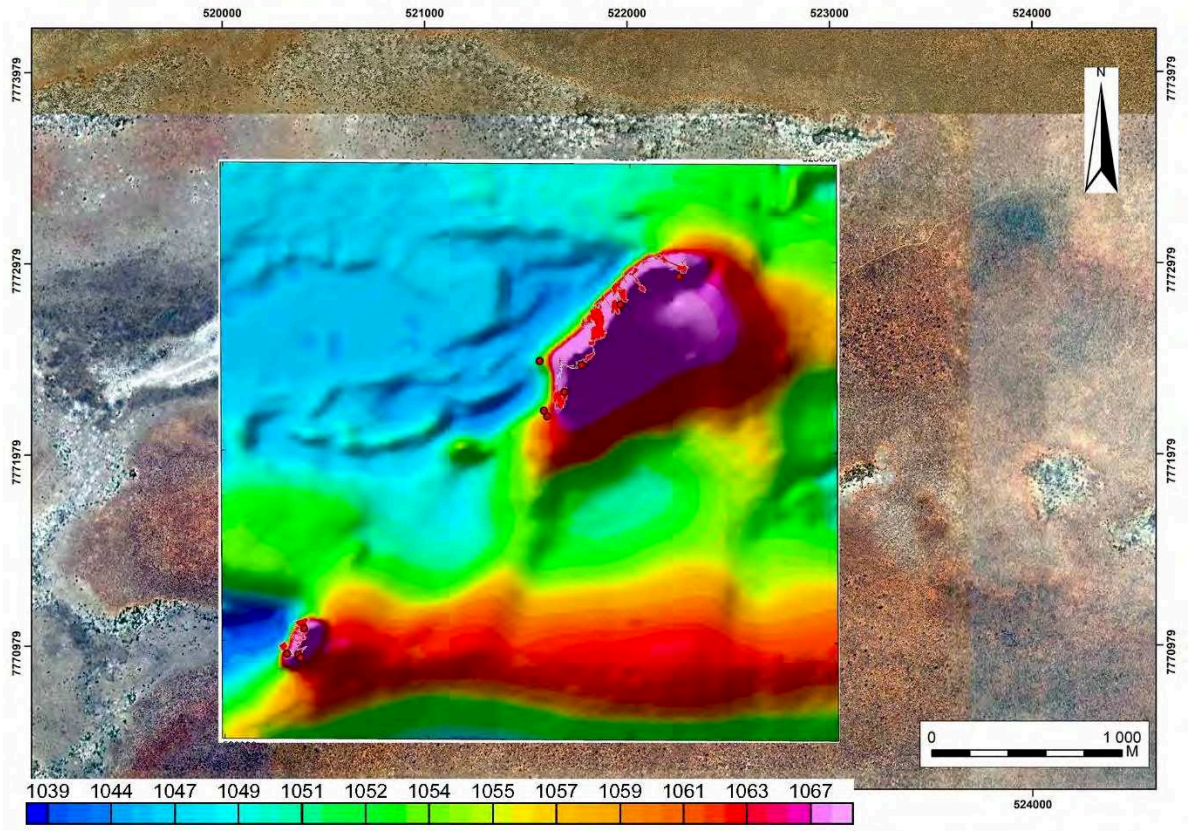


Figure 1259 Report de la carte en relief par GPS différentiel et échelle altitudinal brute fournis par le GPS différentiel (Selfe / GRS Consulting, 2005a).

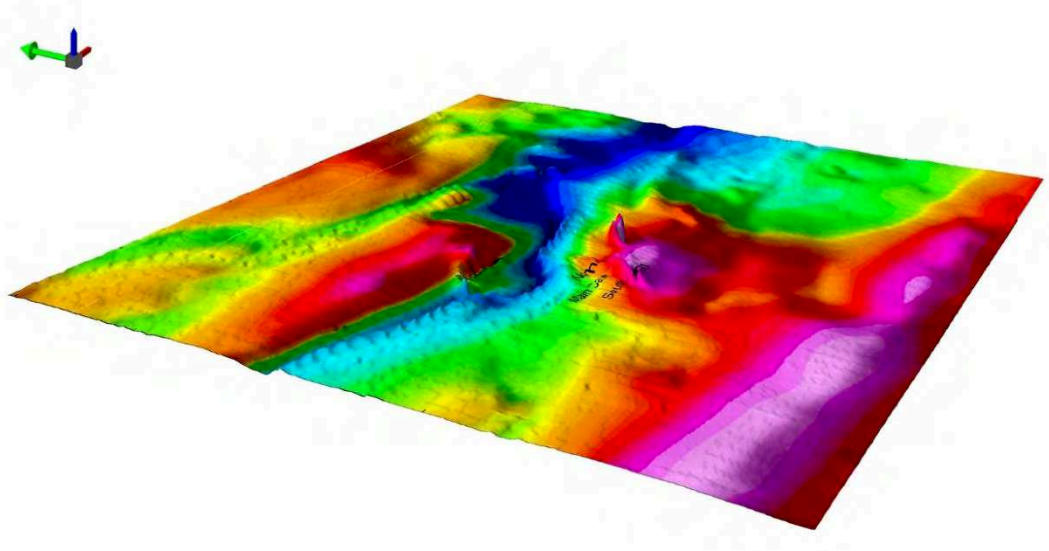


Figure 1260 Vue 2.5D.

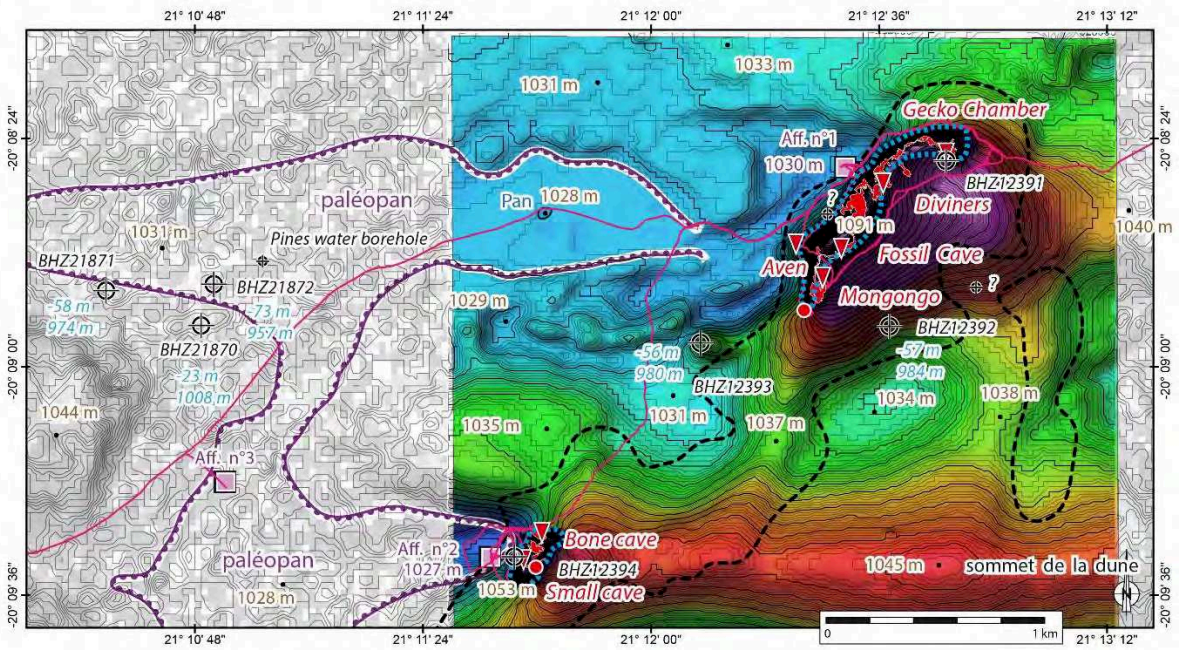


Figure 1261 A gauche, les courbes de niveau issues du SRTM 30 m et à droite, en couleur les données précises mesurées avec le GPS différentiel.

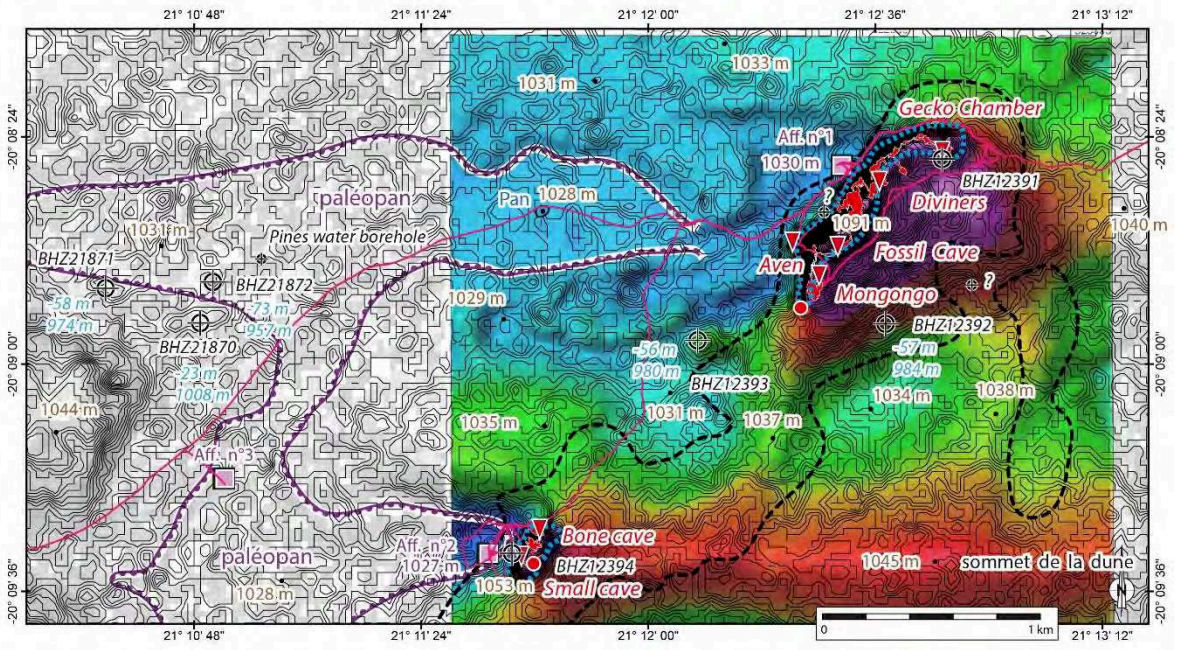


Figure 1262 Courbes de niveau issues du SRTM 30 m.

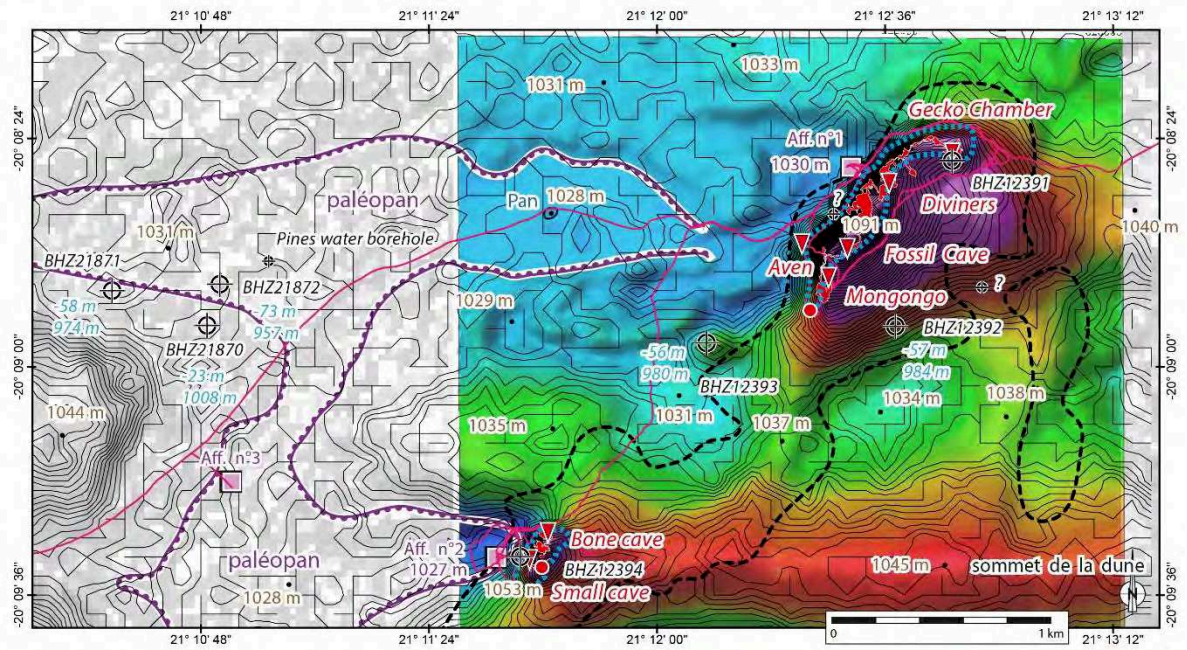


Figure 1263 Courbes de niveau calculées à partir du SRTMV2.

Plus localement, nous avons effectué des modèles 3D des collines par photogrammétrie à partir de photographies prises par drone (DJI FC7203) par Laurent Bruxelles. Nous avons ainsi des modèles 3D des collines de Koanaka (K1, K2 et K3) et pour Gcwihaba nous avons la colline de la grotte de Gcwihaba et une partie de la vallée de Gcwihaba (Figure 1264). La résolution des MNSs (Cf. Chapitre 3) est de l'ordre du centimètre mais l'incertitude sur l'altitude du modèle dépend aussi du GPS du drone et il est de l'ordre de 10 mètres.

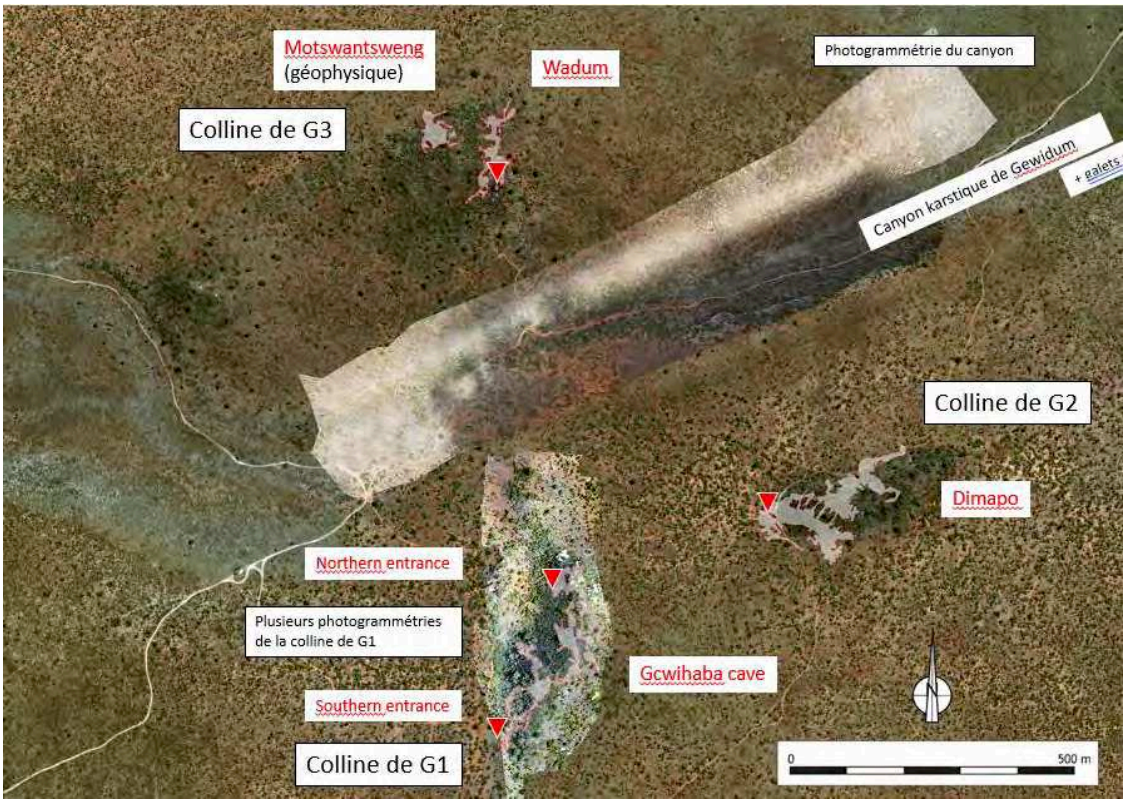


Figure 1264 Localisation des modèles 3D de la colline de Gcwihaba et de celui de la vallée.

12.13. ANNEXE N°11 DU CHAPITRE N°4 : CHRONOLOGIE DES DECOUVERTES SPELEOLOGIQUES, ARCHEOLOGIQUES ET PALEONTOLOGIQUE AU NORD-OUEST DU BOTSWANA

Bien que le désert du nord-ouest du Botswana soit une région inhospitalière et dangereuse, pratiquement inhabitée, où les pistes sont longtemps restées difficiles d'accès et où les conditions climatiques sont caractérisées par un climat aride et de faibles précipitations annuelles (~200mm), cette région a néanmoins fait l'objet de nombreuses expéditions et études scientifiques. Nous présenterons ici une chronologie des principales expéditions qui s'y sont déroulées depuis 1932.

Nous distinguons sept grandes périodes :

Les expéditions de Martinus Cooke de la découverte de la grotte de Gcwihaba en 1932 jusqu'en 1954. Elles aboutissent aux premières photographies de la grotte (1950), au premier plan sommaire de la cavité (Bent, 1954) ainsi qu'à la première étude géologique (Wayland, 1943).

Les expéditions du Professeur John Cooke (Université du Botswana) de 1969 à 1973, qui permettent d'étudier la grotte de Gcwihaba et la région de Gcwihaba Hills (avec la carte géologique de Baillieul) ainsi que de découvrir et de topographier deux nouveaux gouffres dans les *Aha Hills* (1972). Elles sont complétées par les deux expéditions du Falcon College (Rhodésie) de 1969 et 1970, qui réalisent la première topographie complète de la grotte de Gcwihaba.

Les deux expéditions de Martin Pickford en 1988 et 1990, dont la seconde est écourtée à seulement trois jours mais qui ramènent de riches informations : la première cartographie des gisements fossilifères à Gcwihaba et à Koanaka ainsi que la découverte de l'entrée de Bone Cave à Koanaka.

L'expédition anglaise de la BSES en 1991, qui réalise une nouvelle topographie de la grotte de Gcwihaba, suivie des **missions américaines du *Gcwihaba Cave Project*** de Ron Ritter (1992 à 1994), qui permettent la découverte et la topographie de la grotte de Wadoum à Gcwihaba, ainsi que de Bone Cave (K2) et de Blue Cave (K3) à Koanaka.

Les fouilles paléontologiques américaines dans Bone Cave, menées par la *Brook University* sous la direction de Blythe Williams de 1994 à 1997 qui permettent la découverte de restes de primates dont un crâne quasi-complet d'une nouvelle espèce de babouin du Pléistocène moyen.

Les expéditions spéléologiques de Roger Ellis de 2007 à 2016, qui conduisent à la découverte de nombreuses nouvelles grottes dans les Gcwihaba et Koanaka Hills, notamment grâce à des campagnes de gravimétrie réalisées par *GRS Consulting* et *Poséidon Geophysics*, couplées à de profonds et larges forages de *DeWet Drilling* (Gaborone) permettant de pénétrer des grottes inconnues. D'importants travaux de désobstruction sont également

entrepris au cours de cette période, conduisant presque à la mise au jour du plus vaste réseau karstique d'Afrique.

Et, enfin les **missions françaises, dirigées par Laurent Bruxelles**, de 2016 à 2026, associant fouilles paléontologiques, études karstologiques (fantômisation) et prospections spéléologiques. C'est dans le cadre de ces recherches que s'inscrit la présente thèse et le Chapitre n°4.

Les informations présentées dans cette annexe proviennent d'articles et de rapports scientifiques publiés par les géologues (Wayland, Cooke) et des archéologues (Yellen, Pickford, Williams), de livres de vulgarisation (Balsan, Senut), de bulletins spéléologiques (SASA, Ellis) de coupures de presses anciennes (Sciences et voyages), de diverses bases de données disponibles en ligne (Peabody Museum, Ghanzi Geskiedenis, lien vers le site de Howard Briand Selfe) ainsi que nos propres données de fouilles.

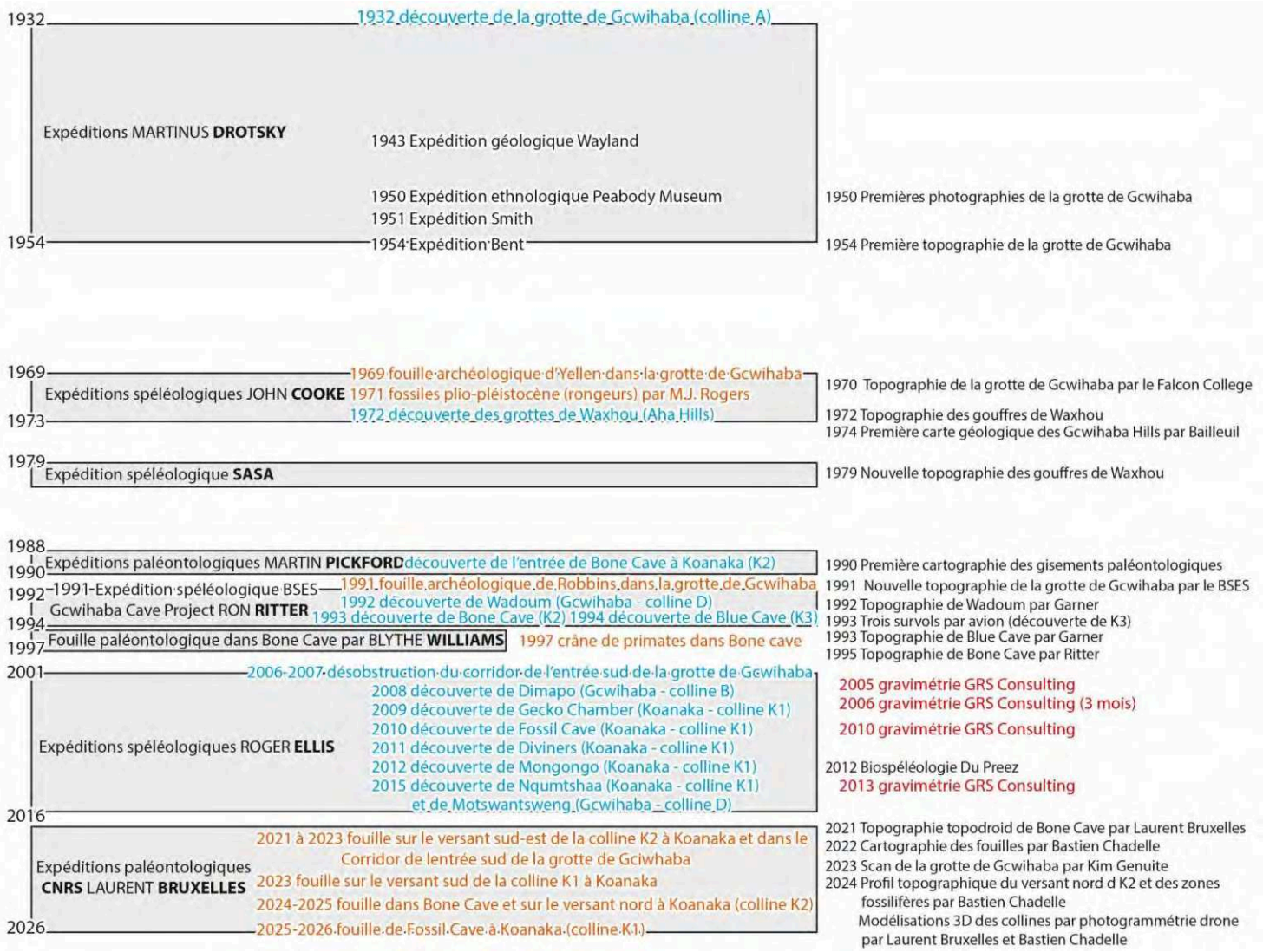


Figure 1265 Chronologie succincte des grandes explorations des grottes du nord-ouest du Botswana de 1932 à aujourd' hui.

1932

La grotte de Gcwihaba, nommée *« Drotsky's cave »* dans le passé, a été indiquée par les Bushmans à Martinus Drotsky[1] en 1932 (Cooke 1975, Ellis, 2025).
Martinus Drotsky est un afrikaner installé à Ghanzi (180 km au sud de Gcwihaba) autour de 1898. Le témoignage d'une petite fille de Drotsky, Neeltjie Bower, livre l'histoire suivante sur la découverte de la grotte le 1er juin 1932 :

> *« Martinus Drotsky était en train de traquer un animal qui a disparu dans la colline. Et puis les San lui ont dit que c'était une grotte et qu'il était trop dangereux pour un humain d'y entrer car il y avait des léopards et de gros serpents à l'intérieur qui le tueraient. Mais le sang d'explorateur qui était lui a donné envie d'explorer et il est entré. Il a vu ces merveilleuses grottes et a même découvert qu'on peut entrer d'un côté et sortir de l'autre côté ».*

Selon Wayland (1944), « Drotsky aurait découvert la grotte alors qu'il guidait un groupe de voyageurs fortunés en 1932 ». Dans ce même article, Wayland dit que l'entrée de la grotte a changé depuis que les San ont montré la grotte à Drotsky il y a 40 ans, soit en 1904 (?). En tout cas, c'est en 1934 que la grotte est protégée et qu'elle est déclarée « monument, à des fins de protection (Proclamation du Protectorat du Bechuanaland n° 68) » (Wayland, 1944). Il y a une gravure « Découvert le 1er juin 1932, M. Drotsky » sur un rocher à droite à l'entrée nord, indiquée sur la topographie de 1969 (Figure 1272 p.1317).
Certains auteurs se trompent et situent la découverte de la grotte en 1934 (Cooke et Baillieul, 1974). Pourtant Ellis (2020) fait référence à un article du journal *Cape Argus* en date du 10 septembre 1932 qui évoque la découverte de la grotte.

[1] Note bibliographique sur Martinus ou Martiens Drotsky (1877 – 1964)
https://www.wikitree.com/wiki/Drotsky-50
https://ghanzigesk.wixsite.com/ghanzi/martiens-andreas-drotsky

1943

Visite de la grotte à Noël 1943 par le géologue Wayland (directeur du *Bechuanaland Geological Survey*), Mr et Mme Drotsky, leurs deux enfants et M. W. Cairns (le commissaire du district par intérim Ngamiland). Dans son article de janvier 1944, Wayland (1944) décrit la grotte de Gcwihaba. Il évoque notamment dans la grotte des déjections de léopards et la présence de deux tanières. Il parle des concrétions volumineuses et du changement climatique. Cooke et Bailleuil (1975) indique injustement que la visite de Wayland est en 1940.

1950

Visite de la grotte par l'expédition du docteur F.D. van Zyl. Cette expédition se déroule de juin à septembre 1950. Y participent Laurent Kennedy Marshall et Lorna Mc Lean Marshall et leurs deux enfants.

> *« Laurence Marshall cofonde en 1922 l'American Appliance Company, compagnie à succès renommée Raytheon Manufacturing Company en 1925 ; il en est le président de 1928 à 1948. En 1949, Laurence et Lorna Marshall se rendent en Afrique du Sud dans le cadre d'un voyage d'affaires qui les conduit autour du monde. Raytheon est devenu un leader dans le développement du radar pendant la Seconde Guerre mondiale, et Laurence a le projet de vendre un système de guidage radar pour les ports aux autorités de Cape Town. Alors qu'il est à Cape Town, Laurence achète des cartes d'Afrique du Sud établies par l'armée américaine et est intrigué par la recherche d'une éventuelle cité perdue dans le désert du Kalahari (Anderson, 2019).*

Laurence Marshall est investie d'une mission. Le président du Peabody Museum d'archéologie et d'ethnologie (créé en 1866) de l'Université de Harvard, J. O. Brew, a rapporté à Laurence les rumeurs et les conjectures selon lesquelles des peuples de chasseurs-cueilleurs vivent au fin fond du désert du Kalahari. Entrer en contact avec un peuple qui peut ouvrir « une fenêtre sur le Pléistocène à laquelle personne n'a osé rêver » .

Il y avait les Marshall (Laurence, Lorna et John) accompagnés par Martinus Drotsky, sa femme et leurs deux enfants. À cette visite participaient aussi Merl La Voy, le Colonel Hoogenhout (administrateur de S.W.A.), John Neer (secrétaire de S.W.A.), H.J. Allen (commissaire de S.W.A.) Ted Rounds (ingénieur à Allens staff), C.J. Mathias et Dr van Zyl (le photographe), Senateur van Zyl, Mr Malan (fermier et archéologue du Cap), Dr Coetze, Mr Barry (Directeur de Rembrandt Cigarette Company)) et Mr Gooch (mécanicien) et d'autres membres d'Allens staff, etc. (https://www.der.org/kalfam/marshall-expeditions.html)

Des photographies[1] (premiers Polaroid et photographies en stéréo) existent de cette visite, ce sont les plus anciennes que l'on connaisse de la grotte (Figure 1266 à Figure 1269). Plus

[1] Lien vers l'Université d'Harvard qui a numérisé les photographies des Marshall.

https://collections.peabody.harvard.edu/objects/details/650706

https://peabody.harvard.edu/blog/marshall-family-archives-digitization-project

tard, Lorna Mc Lean Marshall devient une célèbre anthropologue en étudiant le peuple San de cette région (Marshall, 1976) et son frère John fit du cinéma ethnographique (Anderson et 2019). Elle ne semble pas être revenue dans la grotte lors de ses futures expéditions et on ne trouve aucune information sur la visite de la grotte lors de cette expédition de 1950 hormis ces photographies.

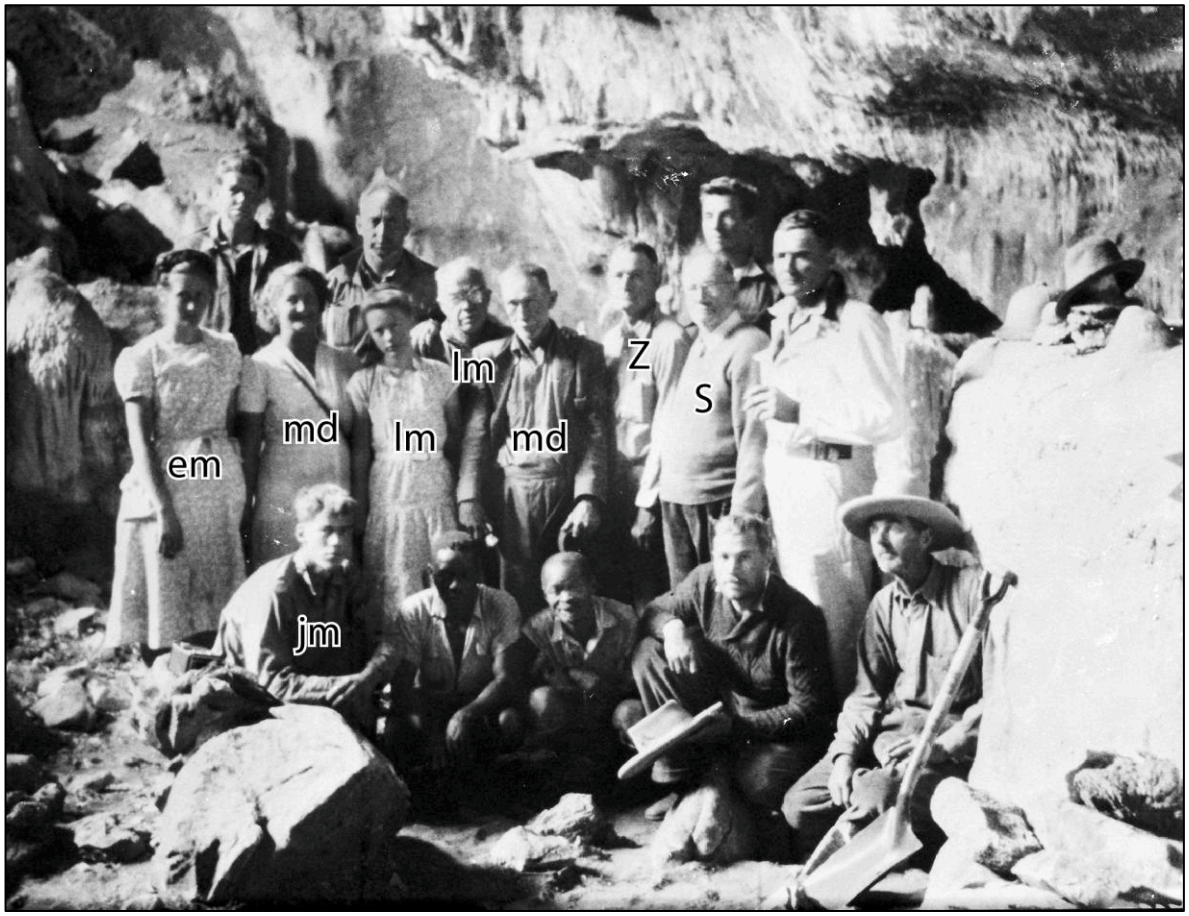


Figure 1266 Photographie de 1950 dans la grotte de Gcwihaba (Source : F.D. du Toit van Zyl / Harvard).

lm : Laurent Kennedy Marshall et Lorna Marshall ;
md: Martinus Drotsky et sa femme ;
Z: Dr van Zyl ;
em: Elisabeth Marshall ;
jm : John Marshall ;
S : « Senator » Gideon Bran van Zyl qui est le *Governor-General of The Union of South Africa.*

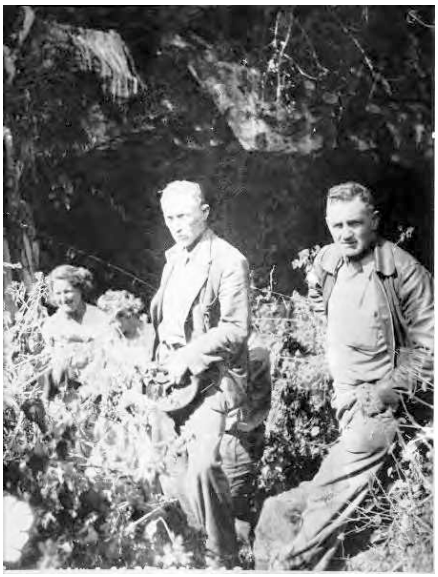


Figure 1268 Martinus Drotsky et sa femme puis Dr van Zyl.



Figure 1267 Martinus Drotsky, Laurent Kennedy Marshall et « Senator » Gideon Bran van Zyl.

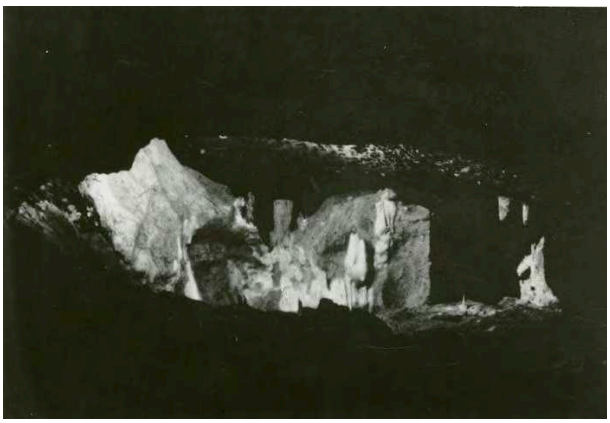








Figure 1269 Série de photographies de la grotte de Gcwihaba lors de l'expédition de 1950 (Source : F.D. du Toit van Zyl / Harvard).

Avec l'aimable permission de *Peabody Museum* pour reproduire ces photographies ici.

1951

Visite des frères Smith de Francistown en novembre 1951 (Bent, 1954) qui signalent une entrée au nord du réseau et deux salles.

1954

Les 5 et 6 août 1954, R.A.R. Bent visite la grotte de Gcwihaba avec Martinus Drotsky et un certain Coney. Ils publient un plan de la cavité (Figure 1270) (Bent, 1954) et décrivent les trois salles déjà connues par Wayland (1944) mais découvrent de nouvelles salles. Ils observent aussi des concrétions cassées et des traces de léopards. Ils évoquent aussi la présence d'autres grottes au nord, de l'autre côté de la vallée :

> *« qui n'ont jamais été pénétrées, il y a une entrée bloquée et une petite entrée qui pourrait être agrandie. Il y a quelques années, il était possible de voir à travers les entrailles bloquées et des piliers stalagmitiques ».*

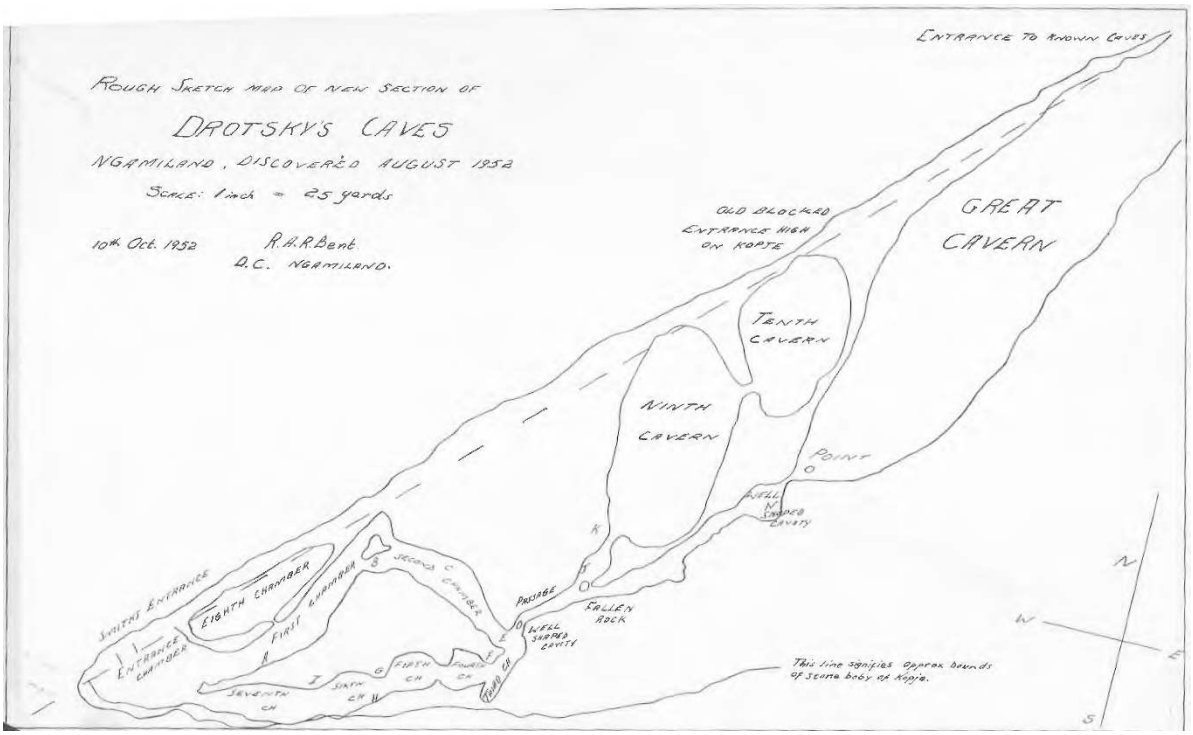


Figure 1270 Plan de la grotte publié par Bent en 1954 (Source : Bent, 1954).

1958

François Balsan (1902-1972) monte trois expéditions dans le Kalahari en 1948 (Balsan, 1950), 1951 et 1958. Il ne passera pas par la région de Gcwihaba mais il rencontrera Drotsky le 17 mars 1958 vers Ghanzi (Balsan, 1959a, p.12).

1969
Première topographie de la grotte

Les étudiants du *Falcon College* de Zimbabwe (Anon, 1969 ; Quick, 1970), lèvent la topographie de la grotte de Gcwihaba du 21 et 24 août 1969 pendant une expédition du 14 août au 5 septembre.



Figure 1271 Logo du Falcon College.

Les encadrants de l'expédition sont : J. Stakesby-Lewis, M.J. Condy, J.K. Quick, Appleton (mécanicien), P.G. Mavros (docteur), Hallamore, Whittall, L.E. Cohler) s'occupent des élèves suivants : A.C. Stewart, Kelly, O.D. Glenn, A. Braithwaite, D.G. Stedman, Vincent, R.C. Halsted, A.P.F. Lombard, T.F. Elliot, A.M. Goatly, Whaley, Arnord, van Beuningen, J.R. Woodnutt, A.N. Worthington, G.A. Ellis et S.W. Keeley.

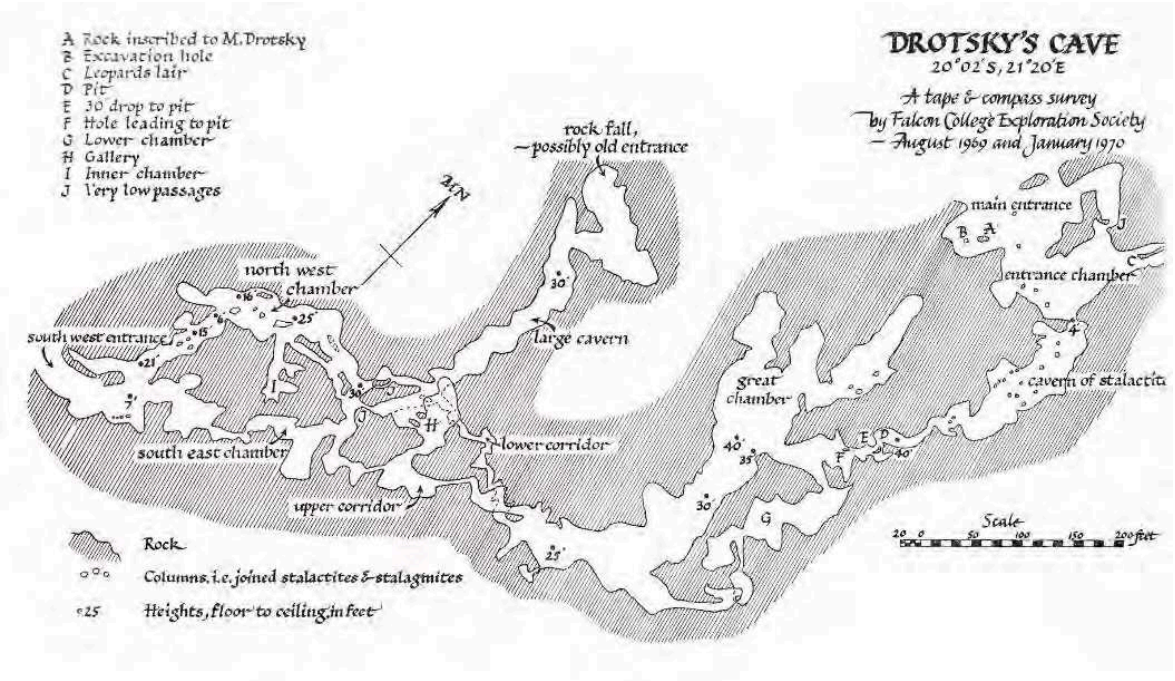


Figure 1272 Topographie de la grotte de Drotsky (Gcwihaba) levée par les élèves du Falcon College.

Edward Jones (« Sarie »/ « EJ ») Marais[1] (né le 21/1/33 et 22/06/22) était professeur de biologie et de chimie au *Falcon College* à ce moment-là. Nous ne savons pas s'il a participé aux expéditions. Il a eu comme élève Fenton P. D. (Wendy) Cotterill un spécialiste des chauves-souris dont nous avons consulté son ouvrage pour localiser des grottes en Afrique australe (Monadjem, 2001, page x Acknowledgements). Cotterill fait une thèse en 2006 sur l'évolution des paysages du Botswana et du paléolac Makgadikgadi (Cotterill, 2006 ; Moore *et al.*, 2009a) et du Zimbabwe (Moore *et al.*, 2012).

[1] À ne pas confondre avec J.C.E Marais qui a publié avec Martini sur les grottes de Namibie en 1996 et 1999 et qui a participé à la mission de Laurent Bruxelles en 2016 en Namibie.

Première fouille archéologique

Toujours en 1969, John Yellen, accompagné d'un groupe de !Kung San de la région de Dobe, mène des fouilles archéologiques dans la salle de l'entrée de nord de la grotte de Gcwihaba. Il réalise quatre sondages carrés de cinq pieds de coté (Figure 1273). Le sondage A, jusqu'à 2 mètres de profondeur, a livré 61 artefacts en pierre (Figure 1274) ainsi que de nombreux fragments de coquilles d'œuf d'autruche, de la faune et des charbons de bois datés de 12200 BP (Yellen *et al.,* 1987).

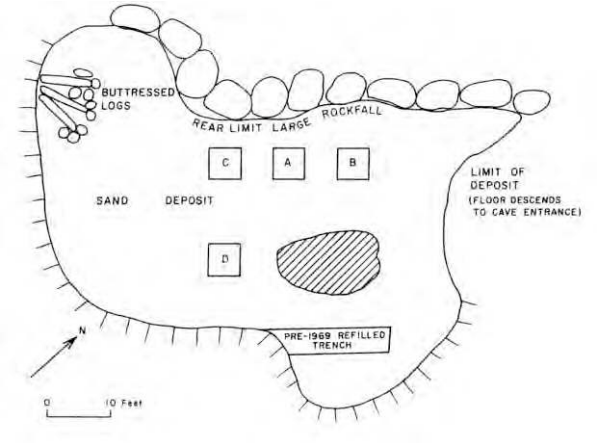


Figure 1273 Plan des fouilles de 1969 dans l'entrée nord de la grotte de Gcwihaba (Yellen et al., 1987).

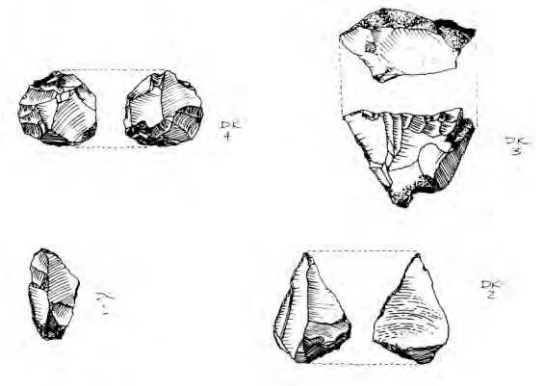


Figure 1274 Dessin des silex taillés trouvés dans le sondage A (Yellen et al., 1987)

1970

En janvier, c'est la seconde et dernière expédition du *Falcon College* de Zimbabwe pour terminer la topographie de la grotte (Quick, 1970, p.7).



Figure 1275 Photographies réalisées par Cohler des expéditions de 1969 et 1970 issues de The Magazine of Falcon College de 1970 *(Quick, 1970).*

Merci au *Falcon College* et à Bridget Accordi de m'avoir mis à disposition le compte-rendu de l'expédition dans *The Magazine of Falcon College* de 1970, rédigé par Quick (1970).

1971
Première expédition de Cooke à Gcwihaba

Nous n'avons pas d'information concernant la première expédition du professeur Harold John Cooke[1] (H.J.C.) (1927-2019) à Gcwihaba en 1971, l'année de son arrivée dans le pays. Il appartient à l'*UBLS (University of Botswana, Lesotho and Swaziland).*

La topographie réalisée par le *Falcon College* est améliorée (Figure 1277) et publiée (Cooke et Baillieul, 1974 ; Cooke, 1975, p.435). Nous avons reporté ces topographies sur les images satellites (Figure 84 et Figure 85 p.115).

En 1971, l'*UBLS* mesure le profil topographique de la colline de Gcwihaba (Figure 1276) (Bulletin SASA n°21, 1979-1980, p.4). Des photographies sont faites par avion.

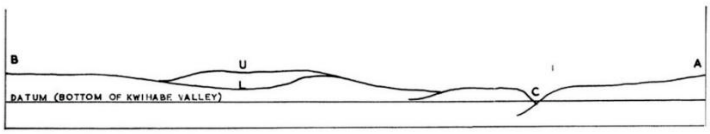


Figure 1276 Profil verticale de la grotte de Gcwihaba (Cooke et Baillieul, 1974, Fig.4, p.153).

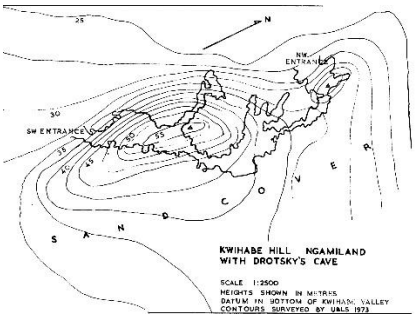


Figure 1277 Report du réseau et de la colline (Cooke et Baillieul, 1974, Fig. 5, p.154).

[1] https://www.rgs.org/about-us/our-work/latest-news/john-cooke-obituary

À la recherche des kimberlites (anomalies aéromagnétiques) et découverte des fossiles de rongeurs pliocènes à Gcwihaba

Cette même année, en 1971, J. G. Roger récolte des brèches fossilifères sur la colline C de Gcwihaba (Pickford et Mein, 1988 ; Senut, 1996). Nous avons décrit cette colline C plus haut (p.583).

Roger pourrait être un ingénieur de la S.A. Vendôme, en lien avec *Falconbridge explorations (pty) limited*, qui recherche des kimberlites (diamants) en faisant des levés aéromagnétiques par hélicoptère. Ça pourrait l'anomalie magnétique située à Gcwihaba qui a amené le géologue dans le secteur de Gcwihaba.
Il est fait mention d'un rapport intitulé *« Ground follow-up work was carried out in the Aha area from 21 May to 13 June, 1979, over the large bulls-eye. S.A. Vendome aeromagnetic anomaly »* (lien vers le site du BGI sur ce rapport) concernant des missions dans le secteur. Les échantillons ont été traités à l'acide à l'Université de Lyon et révèleront une faune de micromammifères *(Dendromurinae, Gerbilinae)* d'âge Pliocène supérieur (Figure 1278).

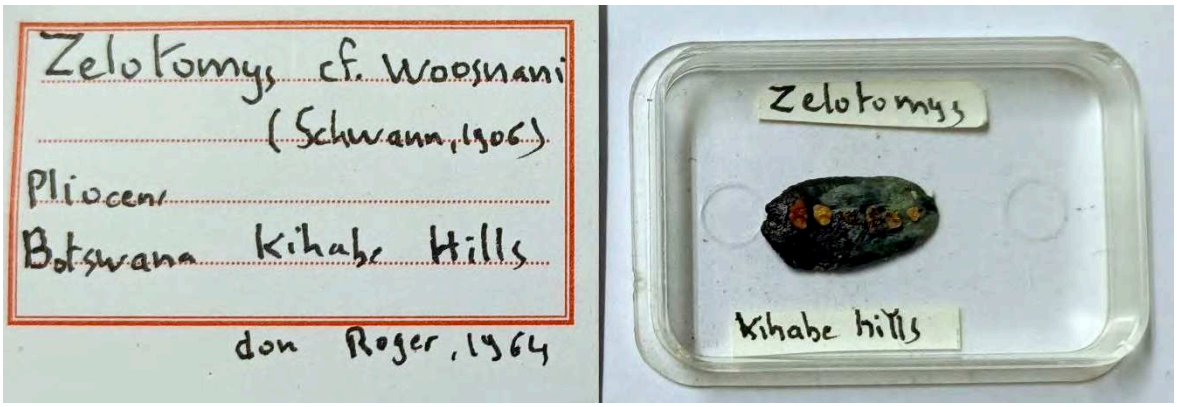


Figure 1278 Echantillon provenant de la découverte de J G. Roger en 1971 sur la colline C de Gcwihaba et conservé dans les collections de paléontologie de l'Université de Lyon 1 (Source : Emmanuel Robert).

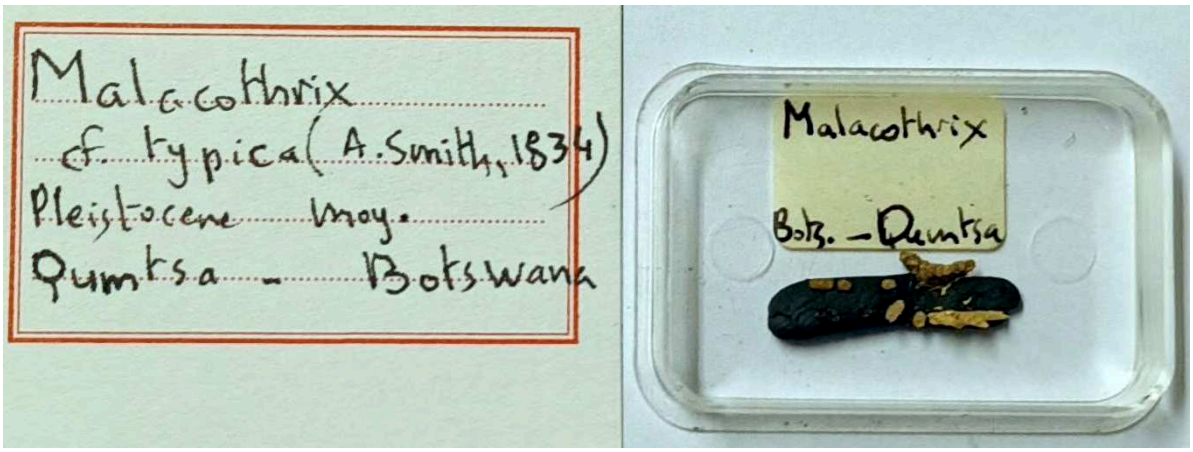


Figure 1279 Echantillon provenant de Koanaka (Source : Emmanuel Robert).

STAATSKOERANT
VAN DIE REPUBLIEK VAN SUID-AFRIKA

REPUBLIC OF SOUTH AFRICA
GOVERNMENT GAZETTE

As 'n Nuusblad by die Poskantoor Geregistreer

PRYS 10c PRICE
OORSEE 15c OVERSEAS
POSVRY—POST FREE

Registered at the Post Office as a Newspaper

VOL. 73] PRETORIA, 30 JULIE / 30 JULY 1971 [No. 3220

PROKLAMASIES

van die Staatspresident van die Republiek van Suid-Afrika

DEPARTEMENT VAN MYNWESE

No. 1288 30 Julie 1971

VERLENGING VAN PROSPEKTEERTOEKENNING

Die Minister van Mynwese het Prospekteertoekenning M46/3/263 ten gunste van S.A. Vendôme Co. (Pty) Ltd, vir 'n tydperk van twee jaar, eindigende 5 Oktober 1973, kragtens artikel 60 (1) (b) van die Ordonnansie op Myne, Bedrywe en Minerale, 1968 (Ordonnansie 20 van 1968), van Suidwes-Afrika, verleng.

PROCLAMATIONS

by the State President of the Republic of South Africa

DEPARTMENT OF MINES

No. 1288 30 July 1971

EXTENSION OF PROSPECTING GRANT

The Minister of Mines has, in terms of section 60 (1) (b) of the Mines, Works and Minerals Ordinance, 1968 (Ordinance 20 of 1968), of South-West Africa, extended Prospecting Grant M46/3/263 in favour of S.A. Vendôme Co. (Pty) Ltd for a period of two years ending 5 October 1973.

Figure 1280 Information concernant le permis de prospection de la S.A. Vendôme en 1971. (Source : https://www.lac.org.na/laws/GGsa/rsagg3220.pdf)

1972
Deux expéditions supplémentaires de Cooke à Gcwihaba et dans les Aha Hills

La deuxième expédition de Cooke à Gcwihaba s'est déroulée de mai à juin 1972 et est constituée du Professeur G. Schmitz, Dr F. Maurer, M. A. Jackson (UBLS Roma), Mme R. Cooke, M. et Mme I. N. Lancaster (Université de Cambridge) et Bo (Bushman local) (Cooke et Baillieul, 1974).

Une troisième expédition de Cooke, à Gcwihaba et dans les Aha Hills, a eu lieu en octobre 1972 et est constituée du Dr P. J. Lardner, M. P. Khabele, M. I. Ncube, M. K. Mogale, M. M. Habangaan, M. P. Glyn (UBLS Gaborone), M. A. Simpkins (Département des levés et des terres) (Cooke et Baillieul, 1974). Des étudiants étaient présents (Cooke, 1973).

C'est au cours de cette deuxième expédition qu'ils découvrent deux nouvelles grottes dans les *Aha Hills* (Cooke, 1973, 1975) :
Independence Cave (Waxhou South) (Figure 1281) (*cf.* Figure 521 p.547), descendue jusqu'à 56 m de profondeur, le 30 septembre.

Aha Hills Unamed Sinkhole (Waxhou South) (Figure 1282) (*cf.* p.545), descendue jusqu'à 70 m de profondeur.

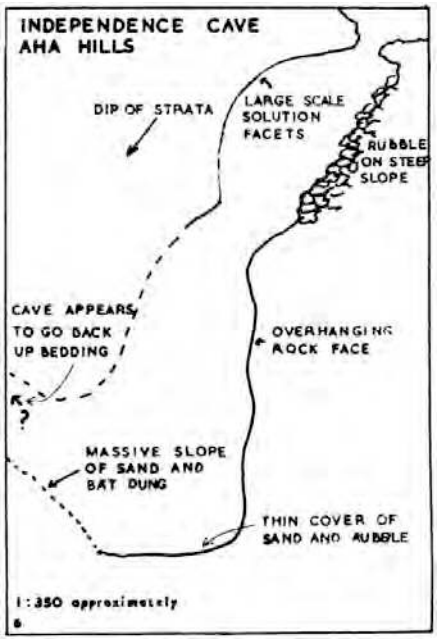


Figure 1281 Coupe topographique de Waxhou South selon Cooke et Baillieul (1974).

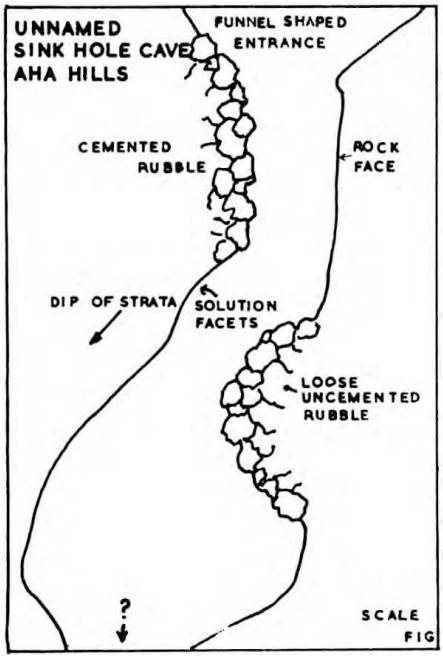


Figure 1282 Coupe topographique de Waxhou North selon Cooke et Baillieul (1974).

À Gcwihaba, la topographie du *Falcon College* est reprise, améliorée et publiée (Cooke et Baillieul, 1974 ; Cooke, 1975) ; le profil de la colline est mesuré, des photographies aériennes sont réalisées.

Les membres des expéditions sont :

de mai – juin 1972

Professeur G. Schmitz	
Dr F. Maurer	
Mr A. Jackson	(UBLS Roma)
Mrs R. Cooke	
Mr et Mrs I.N Lancaster	(Cambridge University)
Bo	Local Bushman

Octobre 1972

Dr P.J. Lardner	
Mr P. Khabele	
Mr I. Ncube	
Mr K. Mogale	
Mr M. Habangaan	
Mr P. Glyn	UBLS Gaborone
Mr A. Simpkins	Dept. of Survey and Lands

1973

Une quatrième et dernière expédition de Cooke à Gcwihaba

La quatrième et dernière expédition de Cooke à Gcwihaba (Cooke et Baillieul, 1974) s'est déroulée en mai 1973.

Elle est constituée de :

DR G. Rohrmann	UBLS Swaziland
Mr P. Glyn	UBLS Gaborone
Mr et Mrs T. Baillieul	Dept. of Geological Surveys
Mr A. C. Campbell	Chief Game Warden, Botswana
Mr B. Muche	Botswana Game Industries
Mr P. Werner	Dept. of Survey and Lands

La topographie de la colline de la grotte de Gcwihaba est réalisée (Cooke et Baillieul, 1974). Plusieurs articles scientifiques sont publiés sur les résultats des expéditions de Cooke (Cooke 1974, 1975 ; Campbell 1974).

1977

Cooke et Verhagen (1977) publient l'âge des concrétions de la grotte de Gcwihaba.

Lab. No.	Sample No.	Sample Description	% Modern Carbon	Corrected Age (Years B.P.)
Wits 164	C74/8 (a) 1	Slice of Stalagmite SIII or SIV	13,47±0,44	15200±300
,, 165	C74/8 (a) 2	Same slice of Stalagmite	13,82±0,36	15100±200
,, 166	C74/8 (b)	Lower slice of Stalagmite	12,30±0,32	16000±200
,, 171	C74/9 (a) 1	Slice of Stalagmite SIII or SIV	17,23±0,52	13200±300
,, 167	C74/9 (a) 2	Same slice of Stalagmite	16,44±0,37	13600±200
,, 168	C74/9 (b) 2	Lower slice of Stalagmite	15,63±0,39	14000±200
,, 169	C74/10 (a) 1	Slice of Stalagmite SIII or SIV	17,98±0,23	13000±200
,, 170	C74/10 (b) 1	Lower slice of Stalagmite	17,42±0,37	13100±200
,, 195	C74/11 (b)	Slice of Stalagmite SIV	78,10±0,70	750±100
,, 163	C74/23 (2)	Nodule on growing Stalagmite	109,50±1,50	>20
,, 122	C73/Stl (a)	Slice of Stalagmite SIV	65,59±0,50	2200±100
,, 123	C73/Stl (b)	Lower slice of Stalagmite	62,79±0,45	2550±100
,, 306	C75/1	Stalactite section SII	1,40±0,27	34000±1700
,, 377	C75/1	,, ,, repeat	2,47±0,30	29300±1000
,, 309	C75/5	Remnant sinter flowstone SII	0,15±0,23	>45000
,, 313	C75/8	Hard old calcrete CII	0,13±0,25	>45000
,, 385	C75/9	Hard old calcrete CI	1,29±0,29	34700±2000
,, 315	C75/9	,, ,, repeat	5,48±0,33	22700±500
,, 307	C75/13	Soft calcrete CIII or CIV	25,39±0,50	10000±200
,, 375	C75/13	,, ,, repeat	25,99±0,33	9800±200
,, 308	C75/16	Sinter floor remnant SII	0,54±0,25	41900±5500
,, 386	C75/16	,, ,, repeat	0,97±0,18	37000±1700
,, 310	C75/17	Sinter floor remnant SII	0,15±0,25	>45000
,, 314	C77/22	Soft recent calcrete CIV	22,75±0,27	11000±100
,, 376	C75/22	,, ,, repeat	23,20±0,34	10800±100

Figure 1283 Tableau des âges des concrétions et des échantillons géologiques de Gcwihaba (Cooke et Verhagen, 1977).

1979

Expédition spéléologique « *Speleotours* » des Sud-africains du *SASA (South African Speleological Association)* du 15 juin au 15 juillet 1979. Ils visitent Gcwihaba du 28 au 30 juin 1979. Ils réalisent les topographies des grottes de Waxhou dans les *Aha Hills* : *Independence Cave* qui s'appellera ensuite *Waxhou South* et *« Aha Hills Unamed Sinkhole »* qui s'appellera *Waxhou North* (Anon, 1979, p.3-9 et topographies p.7). Un article est publié par Campbell (1979). Ils atteignent le fond des grottes (Figure 1284 et Figure 1285).

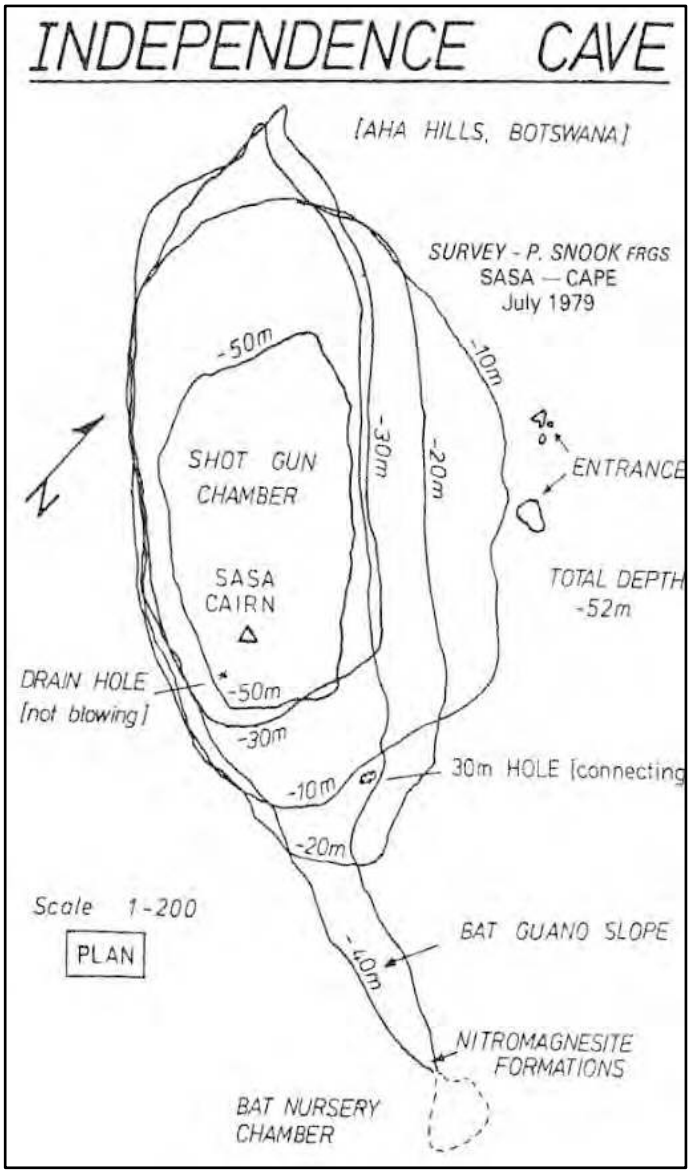


Figure 1284 Plan de Waxhou North (Independence Cave) (ANON, 1979, p.8).

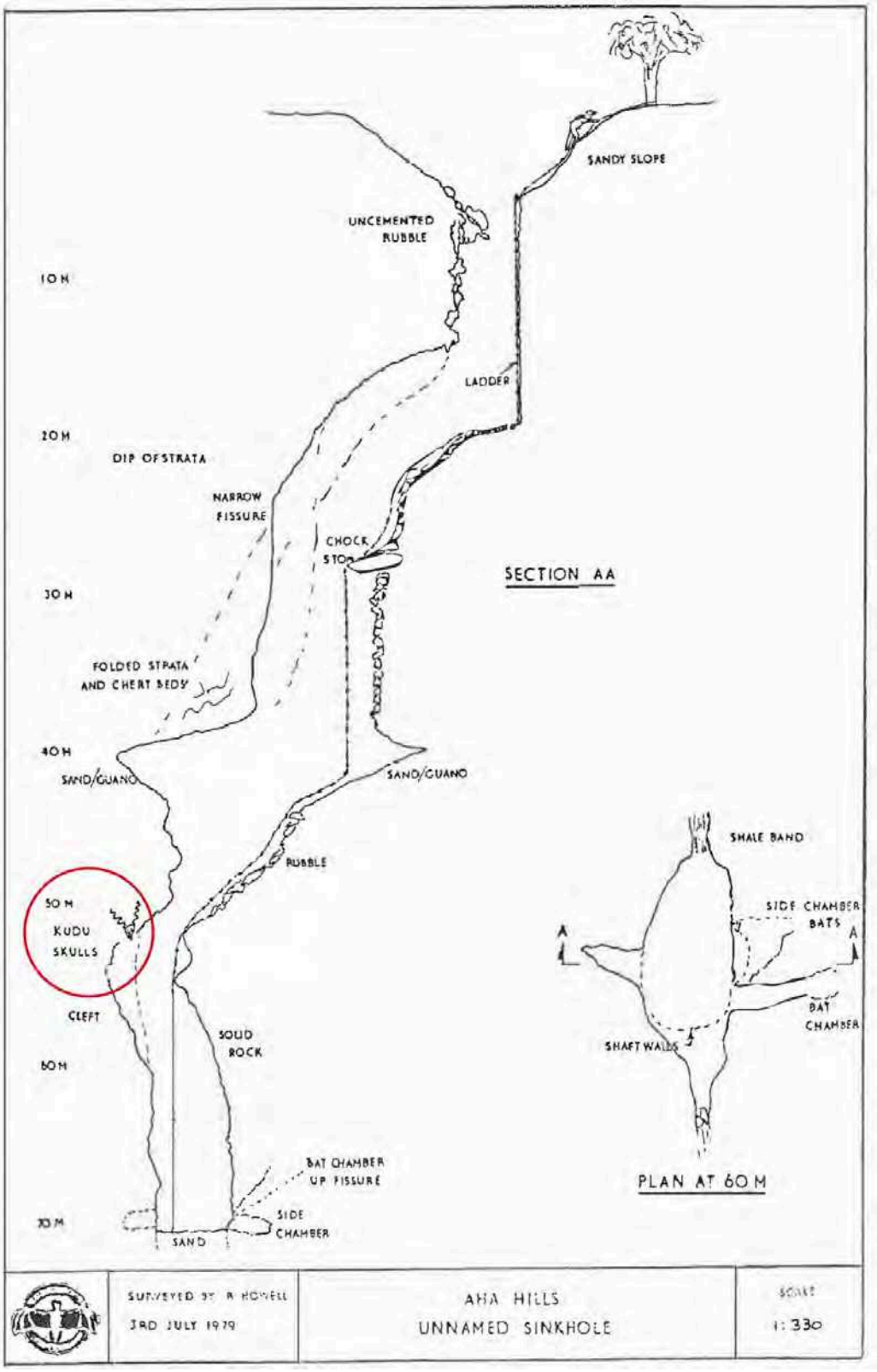


Figure 1285 Coupe topographique de Waxhou North selon Howell en 1979 (ANON, 1979, modifié), où des ossements de koudou sont indiqués en rouge.

1988 - 1990

Les découvertes paléontologiques de 1971 ont attiré les paléontologues français Martin Pickford prospecte pour la première fois la région en février 1988 (Pierre et Mein, 1988) puis revient avec le paléontologue Pierre Mein (Université de Lyon) et l'étudiante Brigitte Senut en février 1990. Ces missions ont permis de cartographier cinq sites fossilifères à Gcwihaba et Koanaka (indiqués en orange sur Figure 1287 et Figure 1288). De plus, l'entrée de la grotte de *Bone Cave* (*cf.* p.626) est mentionnée sur la carte de la colline K2 à Koanaka (Figure 1291) mais ils semblent s'être arrêtés au puits situé au fond de la salle de l'entrée (Ritter et Mann, 1995). Brigitte Senut (2008, p.77) se remémore en 2008 que :

> *« C'est grâce à Léonard Ginsburg, sous-directeur du laboratoire de paléontologie du Muséum national d'histoire naturelle à Paris [...] qui vint me voir dans mon bureau un jour de 1988 et me remit une petite boîte[1] de fossiles provenant du Botswana avec le nom du géologue qui avait récolté ces restes de micromammifères [...]. Ces quelques os ne me parlaient pas beaucoup, et nous avons dû rechercher sur les cartes du Botswana les régions où se trouvaient les niveaux fossilifères. Les recherches bibliographiques nous ont appris que des brèches fossilifères avaient été signalées dans les Aha Hills et Drotsky's cave près de la frontière namibienne, dans le Kalahari. Martin (Pickford) y fit une première prospection en 1989. Notre voyage fut programmé pour le mois de février 1990. ».*

Ces études complémentaires ont permis de dire que :

> *"La faune de petits mammifères de la colline C (p.583) de Gcwihaba est voisine de celle de Makapansgat avec, en particulier, les deux mêmes rongeurs muroïdes Palaeotomys gracilis et Prototomys campbelli. L'âge de ce dernier gisement, par analogie avec les sites d'Afrique de l'Est, est estimé entre 3,2 et 2,6 Ma" (Pickford et Mein, 1988).*

Pickford et Mein (1988) indiquent que :

> *« Cinq nouvelles localités plio-pléistocènes découvertes au Nord-Ouest du Botswana consistent en des sables éoliens cimentés par des carbonates accumulés dans des fissures karstiques et dans des grottes. Ces remplissages sont extrêmement riches en micromammifères qui représentent sûrement des restes de pelotes de réjection de rapaces. Les grands mammifères sont présents mais en général rares et mal conservés. L'analyse biostratigraphique provisoire indique que les strates ont approximativement le même âge que les remplissages de Makapansgat en Afrique du Sud. Les restes de micromammifères suggèrent que le paléomilieu était déjà aride au moment du dépôt, mais que des mares saisonnières bordées par de la végétation existaient à proximité ».*

La mission de février 1990 est interrompue au bout de trois jours à cause de problèmes logistiques. Ils n'ont plus d'eau, qui a été utilisée pour refroidir le moteur du véhicule, et ils ont tellement de crevaisons qu'ils décident de rentrer à Maun. Cependant ces deux missions de reconnaissance ont permis de trouver :

---

[1] Peut-être ces boîtes conservées à Lyon (Figure 1278 et Figure 1279).

« Des dents de primates[1], des Cercopithécoïdes. Appartenant au genre fossile Parapapio, bien connu dans les grottes sud-africaines où ont été découverts des représentants de la famille de l'homme, les Australopithèques. Peut-être avions-nous aussi inconsciemment l'espoir de découvrir des restes de ces premiers hominidés dans les fissures ? » (Senut, 2008, p.80).

La photographie ci-dessous (Figure 1286) montre une de ces dents, trouvée à Koanaka Nord.



Figure 1286 Molaire de Cercopithèque (Parapapio) in situ dans une brèche de remplissage provenant de Koanaka Nord (échelle : 1 cm) (Source : Senut, 2008, p.80).

En résumé, ces deux expéditions paléontologiques ont permis de découvrir « cinq sites fossilifères majeurs dans d'anciennes grottes du nord-ouest du Botswana en 1988 et 1989 (Pickford, Mein et Senut, 1994). ».

La légende de la figure 2 publiée par Pickford, Mein et Senut (1994) précise qu'il y a trois sites fossilifères à Gcwihaba :

- **Gcw A** qui correspond à la colline où se trouve la grotte de Gcwihaba. Plus précisément, on trouve deux sites fossilifères sur cette colline comme l'indiquera plus tard Pickford (1990, Fig. 3, p.10), en orange sur la Figure 1289. Un squelette partiel de bovidé a été trouvé sur le site du nord *(Gwc A North)* (Pickford, 1990, p.1) ;

- **Gcw C North**, et **Gcw C South** indiquées en orange sur la Figure 1287. Un plan et un profil topographique sont publiés de ces sites (Pickford, 1990, Fig. 4, p.11) (Figure 1288).

[1] Cinq dents isolées trouvées dans les brèches de *!Ncumtsa* (Koanaka) selon Williams *et al.* (2012).

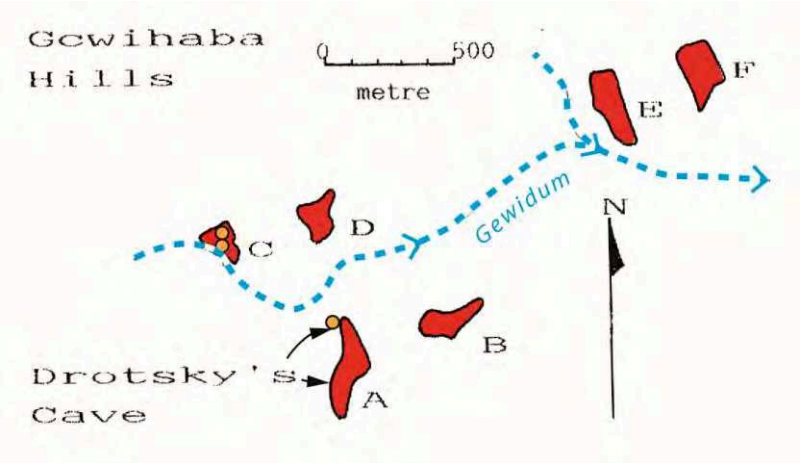
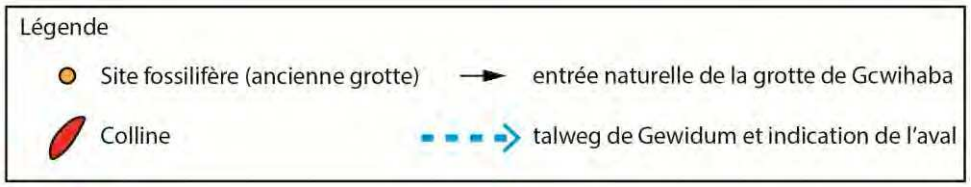


Figure 1287 Localisation des sites fossilifères plio-pléistocènes (en orange) à Gcwihaba Hills (Gcw A, Gcw C N et Gcw C S) et noms des collines Gcw A, Gcw B jusqu'à Gcw F (Source : Pickford, 1990, Fig. 2, p.9, modifié).



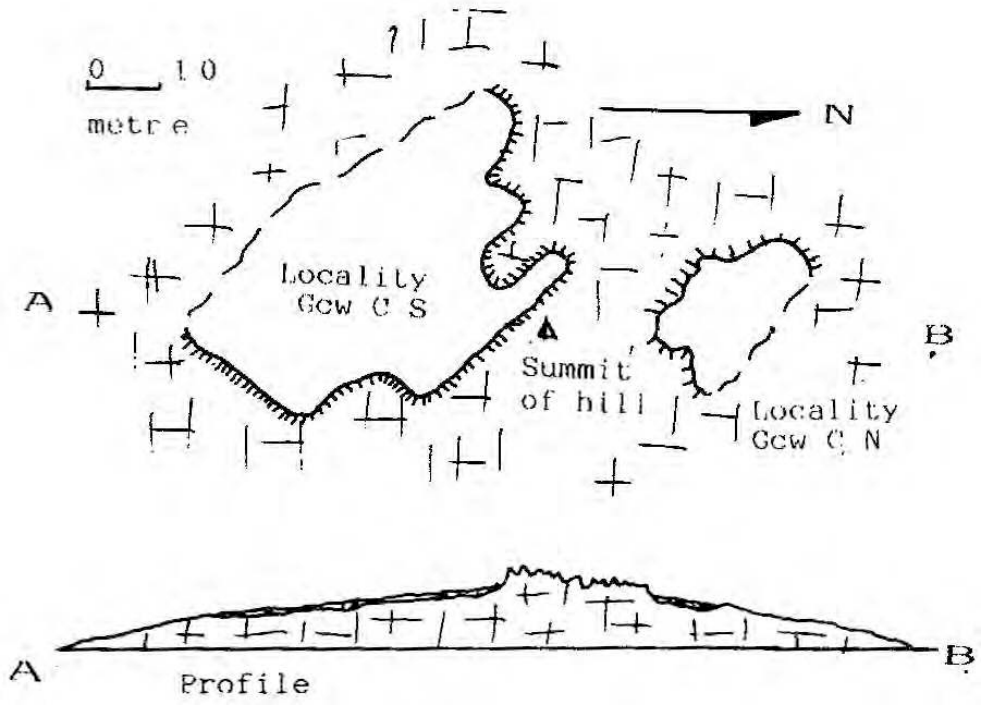


Figure 1288 Localisation des deux sites fossilifères de la Colline C (Gcw C) à Gcwihaba (Gcw C N et Gcw C S) qui correspondent à d'anciennes cavités trépanées par la surface topographique (Source : Pickford, 1990, Fig. 4, p.11, modifié).

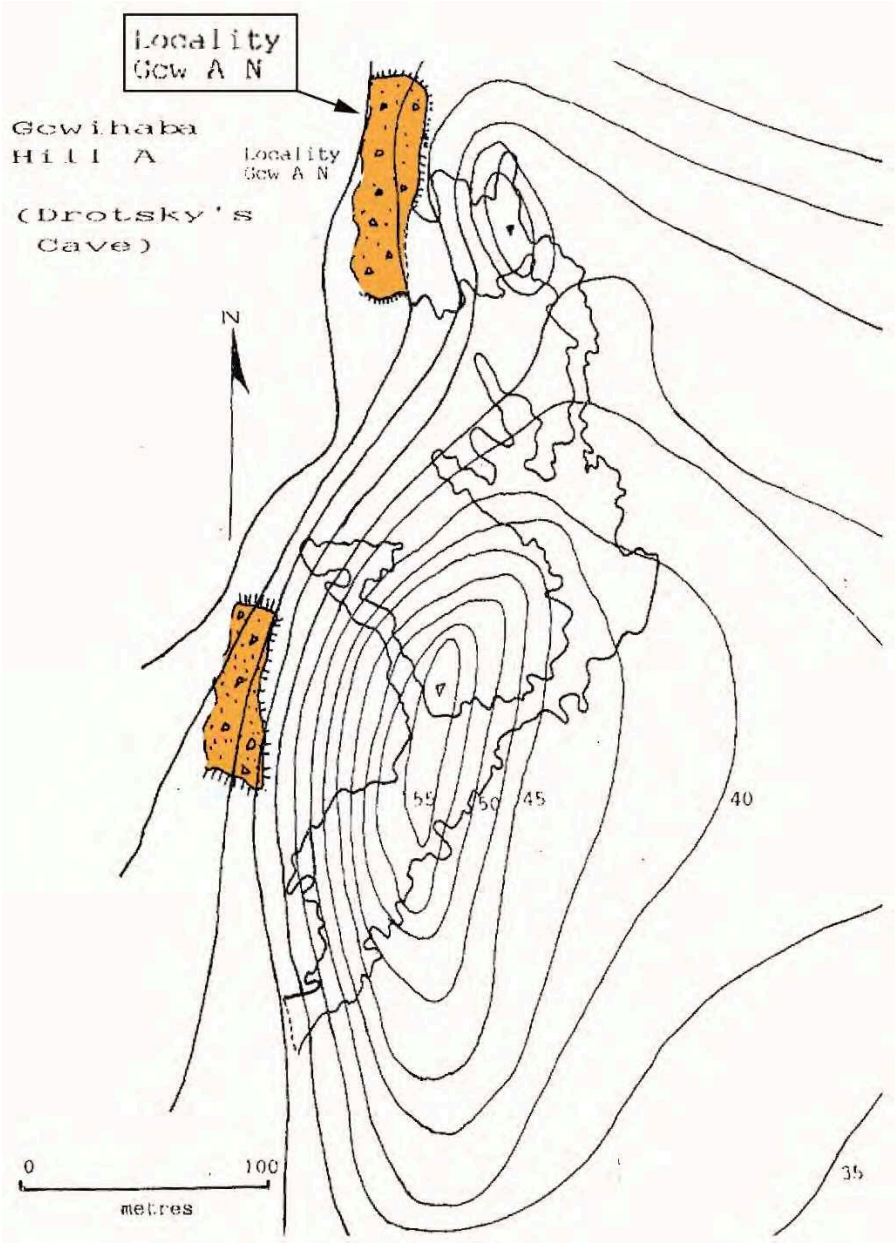


Figure 1289 Brèches fossilifères découvertes par Pickford (1990) et indiquées en orange (Gcw A N et Gcw A S) sur le versant ouest de la grotte de Gcwihaba, puis réidentifiées par Bruxelles et al. (2016, p.68). (Source : Pickford, 1990, Fig. 3, p.10, modifié).

Pickford, Mein et Senut (1994, fig.2) précisent aussi qu'il y a deux sites fossilifères à Koanaka (anciennement appelés Nqumtsa) (Figure 1290) :

- Koa N ;
- Koa S.

Aujourd'hui, ces collines portent le nom de K1 pour la colline au nord et K2 pour celle du sud. Les sites Koa N et Koa S appartiennent donc à la colline K2 de Koanaka.

> *Pickford, Mein et Senut (1994) indiquent que « tous ces sites fossilifères datent de la fin du Pliocène au Pléistocène inférieur, mais un seul (Koanaka Nord) a livré des cercopithécidés [Parapapio sp. (Senut en préparation)] similaires au matériel de Makapansgat.*

C'est donc sur Koa N, donc sur la colline K2, qu'a été trouvé la molaire de Cercopithèque (*Parapapio*) en photographie ci-dessus (Figure 1286).

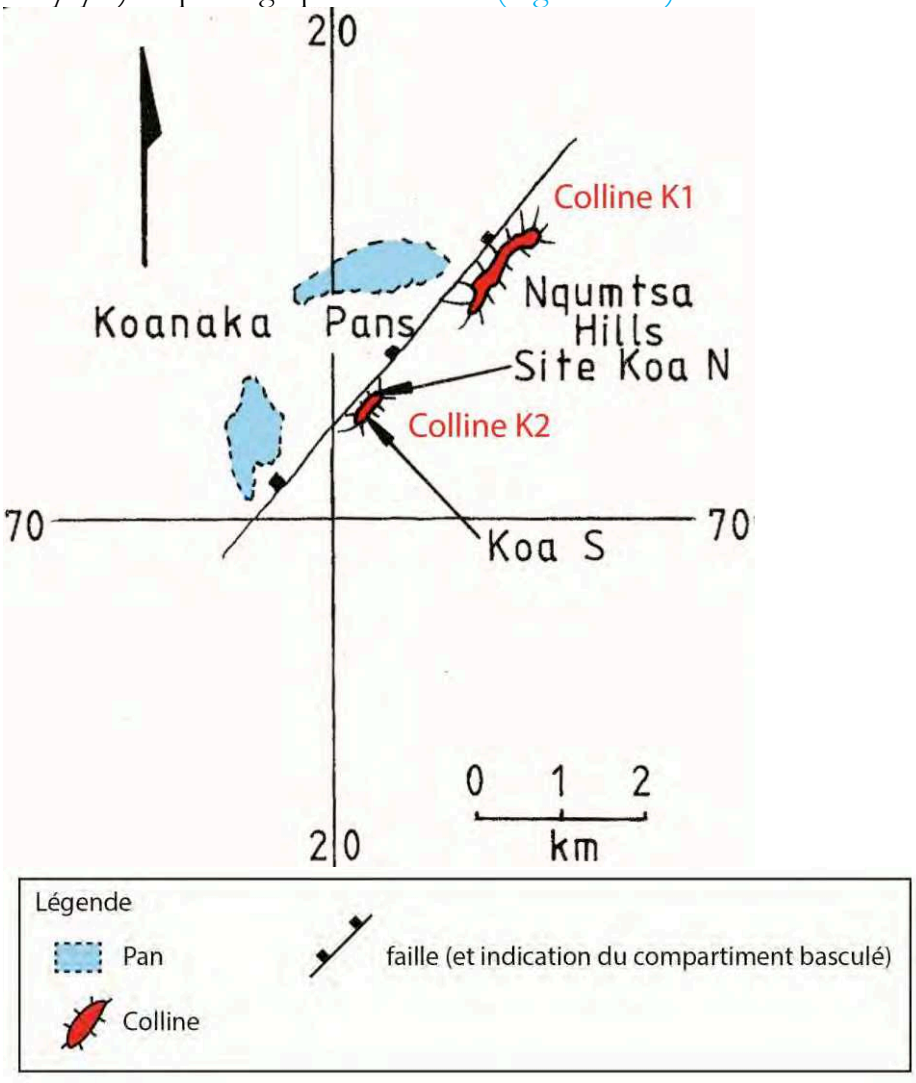


Figure 1290 Localisation des sites fossilifères à Koanaka : Koa N et Koa S.

Pickford, Mein et Senut (1994) indiquent aussi que : » Koanaka Sud a livré des éclats de quartzite in situ, suggérant une présence humaine dans la région au Pléistocène inférieur, mais aucun reste d'hominidé n'a été localisé ».

C'est donc aussi sur la colline K2 qu'ont été trouvés des éclats de quartzite.

> *« Des outils en pierre anciens ont été identifiés dans un gisement du Pléistocène inférieur au Botswana» (Pickford, Mein et Senut, 1994).*

Mais Brigitte Senut (2008, p.81-82) précise aussi :

> *« Nous n'avons pas trouvé de dépôts très anciens dans cette région, mais nous avons complété les données concernant la distribution des Cercopithèques fossiles ».*

> *« La découverte de plusieurs gisements plio-pléistocènes à grands mammifères, mais ces gisements nous ont paru trop difficile d'accès et un peu trop jeunes pour notre thématique. Cependant, les dolomites protérozoïques, riches en brèches fossilifères, affleuraient dans d'autres secteurs et nous avions espoir d'y trouver des remplissages plus anciens ».*

La liste des fossiles trouvés au nord-ouest du Botswana pendant ces expéditions est indiquée par Pickford, Mein et Senut (1994, Table 2).

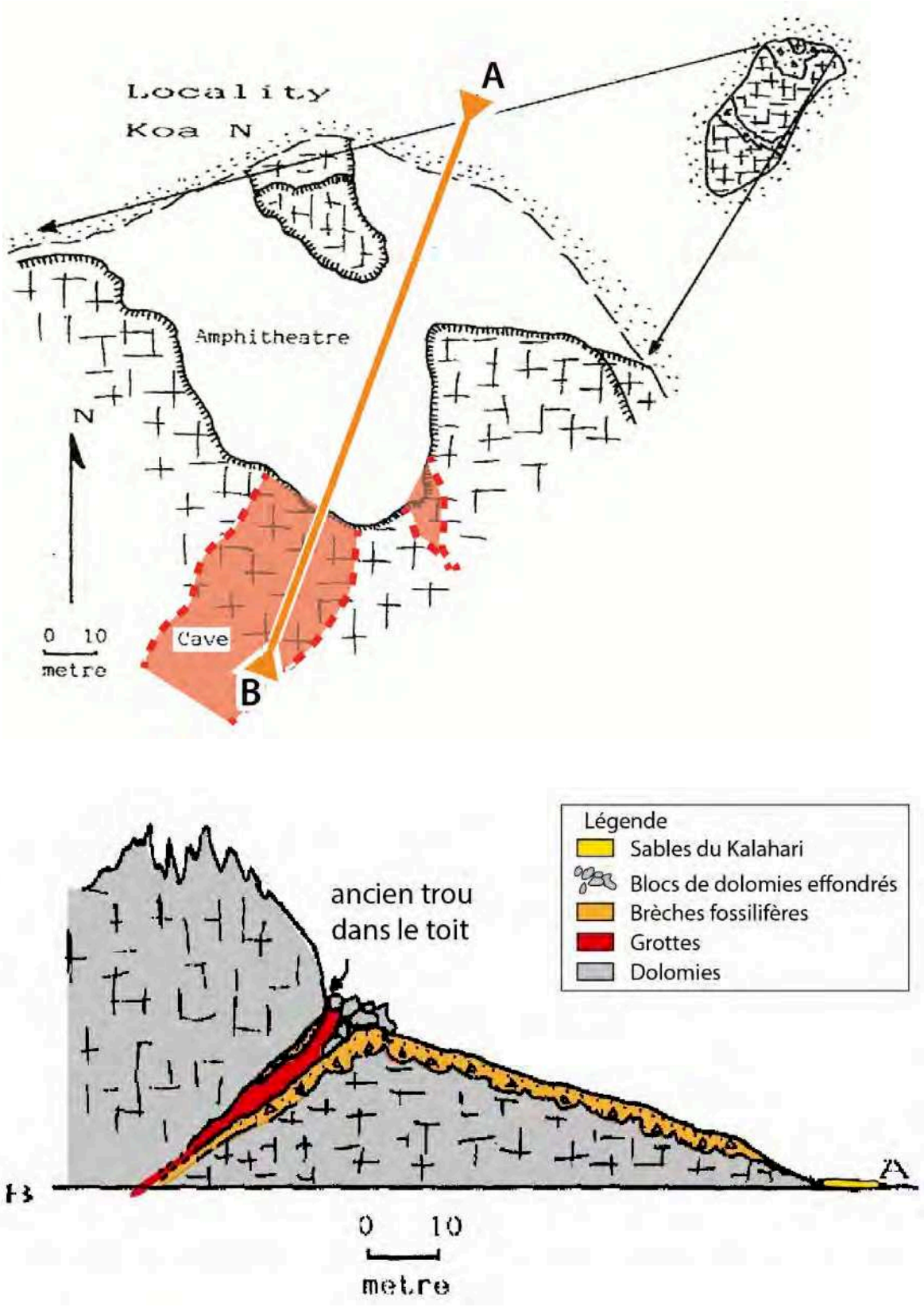


Figure 1291 Plan et coupe de l'amphithéâtre au nord de la colline de K2 à Koanaka et localisation de l'entrée de Bone Cave selon Pickford (1990, Fig.7). (Source: Pickford (1990, Fig.7, modifié)

1991
La fouille américaine de Brook

Après la première fouille archéologique de John Yellen dans l'entrée nord de la grotte de Gcwihaba en 1969, une deuxième fouille archéologique est entreprise par les Américains en 1991 (Robbins *et al.,* 1996). Elle permet de découvrir des industries LSA, des morceaux de coquilles d'œuf d'autruche et de nombreux restes de faunes. Des datations de charbons situent ces dépôts entre12 500 et 11 000 ans. Ils s'intéressent aussi aux dépôts carbonatées subhorizontaux où la vallée est creusée (-7 m) et décrivent plusieurs espèces de diatomées.

L'équipe est constituée de Robbins L.H., Murphy M.L., Stevens N.J. Brook G.A., Ivester A.H., Haberyan K.A., Klein R.G., Milo R., Stewart K.M., Matthiesen D.G. & Winkler A.J.



*Figure 1292 Photographie des fouilles de 1991 dans l'entrée nord de la grotte de Gcwihaba (**Robbins et al., 1996**).*

L'unique expédition de la BSES de 1991

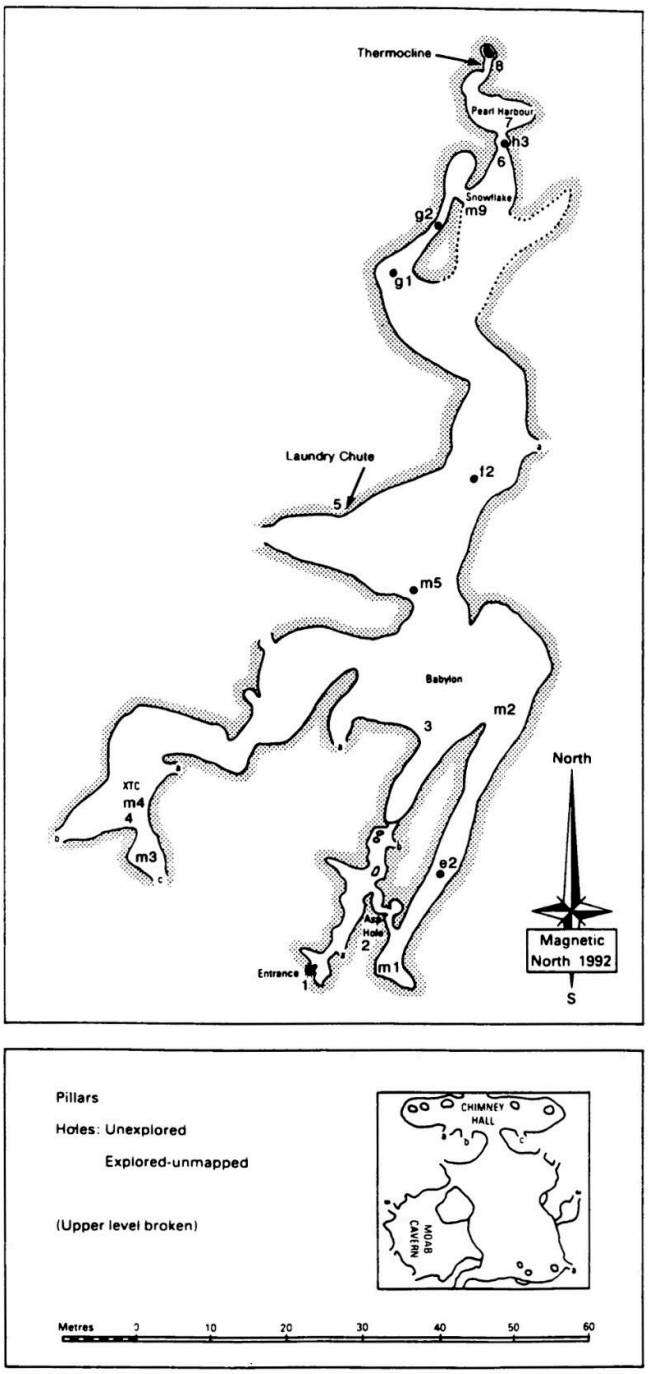
En octobre 1991 une mission de la *BSES* (*(British School's Exploring Society*) dirigée par Dr. Alan Wilson et comprenant 25 personnes (Garner et Ritter y participent) a pour objectif de de refaire la topographie de la grotte de Gcwihaba et d'explorer les gouffres de Waxhou dans les *Aha Hills*, aidé par le local Gummsa (Garner et Ritter, 1994 ; Ritter et Mann, 1995). Le temps a manqué pour topographier ces grottes. M.S. Allen de Maun a apporté un soutien précieux à la réussite de cette expédition.

1992
Expédition du « *Gcwihaba Cave Project* » de Ron Ritter et découverte de la grotte de Wadoum (colline D de Gcwihaba)

Ritter organise trois missions de prospections en 1992 (Garner et Ritter, 1994) :

- du 29/02 au 07/03/1992 ;
- du 21 au 24/08/1992 ;
- en septembre 1992.

Les membres sont extérieurs à la *BSES*.



Lors de cette dernière expédition, ils découvrent la grotte de !Wadum le 7 septembre 1992 (Garner et Riter, 1994).

Paul M. Mann,
Ron Ritter,
J. Doepel,
S. Horsley,
Bryony. Longden,
Tim Longden,
S. McIntosh
et G. Ritter participent à cette découverte

Figure 1293 Topographie de la grotte de Wadum (Source: Garner et Riter, 1994).

1993
Expédition du « *Gcwihaba Cave Project* » de Ron Ritter et découverte du réseau de Bone Cave (Colline K2 à Koanaka)

En décembre 1993, le « *Gcwihaba Cave Project* » constitué de 8 spéléologues, dirigée par Ron Ritter, découvrent un grand réseau au fond de l'entrée de Bone Cave découverte par Pickford en 1990 sur la colline K2 à Koanaka (Ellis, 2025).

Paul M. MANN	S. HORSLEY	S. MC INTOSH
Ron RITTER	B. LONGEN	G. RITTER
J. DOEPEL	T. LONGEN	

Le géologue et spéléologue Jacques Martini participe à l'expédition de 1993 en compagnie de John Irish et Eugène Marais. Il visite la grotte de Gcwihaba et la grotte de Wadoum (Ellis, 2025). Il publiera des articles sur de nouvelles minéralisations découvertes dans la grotte de Gcwihaba en 1996 (Martini, 1996).

1994
Janvier 1994 Expédition du « *Gcwihaba Cave Project* » de Ron Ritter et découverte de Blue Cave (Colline K3 à Koanaka)

Le « *Gcwihaba Cave Project* » continue en janvier 1994, opérant à partir d'un camp de base situé à Gcwihaba, quatre expéditions partent en direction de Koanaka Hills pour un total de 16,5 jours de prospection sur le terrain dont le but est de trouver des entrées de cavité sur les versants des collines.

Pour cela, trois vols de reconnaissance par Cessna 178 permettent de repérer visuellement des collines et de prendre des points GPS Ritter et Mann (1995) (https://www.chilembwe.com/botswana/reports.html)

Cette expédition est dirigée par Ron Ritter. Le National Museum of Botswana (BNMM) y participe ainsi que Callum F. Ross (Williams et al., 2012).

Les résultats du *Gcwihaba Cave Project* sont remis au Muséum de Gaborone sous forme d'un rapport. En tout il comptabilise 65 jours de terrain Deux grottes supplémentaires sont découvertes à Koanaka : *Bone Cave* sur K2, dont l'entrée avait été mentionnée par Pickford (1990) et *Blue Cave* sur K3 (Figure 1296). Aucune grotte n'est trouvée sur K1. Deux missions de gravimétrie vont être réalisées. Les topographies de Gcwihaba et Wadoum sont reprises (Figure 1294 et Figure 1295).

La topographie de la grotte de Gcwihaba a nécessité trois missions et totalisant environ dix jours de travail (Garnet et Ritter, 1994), la majorité du travail a été effectué lors de la mission de 1991 qui a mobilisé 25 membres. Les membres du « *Gcwihaba Cave Project* » sont (Garner et Ritter, 1994) :

K. BULLOCK	S. HORSLEY	S. Mc INTOSH
M. COLLET	C. HUGUES	G.RITTER

M. et B. GROSS	Famille LONGDEN	N.SIMON

Garner est topographe de l'armée britannique. La Barclays Bank a fait don d'un GPS.

Ce rapport motive l'ancien président de la République du Botswana, Ian Khama, alors vice-président, a visité la grotte de Gcwihaba (Ellis, 2020, 2025). Il décide de s'investir dans le projet et de prescrire des forages pour découvrir de nouvelles grottes qui ne possèdent pas d'entrée naturel.

Juillet 1994

La Duke University, la Stony Brook University et le *National museum, Monuments and Arts Gallery of Botswana* prospectent le secteur de Koanaka et cartographient la grotte *Bone Cave*.

En 1995, 1996 et 1997 se déroule l'excavation des fossiles et la récupération des matériaux pour les datations (Williams *et al.*, 2012).

Y participe :

WILLIAMS B. A.	C. F. ROSS	D. M. WADDLE
M. GABADIRWE	G. A. BROOK	

P. J. Lewis et ses étudiants étudient les os. Laurence Steumke fait partie de l'équipe. Alexander van Nievelt et William J. Sanders ont préparé les spécimens.

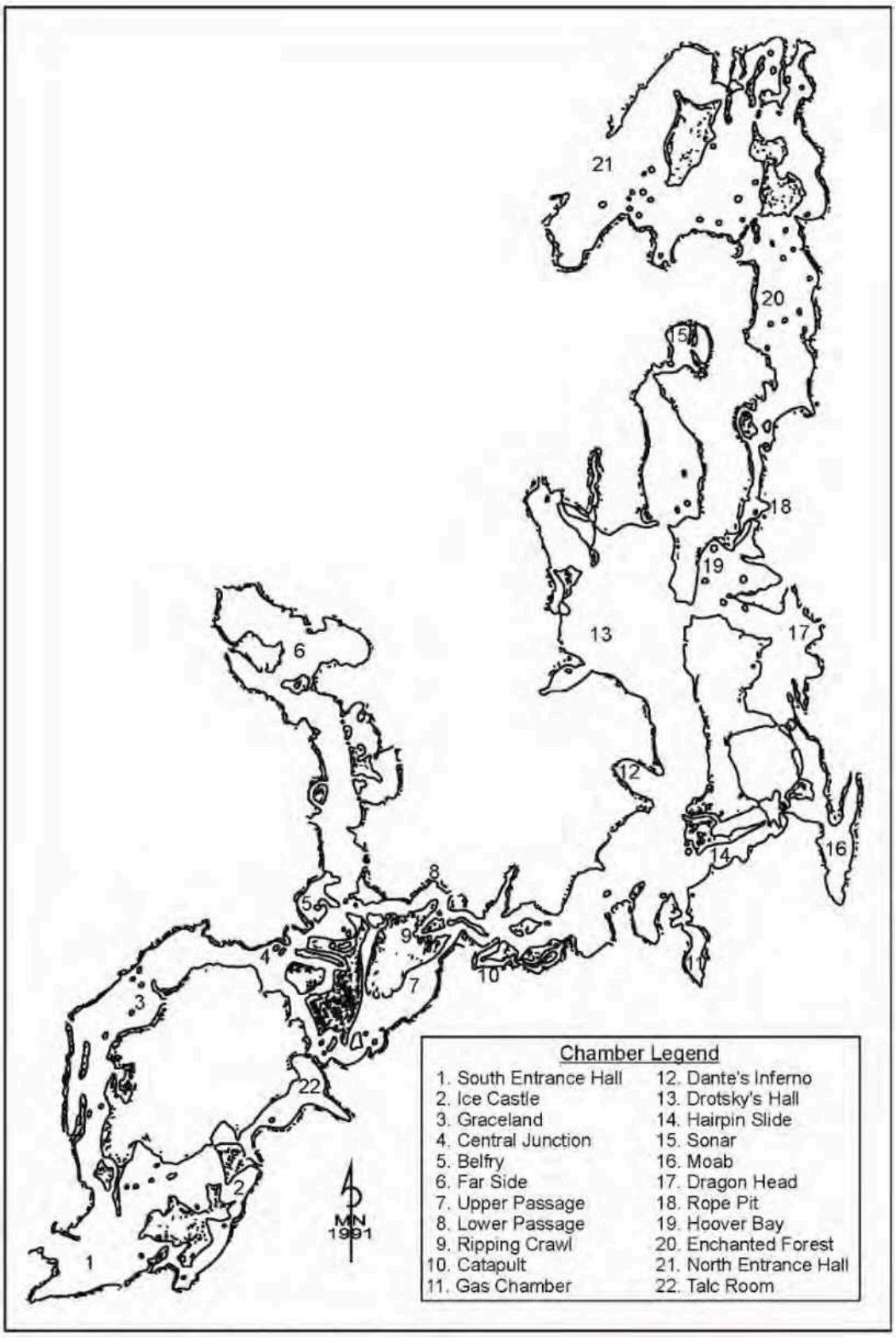


Figure 1294 Topographie de 1991 redessinée et publiée en 1994 par Garner et Riter (1994).

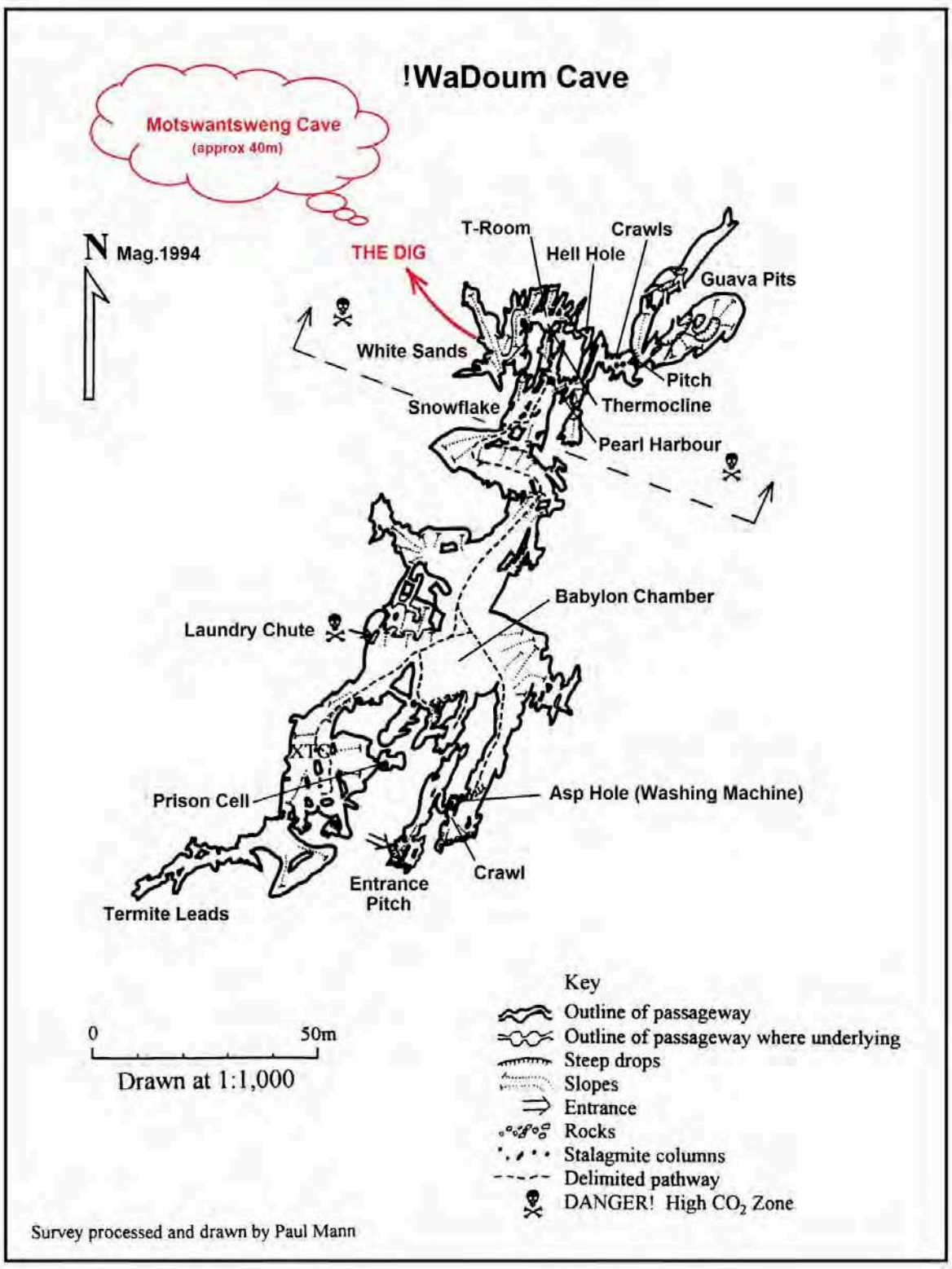


Figure 1295 Nouvelle topographie de la grotte de Wadoum (Source : Mann & Ritter, 1995).

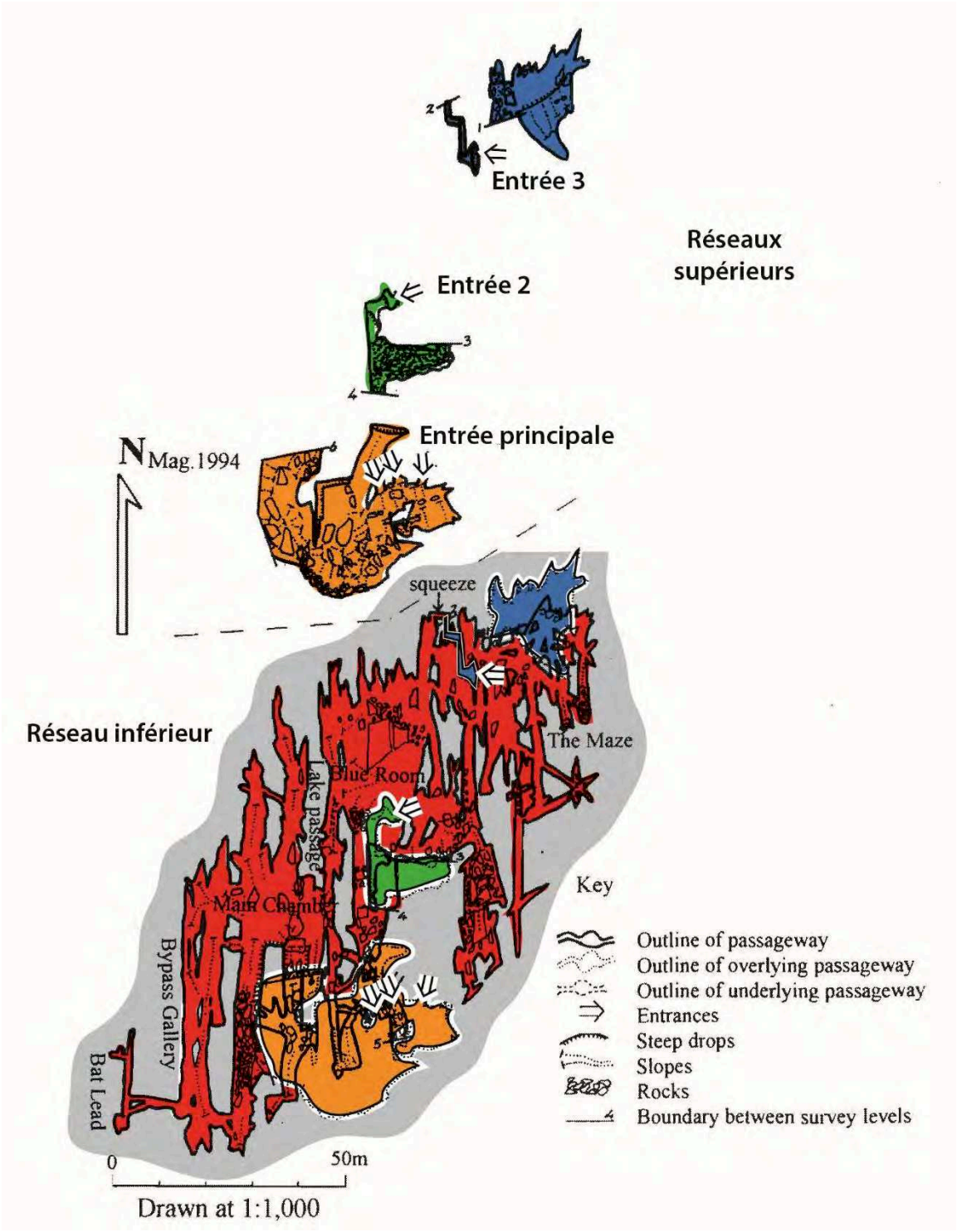


Figure 1296 Topographie de Blue Cave montre que la grotte se développe sur plusieurs étages (Ritter et Mann, 1995, modifié).

1995

La Duke University, la Stony Brook University et le *National museum, Monuments and Arts Gallery of Botswana* poursuivent leur fouille dans la grotte *Bone Cave*. Visite de la grotte de Gcwihaba le 17 octobre 1995 par les géologues R.E.Hanson et MR.B. Direng (Ramokate, 1995, p.5).

1996

La Duke University, la Stony Brook University et le *National museum, Monuments and Arts Gallery of Botswana* poursuivent leur fouille dans la grotte *Bone Cave*.

1997

La Duke University, la Stony Brook University et le *National museum, Monuments and Arts Gallery of Botswana* poursuivent leur fouille dans la grotte *Bone Cave*. En conclusion, ils découvrent trois fossiles de primates (Williams *et al.*, 2012).

Ce sont :

- un crâne d'un jeune adulte mâle Papio portant le numéro BNMM FC346 (Figure 1297) ;
- un os frontal cercopithécidé (BNMM FC348) ;
- une mandibule juvénile (BNMM FC347) et des dents d'une femelle Papio juvénile.

Ils correspondent à un primate éteint représentant un nouveau taxon, nommé ici sous-espèce : *Papio hamadryas— Papio hamadryas botswanae. Am J Phys Anthropol 000:000–000, 2012* (Williams *et al.*, 2012).

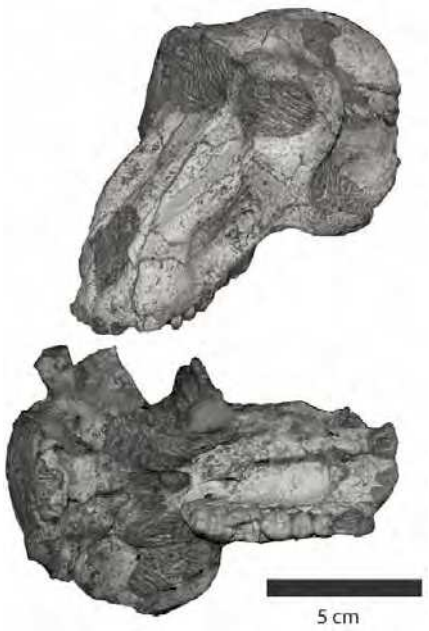


Figure 1297 Crâne de babouin (mâle) trouvé dans la grotte de Bone Cave en 1997. Il est daté de 317 000 ± 114 000 ans (Source : Williams et al., 2012, modifié).

Le crâne était situé dans la *Short Drop Room*, indiqué en rouge sur la topographie de Ritter et Mann (1995) (Figure 1298) et était emballé dans les sédiments karstiques concrétionnés.

La datation, publiée en 2012, donne un âge supérieur à 317 000 ± 114 000 ans (TL) pour ce crâne, soit au Pléistocène moyen ou plus ancien (Williams *et al.*, 2012). Nous ne savons pas ce que ces fossiles sont devenus.

La même année, un prélèvement d'une concrétion, numéroté BC97-14, a été effectué dans la grotte *Bone cave* (Railsback *et al.*, 2018, Fig.5).

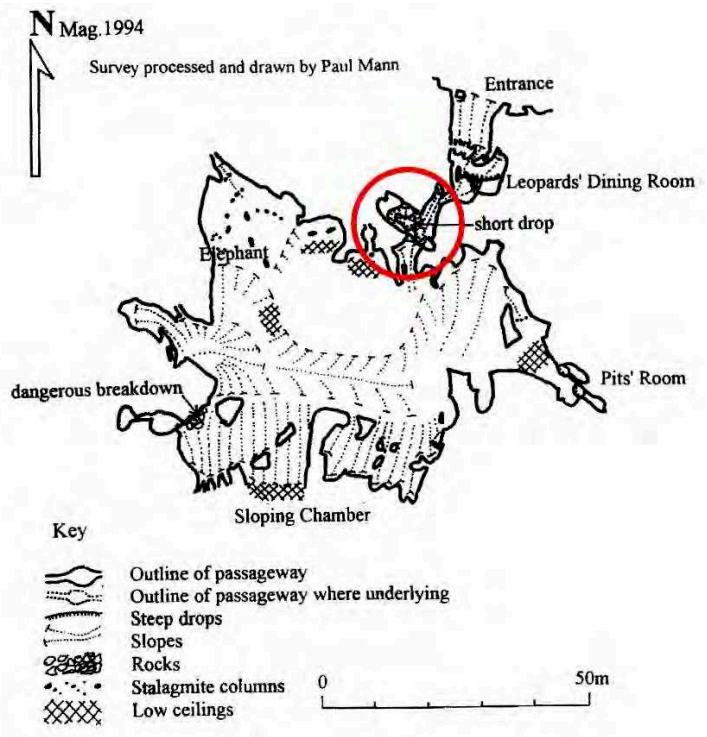


Figure 1298 Localisation du crâne de babouin trouvé dans Bone Cave en 1997 par Williams (Source : Ritter et Mann, 1995, modifié.

2001

Les résultats de 2004 du projet « Gcwihaba Cave Project » de Ron Ritter attirent l'intérêt d'Ian Khama, alors vice-président du Botswana. Il est décidé que les explorations vont continuer. Comme les prospections pédestres apportent peu de résultats, les topographies sont reprises et couplées à des campagnes de gravimétrie et de forages pour détecter des cavités sans entrée naturelle.
Officiellement, ces explorations commencent en 2001 sous la direction de Roger Ellis, des Botswanais sont formés à la spéléologie et l'armée est mise à disposition pour aider.

Les spéléologues sud-africains du *CERAC* (*Cave Exploration Research and Adventure Club*) sont invités à visiter et à prospecter la région pour rechercher de nouvelles grottes. Servaas Badenhorst et Roger Ellis dirigent les expéditions (Ellis, 2020). .

2005

La méthode change d'échelle : de 2005 à 2013, des levés de gravimétrie (gravimètre Scintrex CG-3 Autograv, GPS différentiel) cartographient les anomalies de densité qui trahissent les vides souterrains à Gcwihaba puis à Koanaka (Selfe / GRS Consulting, 2005, 2006).

En septembre 2005 étude de reconnaissance initiale (pour la gravimétrie) sur les collines à Gcwihaba (Figure 1299) (Selfe / GRS Consulting, 2005a et b). L'appareil utilisé est un Scintrex CG3 Autgrav et un GPS différentiel.



Figure 1299 Planche photographique des missions de gravimétrie en 2005 (Source : Gavin).

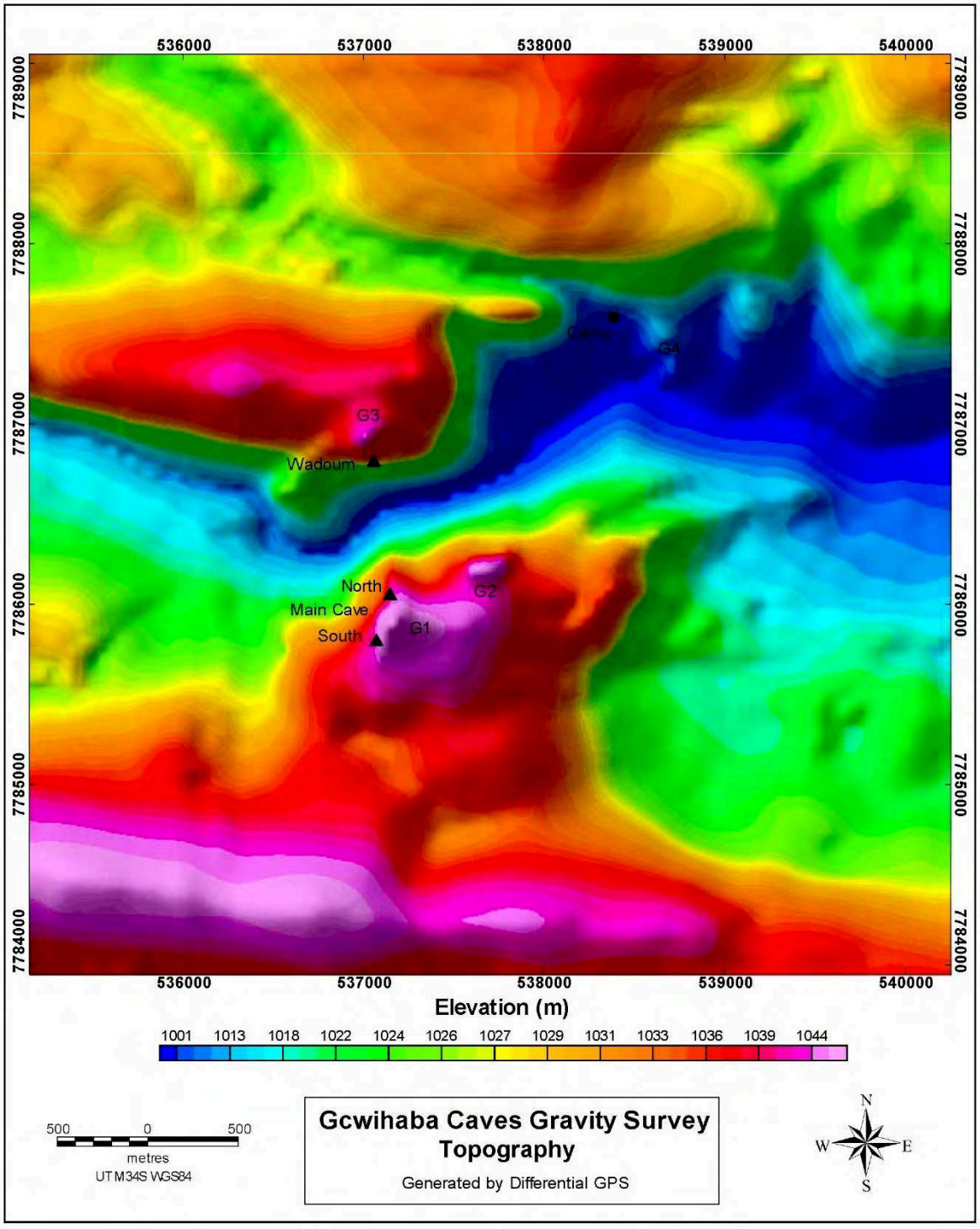


Figure 1300 Mesure d'altitude par GPS différentiel à Gcwihaba (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005b).

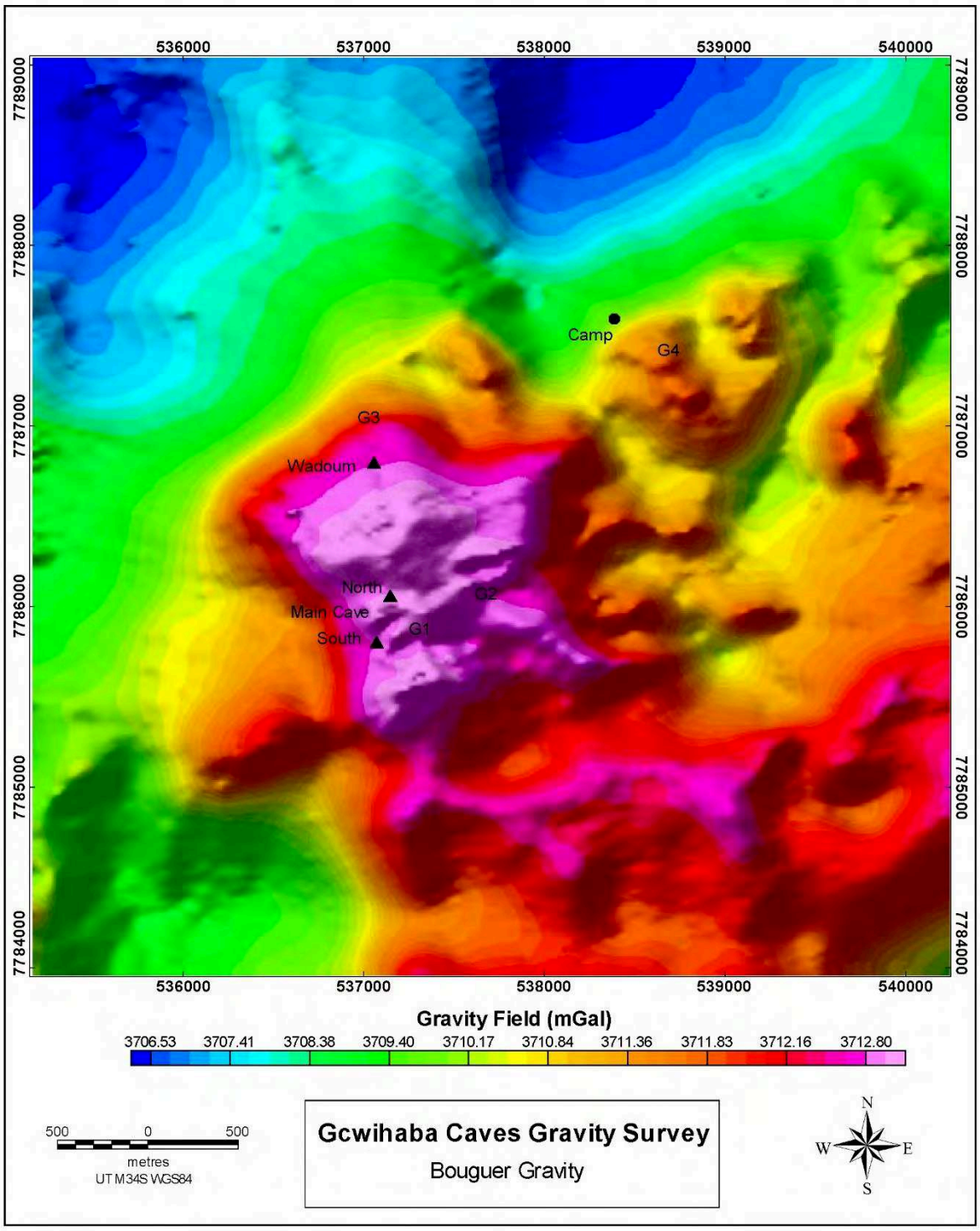


Figure 1301 Mesures de gravité à Gcwihaba (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005b).

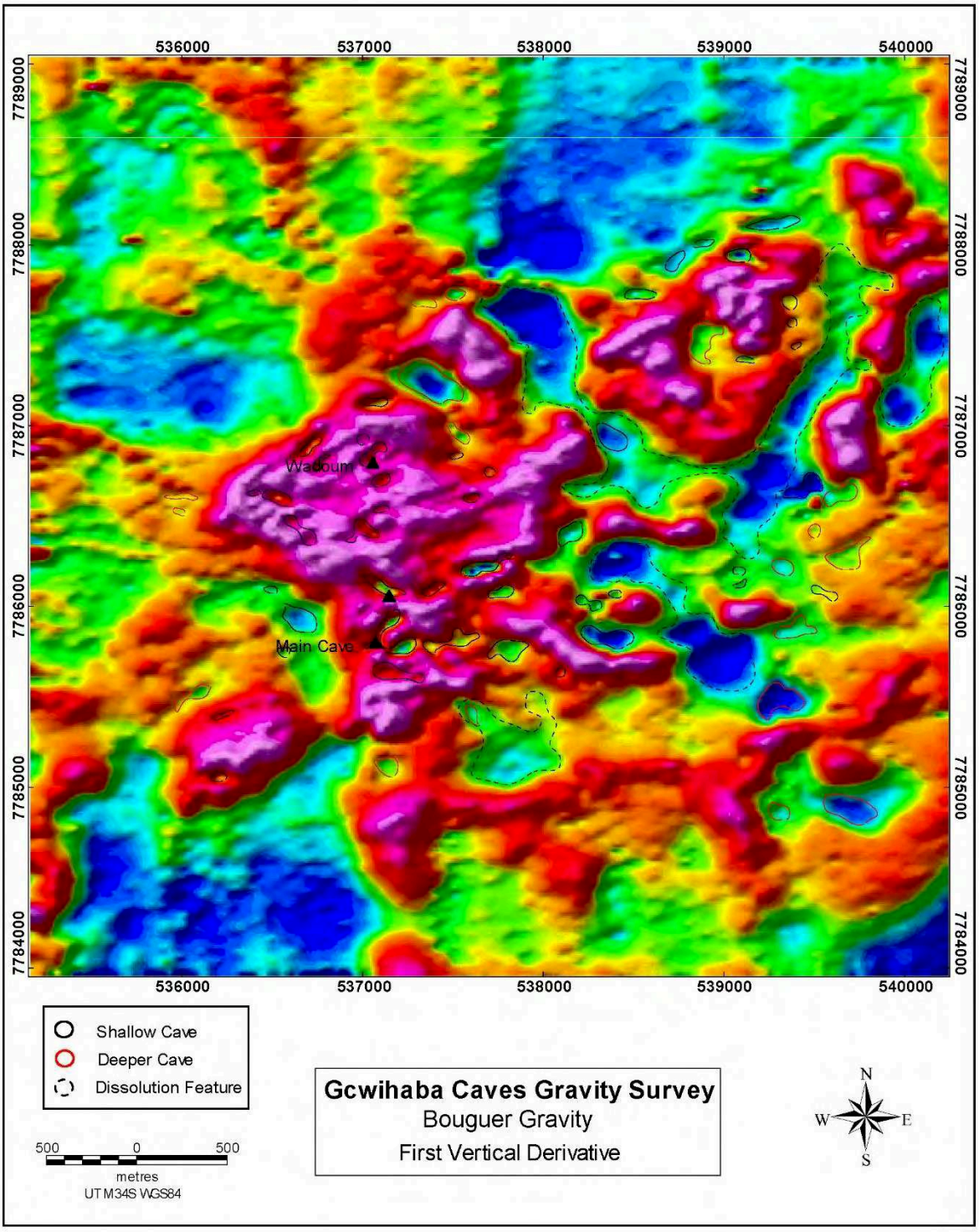


Figure 1302 Mesures de gravité à Gcwihaba (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005b).

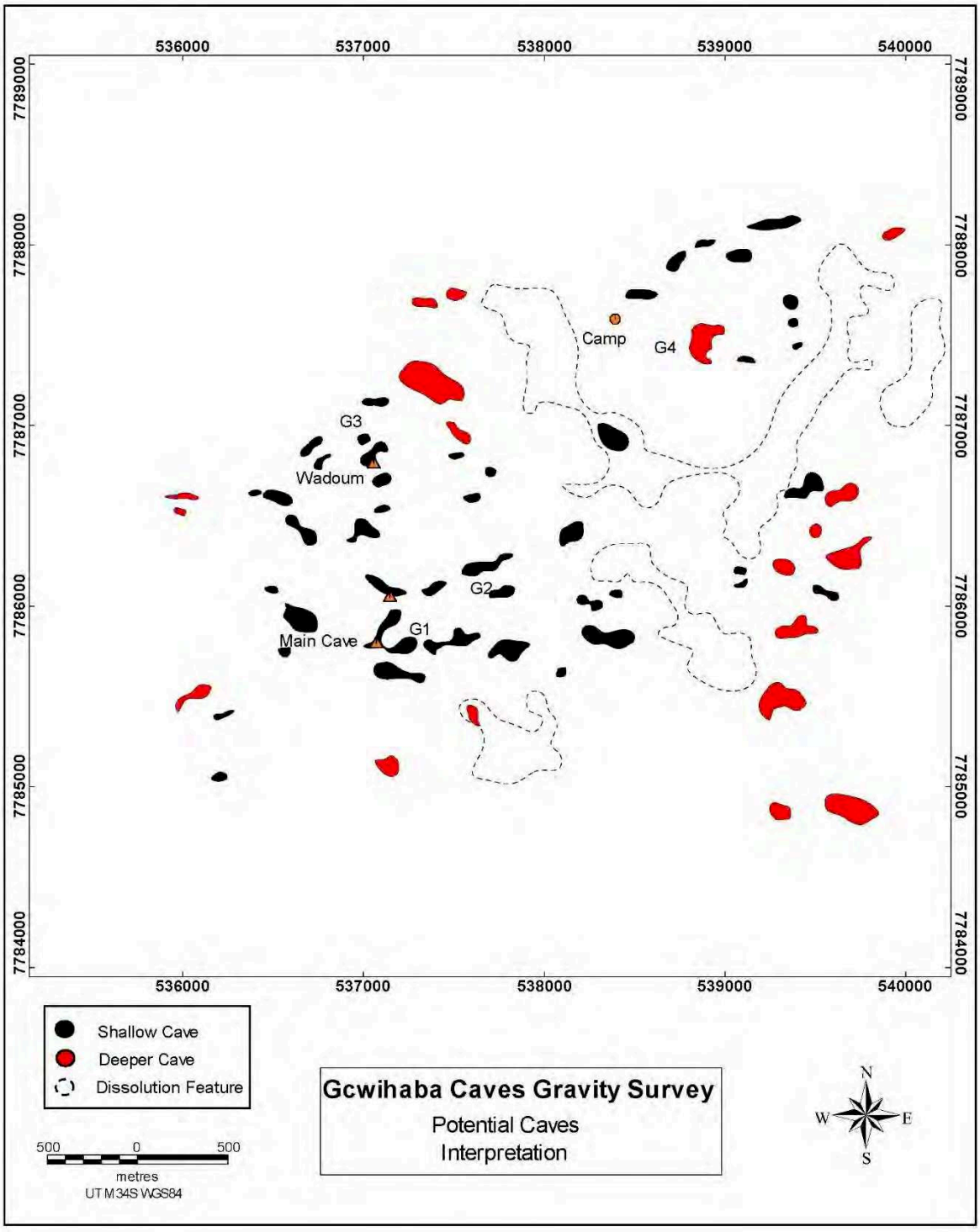


Figure 1303 Interprétation des mesures de gravité à Gcwihaba (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005b).

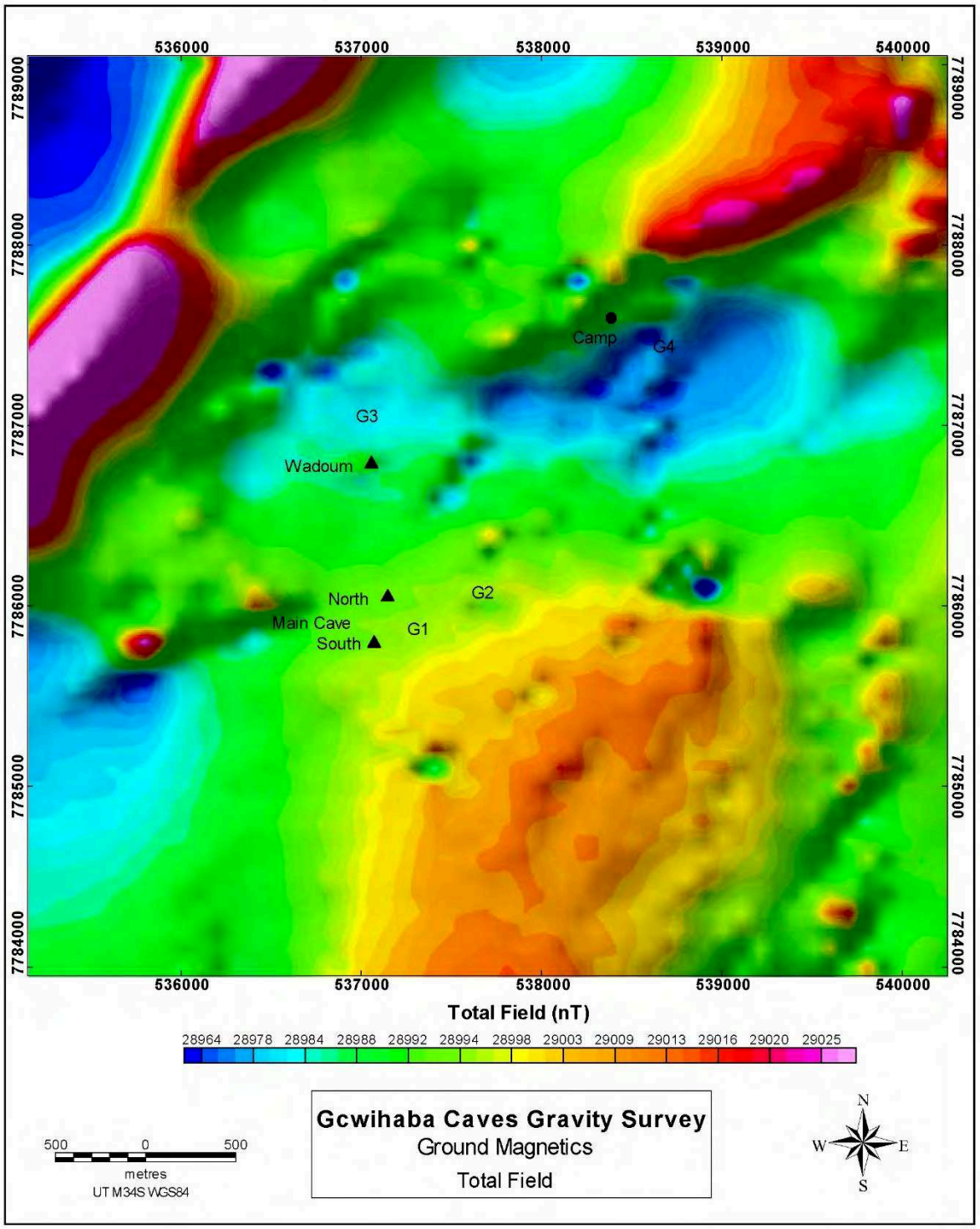


Figure 1304 Mesures du champ magnétique à Gcwihaba (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005b).

2006

Le forage Z12387 (Tableau 44 p.763) (lien) situé à 168 m de l'entrée sud de la grotte de Gcwihaba indique la présence d'une cavité à partir de 35 m de profondeur (Figure 565 p.3). Cette découverte motive la désobstruction du corridor de l'entrée sud de la grotte de Gcwihaba sur une cinquantaine de mètres en 2006 et 2007 (Ellis, 2025) et ont permis la découverte de fossiles (cf. supra p.568, Fourvel *et al.*, 2024). En janvier 2006, les étude de gravimétrie (Selfe / GRS Consulting, 2005a) se poursuivent autour de Koanaka (espacement des mesures de 50 m).

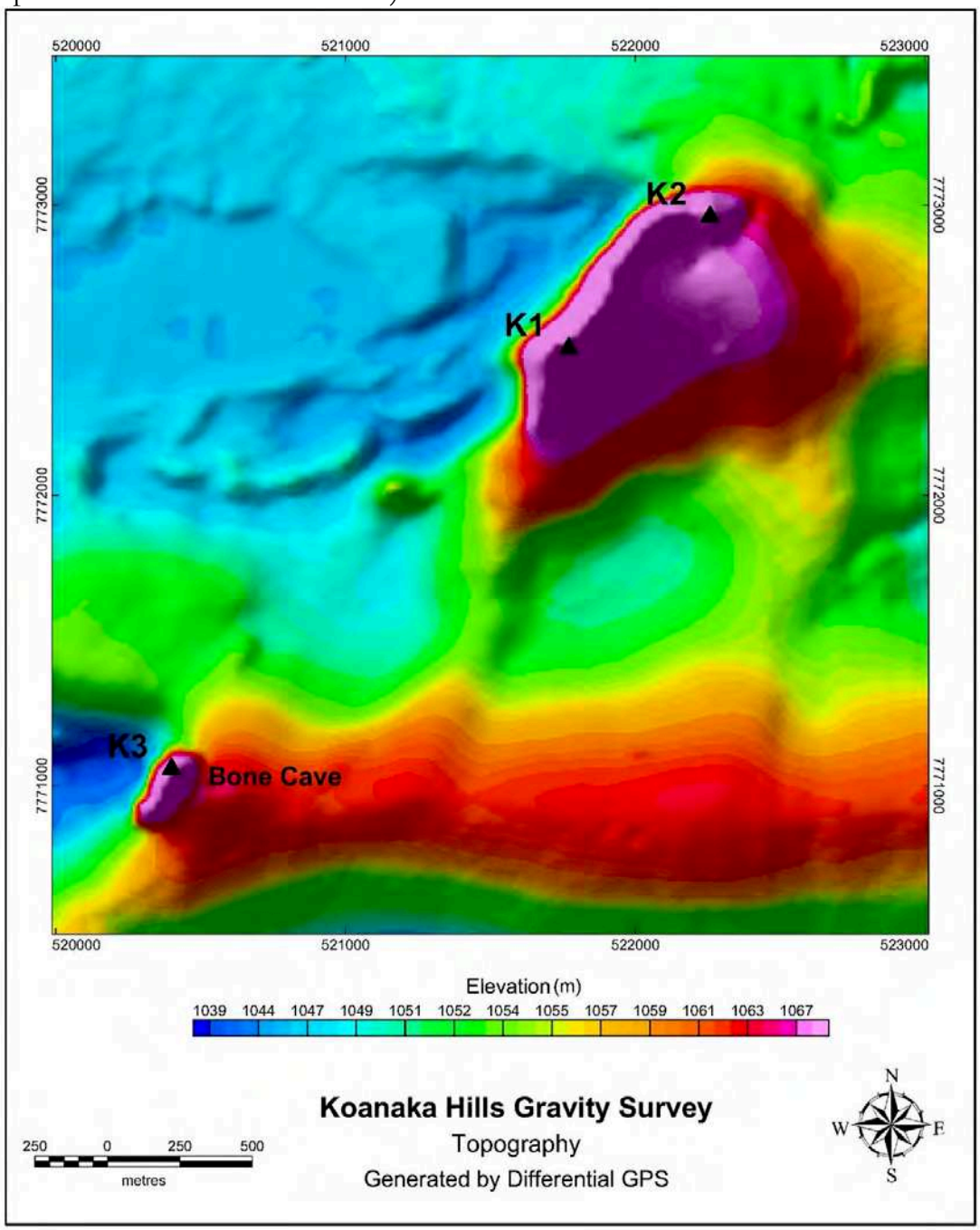


Figure 1305 Mesure d'altitude par GPS différentiel à Koanaka (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005a).

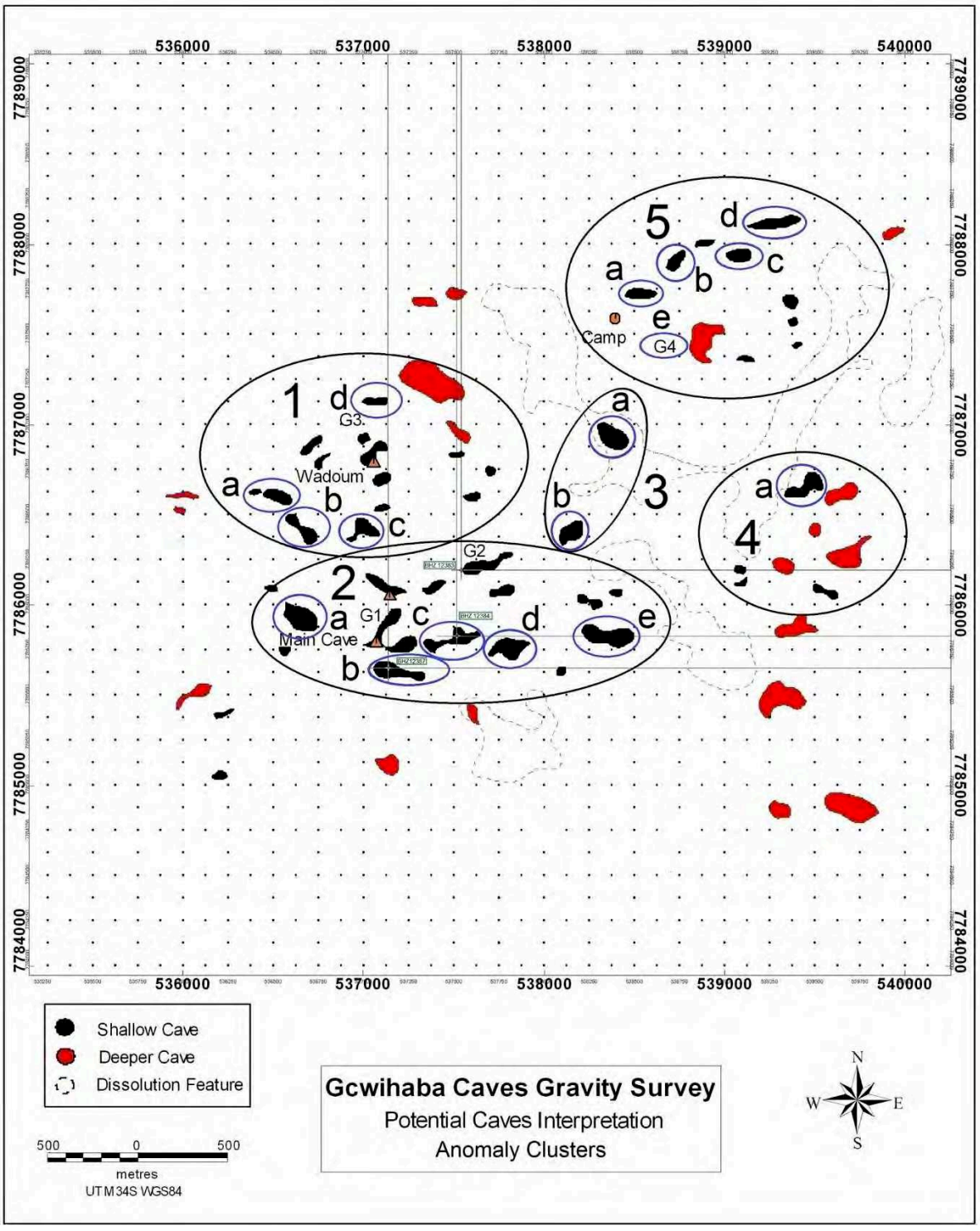


Figure 1306 Interprétation en termes de grottes potentielles à Gcwihaba (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005a).

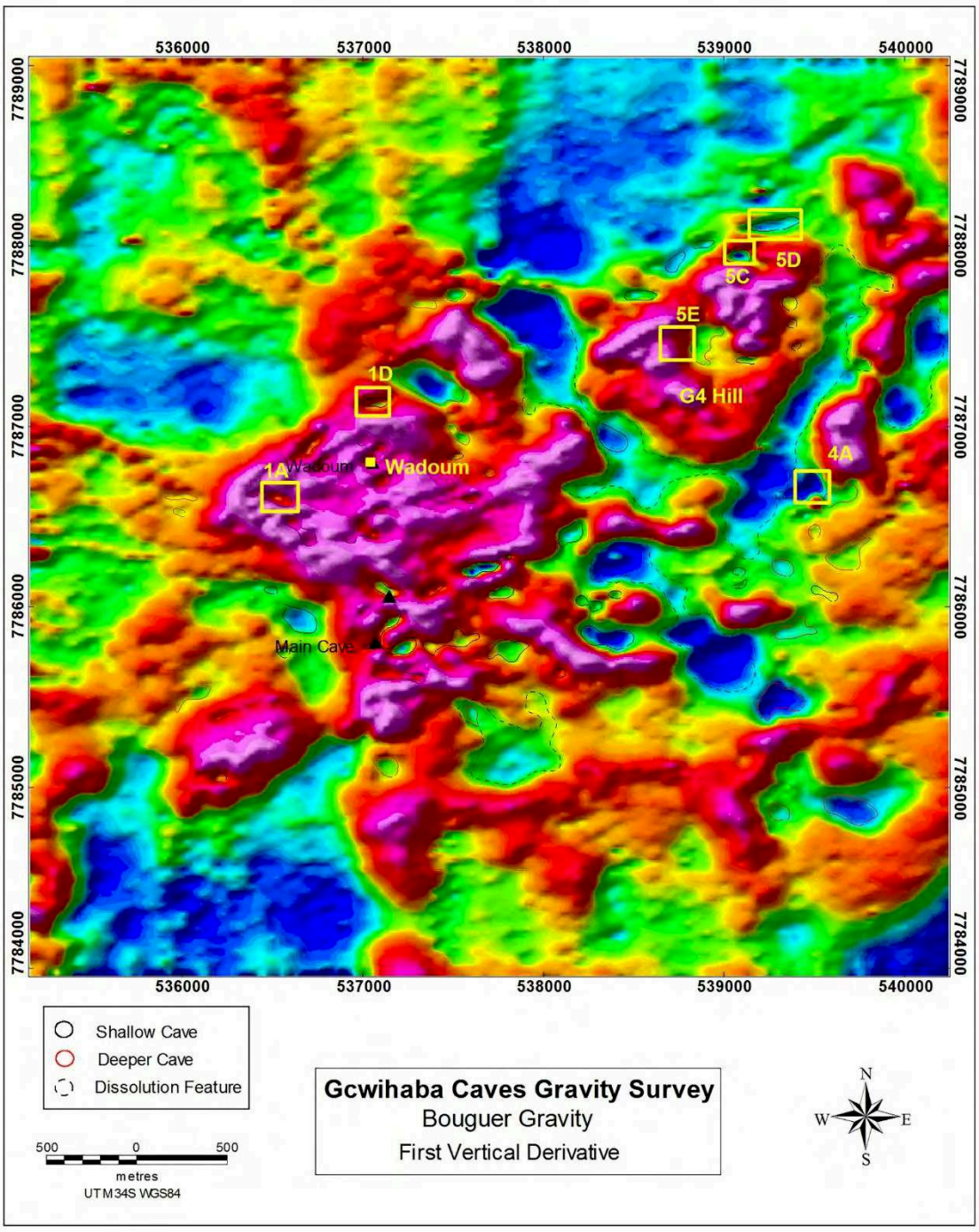


Figure 1307 Mesure des anomalies de gravité à Gcwihaba (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005a).

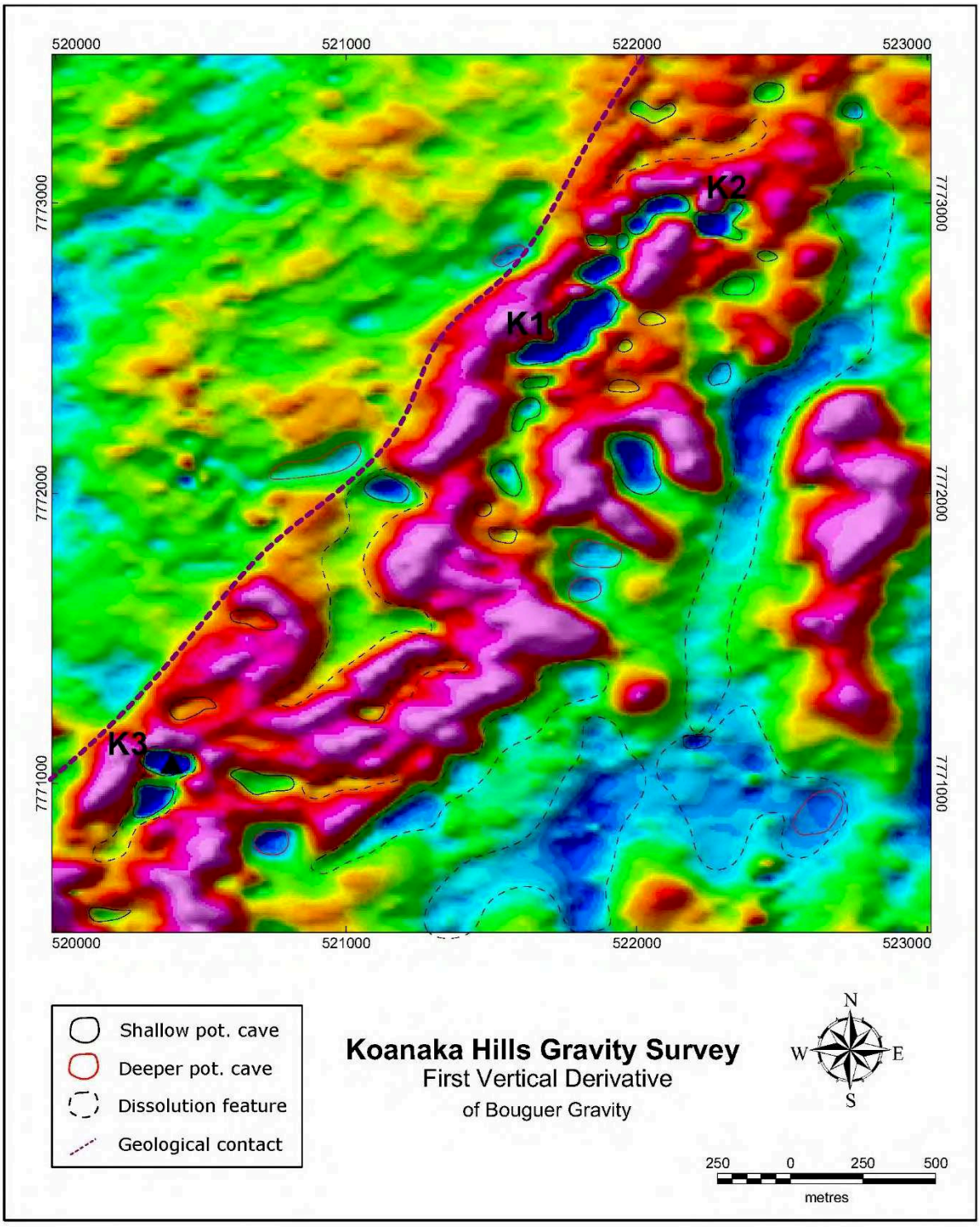


Figure 1308 Mesures de la dérive verticale à Koanaka (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005a).

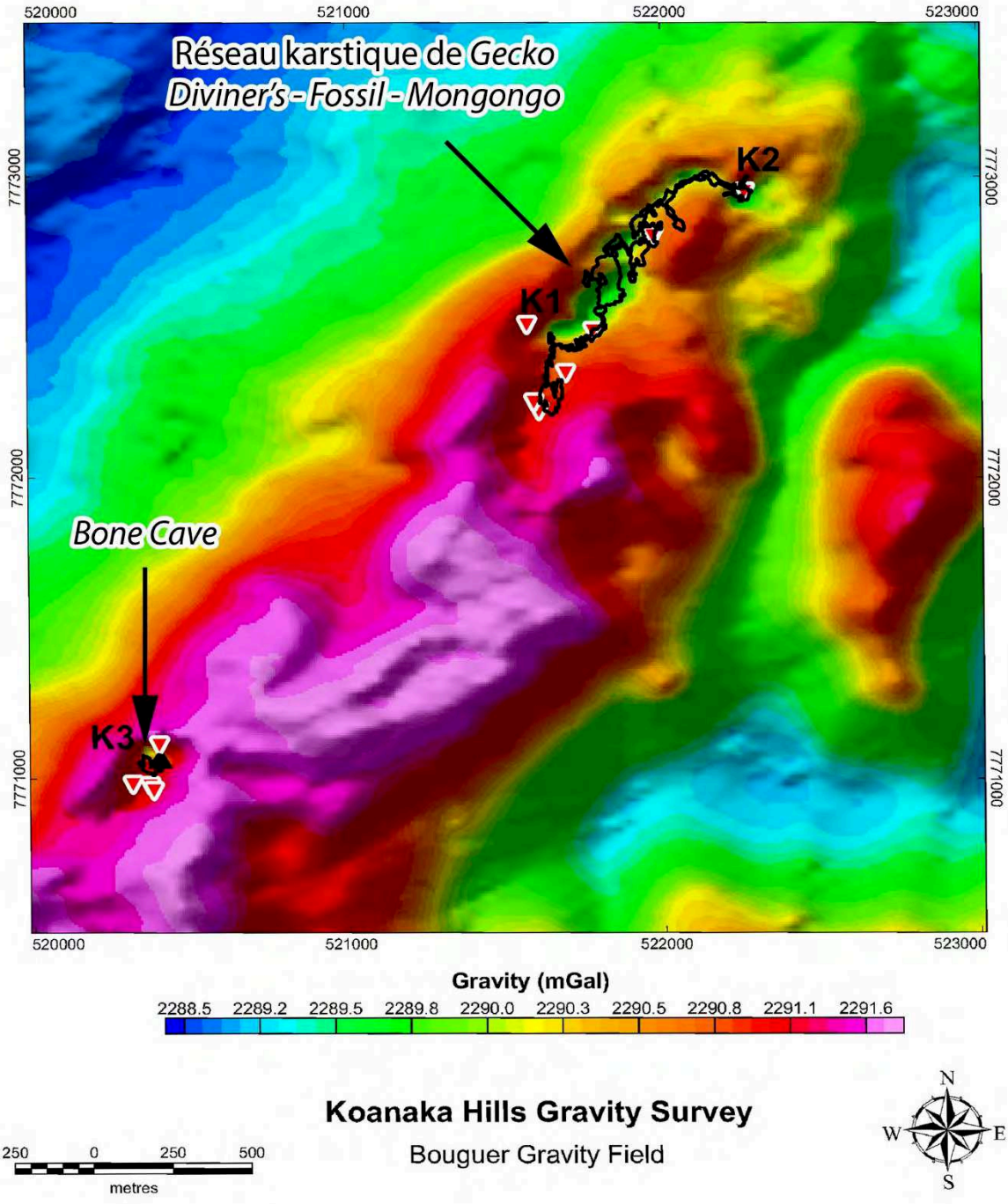


Figure 1309 Levé gravimétrique pédestre réalisé par le GRS Consulting en 2005 et ayant permis de découvrir les réseaux karstiques de K1 (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005a).

Nous avons ajouté les topographies de *Gecko Chamber,-Diviners, Fossil Cave et Mongogo cave.*

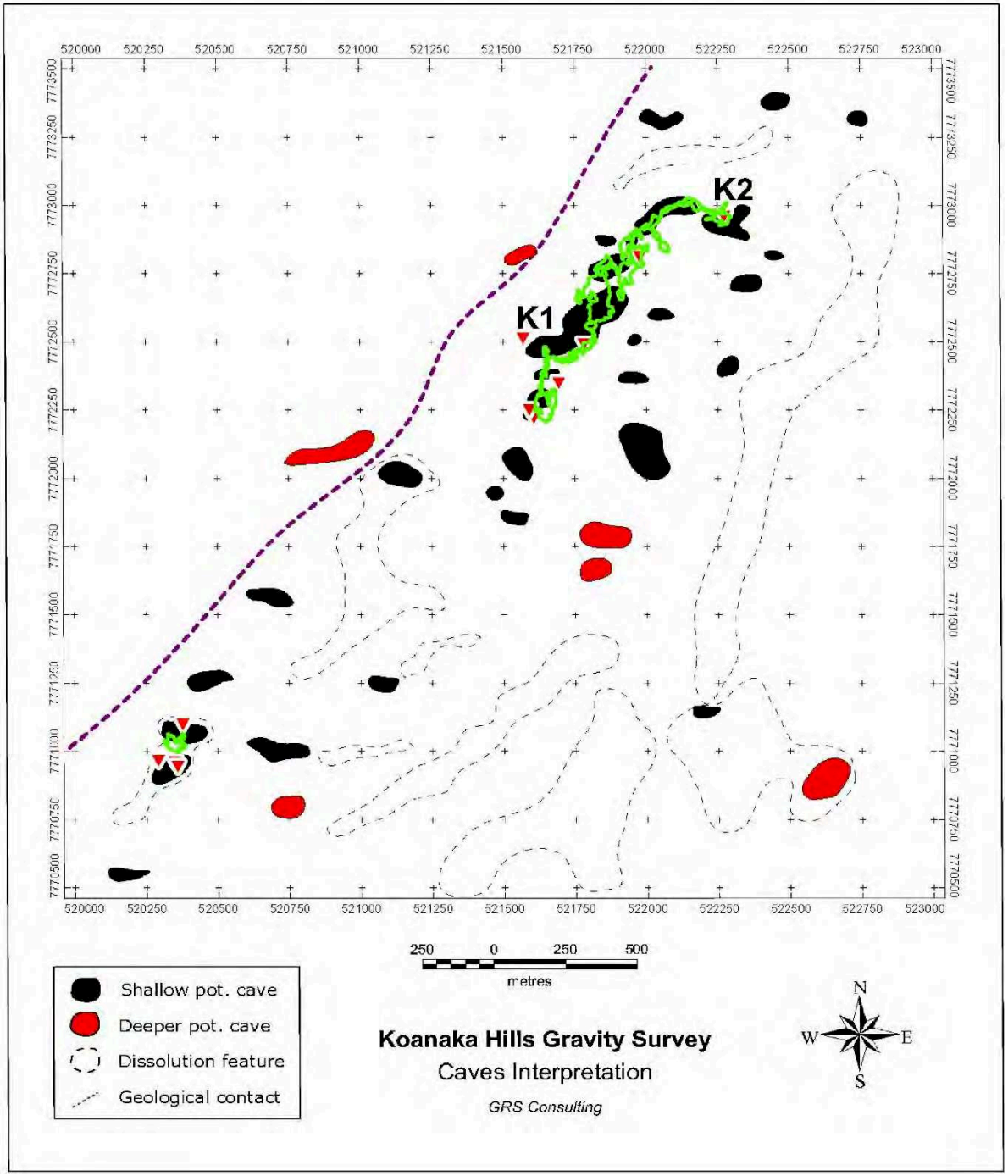


Figure 1310Interprétation des mesures gravimétriques (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005a; modifié).

Nous avons ajouté les topographies des réseaux en vert.

Nous avons compilé les deux cartes précédentes afin de visualiser les secteurs où des grottes pourraient affleurer en surface (en noir).

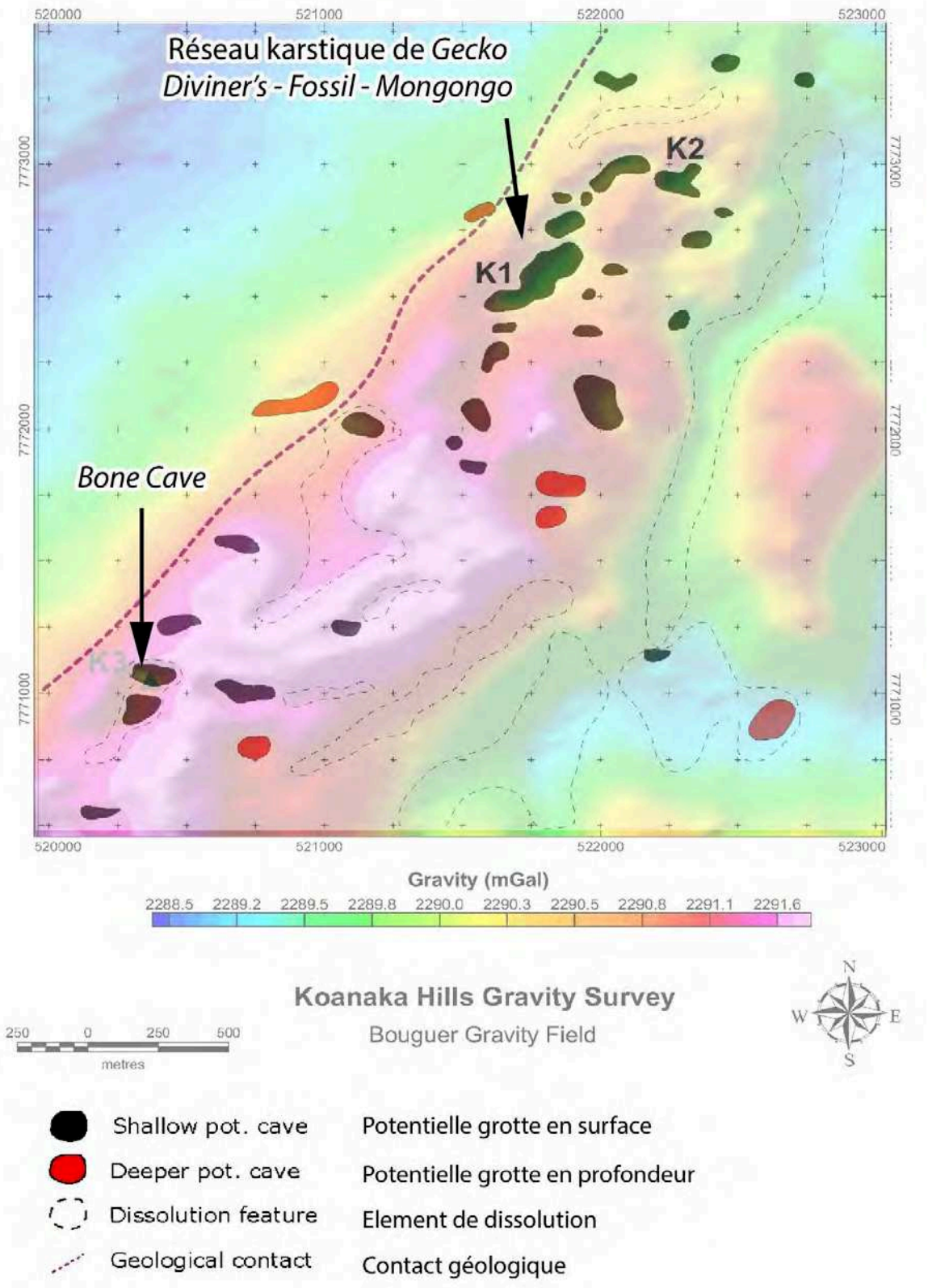


Figure 1311 Compilation des deux cartes précédentes montrant où des grottes pourraient affleurer en surface

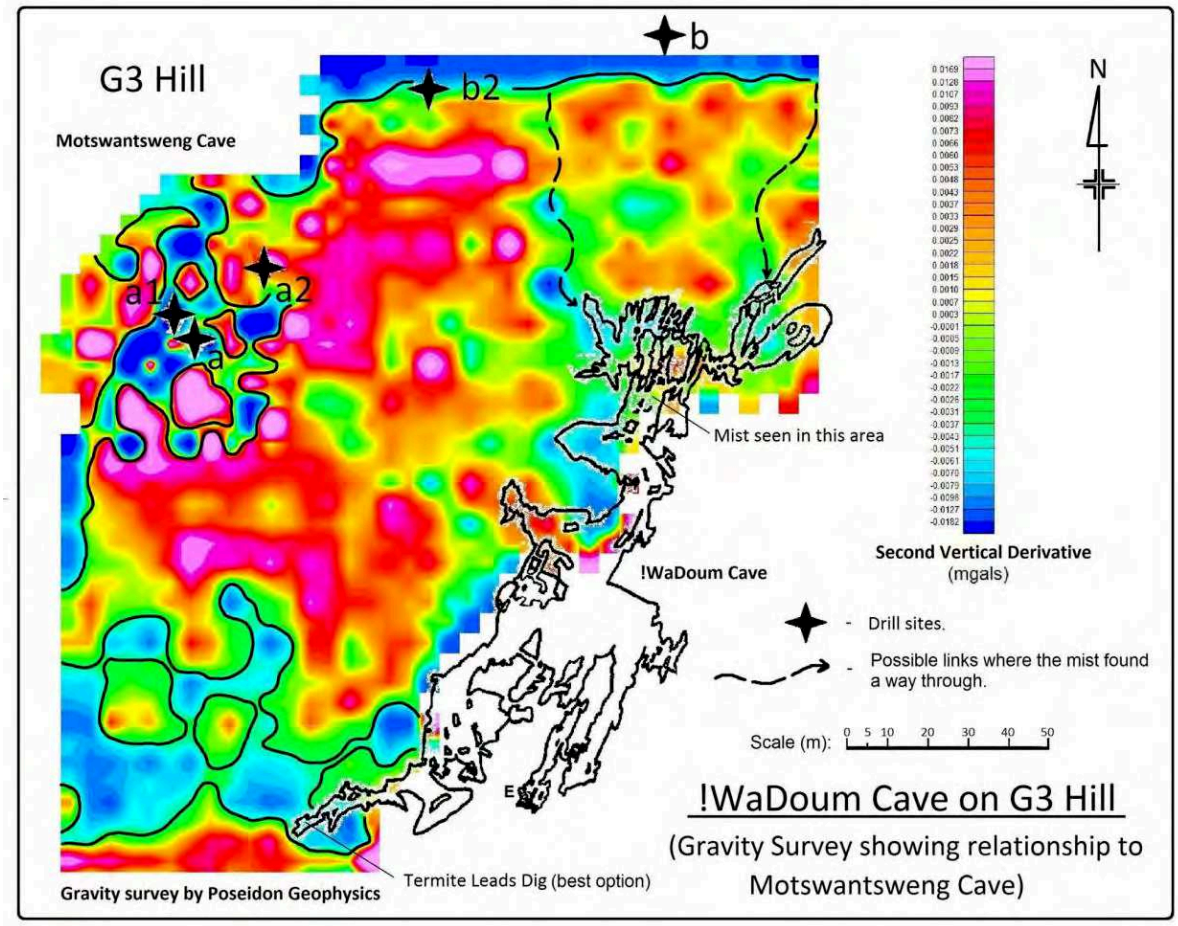


Figure 1312 Levé gravimétrique qui permet de connaitre la topographie de la grotte de Motswantsweng (Independent Cave Explorers, lien).

Des informations complémentaires sont accessibles sur le blog de Howard Brian Selfe (lien), frère de Gavin Selfe (*GRS Consulting)*. Ensemble, ils ont conduit une campagne de levés gravimétriques et altimétriques (au GPS différentiel) d'une durée de trois mois autour des collines.

2008

Les anomalies gravimétriques sont systématiquement forées, si des vides sont trouvés Bingo une cavité est présente en profondeur. Les forages transforment ces anomalies en découvertes concrètes.

L'entreprise *DeWet Drilling* de Gaborone fait des forages et découvre la grotte de Dimapo, sur la colline G2 de Gcwihaba, qui est visitée début décembre 2008 la première fois par Thapelo Olopeng puis la grotte est prospectée par Roger Ellis et John Dickie du *CERAC* (Ellis, 2020, 2025).

Fin 2008 des forages sont réalisés sur K1 une nouvelle grotte est découverte sur le versant sud par Oatse Ledimo grâce à une étude gravimétrique réalisée par le *GRS Consulting*.

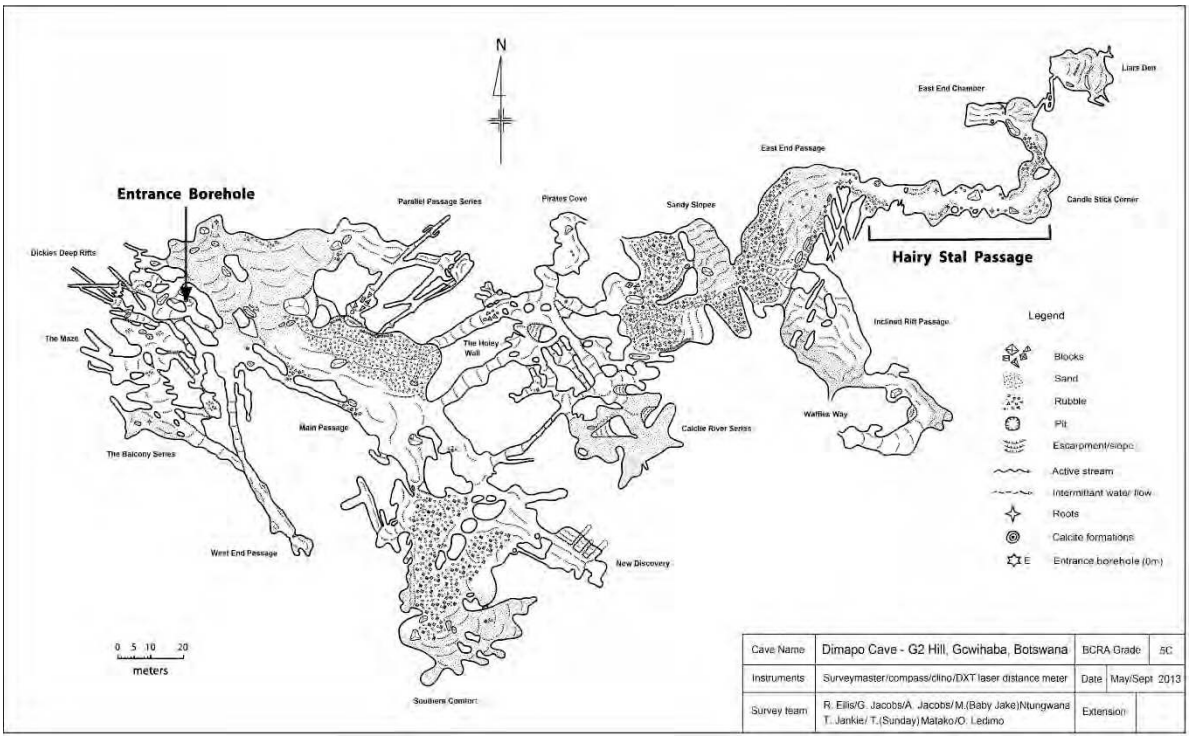


Figure 1313 Topographie de la grotte de Dimapo découverte en 2008 (Source : Du Preez et al., 2015).

2009

Une deuxième grotte (*Gecko Chamber*) est atteinte par un forage sur K1 en août 2009.

2010

En janvier 2010, *Fossil Cave* est trouvée par forage, d'après les indications de Oatse Ledimo qui souhaitait que l'on réalise des forages à mi-pente du versant est.

En avril 2010, Roger Ellis et Clint Howes dirigent l'équipe de *DeWet Drilling* qui continue les forages sur K1. Gavin Selfe fait les relevés gravimétriques qui permettent de choisir des zones pour faire les forages et deux grottes sont trouvées.

Du 2 avril au 9 avril 2010, les spéléologues sud-africains prospectent les grottes et consignent leurs observations dans le volume 41 du bulletin *SASA* publié en 2015.

2011

Découverte de Diviners sur K1 (Koanaka) par forage.

2012

Découverte de Mongongo Cave sur K1 (Koanaka) par forage.

Le ***Gcwihaba Caves Research Project*** débute en 2012 et fait l'objet d'une première publication sur la biospéléogie des grottes du secteur *(Bone Cave, Blue Cave, Diviners Cave)* (Du Preez *et al.*, 2013 ; 2017).

Williams *et al.* (2012) publient le crâne de primate découvert et récupéré en 1997 dans la grotte de *Bone Cave* et indiquent qu'il est daté à >317 000 ± 114 000 ans, et précisent que c'est une date minimale.

2013

Suite des études de gravimétrie des collines de Gcwihaba au mois de mai (Selfe/GRS Consulting 2013).

2015

Début 2015, il est décidé de faire des forages plus larges pour faciliter l'accès des grottes, ils mesureront un mètre de diamètre pour atteindre les grottes de Dimapo, Diviners et Mongongo. En mai et juin 2015 Roger Ellis et Gerhard Jacobs choisissent la localisation des forages. De nouvelles grottes sont trouvées : la grotte de Nqumtshaa (sur K1) et la grotte de Motswantsweng est identifiée par gravimétrie près de Wadum à Gcwihaba (Colline C).

Publication sur les concrétions de Gcwihaba (Du Preez *et al.*, 2015).

2016 à 2018

Une fois les grottes découvertes, il faut désobstruer le sable qui comble les cavités pour faire des jonctions (Ellis, 2025) :

Première jonction entre le North Canyon de la grotte de Diviners et la grotte Nqumtshaa (29 m).
La deuxième jonction a relié la grotte Nqumtshaa à la salle Madusa (35 m).
La troisième jonction a permis de connecter la salle Madusa à la salle Tselakgopo (60 m).
La quatrième et dernière jonction a relié la salle Gecko à la salle Tselakgopo (20 m).

Des photographies des excavations de K1 par *ICE* (*Independant Cave Explorers*) sont disponibles ici : https://www.facebook.com/profile.php?id=100067775523975

Ces désobstructions ont permis notamment de découvrir de la faune d'oiseaux, qui sera étudiée par la suite (Fourvel et al., 2024).

Visite de la grotte de Gcwihaba le 2 mai 2016 par Laurent Bruxelles et son équipe (Bruxelles *et al.*, 2016, p.52) et compréhension de l'intérêt de la biocorrosion comme spéléogenèse :

> *« Les parois de la cavité et les énormes piliers stalagmitiques ont été surcreusés par des courants d'air et de gaz chargés d'acide provenant de la fermentation des guanos de chauves-souris pendant des milliers d'années » (Dandurand et al.2019).*

En novembre 2017, un escalier est installé à l'entrée sud de la grotte de Gcwihaba (Ellis, 2025).

2021

En décembre 2021 a eu lieu la première mission HOMINI'KARST à Gcwihaba et Koanaka dirigée par Laurent Bruxelles et ont commencé les premières fouilles à K2 à Koanaka (Bruxelles et al., 2021). À partir de cette date, des missions archéologiques et spéléologiques auront lieu chaque année dans cette région pour rechercher des grottes et des fossiles d'Hominines. (Voir les chronologies p.105).

2023

En 2023, l'acquisition de la grotte de Gcwihaba (Figure 1314), de *Bone cave* et des fouilles ont été réalisées par lasergrammétrie par Kim Genuite et Grégory Dandurand. Le nuage maillé 3D de la grotte de Gcwihaba, en gris, est ajouté à la surface topographique 3D issue de la photogrammétrie 3D par drone, en couleur (Figure 1315).

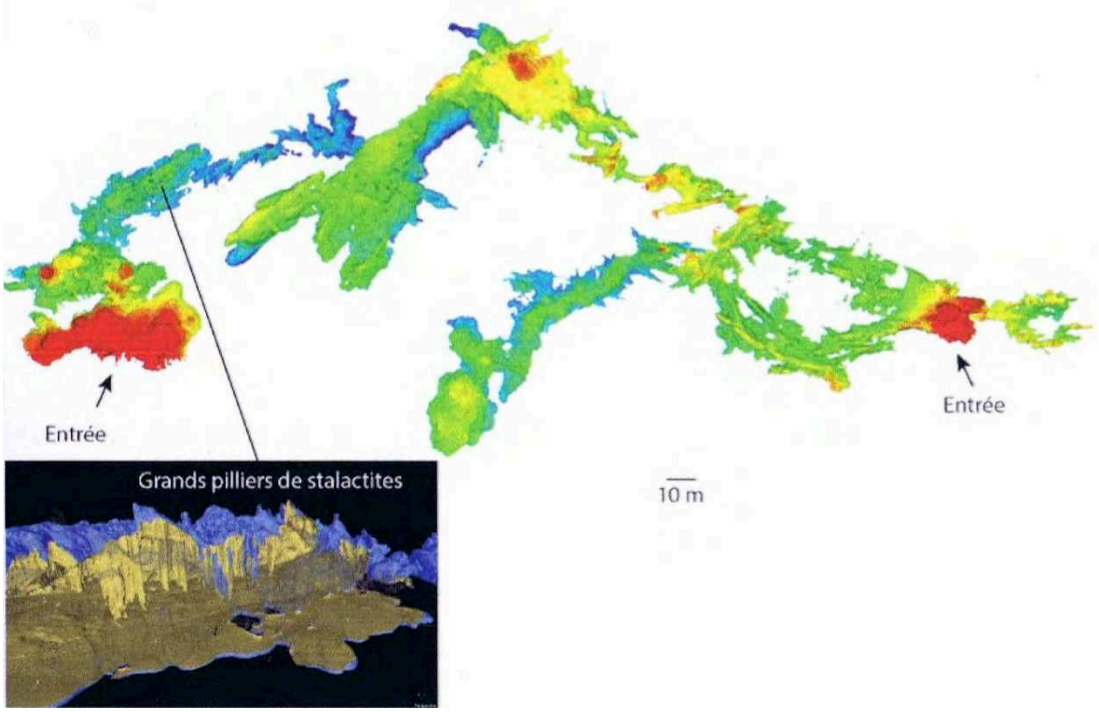


Figure 1314 Topographie de la grotte de Gcwihaba par scan laser terrestre, réalisé par Kim Genuite et Gregory Dandurand en 2023. (Source : FFS, 2024).

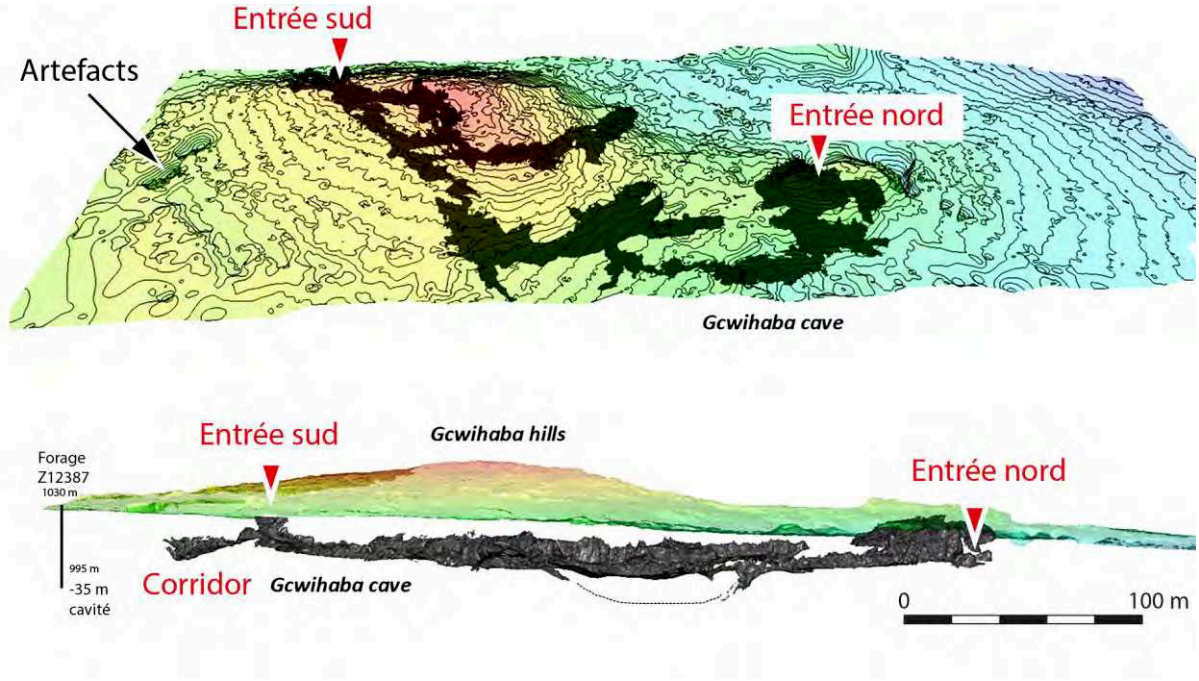


Figure 1315. Ajout du maillage 3D de la cavité de Gcwihaba au modèle 3D par photogrammétrie drone de la colline. En haut, vue en perspective et en bas, vue en profil (Source : Genuite et al., 2024).

12.14. ANNEXE N°12 DU CHAPITRE N°4 : TOPOGRAPHIES SUPPLEMENTAIRES DE WADOUM A GCWIHABA

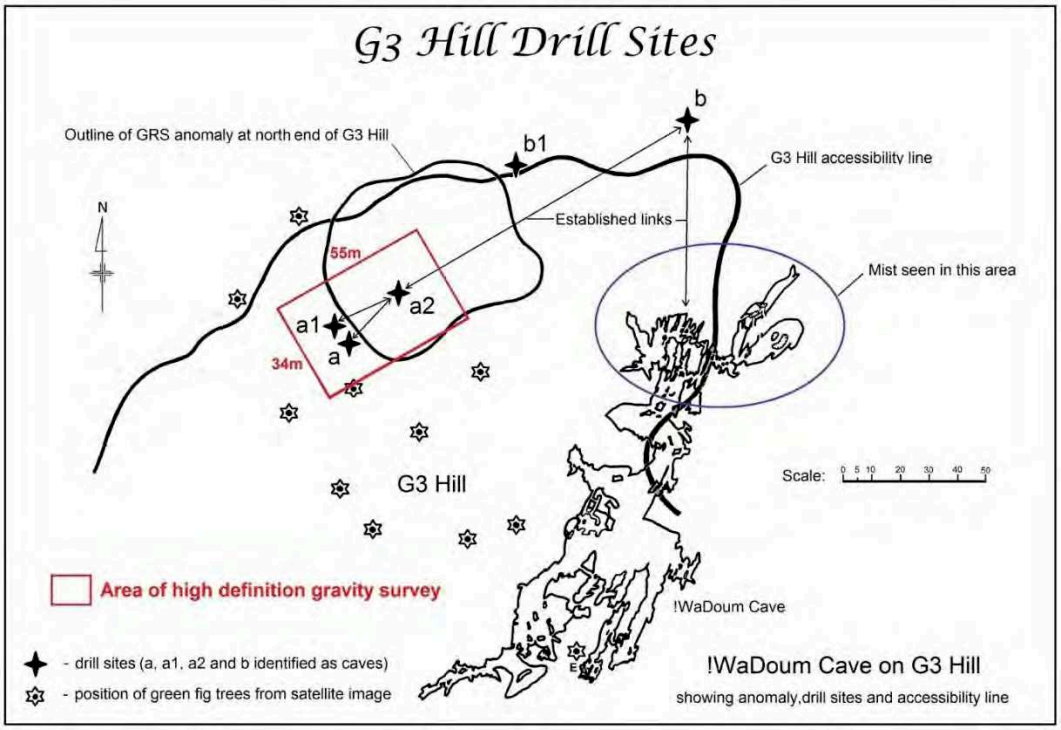


Figure 1316 Carte des recherches de cavités sur la colline de Wadoum (Source : Selfe G. par mail).

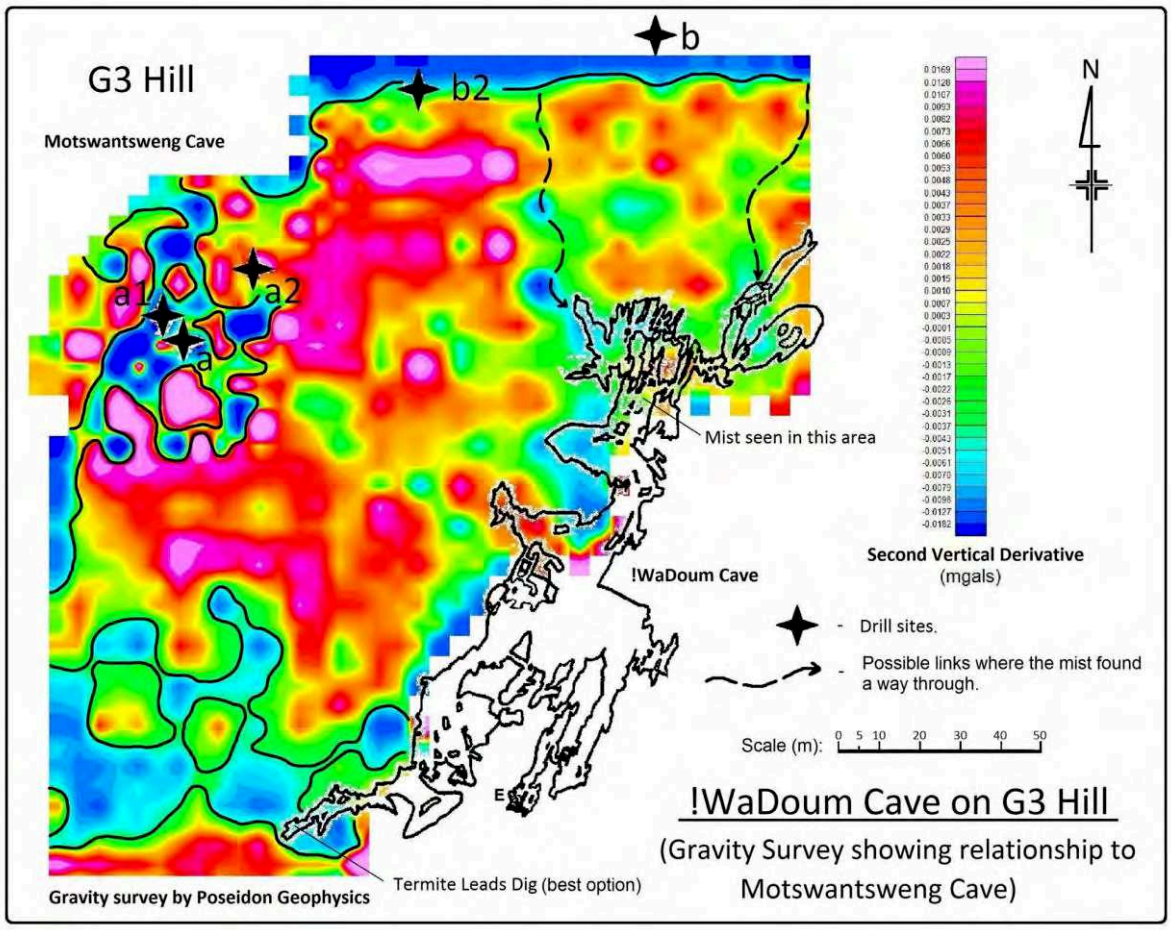


Figure 1317 relevé gravimétrique de la grotte de Wadoum à Gcwihaba (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers).

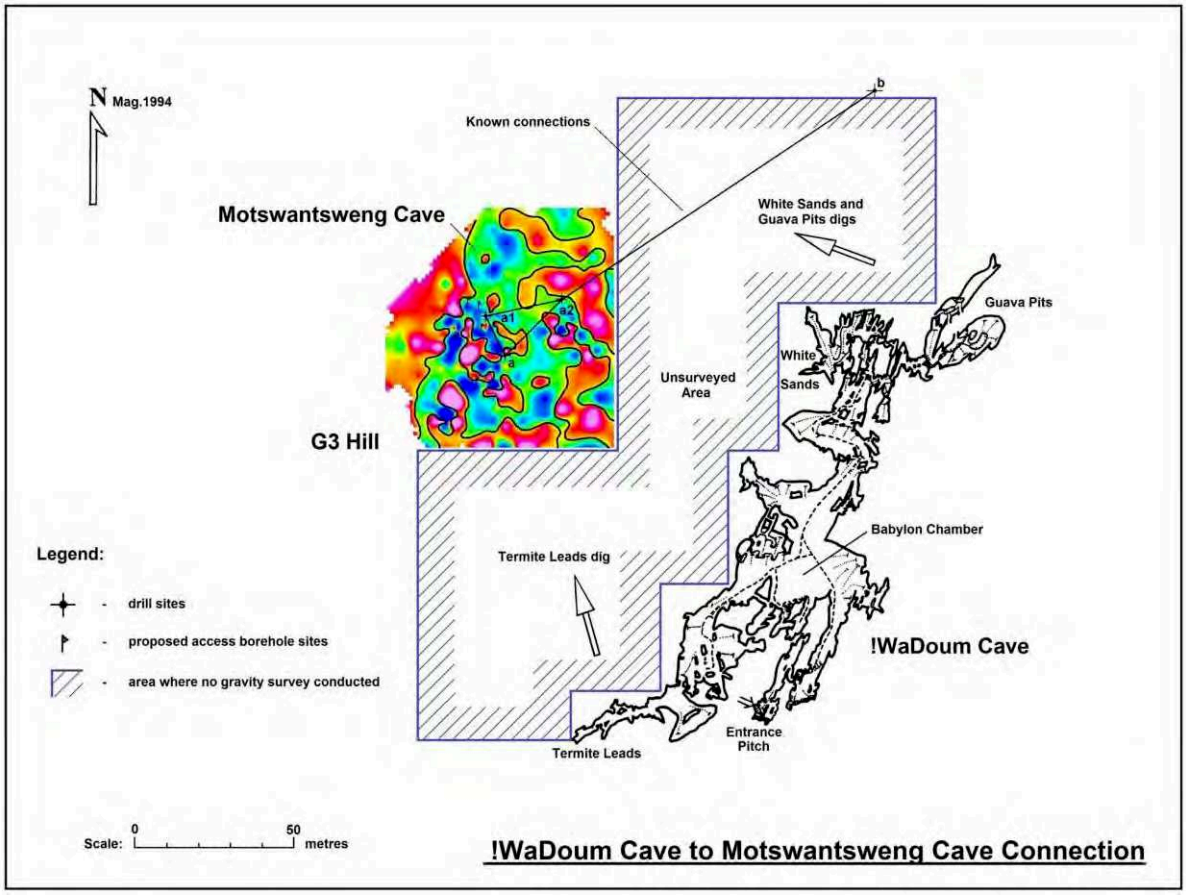


Figure 1318 (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers).

12.15. ANNEXE N°13 DU CHAPITRE N°4 : TOPOGRAPHIES SUPPLEMENTAIRES DE K1 A KOANAKA

Des topographies supplémentaires ont été publiées ou nous ont été fournies par Gavin Selfe.

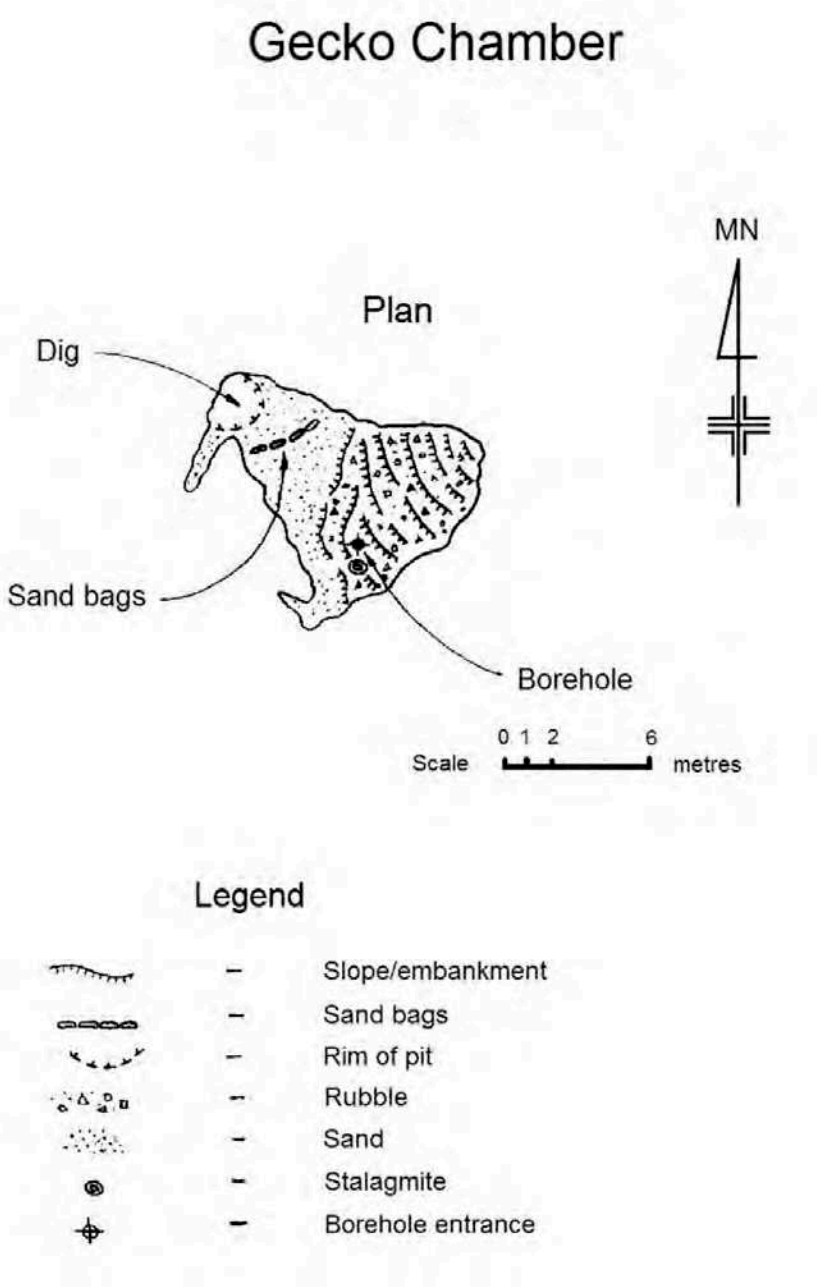


Figure 1319 Plan topographique de Gecko Chamber.

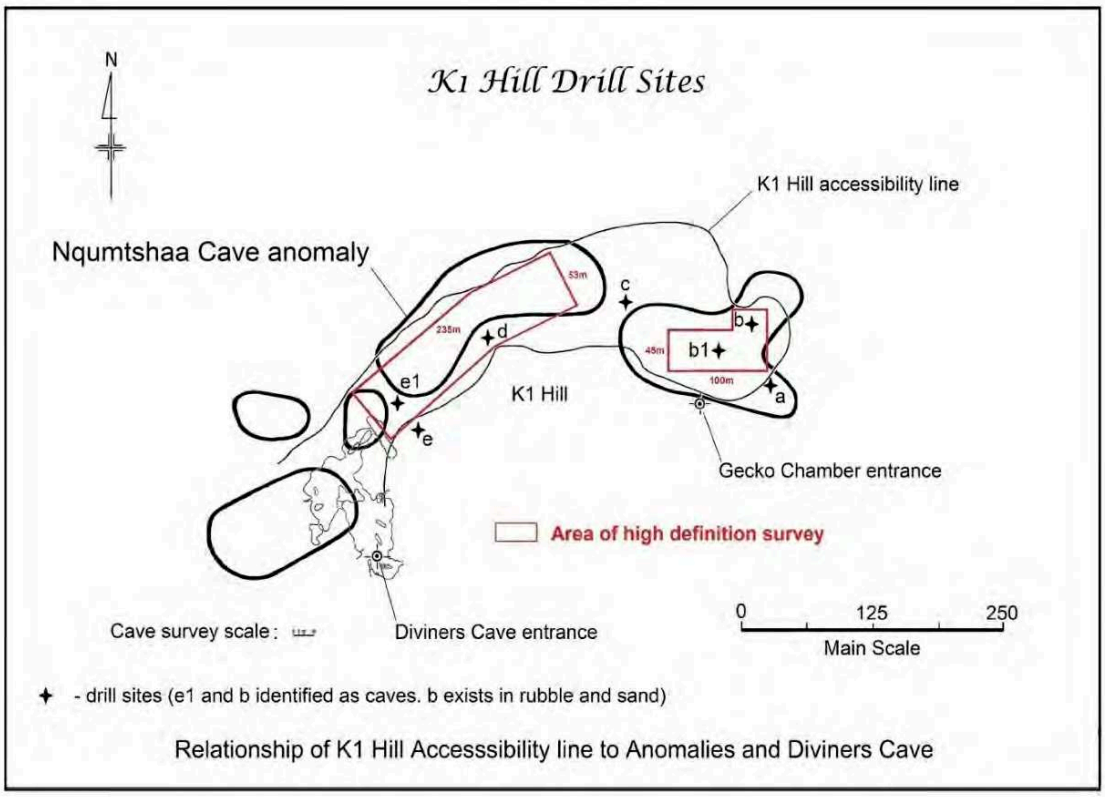


Figure 1320 Localisation des forages et des anomalies électro-magnétiques visant à rechercher la jonction entre Gecko Chamber et Diviner's Cave sur la colline K1 de Koanaka.

Cette jonction est appelée Nqumtshaa Cave. (Source : Selfe G. par mail).

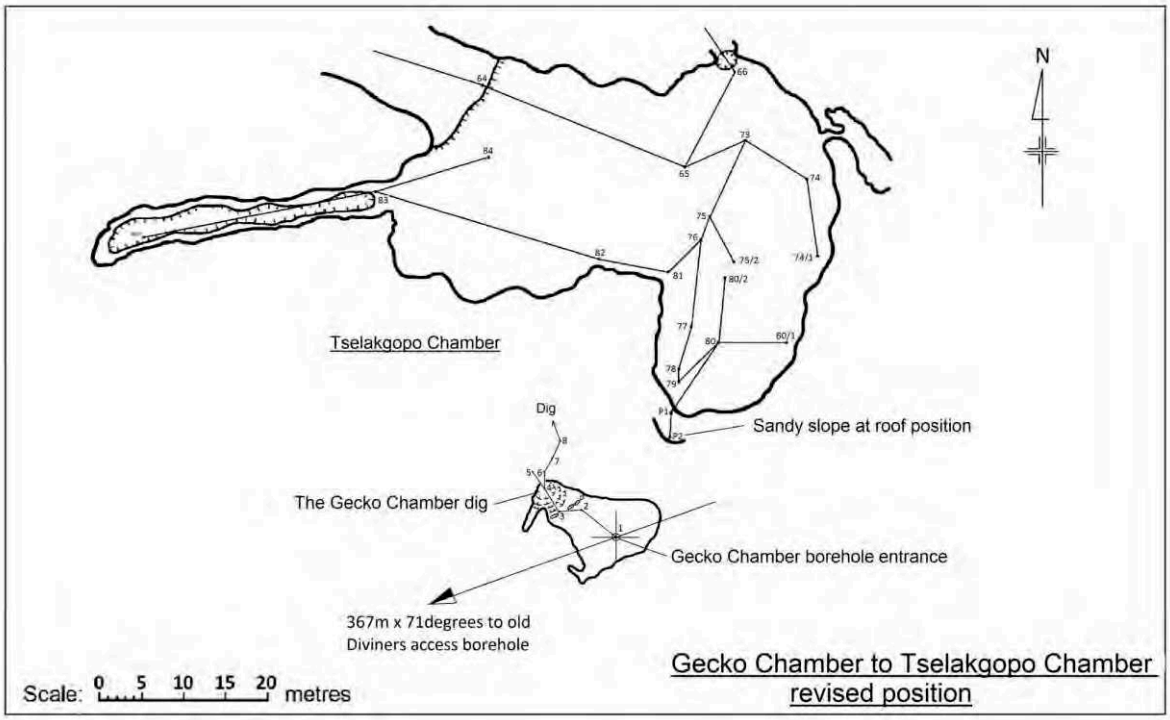


Figure 1321 Plan topographique de Gecko Chamber à Tseloakgopo Chamber (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers).

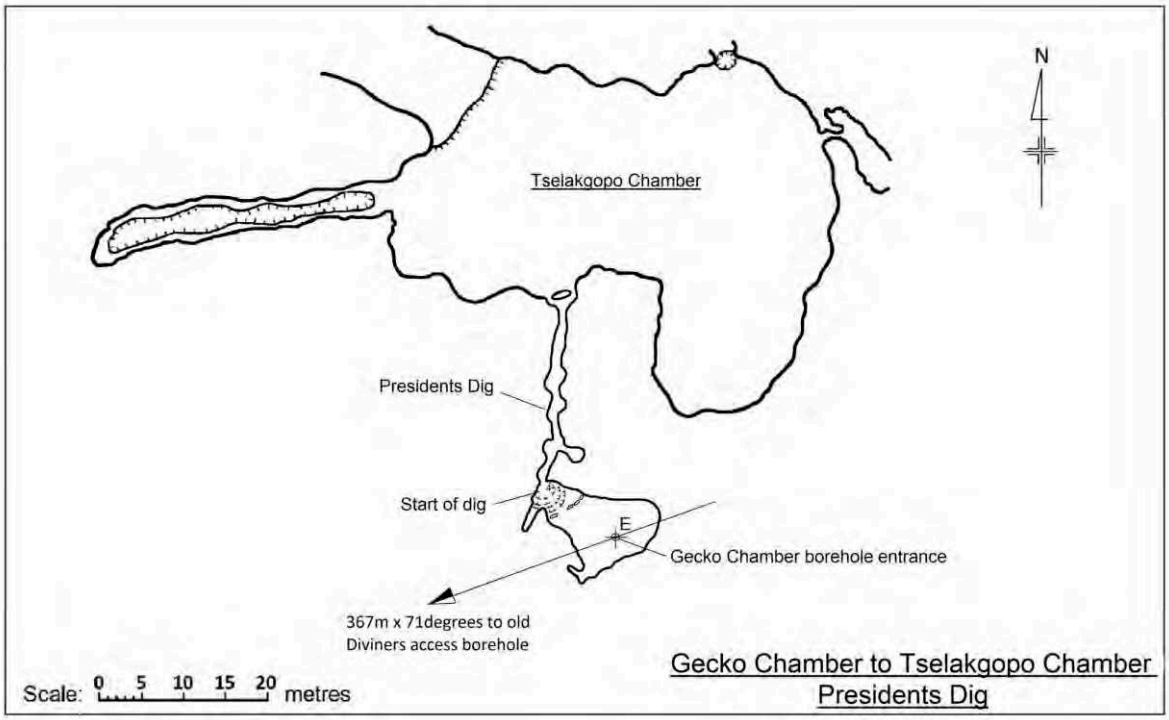


Figure 1322 Plan topographique de Gecko Chamber à Tseloakgopo Chamber (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers).

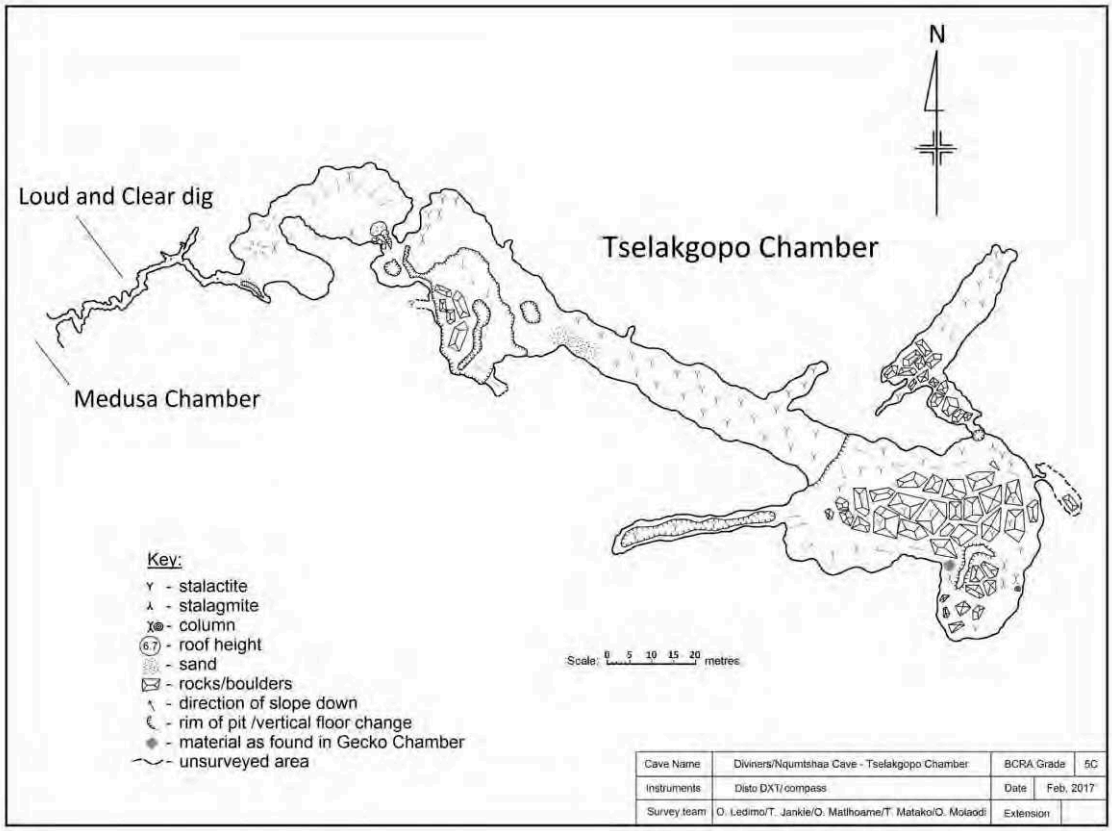


Figure 1323 Plan topographique de Tselakgopo Chamber (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers).

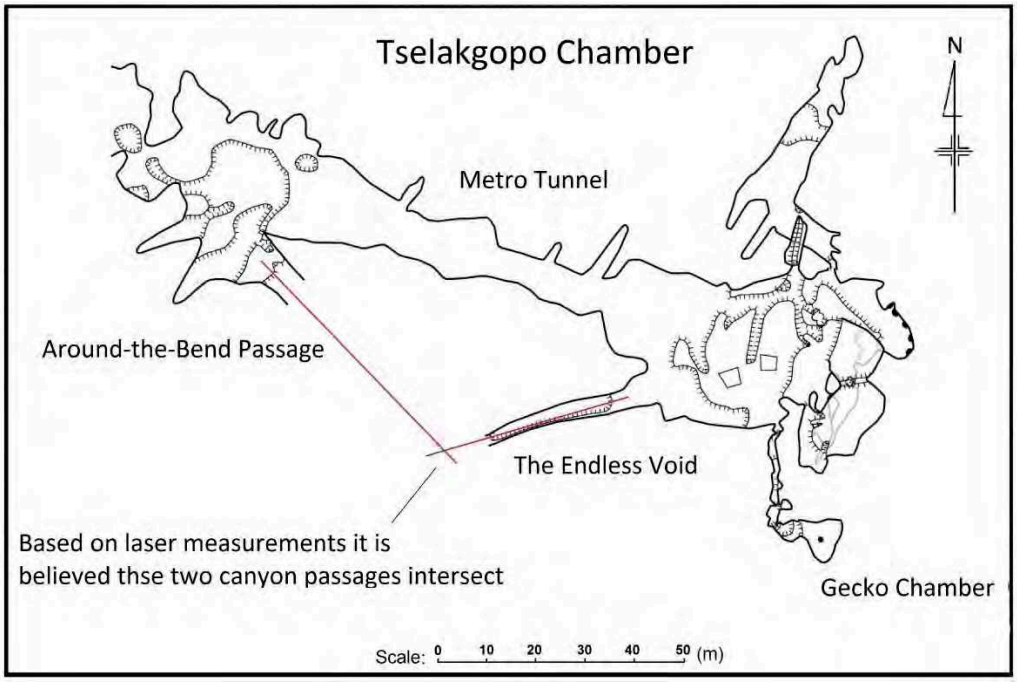


Figure 1324 Plan topographique (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers).

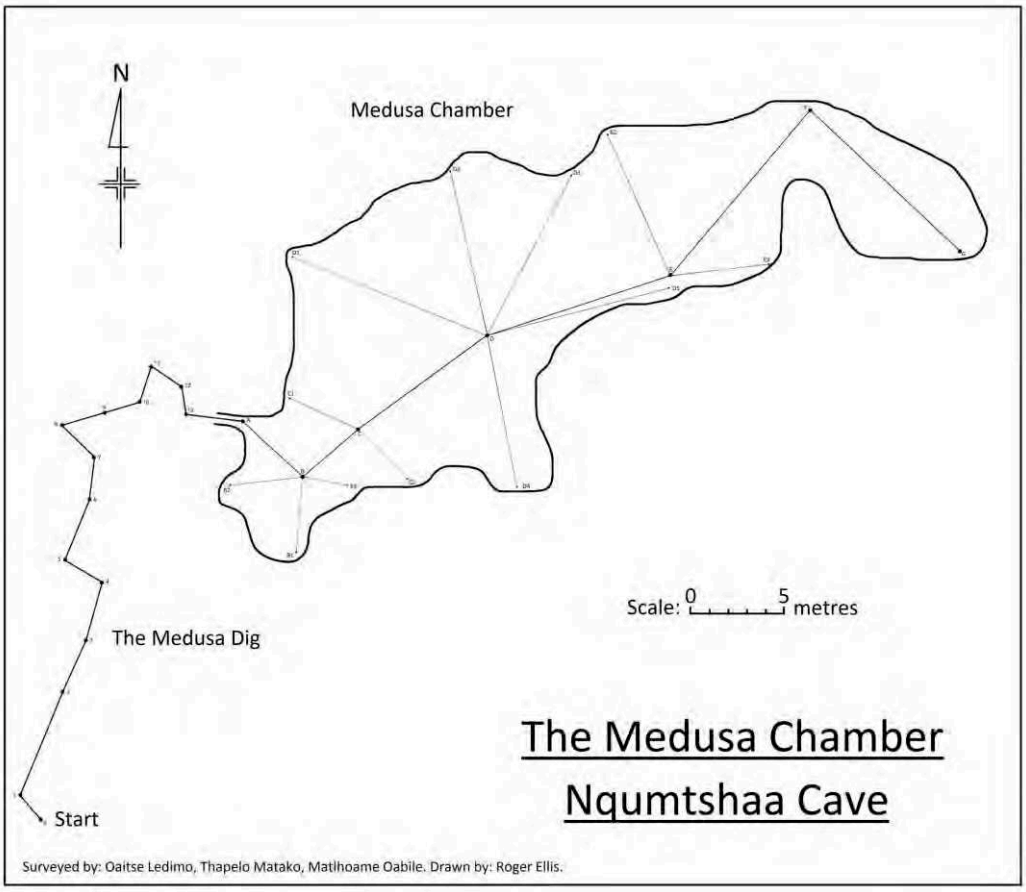


Figure 1325 Plan topographique de Medusa Chamber – Nqumtshaa Cave (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers).

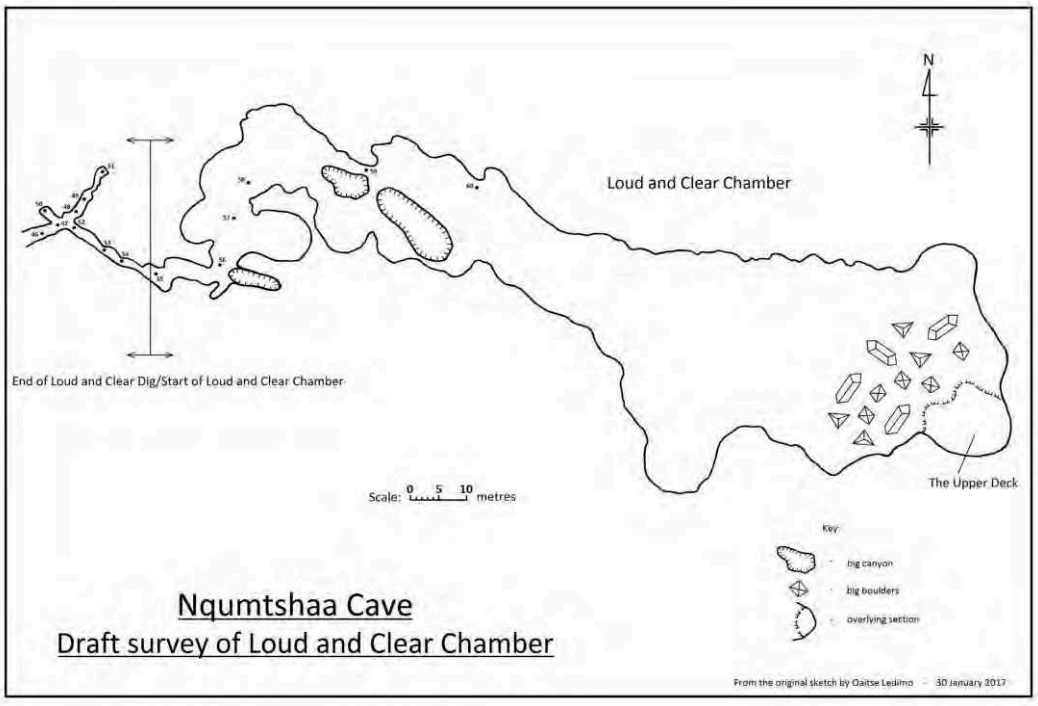


Figure 1326 Plan topographique du réseau de Nqumtshaa Cave.

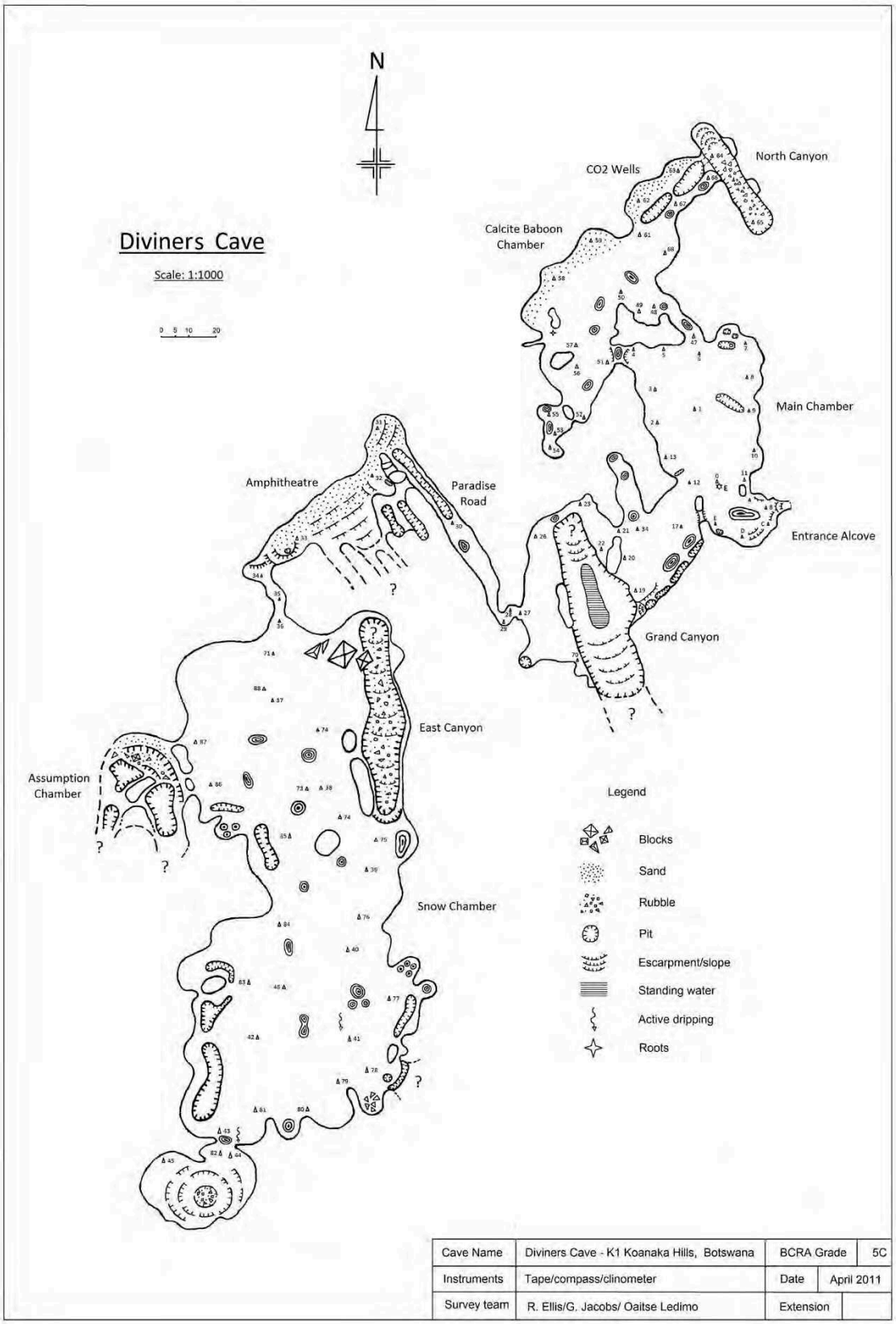


Figure 1327 Plan topographique du réseau karstique de Diviner's Cave (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers).

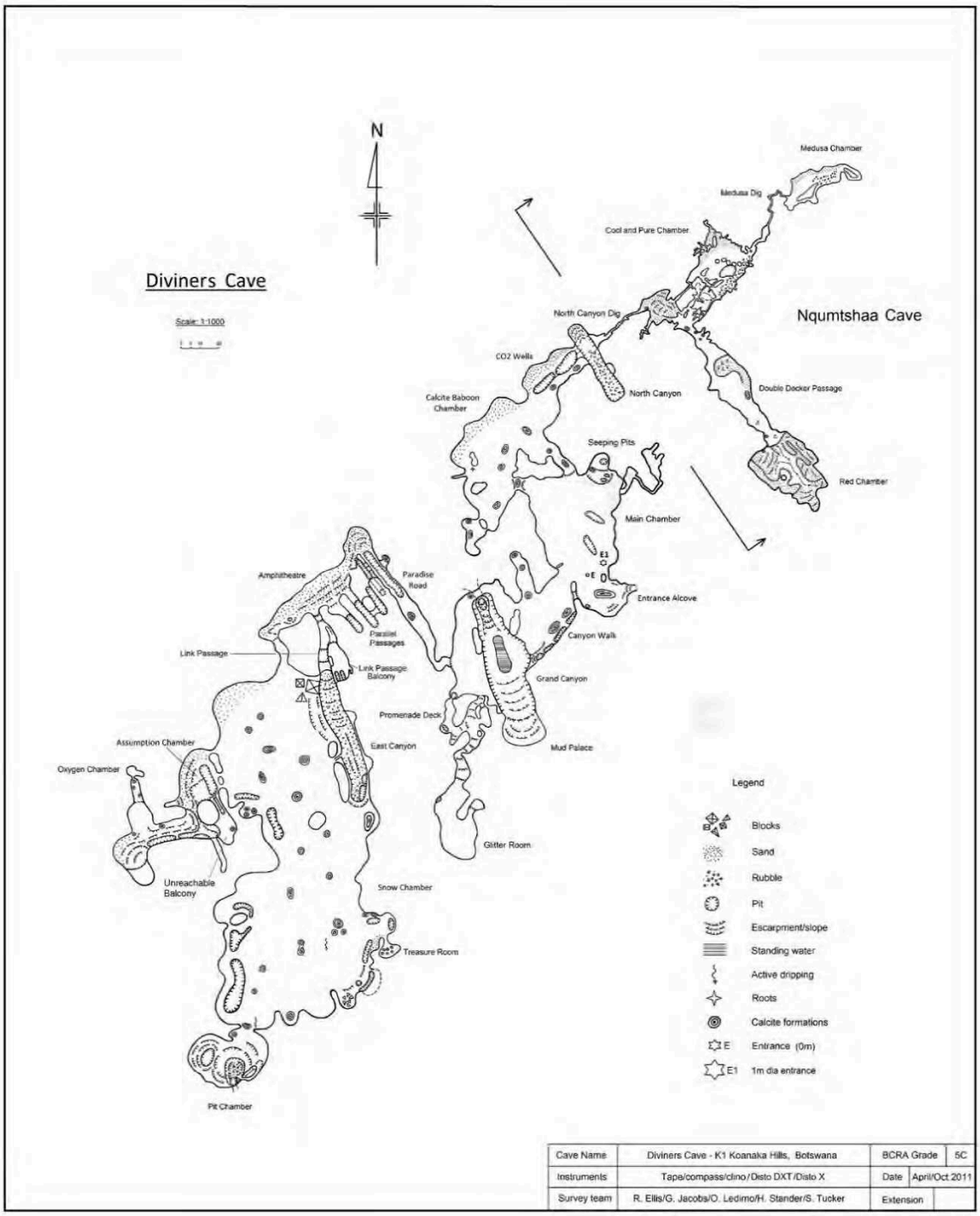


Figure 1328 Plan topographique du réseau karstique de Nqumtshaa Cave et Diviner's Cave (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers).

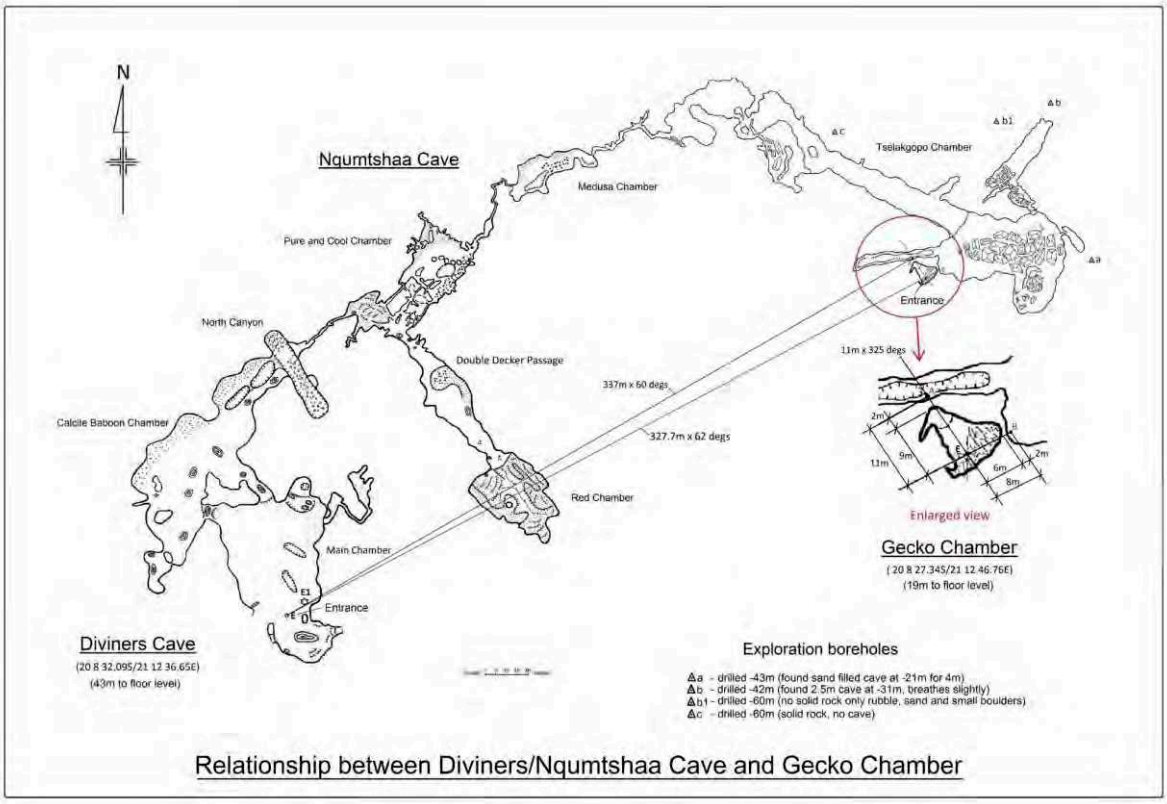


Figure 1329 Plan topographique (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers).

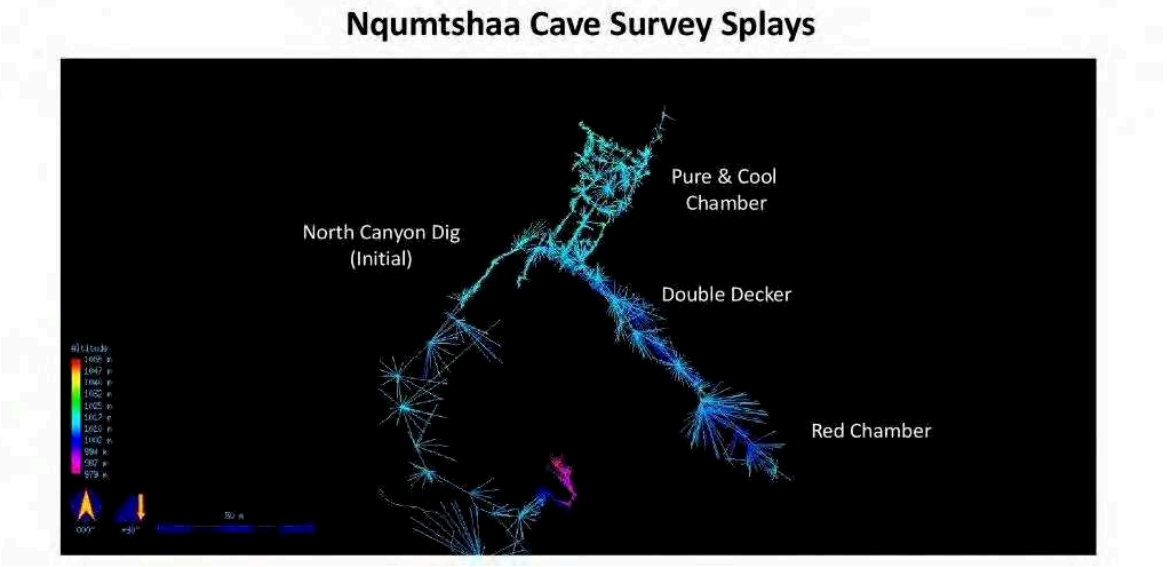


Figure 1330 Levé topographique de Nqumtshaa Cave sur K1 (source : Blog Howard Brian Sefe (lien))

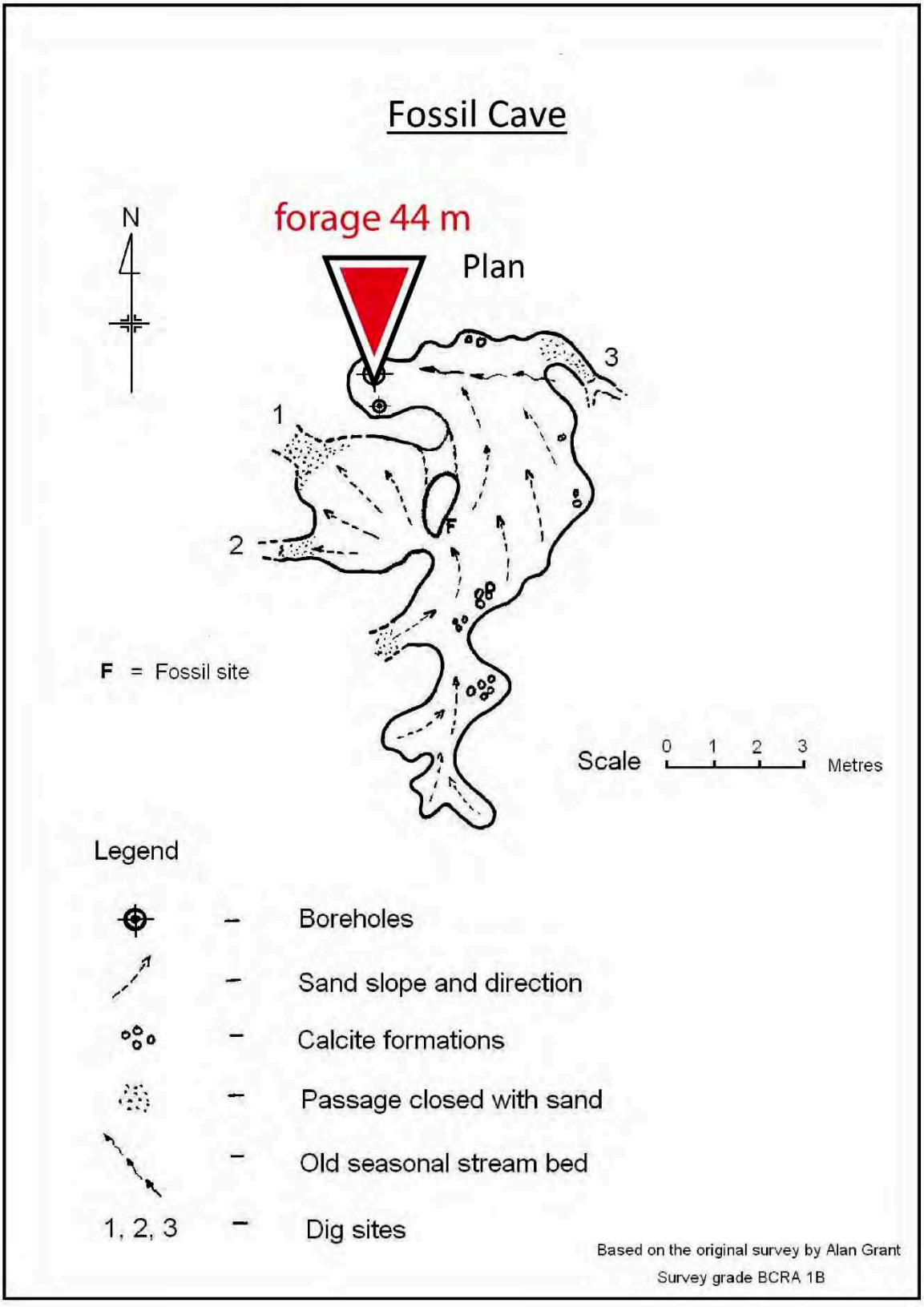


Figure 1331 Plan topographique de la première salle de Fossil Cave d'après Alan Grant (Source : Document fourni par Selfe Gavin, modifié).

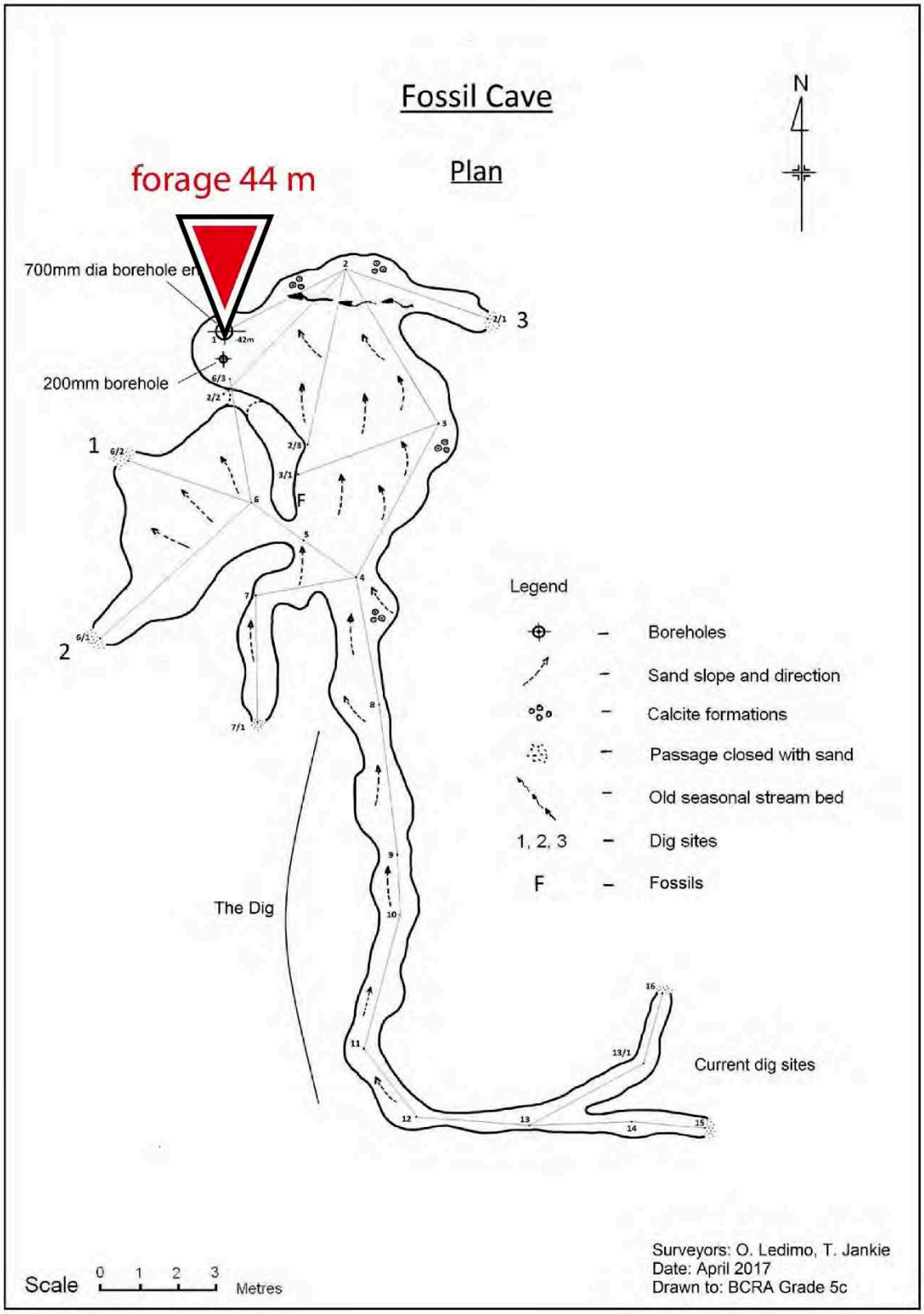


Figure 1332 Plan topographique du réseau de Fossil Cave (Source : Ellis, 2020, p.41, modifié).

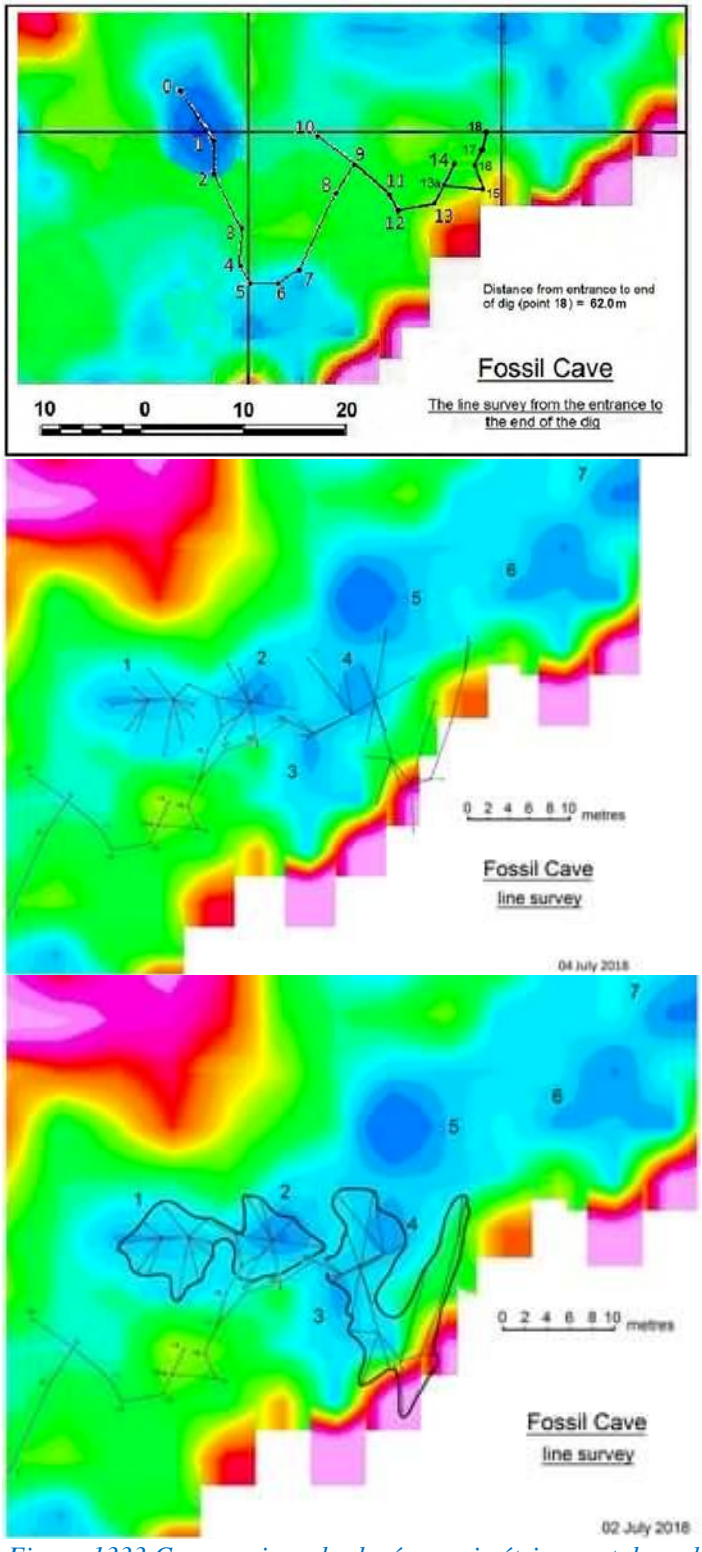


Figure 1333 Comparaison des levés gravimétriques et des relevés topographiques des grandes salles du fond du réseau de Fossil Cave (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers).

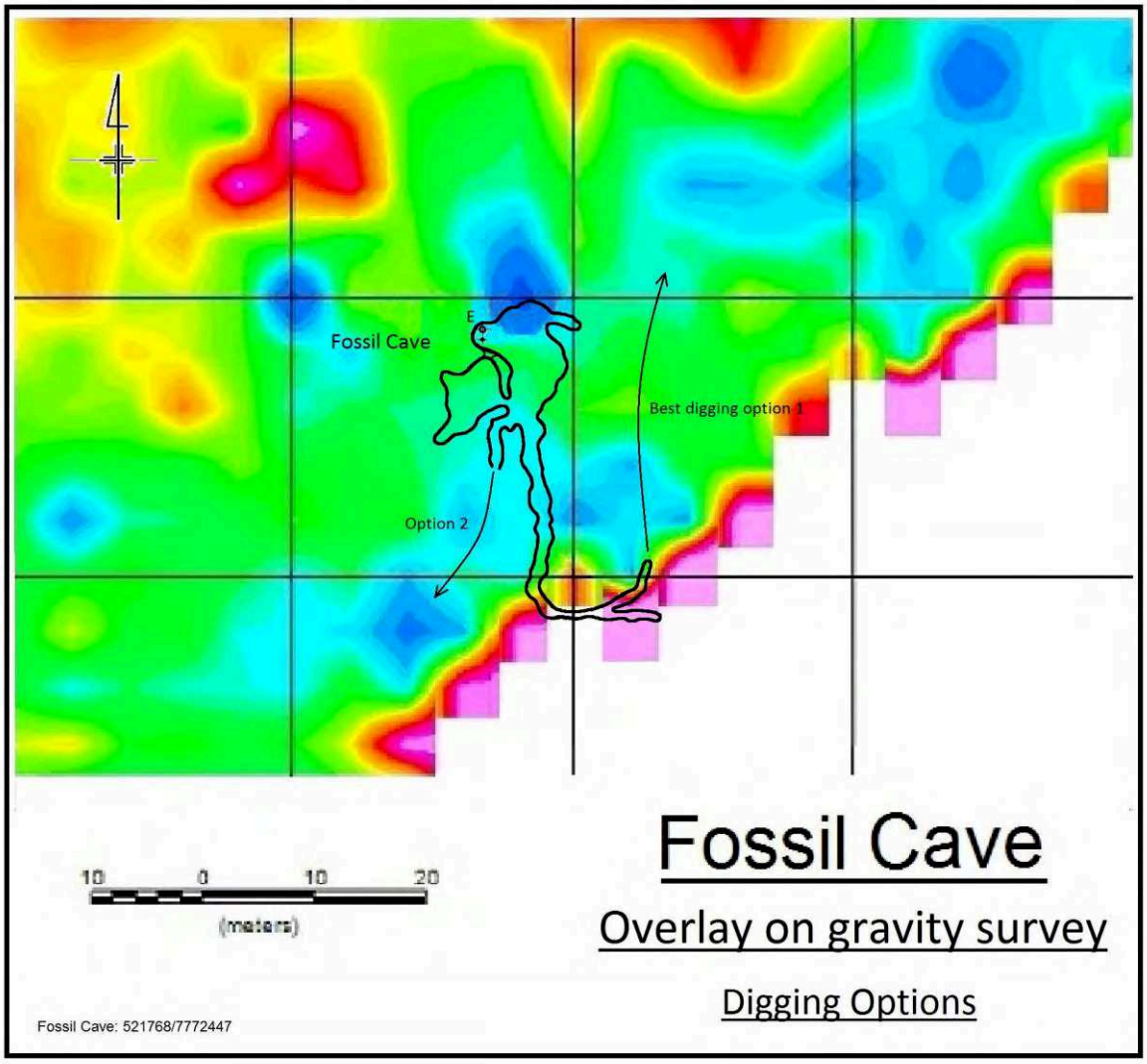


Figure 1334 : Report du plan topographique de la première salle découverte de Fossil Cave sur le relevé gravimétrique (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers).

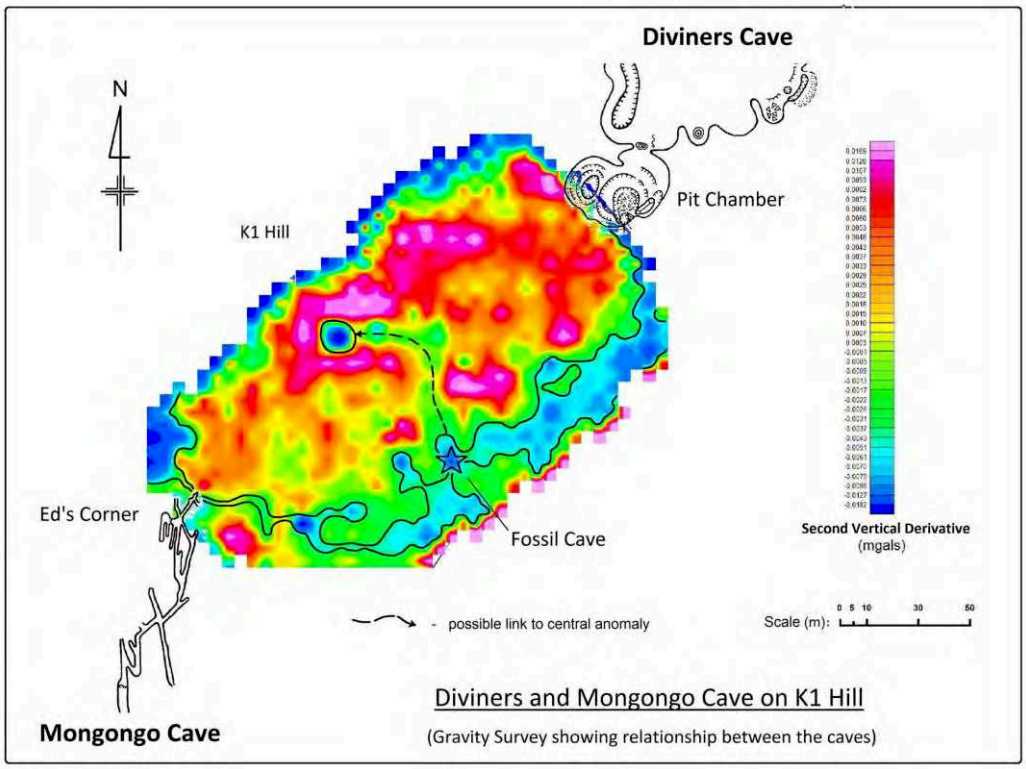


Figure 1335 Relevé gravimétrique et interprétation d'un réseau karstique potentiel à l'intérieur de la colline K1 de Koanaka (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers).

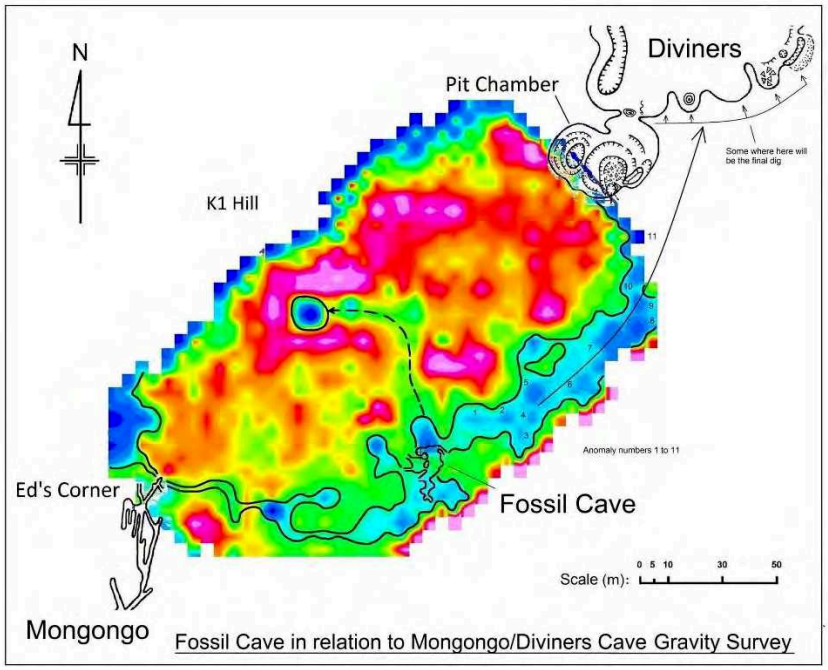


Figure 1336 Report de la topographie de la première salle découverte de Fossil Cave sur le relevé gravimétrique (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers).

Sur un des documents fournis par Gavin, il est écrit que :

> *« les rouges correspondent à une forte densité de dolomie, donc solide, et les bleus à une faible densité, donc à des cavités. Les spéléologues utilisent cette carte pour suivre les bleus (passages interconnectés) en dégageant le sable tout au long du parcours, afin de relier les cavernes numérotées de 1 à 11 et de relier deux des réseaux de grottes que nous avons découverts jusqu'à présent, à savoir la grotte de Diviner's et Fossil Cave. ».*

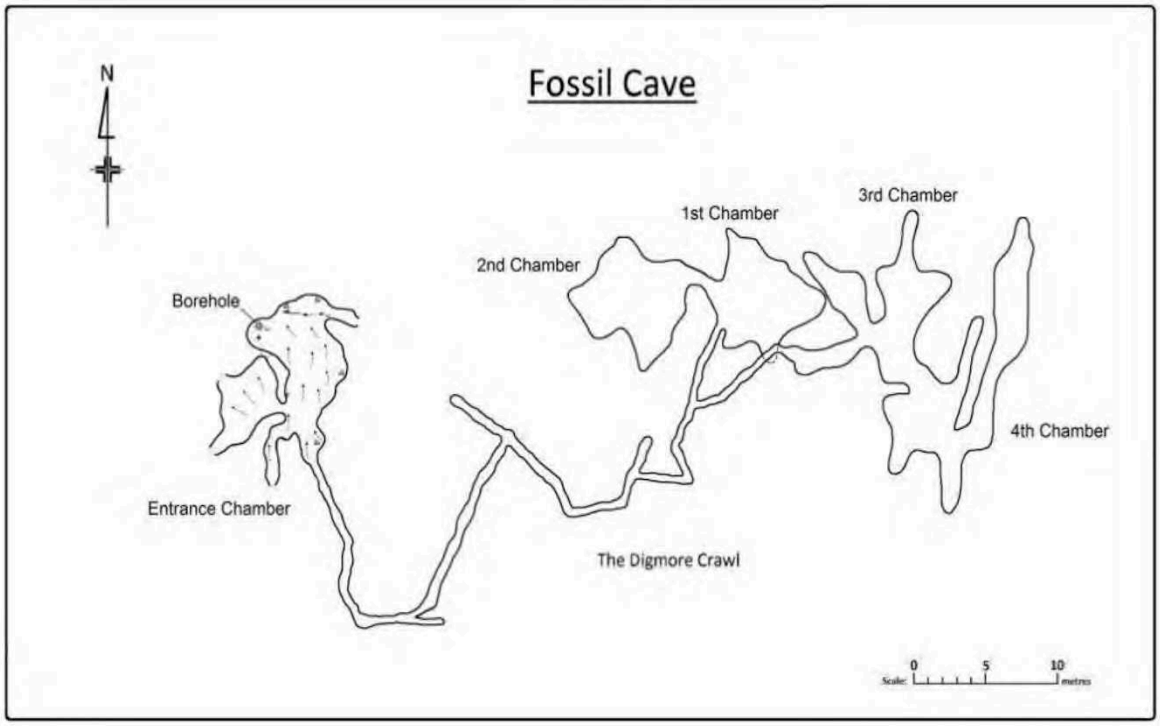


Figure 1337 Plan topographique de la grotte de Fossil Cave (Source : Ellis 2020, p.41).

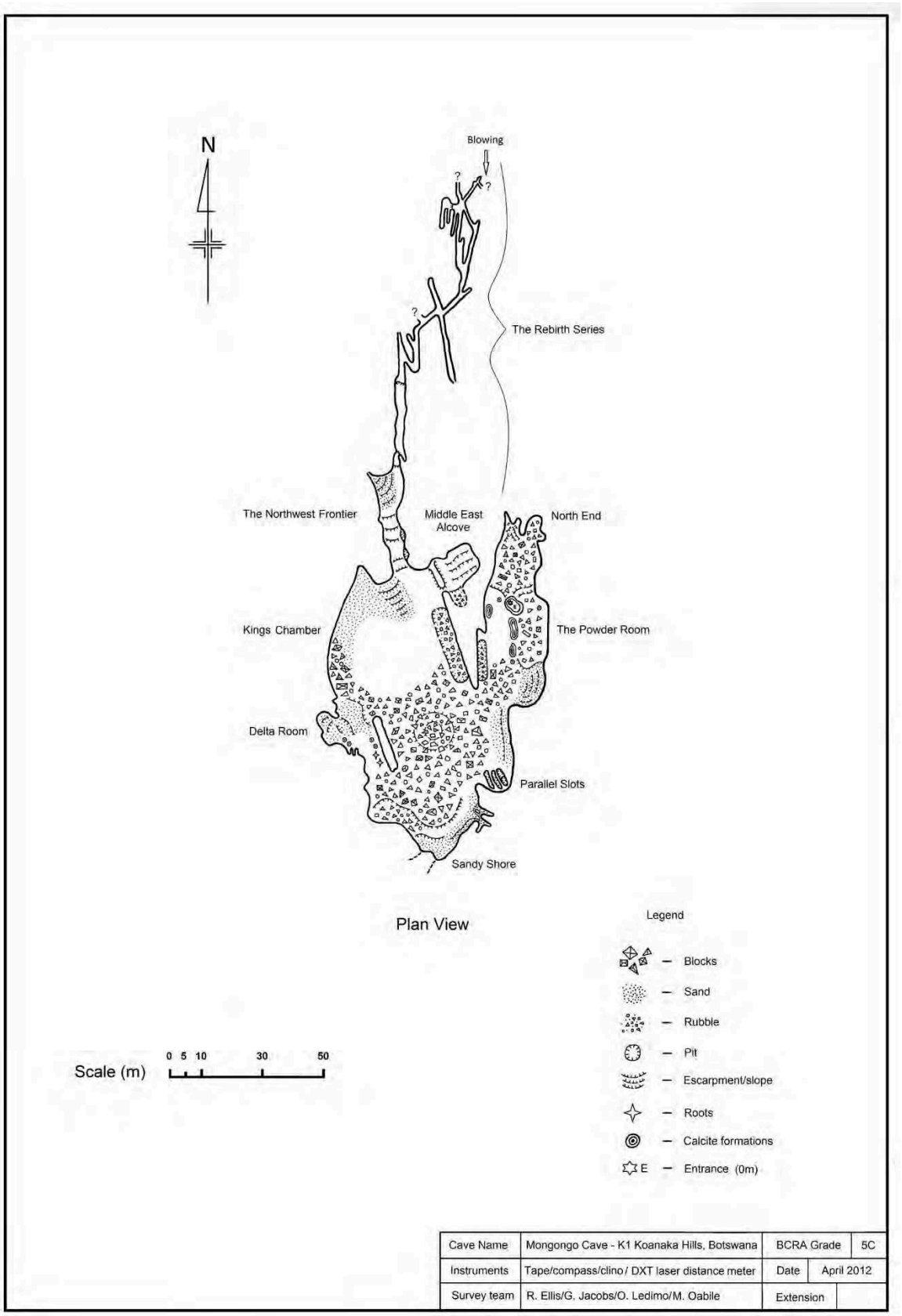


Figure 1338 Plan topographique de Mongongo cave (Source : Ellis, 2020, p.50).

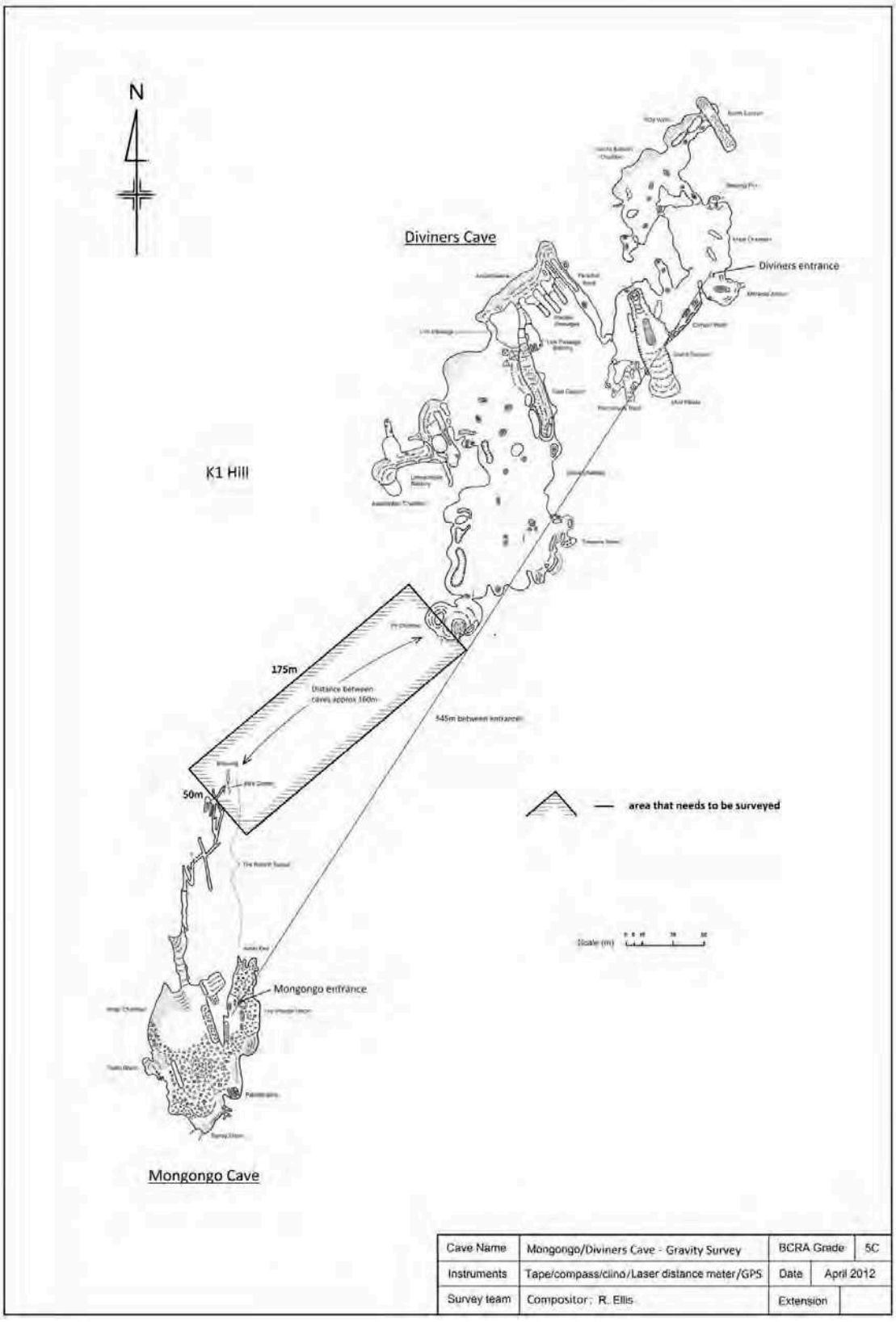


Figure 1339 Jonction hypothétique (The Ultimate Link) entre Mongongo Cave et Diviner's Cave (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers) (Lien internet).

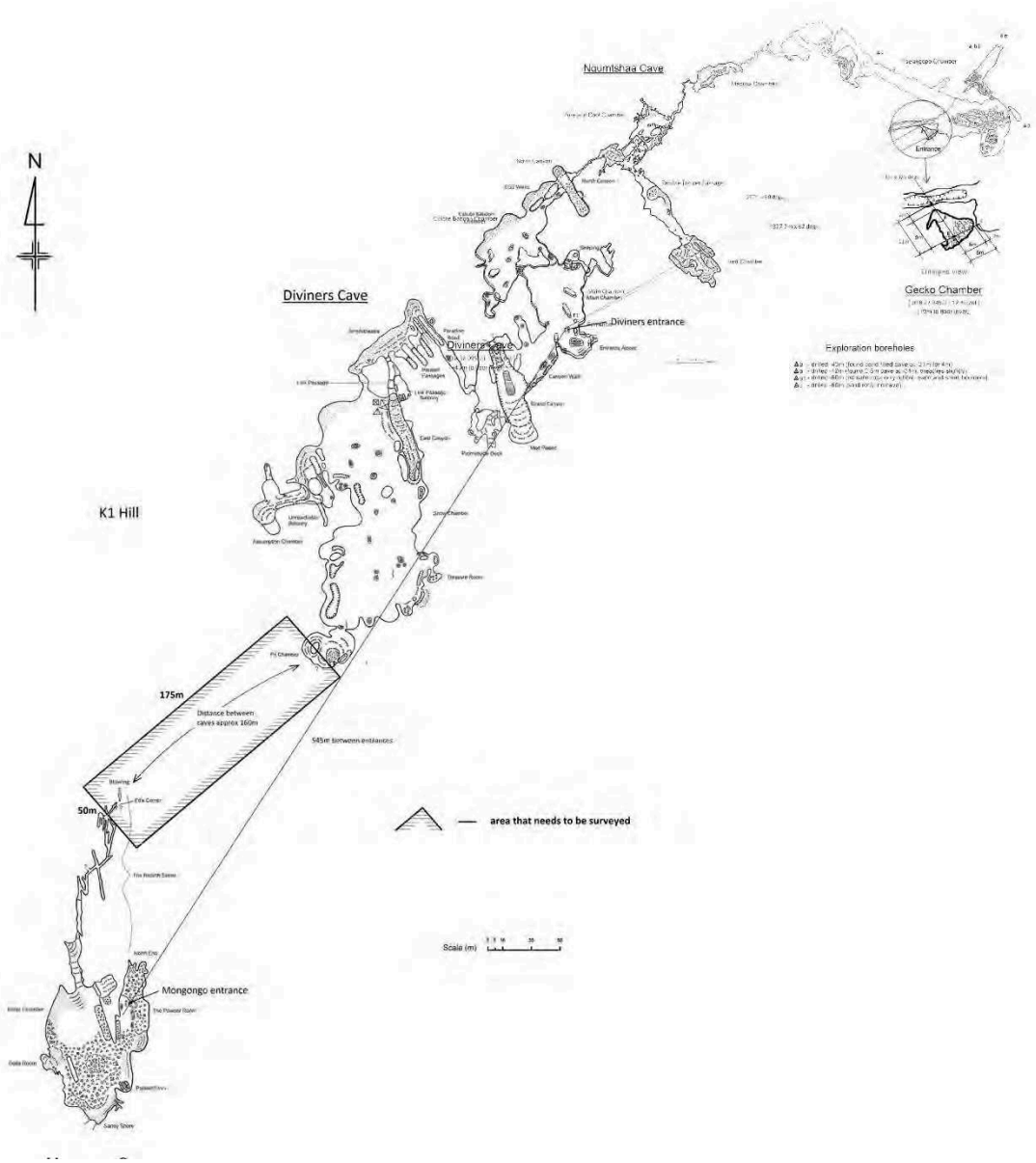


Figure 1340 Ajout du réseau de Gecko Chamber au document précédent (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers).



Figure 1341 Ajout du plan topographique de la première salle découverte de Fossil cave sur la jonction hypothétique (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers) (Lien internet).

12.16. ANNEXE N°14 DU CHAPITRE N°4 : NOTES SUR LA VISITE DE LA GROTTE DE WADOUM (GCWIHABA)

Note (Bruxelles et al.,2022, p.88)

Située sur la colline G4, elle a permis de mettre en évidence un exemple de cavité qui a évolué sans la présence de chauve-souris. Après un puits de 9 m de profondeur et un ramping d'une quinzaine de mètres, on accède, après avoir franchi une trappe installée par les spéléologues, à une vaste salle à concrétions dont le sol est recouvert par des sables rouges du Kalahari. Aucune trace de biocorrosion n'a été reconnue. Les concrétions sont intactes ; les très nombreuses fistuleuses indiquent une grande stabilité paléoenvironnementale de la cavité. Par ailleurs, on repère des traces d'écoulement. Les cupules calées sur la fracturation et la microfracturation sont caractéristiques d'une évolution de la grotte dans des conditions phréatiques et/ou épiphréatiques.

Néanmoins on repère aussi, dans un secteur de la cavité, du fantôme de roche conservé dans des diaclases et des joints de strates. Alors que l'on y reconnaît la structure originelle des dolomies (litage, joints de cherts…), la roche a perdu toute sa cohérence. Elle s'est transformée en un sable noir poreux et pulvérulent dans un premier temps, puis induré par des filonnets de calcite. On reconnaît les boxworks siliceux, les niveaux de cherts et les sables noirs encore en place dans les fissures des parois. Seuls les bancs de cherts sont mis en relief. Ce phénomène, appelé fantômisation, est connu depuis quelques années (Quinif et al., 1997 ; Vergari, 1998 ; Quinif, 1999 et 2010 ; Bruxelles, 2001 ; Quinif et Bruxelles, 2011 ; Dubois et al., 2014). Différentes discontinuités sont exploitées par l'altération qui pénètre progressivement au sein du massif carbonaté. Ce processus peut descendre à plusieurs centaines de mètres de profondeur dans les zones fracturées. Il constitue donc d'importantes masses sablonneuses très sensibles à l'érosion et au soutirage karstique (cf. réseau Diviners-Gecko-Mongongo). Ce phénomène peut s'apparenter à une véritable préparation à la formation de vides karstiques. Ainsi, lors de l'abaissement de la nappe phréatique, ces zones altérées sont préférentiellement et rapidement évidées par le ruissellement ou le soutirage. Cela se traduit en surface par l'apparition de formes en entonnoir (ex. doline de soutirage dans les dunes de sables rouges ou Waxhou North), voire des fontis, qui se raccordent à des conduits karstiques de toute taille, qui vont pouvoir piéger par la suite des brèches de différentes natures, jusqu'au colmatage complet de la cavité. Cette grotte constitue donc un bon modèle d'évolution des cavités avant qu'elle ne soit retouchée par la biocorrosion.

Note de la visite du 25/11/2021:

Au fond de la cavité, présence de fantôme de dolomie (sables noirs), rappelant la grotte de Sterkfontein dans le Cradle of Humankind.
Le pendage est orienté vers le sud, estimé à 45° voire plus (à l'œil). Dans le fond de la grotte, on observe de nombreux niveaux de chert, de 50 cm de puissance, de couleur rougeâtres, n'ont pas été dissous par la fantômisation (boxworks) et indiquent le pendage des dolomies.
Les sables rouges du Kalahari pénètrent dans la grotte par les points hauts. Des talus de sables rouges viennent recouvrir le sol de la salle principale. Oatse L. nous indique que ce sont dans ces sables rouges que l'on retrouve des serpents tombant de la surface. En remontant ces talus, il serait possible de retrouver des anciennes brèches mais les mesures de conservation l'empêchent.
De nombreuses termitières ont été observées dans l'une des salles (Termites Leads sur le plan p.581), certaines forment des colonnes de 60 cm, d'autres sont effondrées. Autour de ces termitières, de nombreuses pistes de termites, de 1 cm de diamètre, parcourent la cavité dans tous les sens.
Le pendage des dolomies dans la grotte de Wadum est plus important (vers 45° à 50° à l'œil) que dans les grottes de Gcwihaba. Aucune brèche fossilifère n'a été observée.

12.17. ANNEXE N°16 DU CHAPITRE N°4 : IDENTIFICATION DE LA VEGETATION APRES LES EPISODES DE PLUIE SUR LES IMAGES SATELLITES

Ces images satellites (*Wayback* 2022-05-18) montrent des structures en éventail que nous avons associées aux orages de pluie et à la végétation qu'ils induisent. L'ajout des données de relief (modèle ombré calculé à partir du MNT JAXA (lire Chapitre n°1) indique que ces structures sont indépendantes des reliefs et des dunes de sable.

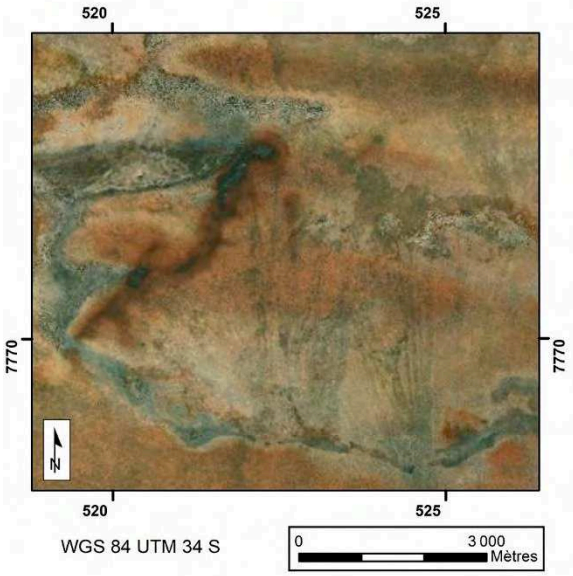


Figure 1342 Structures en éventail à l'est de la colline K1 à Koanaka au Botswana.

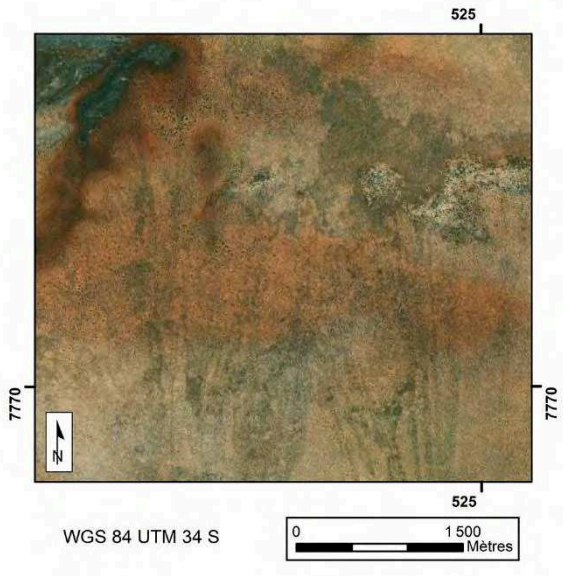


Figure 1343 Détail sur les éventails.

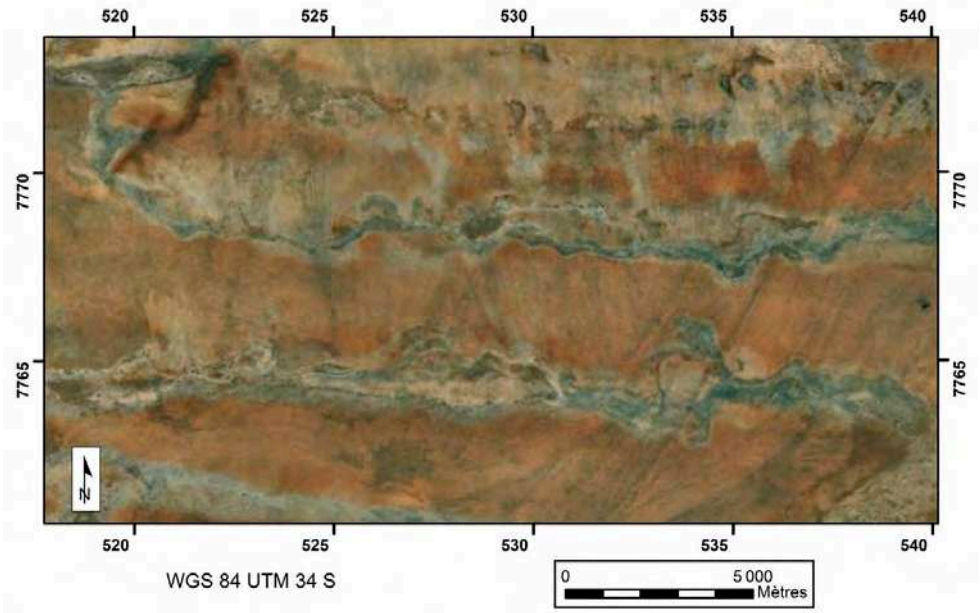


Figure 1344 Vue moins large des éventails que l'on retrouve dans toute la région.

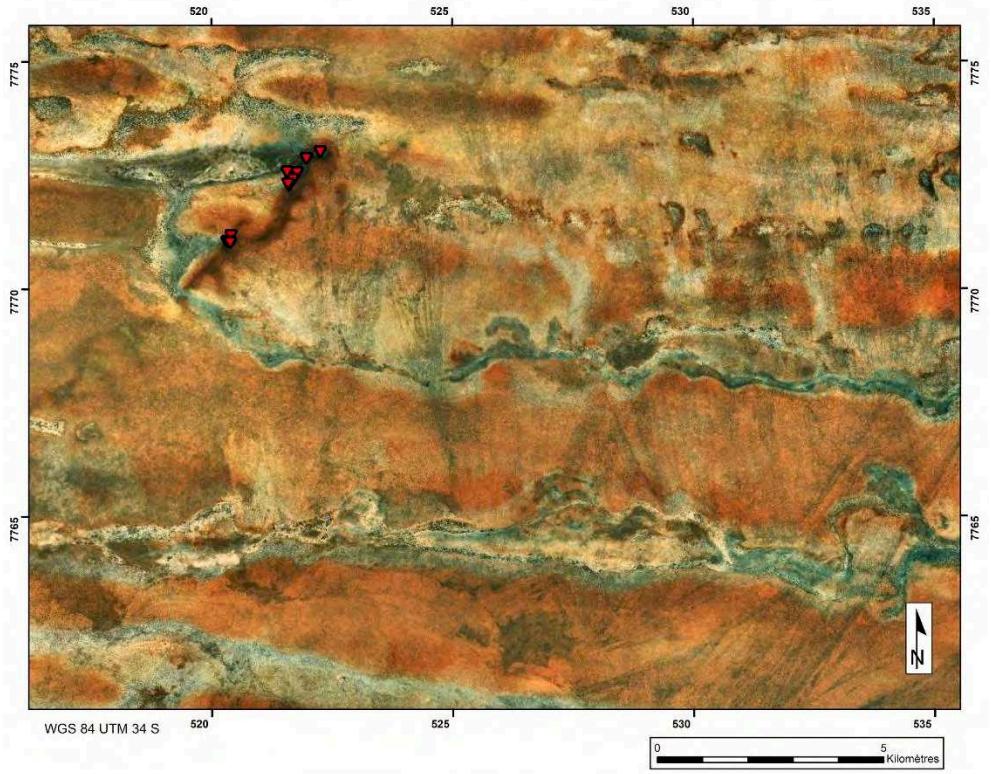


Figure 1345 Image satellite.

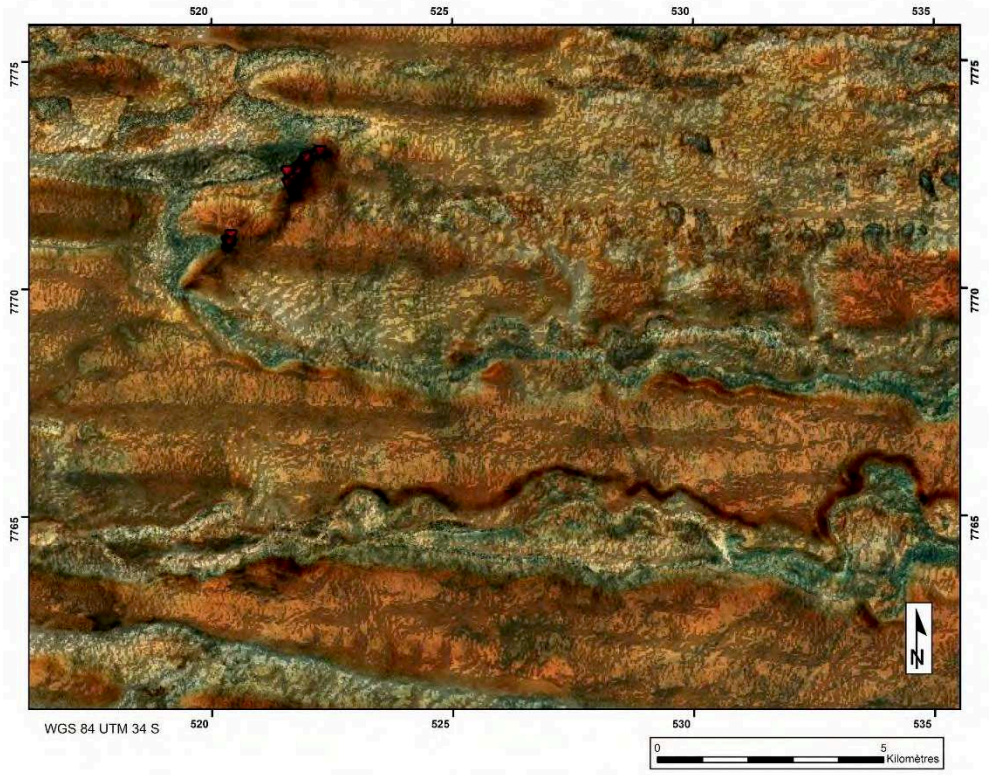


Figure 1346 Image satellite avec relief.

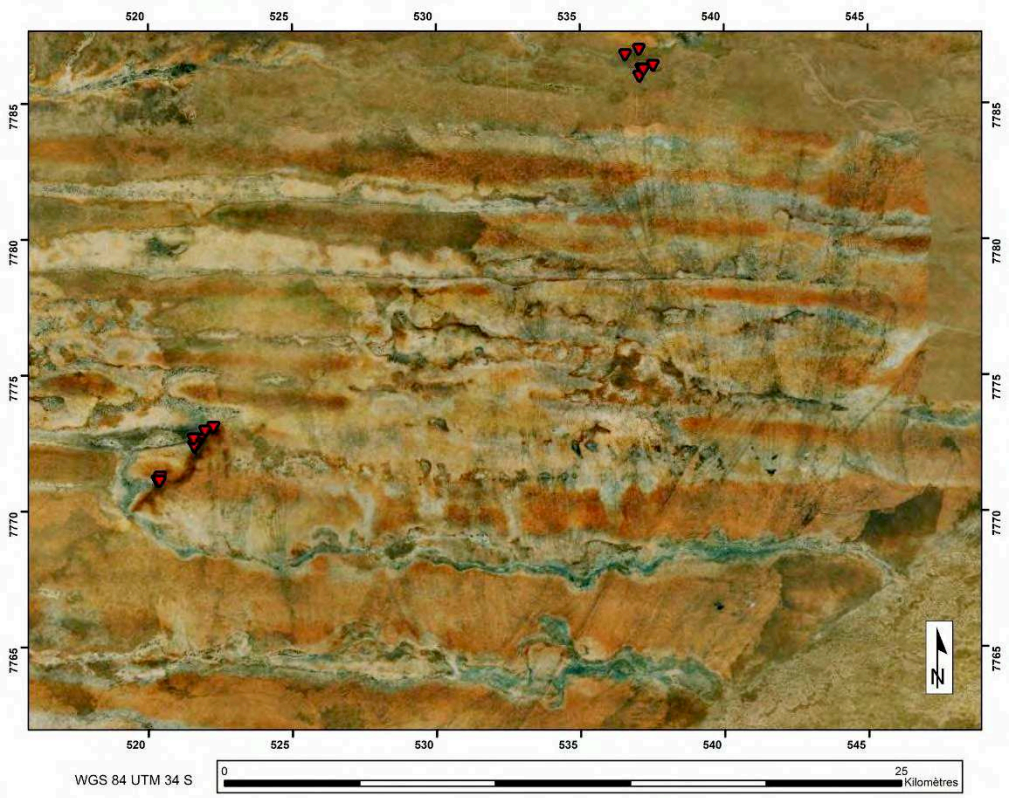


Figure 1347 Image satellite.

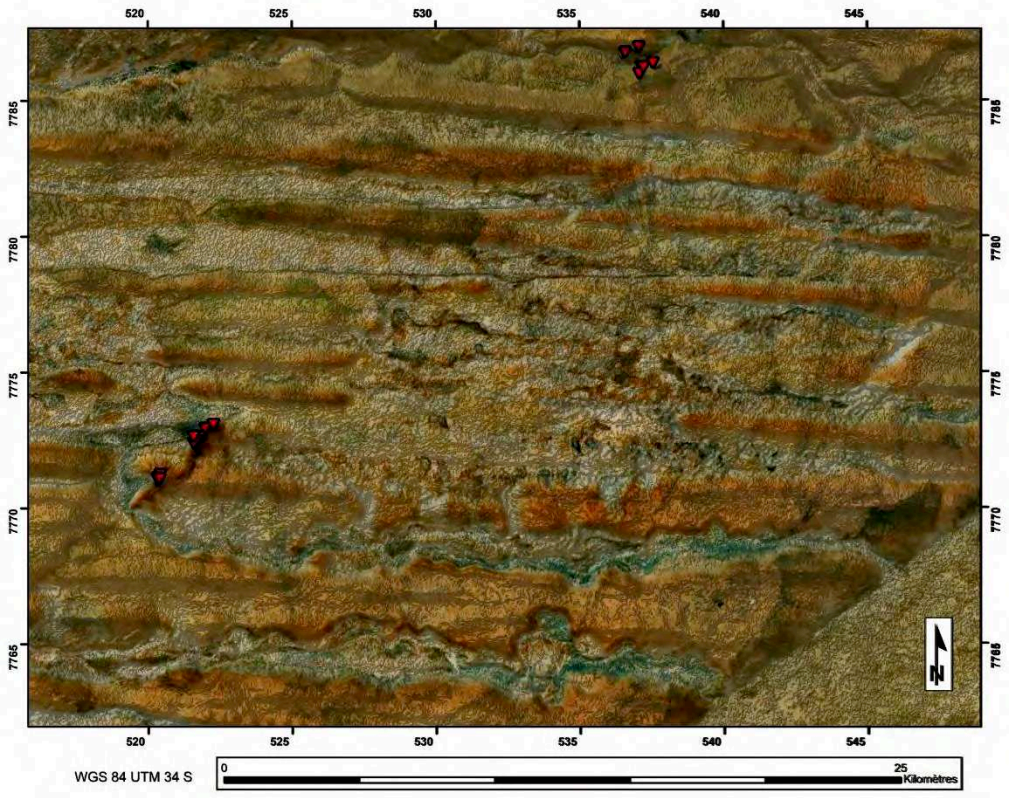


Figure 1348 Image satellite avec relief.

12.18. ANNEXE N°17 DU CHAPITRE N°4 : CARTES DE XAI-XAI (BOTSWANA)

Xai-xai est situé vers 1110 m d'altitude (MNT JAXA). Il est parfois écrit Nyae Nyae, Cae Cae ou encore Cgae Cgae. Des industries LSA sont indiquées à Xai-Xai dans un tableau de Wilkins (2021).

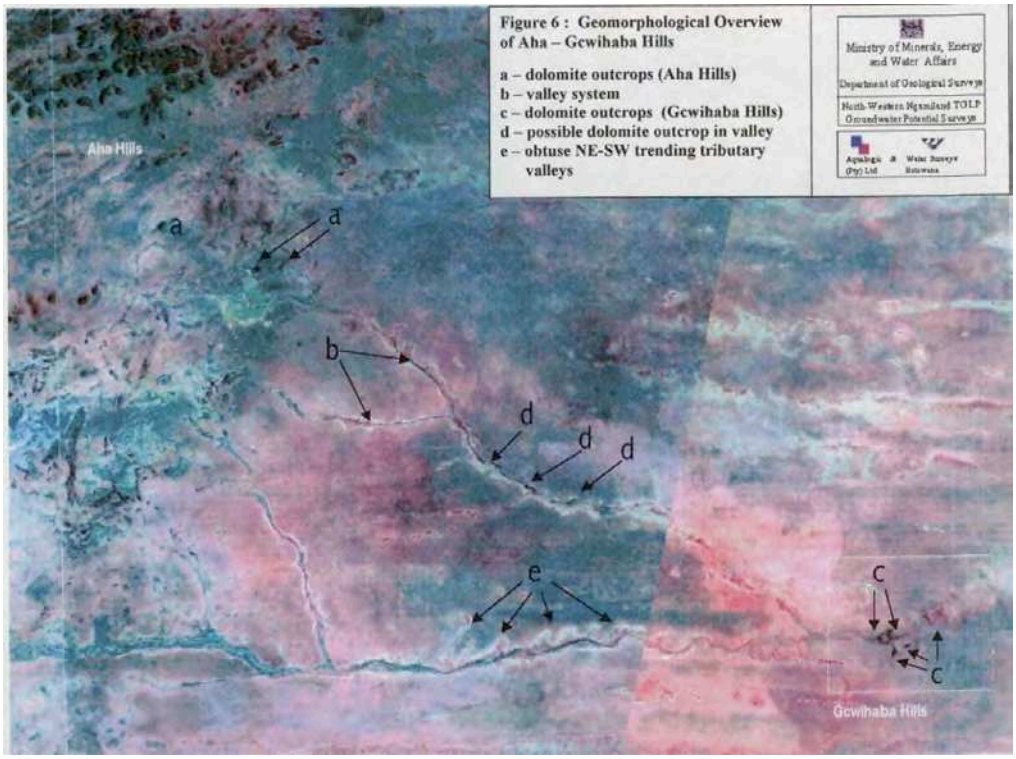


Figure 1349 Carte satellite entre Gcwihaba et les Aha Hills (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2001, Fig.6).

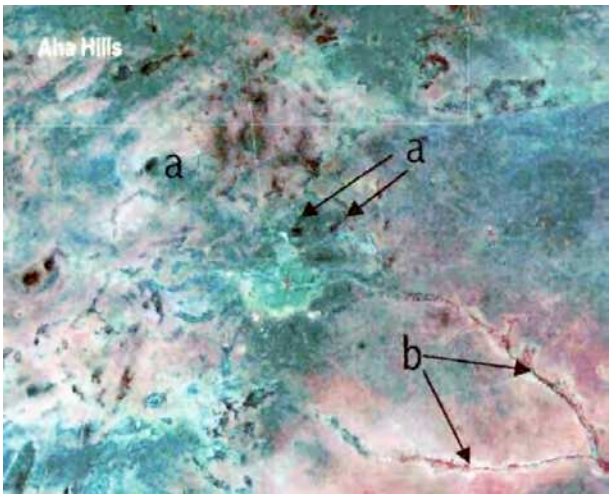


Figure 1350 Détail de la figure précédente.

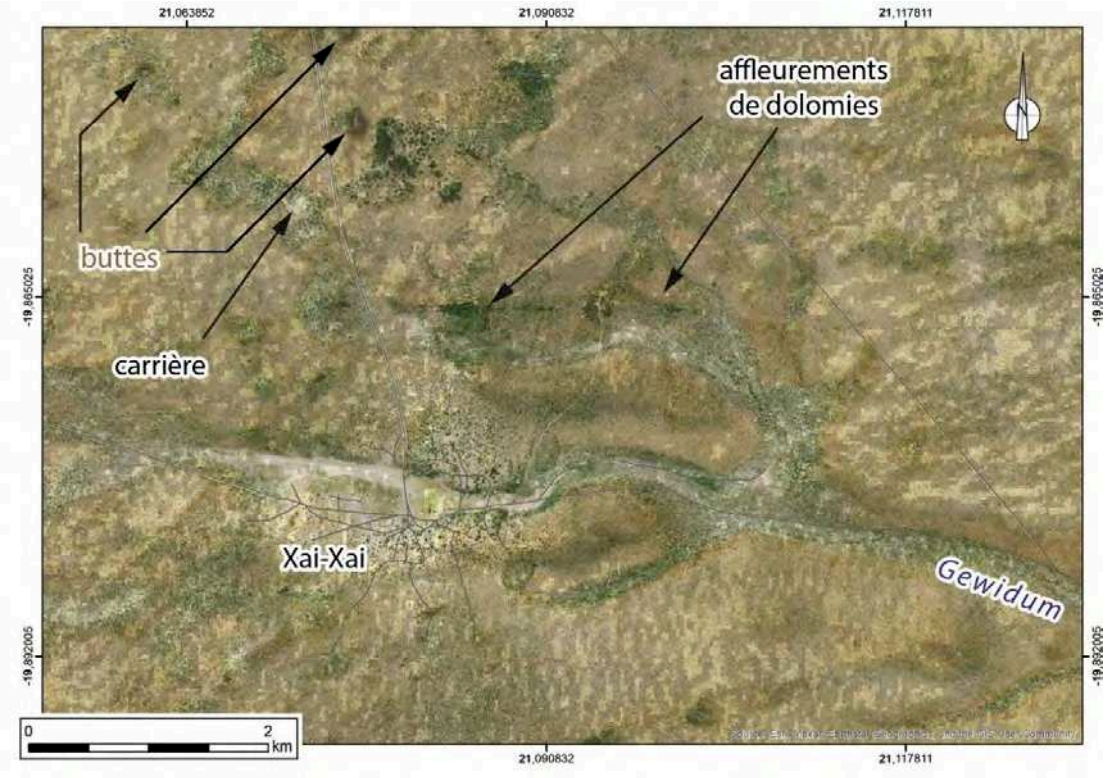


Figure 1351 Image satellite de la région de Xai-Xai.

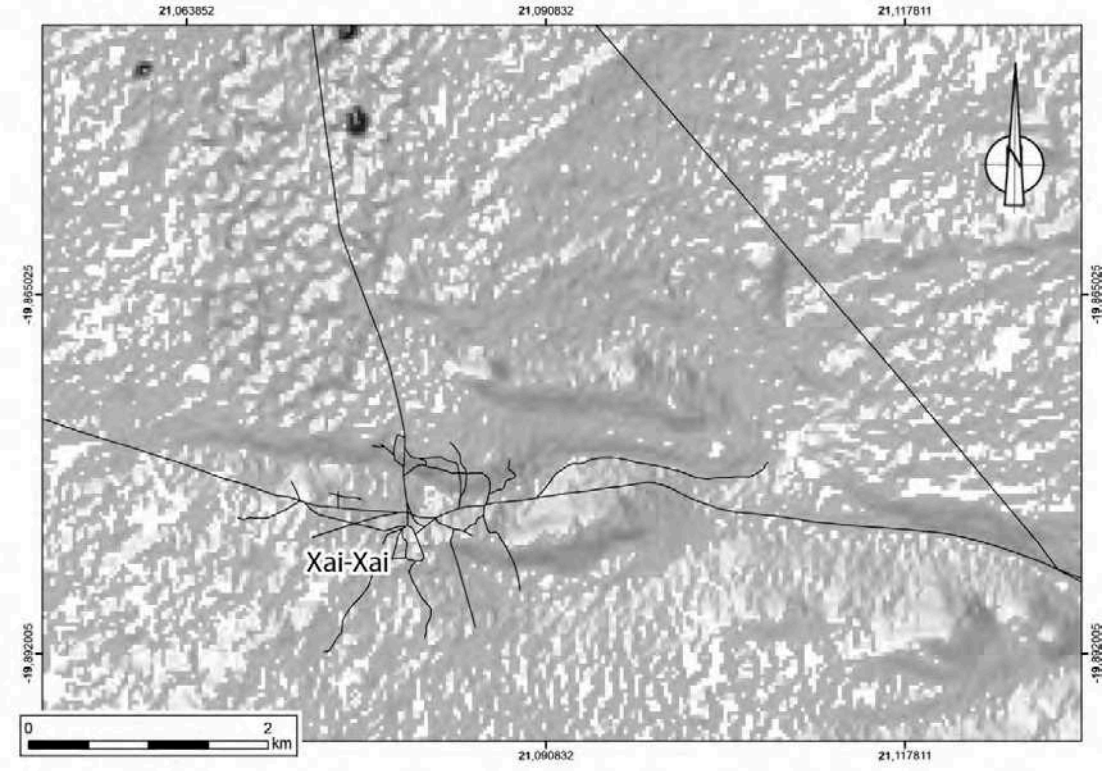


Figure 1352 Modèle ombré (MNT JAXA) et carte des pentes de la région de Xai-Xai (en noir les pistes).



Figure 1353 Détail de l'image satellite du village de Xai-Xai.

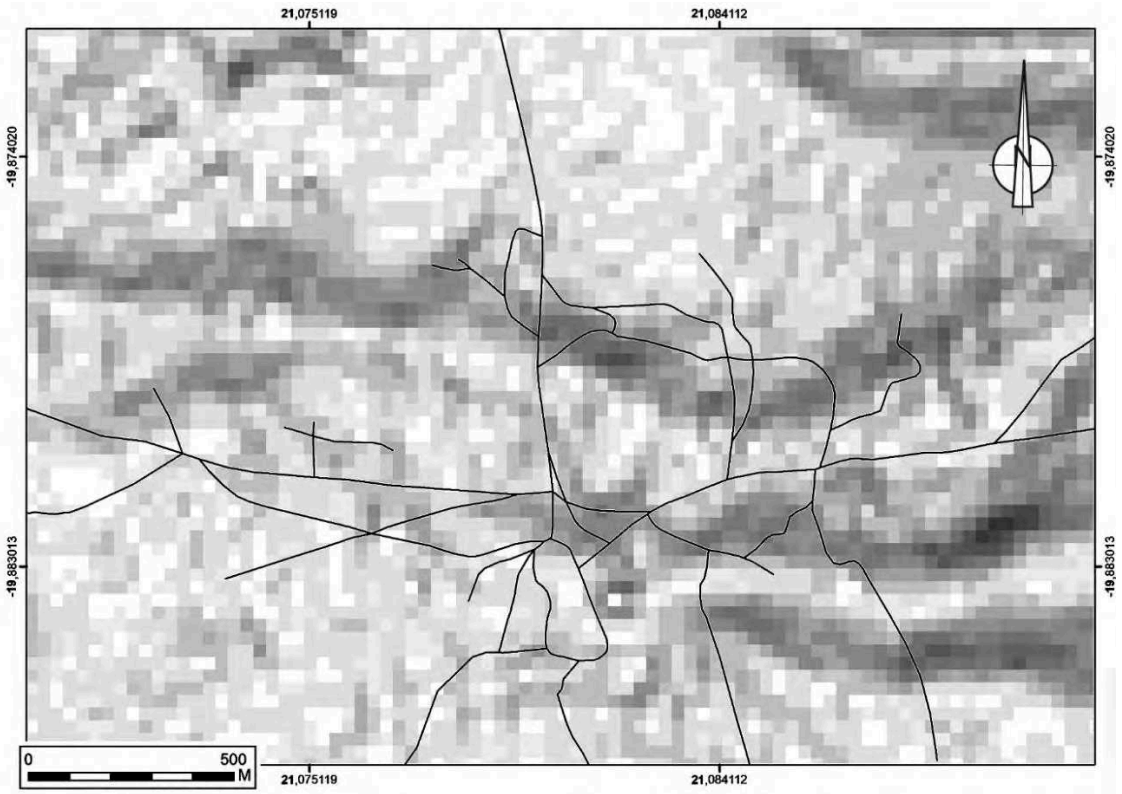


Figure 1354 Détail du modèle ombré (MNT JAXA) et de la carte des pentes du village de Xai-Xai (en noir les pistes).

12.18.1. Zoom sur la plaine du village de Xai-Xai.



Figure 1355 Image satellite de la plaine du village de Xai-Xai.

12.19. ANNEXE N°18 DU CHAPITRE N°4 : MOLLUSQUES ET CALCRETES

12.19.1. Les dépôts lacustres, les calcaires bioclastiques

Comme indiqué dans l'introduction de ce chapitre (p.473) il a existé plusieurs niveaux de paléolacs dans le Delta de l'Okavango matérialisés par des bordures de relief (*ridge*), des surfaces planes et des dépôts lacustres et côtiers.

Nous allons étudier ici les types de dépôts que nous trouvons. Nous décrirons après les types de formes que nous trouvons (p.818) et nous avons dressé la liste des paléolacs dans le Chapitre n°4.

Certains fossiles font penser à des zones marécageuses et humides près des collines de Gcwihaba comme des grenouilles (*Pyxicephalus adspersus ; Xenopus)*, un rat *(Angoni vlei rat)* et des tortues *(Pelusios sp.*) (Robbins *et al.*, 1996, p.15) et à Koanaka *Hills* des rongeurs (*Otomyinae* et *Graphiurus*) (Pickford, 1990) :

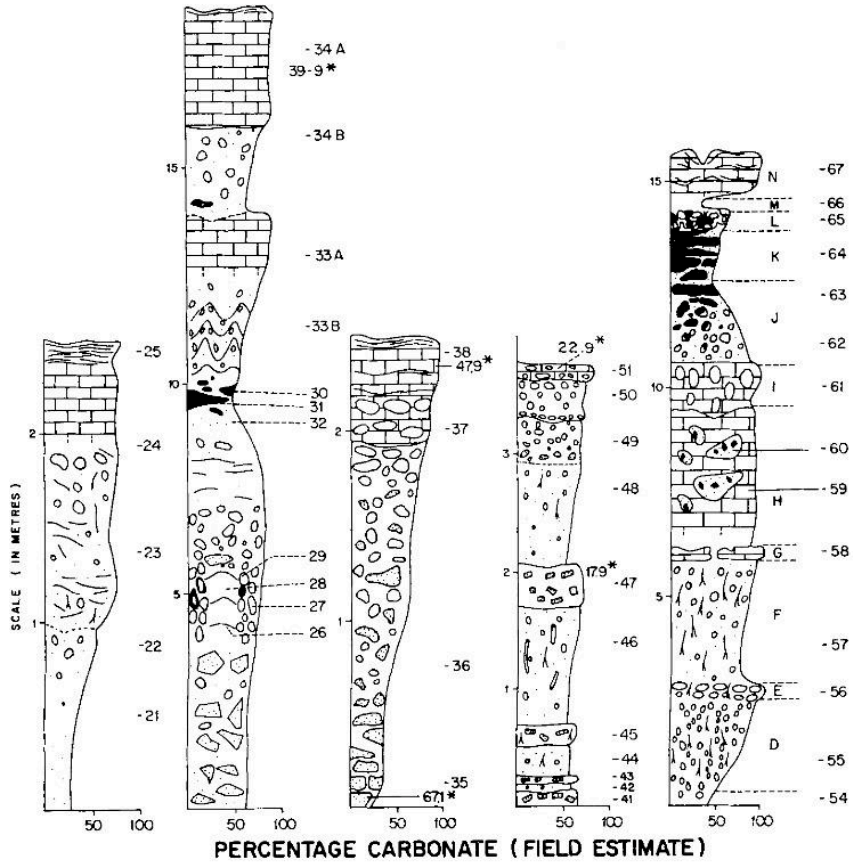
> *« Ces grenouilles ont probablement été trouvées dans la rivière du Pléistocène terminal de la vallée de Gcwihaba ou dans des bassins avoisinants » (Robbins et al., 1996, p.15).*
>
> *« Ce spécimen était soit Xenopus laevis petersii, soit Xenopus muelleri. Cette grenouille est importante car elle est très aquatique. Bien qu'elle puisse survivre dans les régions désertiques, une source d'eau constante est nécessaire(Robbins et al., 1996, p.17) ».*
>
> *« La présence d'*Otomyinae *et de* Graphiurus *suggère l'existence de zones marécageuses bordées d'arbres à proximité.» (Pickford, 1990).*

Cette année, l'identification de faunes caractéristiques de certains types d'environnement aquatique (poissons, rongeurs palmés) dans la grotte de *Bone Cave* ont validé ces environnements aquatiques près de la grotte (Linchamps *et al.*, sous presse).

On parle aussi du paléolac de Caprivi vers 15 000 et 3 000 ans BP à partir de datation 14C (non corrigé) sur des coquilles marines (**Shaw et Thomas, 1988 in** Thomas *et al.*, 2000, p.246).

12.19.2. Les calcrètes décrits par Watts (1980)

Watts a décrit des calcrètes dans la vallée de Serorome au sud-est du Botswana (Watts, 1980, Fig.1, p.664).



Les forages ont découvert des calcrètes en profondeur elles seraient quaternaires et mesurent entre 6 et15 m de puissance.

> *« Les données de forage indiquent des calcrètes composites d'au moins 3,0 m d'épaisseur, la plupart ayant plus de 6,0 m. Certains calcrètes composites épais du sud (certains ne sont pas d'origine pédogénique) peuvent être du Pliocène, mais la plupart des formes d'épaisseur intermédiaire (6-15 m) sont probablement quaternaires » (Watts, 1980).*

Les calcrètes, la formation des silcrètes et la migration des dunes soient associées aux périodes arides (Cooke, 1975 in Watt, 1980).

« La cimentation précoce de la calcite est induite par l'évaporation et/ou la perte de CO2 qui provoque la précipitation de la calcite en déséquilibre thermodynamique avec l'eau vadose. La calcite est également précipitée à partir d'eaux vadoses dans des calcrètes développés sur des lithologies hôtes riches en Mg et par remontée capillaire à partir d'eaux souterraines peu profondes dans des dépressions salines » (Watts, 1980).

« Quatre épisodes majeurs de formation de calcrètes se sont produits au cours de (1) l'époque du Pliocène et comprend le « calcaire du Kalahari » du Pliocène moyen ; (2) Acheuléen ou Pléistocène moyen ; (3) Pléistocène supérieur (ou Fauresmithien). L'âge précis de ces épisodes n'est cependant pas bien connu. Certains des calcrètes peuvent correspondre aux formes les plus anciennes de Cooke (1975), tandis que le 4e épisode de Netterberg (Pléistocène supérieur récent) semble équivalent aux deux calcrètes plus jeunes de Cooke (Watts, 1980).

12.19.2.1. Les calcrètes sur les surfaces planes entre les dunes de sables du Kalahari

Les calcrètes sont des carbonates liés à l'évaporation de l'eau. Elles sont appelées « croûtes de type caliche » par Salomon (2006, p.161).

12.19.2.2. Les silcrètes sur les surfaces planes entre les dunes de sables du Kalahari

Les calcrètes peuvent avoir été partiellement silicifiées (Cooke,1974, Fig.3).

12.19.3. Les coquilles décrites lors de la désobstruction de Wadum par Ritter et Garner (1994b)

Ritter et Garner (1994b) ont trouvé des coquilles similaires à celles décrites par Cooke et Baillieul (1974) dans les calcrètes III-IV en désobstruant l'aven de Wadum.

> *« Le sable extrait contenait une couche d'environ 10 cm d'épaisseur, à environ 5 cm sous la surface, qui contenait un grand nombre de coquilles d'escargots d'eau douce, similaires à celles décrites par* ***Cooke et Baillieul (1974)*** *(Ritter et Garner, 1994b).*

12.19.4. Les coquilles décrites à Dimapo (G2)

Une grande quantité de coquilles est aussi décrite à Dimapo (WATER SURVEYS BOTSWANA & AQUALOGIC (PTY) LTD, 2001, p.17).

12.19.5. Sur K2

A Koanaka K2 (Nqumtsa sud), Pierre Mein découvre des fossiles d'*Achatina* et de *Xerocerastus* (Pickford et Mein, 1988).

12.19.6. Les coquilles de Xerocerastus (mollusques non marins) dans les sables du Corridor de Gcwihaba datés de -26 000 ans

Dans la grotte de Gcwihaba, au niveau du *Corridor South Entrance*, les sables non indurés que nous avons fouillés et qui ont été en grande partie désobstrués en 2006-2007 montrent de très nombreuses coquilles de mollusques terrestres qui appartiennent à *Xerocerastus* (Famille *Succineidae) qui seraient « adaptées à un habitat aride »* (Van Bruggen, 1963,p.261 ; 1966, p.111) et « qui sont cantonnés aux portions les plus sèches du Kalahari » Pickford et Mein (1988). Ici, ces niveaux de sables sont recouverts par plusieurs planchers stalagmitiques.

Des Xerocerastus sont indiqués au-dessus de dépôts fluviatiles et à la base de dunes de sable dans la vallée d'Aoub (sud de Gochas) sur la côte ouest namibienne. Elles sont datées de 4480+- 290 (Heine, 1990, p.168) et au-dessus il y a du *papio ursinus*. Une coupe intéressante est dessinée. Un autre niveau avec des Xerocerastus est daté de 12765+ -475 dans la vallée de Molopo (26°S, 21°E) (Heine, 1990, p.170).

Pickford et Mein (1988) en signalent aussi au même endroit, ainsi qu'à Koanaka Sud (*Nqumtsa*).

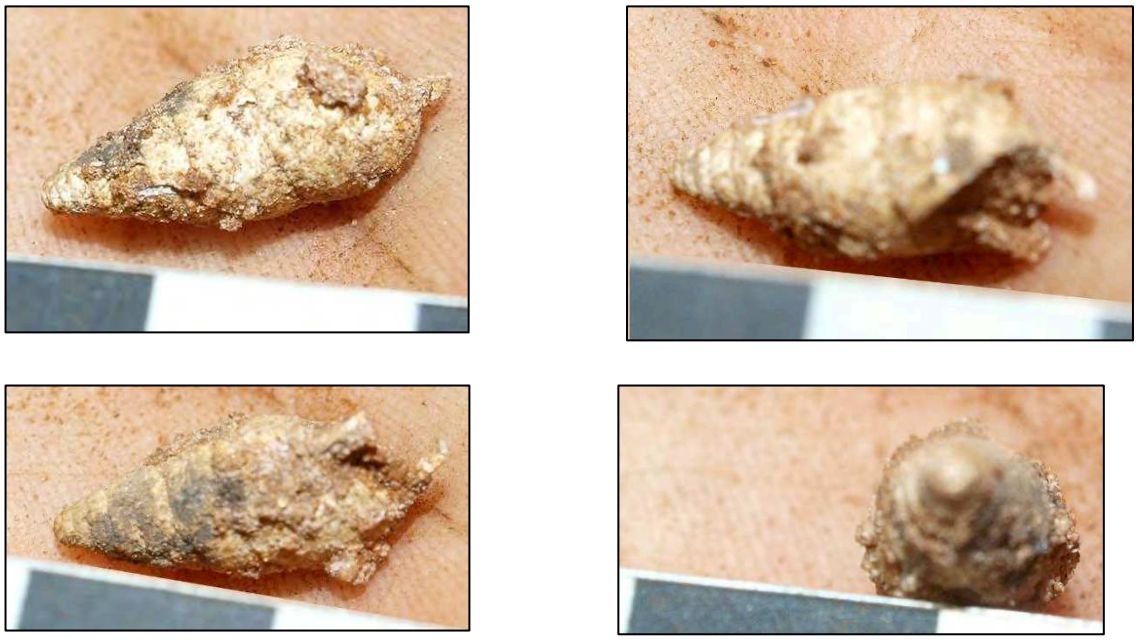


Figure 1356 Type de coquilles trouvées en abondance dans les sables du Corridor South Entrance de la grotte de Gcwihaba.

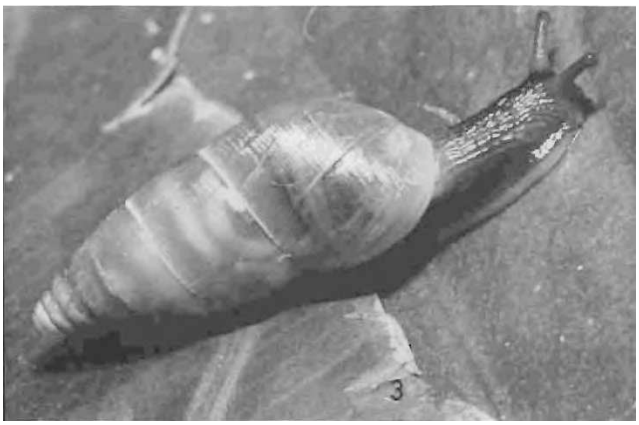


Figure 1357 Xerocerastus subteres. (Source : Laura Kelsall in *Van Bruggen (1966, Plate 10)).*

12.19.7. Comparaison avec les coquilles de Xerocerastus dans les calcrètes et les calcaires du Paléolac Etosha en Namibie

Cette espèce est aussi présente dans les anciens dépôts du lac d'Etosha (Figure 1358) (voir aussi la carte détaillé de Thomas et Shaw, 1991, Fig.5.8 p.135), dans des calcrètes et dans des carbonates, et apparait de façon ubiquiste dans la chronologie. Il est présent aussi bien à l'Holocène, qu'au Pléistocène inférieur et du Pléistocène inférieur au Pliocène supérieur)(en rouge sur la Figure 1362) (Pickford *et al.*, 2009 ; Miller, Pickford et Senut, 2010).

Thomas et Shaw (1991, p.177) citent les travaux de Rust (1984, 1985) avec des dates supérieures à 40 000 ans BP (14C) et le développement de calcrètes à :

- 33 000 à 28 000 ans BP ;
- 22 000 à 18 000 ans BP ;
- 10 500 à 9 000 ans BP.

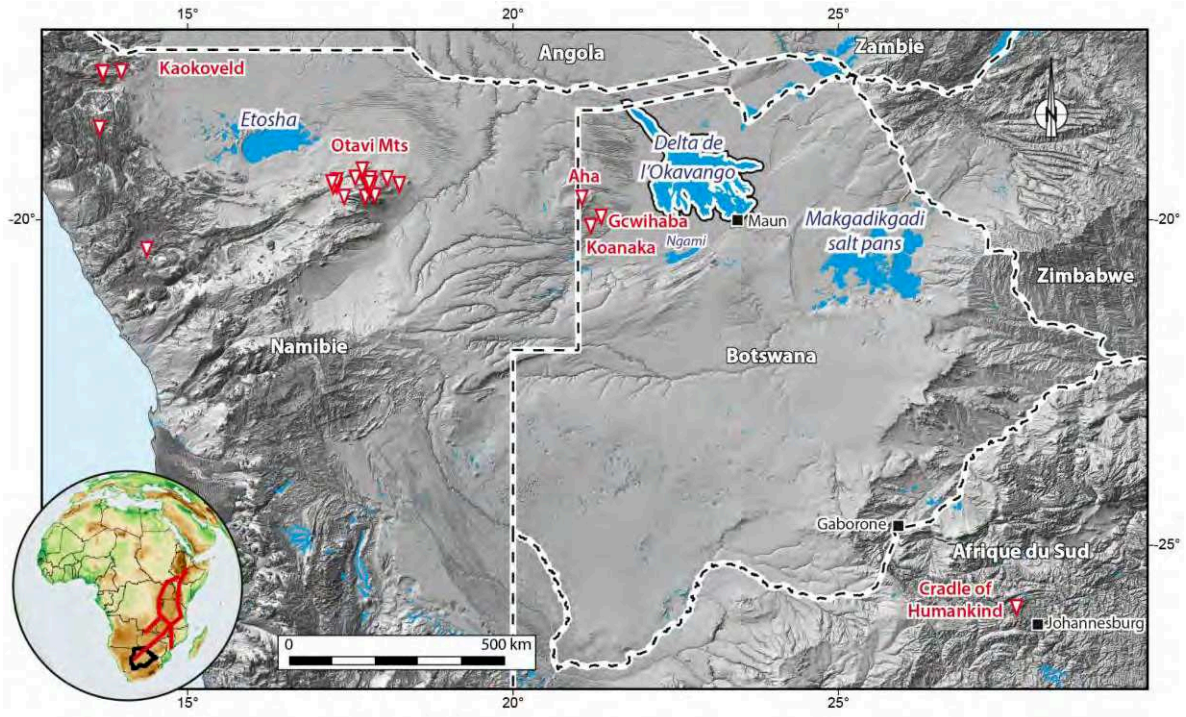


Figure 1358 Localisation du lac Etosha en Namibie par rapport à l'Okavango.

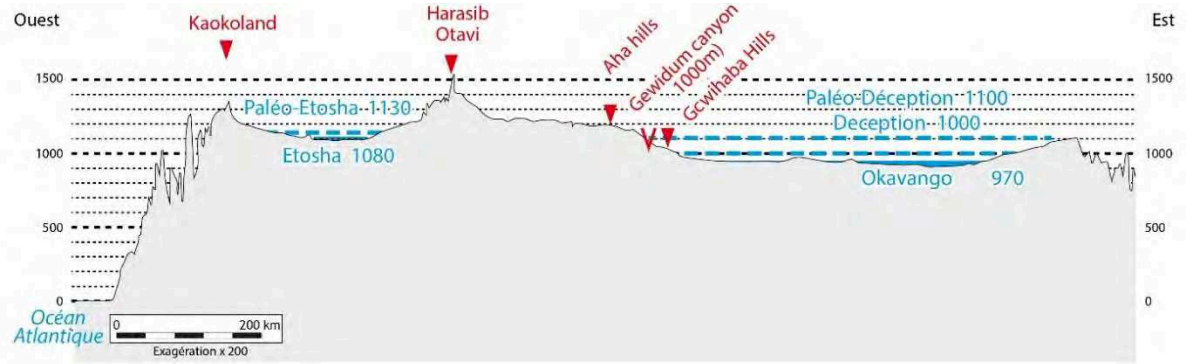


Figure 1359 Profil topographique O-E de la Namibie et du Botswana localisant les karsts de Kaokoland, d'Harasib (région d'Otavi) et de Gcwihaba Hills (Aha Hills et Koanaka Hills) et des paléoniveaux de l'Okavango.

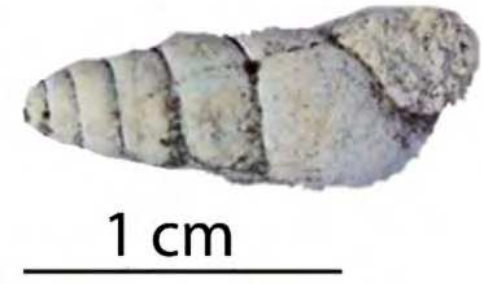


Figure 1360 Xerocerastus burchelli trouvé à Etosha en Namibie (Pickford et al., 2009, fig.39, p.131).

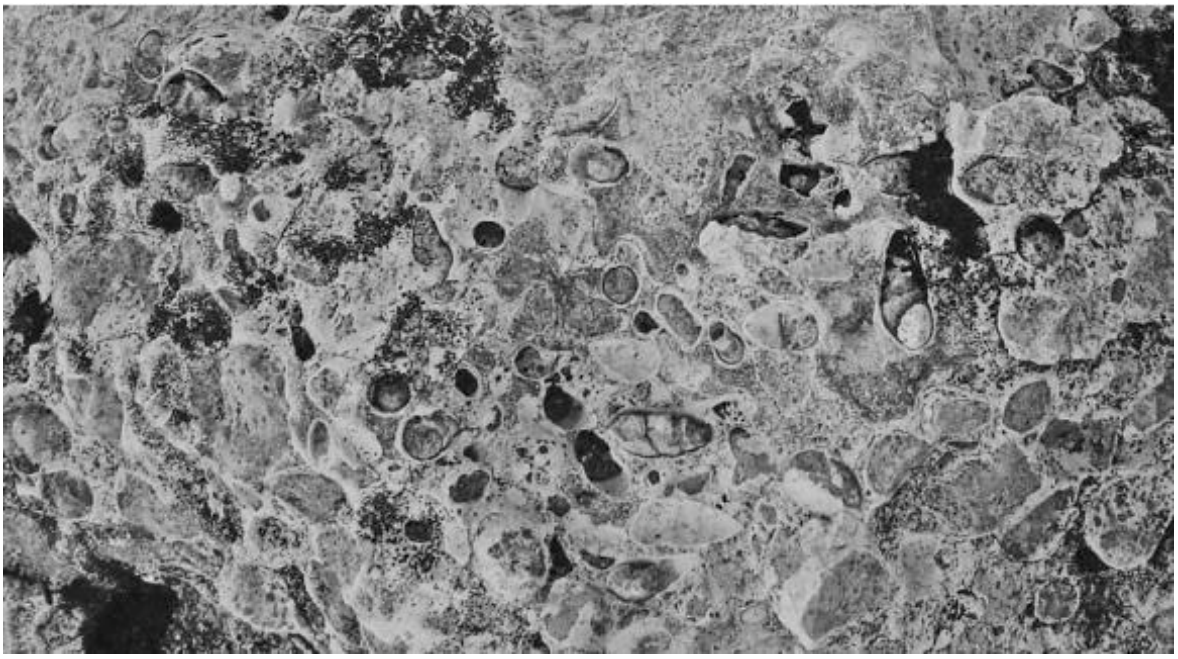


Figure 1361 Calcrète à nombreuses coquilles de Xerocerastus burchelli trouvée à Etosha en Namibie (Pickford et al., 2009, fig.41, p.133).

Note sur Xerocerastus *de Pickford et al.(2009, p.129) et ajout en gras 'après Van Bruggen (1963).*
Il existe actuellement plusieurs espèces de Xerocerastus en Namibie (Connolly, 1939). Van Bruggen (1970) a reconnu 5 espèces qui diffèrent les unes des autres par les dimensions et les proportions de la coquille :

- Xerocerastus damarensis **(Adams, 1870)** *(h/d 2,21-2,61)*
- Xerocerastus burchelli ***(Gray, 1834)*** *(h/d 2,27-2,46)*
- Xerocerastus **(Lubricetta)** subteres **(Boettger, 1910)** *(h/d 2,59-3,16)*
- Xerocerastus nitens *(h/d 2,00-2,09)*
- Xerocerastus hottentotus *(h/d 1,58-1,64)*
- Xerocerastus ovulum *(h/d 1,40-1,61).*

Le matériel de Poacher's Point est similaire en dimensions et en proportions de coquille à deux de ces espèces X. damarensis et X. burchelli, mais il semble être morphologiquement plus proche de cette dernière que de la première.

Sediment unit	Thickness	Age	Fossil content
Aeolian sands (Okondeka lunette dunes), beach deposits, fans at river mouths, salt crusts	Up to 6 metres	Holocene to Present	Extant snails, *Struthio camelus* eggshells, Mammals
Unnamed calc-tufa at Namutoni	1 metre	Holocene	Planorbidae,
Unnamed calcified marl in Homob Waterhole depression	1 metre	Holocene	*Xerocerastus*, Planorbidae
Oshigambo Pan-loess	1-1.5 metres	Latest Pleistocene	Snails, *Struthio camelus* eggshells, Mammals
Pelican Island Green Silts	3 metres	Latest Pleistocene	
Elevated beach deposits (1.5-2 m above floor of pan)	0.5 – 2 metres	Latest Pleistocene	*Hodotermes* bioconstructions, reworked oncolites, *Melanoides tuberculata*, *Bellamya unicolor*, *Mutela* sp.
Erosional unconformity	Incision of up to 20 metres	Middle to Late Pleistocene	
Etosha Limestone (fossiliferous calcrete and calcreted sands)	1-3 metres in the north, thicker in the south	Early Pleistocene	Oncolites (reworked), plant root networks, *Achatina*, *Xerocerastus*
Unnamed thin but widespread rubble horizon containing black sediment nodules (Ekuma and Oshigambo Valleys; Pelican Island)	10 cm	Early Pleistocene	Reworked fragments of fish and turtles from the Ekuma Delta Member
Poacher's Point Member (fossiliferous micro-ooid strata becoming ooliticwith Magadi-type chert on Pelican Island)	3-20 metres	Late Pliocene to Early Pleistocene	Oncolites, Ostracoda *Xerocerastus*, *Achatina*, *Succinea*, *Struthio camelus* eggshells
Ekuma Delta Member (cross-bedded clean quarztite with minor green clay)	50 cm to 2 metres	Middle Pliocene (ca 4 Ma)	*Bellamya*, *Mutela*, *Clarias*, Cyclanorbinae, *Pelusios*, *Crocodylus*, Phoenicopteridae, *Struthio daberasensis* eggshells, Mammals
Etosha Pan Clay Member (green clay and silt with quartzite stringers)	At least 3 metres (probably considerably thicker)	Late Miocene (ca 6 Ma)	Oncolites, *Clarias*, Cyclanorbinae, *Pelusios*, *Crocodylus*, *Phoenicopterus*, Mammals
Beisebvlakte Borehole (?Andoni Formation)	At ca 34 metres depth	Base of the Middle Miocene (16 Ma)	*Namornis oshanai*eggshells
Subsurface mudstones, shales	--	Mesozoic	*Palynomorphs*
Subsurface dolomites, limestones	--	Proterozoic	*Stromatolites*

Figure 1362 Tableau de Pickford et al., 2009 (Table 1 , p.20, colorisé) indiquant la position chronologique ubiquiste de Xaerocerastus (en bleu).

12.19.8. Des mollusques

Des mollusques ont été trouvés et identifiés dans cette région du Nord-Ouest du Botswana. Sur 39 espèces 23 sont terrestres et 16 sont fluviatiles.

Van Bruggen (1966, p.103) a trouvé à Koanaka et dans les Aha Hills les espèces suivantes :

- Famille Chondrinidae : Gastrocopta damaric (Ancey, 1888) ;
- Famille Pupillidae : Pupoides calaharicus (Boettger, 1886) ;
- Famille Achatinidae : Achatina damarensis (Pfeiffer, 1870)

Nous trouvons aussi de nombreuses coquilles d'Achatina récentes ainsi que d'autres gastéropodes terrestres (Gastropoda pulmonata).

12.20. ANNEXE N°20 DU CHAPITRE N°4 : PHOTOGRAPHIES D'UN ORAGE A KOANAKA HILLS



Figure 1363 Orage sur le paléopan de Koanaka (Source : Auriol P.).



Figure 1364 Orage à la colline K2 Koanaka (Source : Auriol P.).

12.21. ANNEXE N°23 DU CHAPITRE N°4 : PARES-FEUX SUR LES IMAGES SATELLITES A GCWIHABA

Ellis (2020, p.152) explique que la réalisation des pares-feux destinés à protéger la zone a été interrompue, car ils étaient mal positionnés notamment celui au sud de la colline de Gcwihaba.

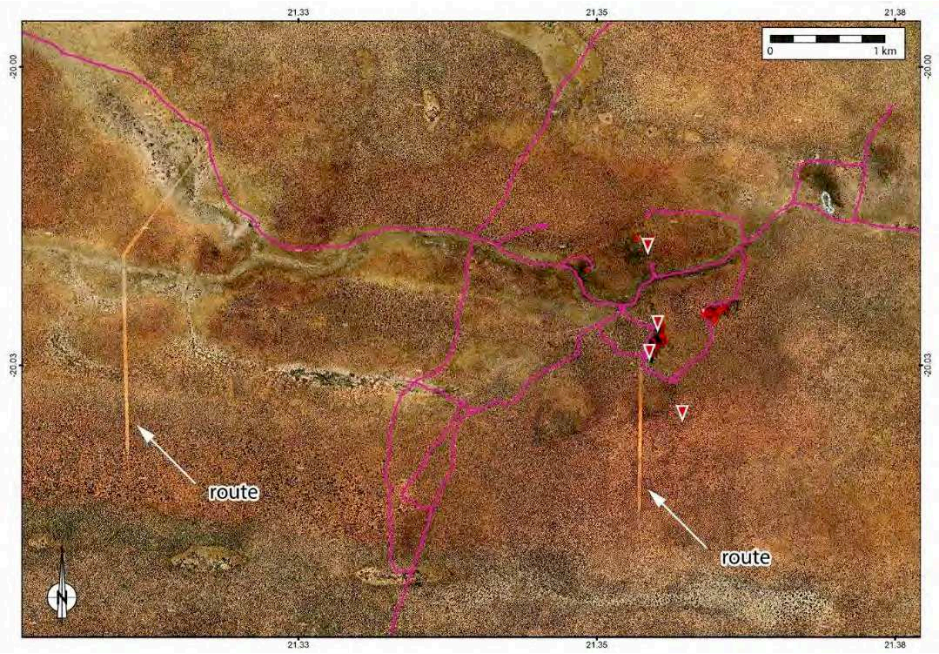


Figure 1365 Des pare-feu ont été entrepris dans la région (image satellite Yandex début 2016).

Lien vers Yandex



Figure 1366 Photographies des pares-feux (Source : Ellis, 2020, p.152).

12.22. ANNEXE N°24 DU CHAPITRE N°4 : IMAGE SATELLITE TERRA COLOR RENDANT COMPTE DES PALEODRAINAGES SUR LE HORST DE L'OKAVANGO



Figure 1367 Image satellite Terra color.

Lien Terra color

12.23. ANNEXE N°27 DU CHAPITRE N°4 : ANALYSE GEOMORPHOLOGIQUE GCWIHABA ET KOANAKA

Cette carte montre plusieurs vastes zones où il y a une absence des dunes de sable linéaire notamment entre *Gcwihaba Hills* et *Koanaka Hills*.

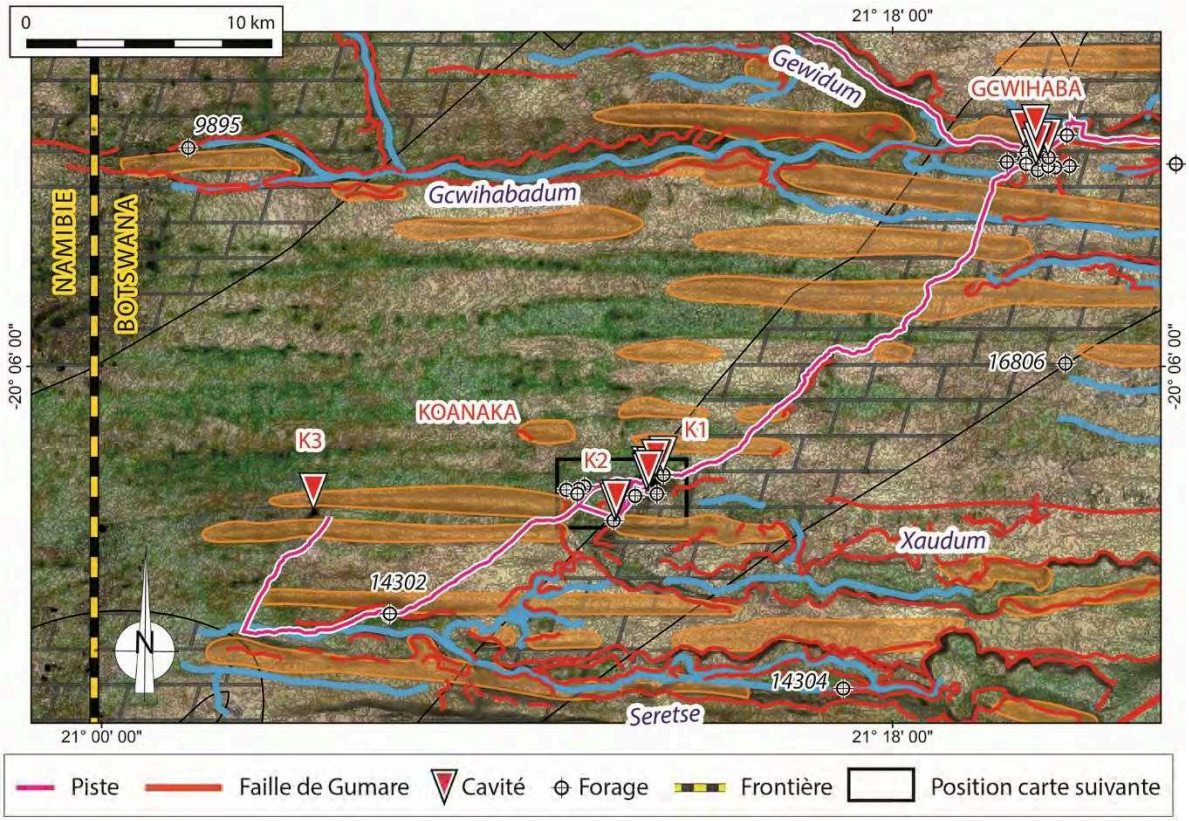


Figure 1368 Analyse géomorphologique de Gcwihaba Hills à Koanaka Hills (Voir Figure 589 p.594).

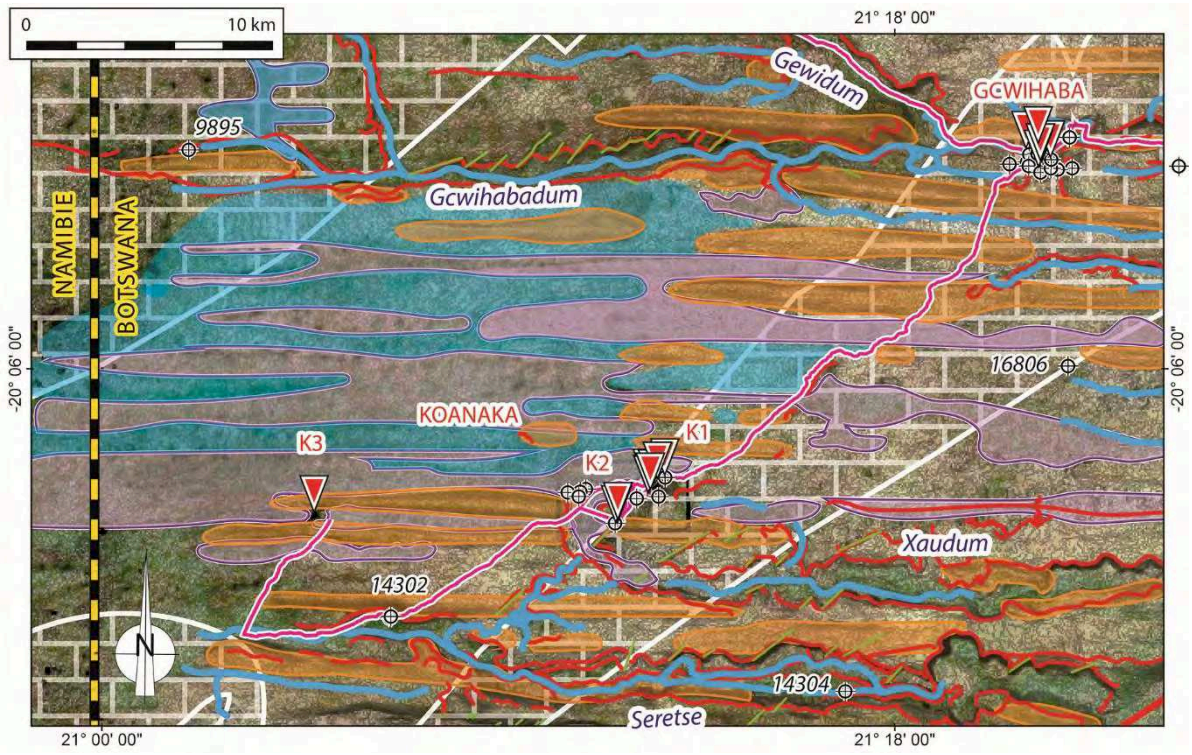


Figure 1369 Analyse géomorphologique de Gcwihaba Hills à Koanaka Hills (en bleu les secteurs où les dunes de sables ont été arasées, en violet les zones de paléopans.

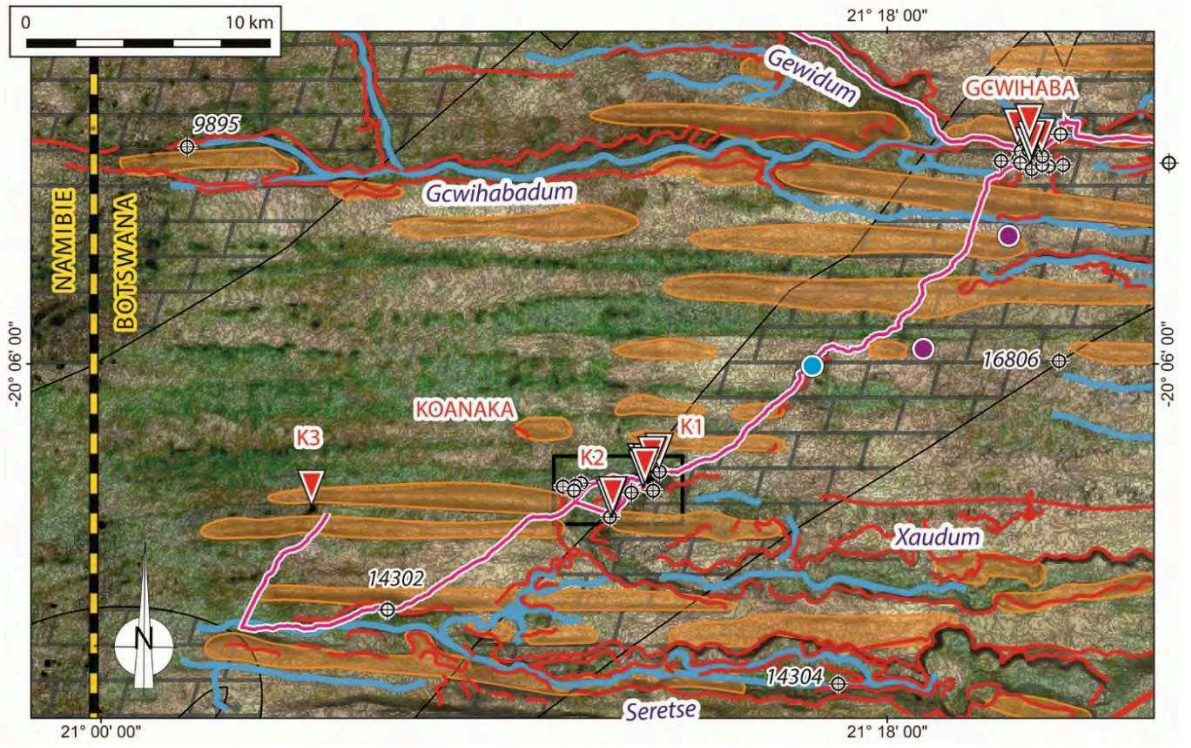


Figure 1370 Identification d'une zone où les dolomies sont en subsurfaces (point bleu) et des petites collines dolomitiques (points violet).

La carte ci-dessous (Figure 1371) montre le relevé aéromagnétique régionale de Lehman (2015).

On distingue la structure magnétique, orientée NO-SE, qui coïncide au contact géologique entre les dolomies à l'est et le Complexe de Chihabadum à l'ouest selon la carte géologique de Machacha (1997).

Le forage BHZ n°16806, à l'est, ne traverse pas cette structure magnétique. Il rencontre 3 m de sables, puis 6 mètres de calcrètes, 110 m de sables altérés et 31 mètres de sables altérés rougeâtres. (lien) (Tableau 33 p.677). Remarquons que la piste longe une dune de sables par l'ouest.

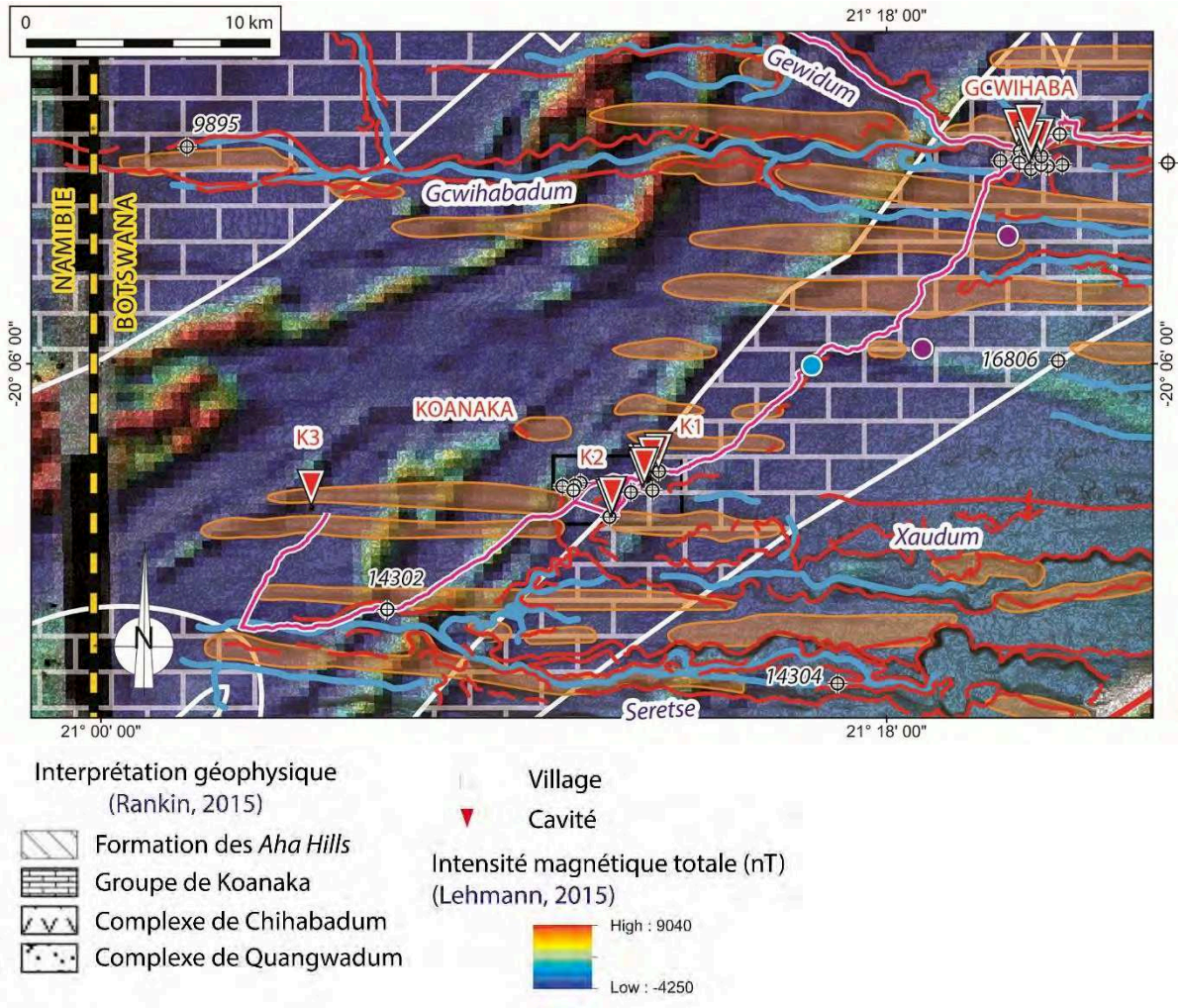


Figure 1371 Relevé aéromagnétique.

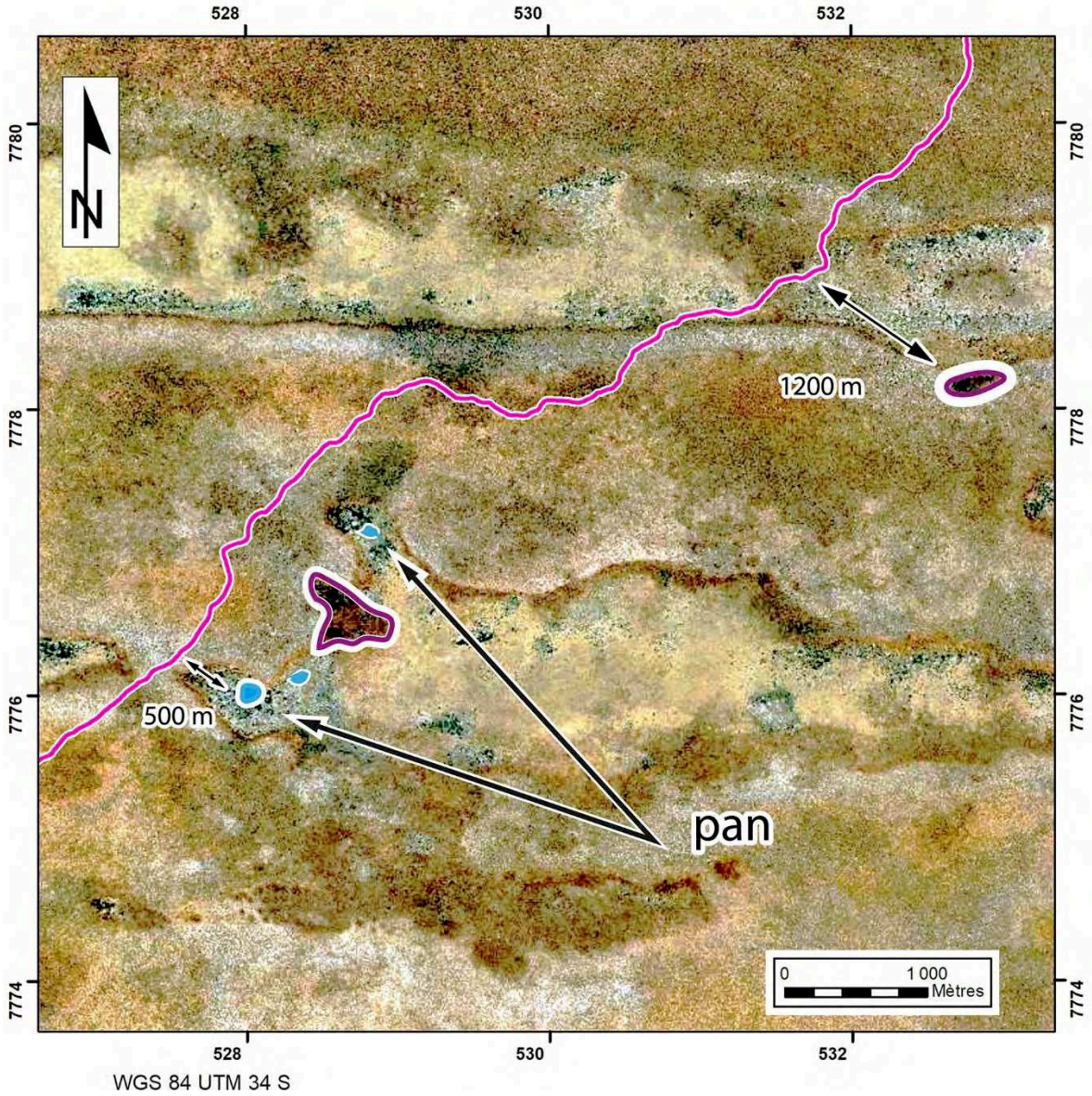


Figure 1372 Localisation des pans et des dolomies entre Gcwihaba Hills et Koanaka Hills.

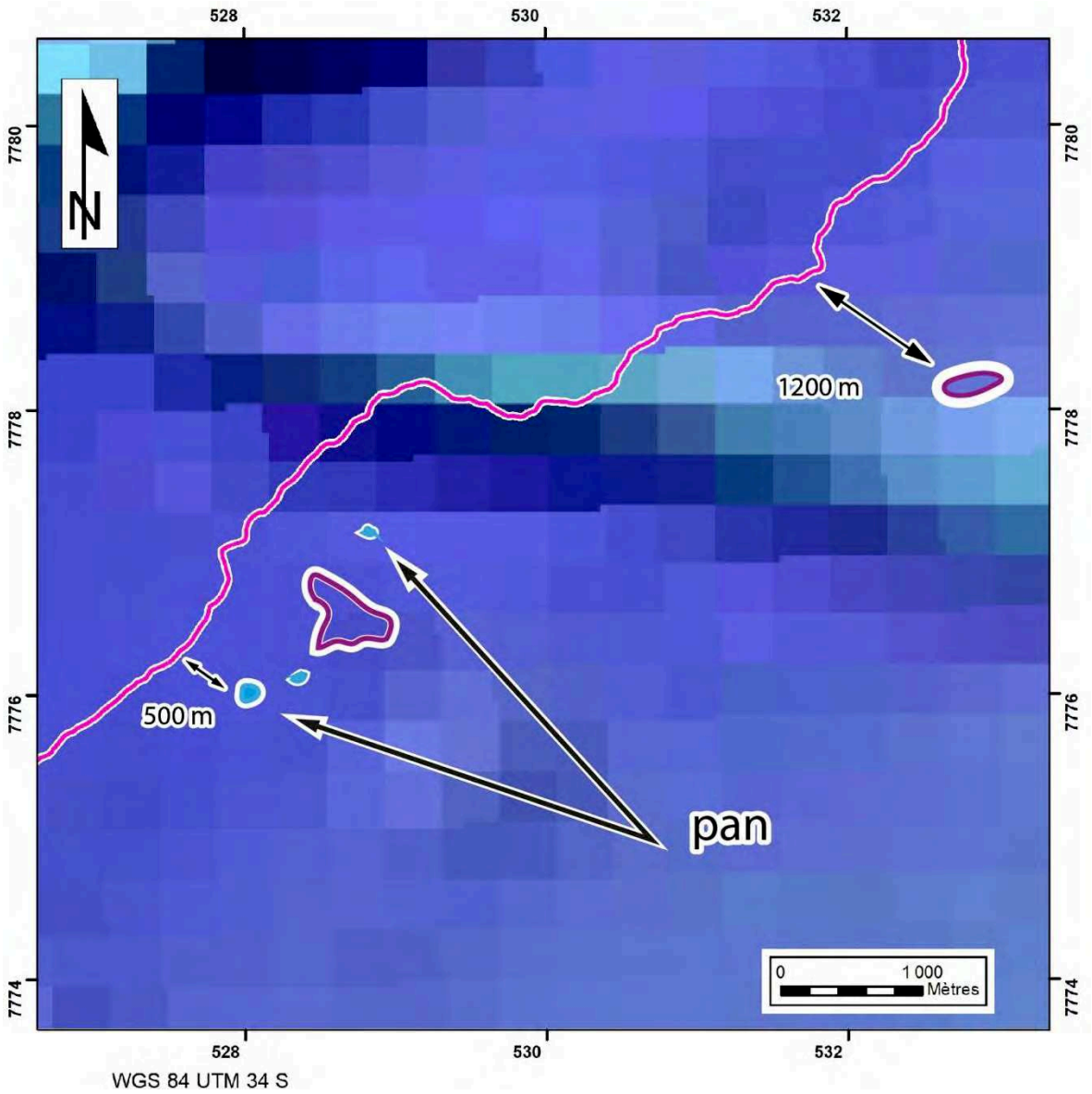


Figure 1373 Relevé aéromagnétique de Lehman.

13. ANNEXE DU CHAPITRE N°5

13.1. ANNEXE N°1 DU CHAPITRE N°5 : REPORT DES RESEAUX KARSTIQUES DE CODZO RIVER ET NINGA MIRIANGO AU MOZAMBIQUE

L'analyse des réseaux topographiques, complétée par une prospection sur le terrain par Laurent Bruxelles en 2019, ont mis en évidence une spéléogenèse par fantômisation de ces cavités du Mozambique.

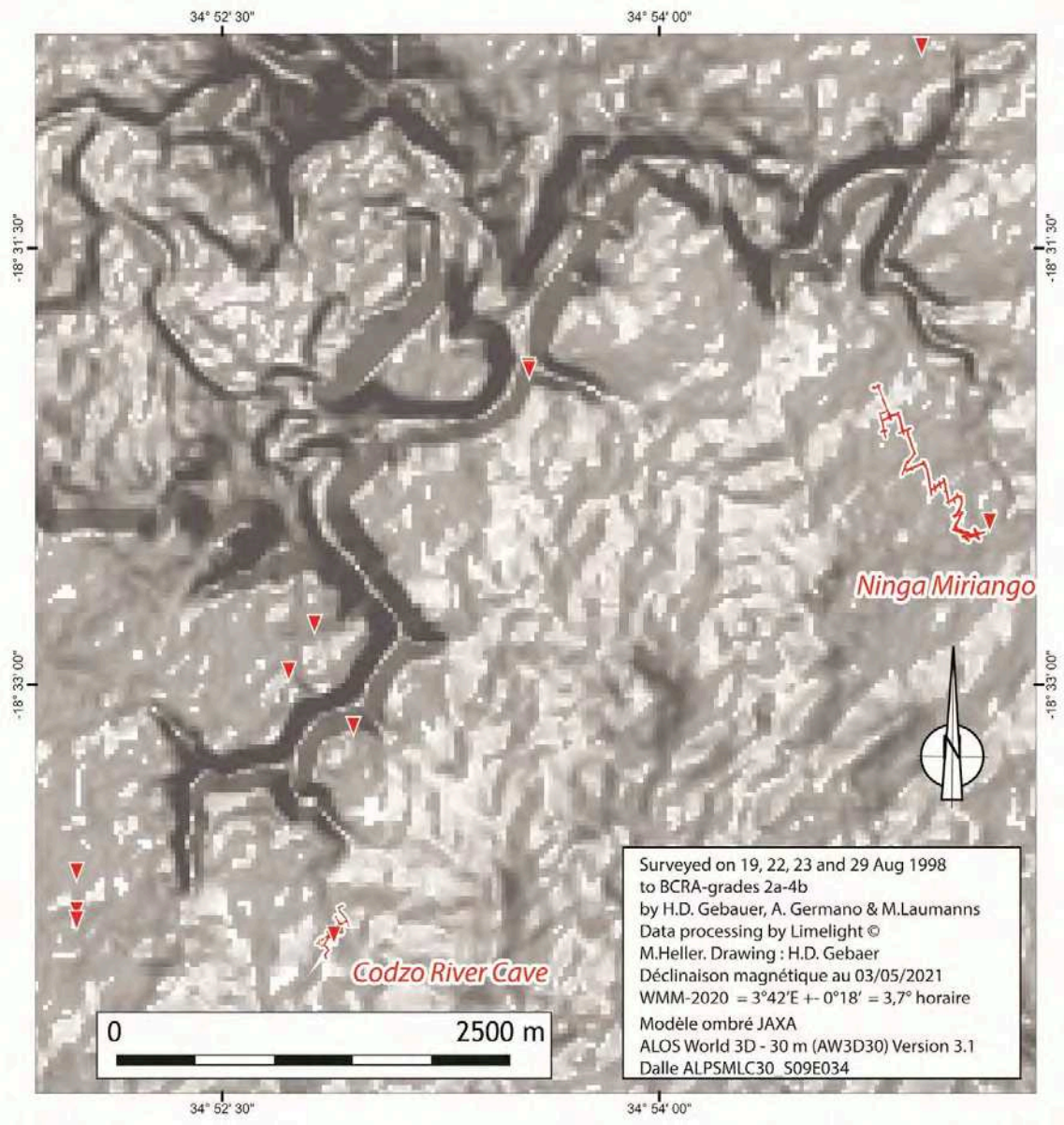


Figure 1374 Report des réseaux de Codzo River Cave et Ninga Miriango.

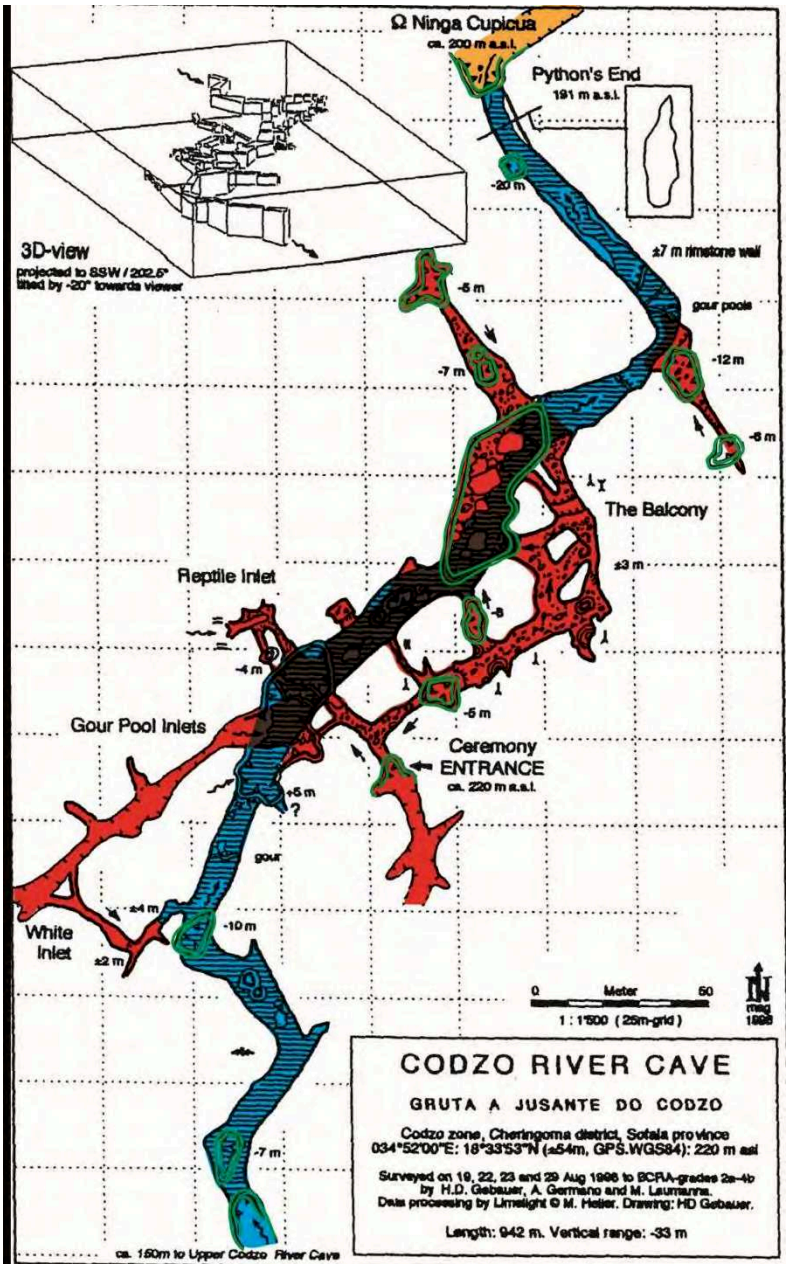


Figure 1375 Grotte de Codzo River Cave (Source : Laumanns, 2017c, p.19).

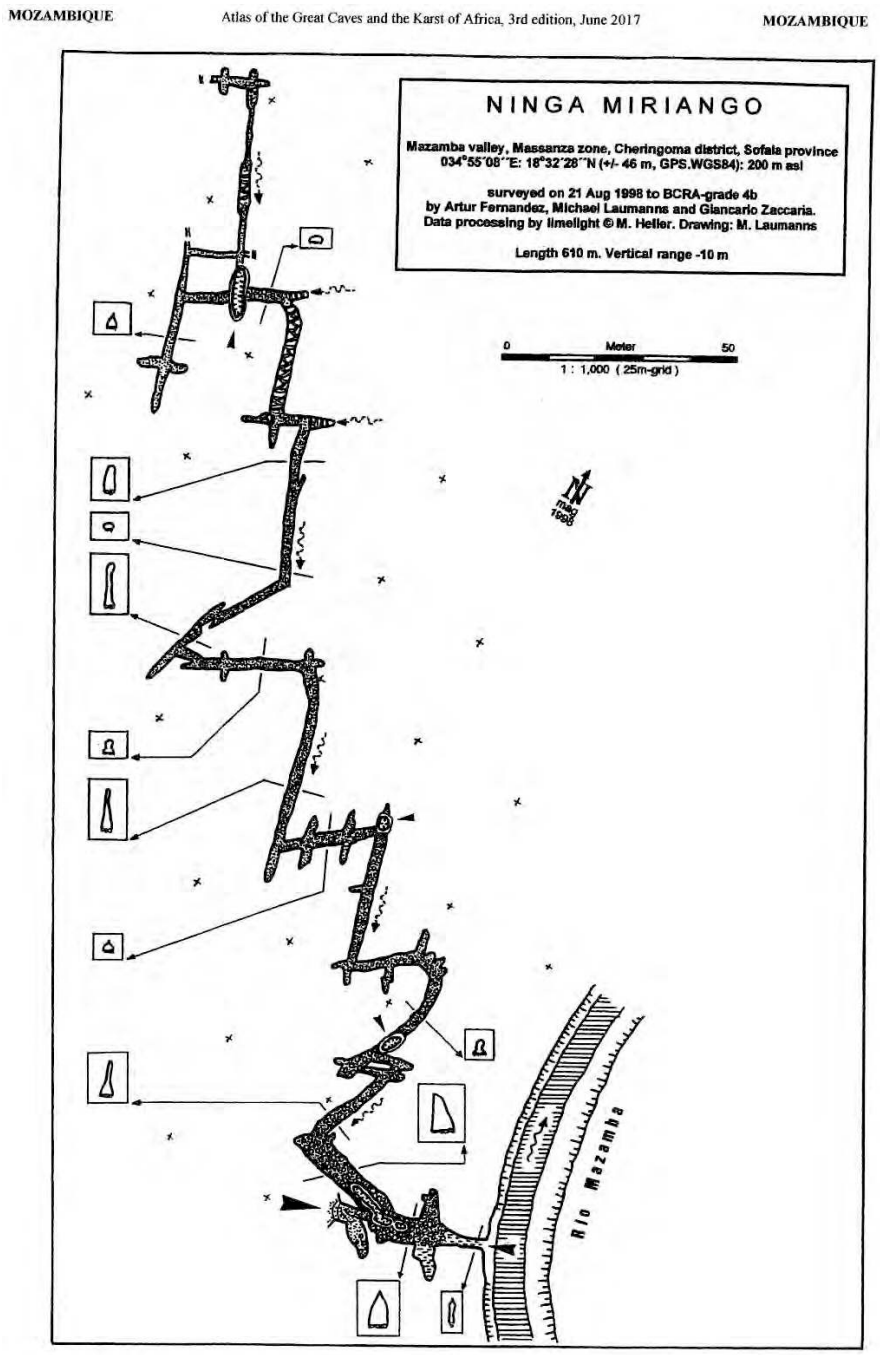


Figure 1376 Grotte de Ninga Miriango (Source : Laumanns, 2017c, p.26).

14. BIBLIOGRAPHIE

ABIYE T. A., MENGISTU H., DEMLIE M. B. (2011) Groundwater Resource in the Crystalline Rocks of the Johannesburg Area, South Africa. Journal of Water Resource and Protection, Volume 3, Pp. 199-212
http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2011.34026
https://www.scirp.org/pdf/JWARP20110400009_29807898.pdf

ACACIA (2002) Atlas of Namibia Project. Directorate of Environmental Affairs, Ministry of Environment and Tourism -SF B 389 'ACACIA', subproject E1 University of Cologne
http://www.uni-koeln.de/sfb389/e/e1/download/atlas_namibia/e1_download_physical_geography_e.htm

ADAMS J.W. (2012) A revised listing of fossil mammals from the Haasgat cave system ex situ deposits (HGD), South Africa. *Palaeontologia Electronica* Vol.15, Issue 3, 29A, 88p.
https://palaeo-electronica.org/content/pdfs/337.pdf

ADAMS J.W., HEMINGWAY J., KEGLEY A.D.T, THACKERAY J.F. (2007) Luleche, a new paleontological site in the Cradle of Humankind, North-west Province, South Africa. Journal of Human Evolution Volume 53, pp-751-754
https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2007.08.009

ADAMS J.W., HERRIES A.I.R., HEMINGWAY J., KEGLEY A.D.T, KGASI L., HOPLEY P., READE H., POTZE S. & THACKERAY J.F. (2010) Initial fossil discoveries from Hoogland, a new Pliocene primate-bearing karstic system in Gauteng Province, South Africa. Journal of Human Evolution Volume 59, pp.685-691
https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2010.07.021

ALARY T. (2017) Création d'un SIG au Coeur du "berceau de l'humanité". Rapport de stage Cycle ING2 ENSG Géomatique, IFAS. Encadrant L. Bruxelles, J.-F. Hardouin, P.-Y. Hardouin. 29 p. + 3 annexes.

ALMOND J.E. (2012) Gatkop cave on Farm Randstephane 415 KQ near Thabazimbi, Limpopo Province. 21 p.
https://sahris-bucket.s3.af-south-1.amazonaws.com/web%20folders/live%20site/media/heritage-reports/docs/2023-10/Thabazimbi%20Gatkop%20PIA%202012_3.pdf?VersionId=buV7FW_iaWD22YayAm7a7ZaApBCYj11A

ALMOND J.E. (2014) Proposed Meletse Iron Ore Project on remaining extent of the Farms Donkerpoort 448KQ and Randstephane 455KQ near Thabazimbi, Waterberg District, Limpopo Province. 43 p.
https://sahris.sahra.org.za/sites/default/files/heritagereports/PIA_Meletse_Final.pdf

ALTCHENKO Y., GENCO A., PIERCE K., WOOLF R., NIJSTEN G.-J., ANSEMS N., MAGOMBEYI M., EBRAHIM G., LAUTZE J., VILLHOLTH K.G., LEFORE N., MODISHA R. C. O., BAQA S., Mc GILL B. & KENABATHO P. (2017) Resilience in the Limpopo Basin: The potential role of the transboundary Ratoswa aquifer – Final draft. 68 p.
https://hal.science/hal-02329681/document

ALTERMANN W. (1996) Discussion on 'Zircon Pb-evaporation age determinations of the Oak Tree Formation, Chuniespoort Group, Transvaal Sequence: implications for the transvaal-Griqualand West basin correlations'. South African Journal of Geology. Volume 99(3). Pp-337-338
https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/EJC-942778d2b

ALTERMANN W. et NELSON D.R. (1998) Sedimentation rates, basin analysis and regional correlations of three Neoarchaean and Palaeoproterozoic sub-basins of the Kaapvaal craton as inferred from precise U–Pb zircon ages from volcaniclastic sediments. Sedimentary Geology 120, pp. 225-256
https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1998SedG..120..225A/doi:10.1016/S0037-0738(98)00034-7

ANDREW A.R., BAILEY B., A. (1909) The Geology of Nyasaland with a description of the fossil flora (ARBER E.A.N.), notes on the fossil non-marin Mollusca and a bilvalved crustacean (*estheriella*) by NEWTON R.B., and a description of the fish-scales of *Colobodus*, etc. by TRAQUAIR R.H. in Quaterly Journal of the Geological Society of London. Volume 66, 1910, pp-189-240
https://archive.org/download/quarterlyjourna661910geol

ANDERSON C. (2019) Par-delà le cinéma ethnographique : John Marshall et le projet Kalahari. Décadrages. 40-42Cinéma ethnographique. Dossier cinéma ethnographique. Pp. 150-225
https://doi.org/10.4000/decadrages.1453

ANHAEUSSER C.R., VILJOEN M.J. & VILJOEN R.P. (2016) Africa's Top Geological Sites. 35Th International Geological Congress Commemorative Volume. ACACIA.312 p.

ANONyme (1979) Botswana 1979. Bulletin SASA South African Spelaeological Association. Volume n°21 1979-1980. Pp.3-9

ARCHAMBAULT M., LHENAFF R. et VANNEY J.-R. (1980) Documents et Méthodes pour le commentaire de cartes. Géographie et géologie. Premier fascicule Principes Généraux. Deuxième édition, Quatrième tirage. Edition Masson, 101 p.

ATLAS OF NAMIBIA PROJECT (2002) Directorate of Environmental Affairs, Ministry of Environment and Tourism
https://www.uni-koeln.de/sfb389/e/e1/download/atlas_namibia/e1_download_physical_geography_e.htm#geology_1

AYACHE B. & CABARET O. (2022) Use of a free and open access high-resolution digital terrain model for the identification of surface karst forms. Eaux-SCARS – BRGM - Présentation Eurokarst 2022. 11p.
https://sigesaqi.brgm.fr/IMG/pdf/eurokarst_2022_traitementlidar.pdf

BABY G. (2017) Mouvements verticaux des marges passives d'Afrique australe depuis 130 Ma, étude couplée : stratigraphie de bassin – analyse des formes du relief – Thèse – Université de Rennes 1 - 371 p.33-34

BABY G., GUILLOCHEAU F., MORIN J., ROBIN C., DALL'ASTA M. (2017) Mass transfert between the south african plateau and the adjacent atlantic margin (Namibia – South Africa) since the Gondwana Break-Up. Programme Guide A workshop of the SGF, Source to Sink : A long term perspective of sediment budgets and sources characterization. 30 november/02 December 2019 – University of Rennes 1. Pp-33

BALSAN F. (1950) L'Etreinte du Kalahari. 1948 : Première expédition française au désert Rouge (Sud-ouest africain, Rhodésie, Union sud-africaine) ; par celui que l'on a appelé « le dernier des explorateurs ». Réédition 1990. Voyage jusqu'au bout. Editions Ouest-France. 303 p.

BALSAN F. (1959a). Nouvelles explorations au Kalahari. Raid à travers le centre inconnu du désert rouge. Sciences et voyage. Numéro 165. Pp.9-12

BALSAN F. (1959b). Nouvelles explorations au Kalahari. Raid à travers le centre inconnu du désert rouge. Sciences et voyage. Numéro 166. Pp.24-27

BALSAN F. (1959c). Nouvelles explorations au Kalahari. Sept jours en pirogue dans les marais de l'Okavango. Sciences et voyage. Numéro 167. Pp.27-30

BALSAN F. (1959d) Nouvelles aventures au Kalahari.

BAQA S. S. (2017) Groundwater Recharge Assessment in the Upper Limpopo River Basin: A Case Study in Ramotswa Dolomitic Aquifer. Supervisors: Dr. Karen Villholth (IWMI) Prof. Tamiru Abiye (Wits). 128 p.
https://core.ac.uk/download/pdf/188769366.pdf

BARHAM L.S., PINTO LLONA A.C. & STRINGER C.B. (2002) Bone tools from Broken Hill (Kabwe) cave, Zambia, and their evolutionary significance. Before farming. Volume 2. Number 2. 12 p.
http://doi.org/10.3828/bfarm.2002.2.3

BARNARD H.C. (2000) An Explanation of the 1 :500 000 General Hydrogeological Map Johannesburg 2526. Department of Water Affairs and Forestry. 84 p.
https://www.dws.gov.za/ghreport/reports/GH4357.pdf

BARRAL C. (2024) Géologie des réservoirs karstiques : développement d'un outil méthodologique type SIG en 3D, exemple du Larzac sud (France). Université de Montpellier. Thèse de doctorat, Sciences de la Terre, sous la direction de Séranne, Michel Camus, Hubert. 250 p.
https://theses.hal.science/tel-05058442v1

BARRAL C., SERANNE M., CAMUS H. & JOUVES J. (2024) Impact of alteration corridors on karst reservoir organisation and evolution of groundwater flow path : An example from the southern border of the Larzac Causse, southern France. BSGF. Earth Sciences Bulletin. Volume 195. Issue 4. 23 p.
https://doi.org/10.1051/bsgf/2023017

BASSON I.J. & KOEGELENBERG C. (2016) Structural Controls on fe Mineralization at Thamazimbi Mine, South Africa. Ore Geology Review. 38 p.
http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.08.022

BASSON I.J. (2019) Cumulative deformation and original geometry of the Bushveld Complex. Tectonophysics 750(2019) pp.177-202.
https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.11.004

BAILEY G.N., REYNOLDS S.C., KING G.C.P. (2011) Landscapes of human evolution : models and methods of tectonic geomorphology and the reconstruction of hominin landscapes. Journal of Human Evolution. 60-2011) Pp 257-280
https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2010.01.004

BAILLIEUL T.A. (1973) Cave exploration on Lobatse Estate. TAB/15/73. 2 p. + cartes
http://www.library.bgi.org.bw/ActiveConnect/DesktopModules/MediaDisplay.aspx?index=24416

BEAUDET A., FOURVEL J.-B. (2019) HOMME 2019 : analyses préliminaires des faunes plio-pléistocènes des régions de la Buzi River et du Cheringoma Plateau (Mozambique). 19 p.

BEGER K. (2001) Environmental Hydrogeology of Lobatse. South Eat District, Republic of Botswana. Report by the Environmental Geology Division. Dept. Of Geological Survey(DGS), Lobatse, Botswana. BGR, 45 p.

BEKKER A., KAUFMAN A.J., KARHU J.A., BEUKES N.J., SWART Q.D., COETZEE L.L., ERIKSSON K.A. (2001) Chemostratigraphy of the paleoproterozoic Duitschland formation, South Africa: Implications for coupled climate change and carbon cycling. American Journal of Science. Volume 301, Pp.261-285
https://doi.org/10.2475/ajs.301.3.261

BERGER L.R., LACRUZ R. (2003) Preliminary report on the first excavations at the new fossil site
of Motsetse, Gauteng, South Africa. S. Afr. J. Sci. 99, 279 – 282.
https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/EJC97627

BERGER L.R., De RUITER D.J., CHURCHILL S.E., SCHMID P., CARLSON K.J., DIRKS P.H.G.M. & KIBII J.M. (2010) Australopithecus sediba: A New Species of Homo-Like Australopith from South Africa. Science. Volume 328, Issue 5975, pp.195-204
https://doi.org/10.1126/science.1184944

BERGER L.R., HAWKS J., De RUITER D.J., CHURCHILL S.E., SCHMID P., DELEZENE L.K., KIVELL T.L., GARVIN H.M., WILLIAMS S.A., De SILVA J.M., SKINNER M.M., MUSIBA C.M., CAMERON N., HOLLIDAY T.W., HARCOURT-SMITH W., ACKERMANN R.R., BASTIR M., BOGIN B., ETC. (2015) Homo naledi, a new species of the genus Homo from the Dinaledi Chamber, south Africa
https://dx.doi.org/10.7554/eLife.09560

BERGER L.R., HAWKS J., DIRKS P. HGM, ELLIOTT M., ROBERTS E.M. (2017) Homo naledi and Pleistocene hominin evolution in subequatorial Africa, 19p.
https://doi.org/10.7554/eLife.24234

BERGER, L.R., BRINK, J. (2007) An Atlas of southern African Mammalian Fossil Bearing Sites - Late Miocene to Late Pleistocene. Chapter 6: The Sites Dolomitic and Other Cave Deposits: South Africa. 64 p.
https://profleeberger.com/files/An_Atlas_of_southern_African_Fossil_Bearing_Sites.pdf

BERNA F., GOLDBERG P., KOLSKA HORWITZ L., BRINK J., HOLT S., BAMFROD M. & CHAZAN M. (2012) Microstratigraphic evidence of in situ fire in the Acheulean strata of Wonderwerk Cave, Northern Cape province, South Africa. PNAS. Proceedings of the National Academy of Sciences. 6 p.
https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.1117620109

BENNETT T. (2011) Middle Stone Age Lithic Technology at Mvumu, Niassa, Mozambique. A thesis submitted to the faculty of graduate studies in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of arts Department of Archaeology. Calgary. Alberta. 217 p.
http://hdl.handle.net/1880/105294
https://prism.ucalgary.ca. doi:10.11575/PRISM/4293

BENT R.A.R. (1954) Drotsky's caves, Xihabedum, Ngamiland, further discoveries 5th 6th August,1954. 5p. + 1 Map
http://www.library.bgi.org.bw/ActiveConnect/DesktopModules/ViewDocument.aspx?ContentIndex=303

BETZLER C., RING U. (1995) Sedimentology of the Malawi Rift: Facies and stratigraphy of the Chiwondo Beds, northern Malawi. Journal of Human Evolution, Volume 28, pp.23-35
https://doi.org/10.1006/jhev.1995.1004

BEUKES N.J. (1983) Palaeoenvironmental Setting of Iron-Formations in the Depositional Basin of the Transvaal supergroup, South Africa. Chapitre 4. Iron-Formation Facts and Problems, pp.131-209
https://doi.org/10.1016/S0166-2635(08)70043-4

BEUKES N.J., Van NIEKERK H.S. & GUTZMER J. (1999) Post Gondwana African land surfaces and pedogenetic ferromanganese deposits on the Witwatersrand at the West Wits Gold Mine, South Africa, South African Journal of Geology. S. Afr.J. Geol, 1999, 102(1), Pp 65-82.
https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/EJC-94d379bf3

BEUKES N.J., SWINDELL E.P.W., WABO H. (2016) Manganese Deposits of Africa, Episodes Vol.39, no.2 – International Union of Geolocical Sciences
https://doi.org/10.18814/epiiugs/2016/v39i2/95779
https://www.episodes.org/journal/view.html?doi=10.18814/epiiugs/2016/v39i2/95779

BGI (Botswana Geoscience Institute) (1997) Pre-Kalahari geology, lithology, dolerite dykes and faults, of Botswana
https://geos.bgi.org.bw/GDP/Search

BGI (Botswana Geoscience Institute) (2022) BGI Data and Information Catalogue revised April 2022. 31 p.
https://www.bgi.org.bw/sites/default/files/GEOSCIENCE%20DATA%20CATALOGUE%202022%20Rev%201.pdf

BISHOP J.M., AUST P. & COTTERILL F.P.D., LESLIE A.J. & RYAN C.O. (2008) Colonizing a desert wetland : Population history of the Nile crocodile in south-central Africa represents a biotic signature from an ancient palaeo-lake. Poster. South African Journal of Botany. Volume 74. Issue 2. Pp.362-362
http://doi.org/10.1016/j.sajb.2008.01.035
https://eseb.org/wp-content/uploads/2018/08/2007_Program_Abstracts.pdf

BLOOMFIELD K. (1965) The Geology of the Zomba Area. Geological Survey Departement. Bulletin Number 16. 193 p.
https://resources.bgs.ac.uk/sadcreports/malawi1965bloomfieldgeologyofzomba.pdf

BOSHOFF P. (1990) Bulletin of the south African speleological association (1990) Volume 31, Pp.60-64

BOSHOFF P. (2019) Case studies of speleogenesis in the Cradle of Humankind Unesco World heritage site and the west rand expanse, South Africa: Tectonic controls and their palaeoproterozoic components. Dissertation submitted in fulfillment of the requirements for the degree masgister scientiae in Geology in the faculty of science at the University of Johannesburg. Supervisor: Prof. J.D. Kramers. Co-Supervisor: Dr. H.S. van Niekerk, 225 p.

BOSSE H.-R., GWOSDZ W., LORENZ W., MARKWICH H., ROTH W. & WOLFF F. (1996) Limestone and Dolomite Resources of Africa. Geologisches Jahrbuch Reihe D. Mineralogie, Petrographie, Geochemie, Lagerstättenkunde. Heft 102. 532 p. + Annexes

BOUNATIROU S., STORRY R., VIALLON J.-P., PIGNEROL F., DEMONCEAUX T., GUILLOUX A. & BERGERE A. (2009) Projet Gautrain

en Afrique du Sud. TRAVAUX. La revue technique des Travaux Publics. N°858. Février 2009. Pp-55 à 69
https://www.fntp.fr/sites/default/files/content/publication/858_projet_gautrain.pdf

BOND G. (1952) Evidence of Glaciation in the Lower Part of the Karoo System in Southern Rhodesia Trans. Geol. Soc.S. Afr.15, 1-11

BOND G. (1970) The dwyka Series in Rhodesia. Proceedings of the Geologists' Association Vol.81 Issue 3, 1970, pp-463-472
https://doi.org/10.1016/S0016-7878(70)80007-4

BOURDET J. (2025) Le mystère des mini-dunes élucidé. CNRS le Journal. 4p.
https://lejournal.cnrs.fr/articles/le-mystere-des-mini-dunes-elucide

BOURGEAT F. et PETIT M. (1966) Les « Stone-lines » et les terrasses alluviales des Hautes Terres malgaches ». Cahiers de l'ORSTOM. Vol. IV, fascicule 2. Pp 3-19
https://resources.bgs.ac.uk/sadcreports/madagascar1965bourgeatandpetitstonelines.pdf

BOULE M. (1923) Les hommes fossiles. Eléments de paléontologie humaine. Deuxième édition. Masson. 505 p.

BOUYSSE P.(2014) Notes explicatives de la carte géologique du monde 3e édition révisée à l'échelle des 1:35 000 000, Commission de la Carte Géologique du Monde CCGM/CGMW ISBN 978-2-917310-24-3, 16 p.

BOUYSSE P. et coll. (2014) Geological Map of World at 1 :35M (revised issue, 3rd edition), CCGM-CGMW 2014
https://ccgm.org/

BRAGA J., THACKERAY J.F., BRUXELLES L., DUMONCEL J., FOURVEL J.-B. (2017) Stretching the time span of hominin evolution at Kromdraai (Gauteng, South Africa): Recent discoveries. Comptes Rendus Palevol, Volume 16, Issue I, pp. 58-70
https://doi.org/10.1016/j.crpv.2016.03.003

BRAGA J., THACKERAY J.R., ZIPFEL B. (2022) The Kromdraai early hominin-bearing site. A review of recent findings. Le site à homininés anciens de Kromdraai. Une synthèse des découvertes récentes. L'anthropologie Volume 126. 14 p.
https://doi.org/10.1016/j.anthro.2022.103054

BRAGA J. & MOGGI-CECCHI J. (2025) Infant craniofacial diversity in Early Pleistocene Homo. Nature communications, 16, 4796. 17 p.
https://doi.org/10.1038/s41467-025-59734-x

BRAUN J, GUILLOCHEAU F., ROBIN C., BABY G., JELSMA H. (2014) Rapid erosion of the Southern African Plateau as it climbs over a mantle superswell Journal of Geophysical Resaerch : Solid Earth. Pp.6093-6112
https://doi.org/10.1002/2014JB010998

BRAUN K., NEHME C., PICKERING R., ROGERSON M. & SCROXTON N. (2019) a windwos into Africa's past hydroclimates : the SISAL_V1 database contribution. Quaternary 2019. Volume 2. Issue 1. 33 p.
https://doi.org/10.3390/quat2010004
https://hdl.handle.net/20.500.14394/29891

BRGM (1985): Siting of boreholes for Ramotswa. wellfield extension. Draft Final Report by the "Bureau de Recherches Geologiques et Minieres" (BRGM), Borehole location and hydrological investigations.

BRINK A.B.A. & PARTRIDGE T.C. (1965) Transvaal Karst, South African Geographical Journal, 47:1, Pp.11-34.
http://www.tandfonline.com/action/showCitFormats?doi=10.1080/03736245.1965.10559398
https://doi.org/10.1080/03736245.1965.10559398

BROCK A., MC FADDEN P.L., PARTRIDGE T.C. (1977) Preliminary palaeomagnetic results from Makapansgat and Swartkrans. Nature. Volume 266. Pp 249-250
https://doi.org/10.1038/266249a0

BROMAGE T.G., SCHRENK F. et ZONNEVELD F.W. (1995) Paleoanthropology of the Malawi Rift : An early hominid mandibule from the Chiwondo Beds, northern Malawi. Journal of Evolution. Volume 28. Pp.71-108
https://doi.org/10.1006/jhev.1995.1007

BROOK G. A., BURNEY D.A., COWART J.B. (1990) Desert paleoenvironmental data from cave speleothems with examples from the Chihuahuan, Somali-Chalbi, and Kalahari deserts. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaecology. Volume 76, Issues 3-4. Pp-331-329
https://doi.org/10.1016/0031-0182(90)90118-Q

BROOKS A. S. & YELLEN J. E. (1977) Archaeological Excavations at ≠Gi : A Preliminary Report on the First Two Field Seasons. Botswana Notes and Records, Volume 9, Pp.21-30

https://www.jstor.org/stable/40979503

BROOK M.C. (2012) The Journey of Botswana's diamonds. DTC Botswana. 68p. https://minedocs.com/20/DTC_Botswana_Global_Publications_Journey_Botswanas_Diamonds.pdf

BROOM R. (1936) A New Fossil Anthropoid Skull from South Africa. Nature, Volume 138, pp.486-488
http://dx.doi.org/10.1038/138486a0

BROOM R. et ROBINSON J.T. (1949) Another new Type of Fossil-Man. Nature. Volume 164, p.322-323
https://doi.org/10.1038/164322a0

BROPHY, J.K. (2004) Preliminary Report on the Faunal Remains and Taphonomic Analysis of Plover's Lake Cave, Cradle of Humankind, South Africa, Ph.D. thesis, University of Tennessee, Knoxville. 84 p.
https://trace.tennessee.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=6267&context=utk_gradthes

BROUGHTON D.W. (2014) Geology and ore deposits of the central african copperbelt. A thesis submitted to the Faculty and the Board of Trustees of the Colorado School of Mines in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Geology). 174 p.
https://repository.mines.edu/bitstream/handle/11124/251/Broughton_mines_0052E_10371.pdf?sequence=1&isAllowed=y

BROWN F. H., MC DOUGALL I., GATHOGO P.N. (2013) Age Ranges of Ausrtalopithecus Species, Kenya, Ethiopia and Tanzania, pp.7-20 https://doi.org/10.1007/978-94-007-5919-0_2 *in* Chapitre 2 in Reed K.E ; FLEAGLE J.G. & LEAKEY R.E. (eds.) (2003) The Paleobiology of Australopithecus, Vertebrate Paleobiology and Paleoanthropology, Springer
https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-5919-0

BRUCHS J.M. *(2008) Final relinquishment report. A review of exploration results from Gcwihaba resources. Base Metal Project Prospecting licences: PL117/2005, PL120/2005. 41 p.*
http://www.library.bgi.org.bw/ActiveConnect/DesktopModules/ViewDocument.aspx?ContentIndex=683

BRUNET M., BEAUVILLAIN A., COPPENS Y., HEINTZ E., MOUTAYE A. H. E. & PLIBEAM D. (1995) The first australopithecine 2500 kilometres west of the Rift Valley (Chad). Nature. 378. Pp.273-275
https://doi.org/10.1038/378273a0

BRUNET M. (2009) Cours : Les Hominidés anciens… une nouvelle histoire à la lumière des découvertes récentes. Partie III : Évolution, paléobiogéographie, paléoécologie et paléoenvironnements des Hominidés anciens. Pp.447-471 https://www.college-de-france.fr/media/michel-brunet/UPL60075_Brunet.pdf https://doi.org/10.4000/annuaire-cdf.1482

BRUNET M., BEAUVILLAIN A., COPPENS Y., HEINTZ E., MOUTAYE A. H. E. & PLIBEAM D. (1996) Australopithecus bahrelghazali, une nouvelle espèce d'Hominidé ancien de la région de Koro Toro (Tchad). Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Série II. Tome 322., n°10. Fascicule a. Pp.907-913 https://www.academia.edu/94647305/Australopithecus_bahrelghazali_une_nouvelle_esp%C3%A8ce_dHominid%C3%A9_ancien_de_la_r%C3%A9gion_de_Koro_Toro_Tchad_?source=swp_share https://drive.google.com/file/d/1QrmO_CDvvanlFjtFV7fDw7zb84u_il59/view?usp=sharing

BRUXELLES L., BRAGA J., DURANTHON F. THACKERAY F. (2009) New researches in a famous karst area: the Cradle of Humankind (Gauteng, South Africa), ICS Proceedings Archeology and Paleontology 64 15 th International Congress of Speleology 64-68

BRUXELLES L et CAMUS H. (2014) Grotte de Lascaux. Forme et formations superficielles de surface et sub-surface (Montignac, Dordogne). Rapport d'étude, ministère de la Culture, 99p. + 8 annexes.

BRUXELLES L., MAIRE R., BEAUDET A., COUZENS R., DURANTHON F., FOURVEL J.-B., STRATFORD D., THACKERAY F., BRAGA J. (2018) The revised stratigraphy of the hominin-bearing site of Kromdraai (Gauteng, South Africa) and associated perspectives. Journal of Human Evolution, Volume 114, pp.1-19 https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2017.09.005 in BRAGA J., THACKERAY F. (2016) Kromdraai, A Birthplace of Paranthropus in the Cradle of Humankind. A South African Heritage Site. Edition SUN PRESS. 91 p. Chapter 3, pp.31-48 https://play.google.com/books/reader?id=0Oy9DwAAQBAJ&pg=GBS.PR7&hl=fr https://doi.org/10.18820/9781928355076

BRUXELLES L. & BRUXELLES S. (2002) La chasse aux fantômes dans les Grands Causses : utilisation d'un nouveau concept de spéléogenèse dans la recherche de cavités. Spelunca 88, 14-20.

BRUXELLES L., SIMON-COINCON R., GUENDON J.-L. et AMBERT P. (2007a) Formes et formations superficielles de la partie ouest du Causse de Sauveterre. Karstologia n°49, Pp.1-14.
https://doi.org/10.3406/karst.2007.2595

BRUXELLES L., BRAGA J., DURANTHON F., THACKERAY F. (2009b) New researches in a famous karst area : the Cradle of Humankind (Gauteng, South Africa), ICS Proceedings Archeology and Paleontology 64 15 the International Congress of Speleology 64-68

BRUXELLES L., CLARKE, R.J., MAIRE, R., ORTEGA, R., STRATFORD, D. (2014) Stratigraphic analysis of the Sterkfontein StW 573 Australopithecus skeleton and implications for its age. Journal of Human Evolution 70, pp. 36–48.

BRUXELLES L., SUBSOL G., MORENO B., JESSEL J.-P., BRAGA J., THACKERAY F, CLARKE R. J. (2014) Numérisation in situ du squelette d'Australopithèque Little Foot à Sterkfontein, Afrique du Sud. Karstologia n°64, pp. 1-6

BRUXELLES L., LANS B., NGOLOYI N. (2015) Human Origin in Namibia. A la recherche des origines de l'Homme en Namibie. Rapport préliminaire. Ministère de l'Europe et des Affaires Etrangères. Commission consultative des recherches archéologiques à l'étranger. Rapport préliminaire. 36 p.
https://hal.science/hal-03100631

BRUXELLES L., DANDURAND G., JARRY M., LANS B., NGOLOYI N., DURANTHON F. (2016) Human Origin in Namibia. A la recherche des origines de l'Homme en Namibie. Ministère de l'Europe et des Affaires Etrangères. Commission consultative des recherches archéologiques à l'étranger. Rapport de seconde année. 111 p.
https://hal.science/hal-03100617

BRUXELLES L. (2017) Des fantômes et des hommes Le rôle de la fantômisation dans la formation des karsts à hominidés d'Afrique du Sud Karstologia n°69 – 1-8

BRUXELLES L., DANDURAND G., JARRY M., LANS B., NGOLOYI N., DURANTHON F. (2017) Human Origin in Namibia. A la recherche des origines de l'Homme en Namibie. Ministère de l'Europe et des Affaires Etrangères. Commission consultative des recherches archéologiques à l'étranger. Rapport de la troisième année – Octobre 2017. 52 p.
https://hal.science/hal-03100604

BRUXELLES L., DANDURAND G., JARRY M., LANS B., DURANTHON F. (2018) Human Origin in Namibia. A la recherche des origines de l'Homme en Namibie. Ministère de l'Europe et des Affaires Etrangères. Commission consultative des recherches archéologiques à l'étranger. Rapport de quatrième année – Novembre 2018. 82 p.
https://hal.science/hal-03100587

BRUXELLES L. (2019) Les karsts du berceau de l'Humanité en Afrique australe. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Sciences de l'Univers, Université de Montpellier, Volume 2, 133 p.

BRUXELLES L., BEAUDET A., DANDURAND G., DURANTHON F., FOURVEL J.-B., JARRY M., PICKFORD M. (2019) Human Origin in Namibia. A la recherche des origines de l'Homme en Namibie. Ministère de l'Europe et des Affaires Etrangère. Commission consultative des recherches archéologiques à l'étranger. Rapport de première année du second quadriennal. 62 p.
https://hal.science/hal-03100566

BRUXELLES L., BEAUDET A., CHADELLE B., DANDURAND G., DURANTHON F., FOURVEL J.-B., JARRY M. (2020a) *Human Origin in Namibia*. A la recherche des origines de l'Homme en Namibie et au Botswana. Rapport complémentaire. Rapport de seconde année du second quadriennal. Octobre 2020. Ministère de l'Europe et des Affaires Etrangères. Commission consultative des recherches archéologiques à l'étranger. 61 p.
https://hal.science/hal-03100555

BRUXELLES L., CHADELLE B., DANDURAND G., DURANTHON F., FOURVEL J.-B., JARRY M. et THABARD C. (2020b) *Human Origin in Namibia*. A la recherche des origines de l'Homme en Namibie et au Botswana. Rapport complémentaire. Troisième année du second quadriennal. Décembre 2021. Ministère de l'Europe et des Affaires Etrangères. Commission consultative des recherches archéologiques à l'étranger. 57 p.
https://hal.science/hal-03427221v1

BRUXELLES L., BEAUDET A., FOURVEL J.-B. (2021) A la recherche des origines de l'Homme en Namibie. Ministère de l'Europe et des Affaires Etrangères. Commission consultative des recherches archéologiques à l'étranger. 58 p.

BRUXELLES L., BEAUDET A., CHADELLE B., FOURVEL J.-B., DANDURAND G., DURANTHON F., THABARD C. (2021) A la recherche des origines de l'Homme en Namibie. Ministère de l'Europe et des Affaires Etrangères. Commission consultative des recherches archéologiques à l'étranger. 39 p.
https://hal.science/hal-03427221

BRUXELLES L., BEAUDET A., CHADELLE B., DANDURAND G., DURANTHON F., FOURVEL J.-B., JARRY M., LEDIMO O., THABARD C. (2022) *Human Origin in Namibia*. A la recherche des origines de l'Homme en Namibie et au Botswana. Rapport de fin de quadriennal. Octobre 2022. Ministère de l'Europe et des Affaires Etrangères. Commission consultative des recherches archéologiques à l'étranger. 202 p.

BRUXELLES L. (2022a) Programme Collectif de Recherche. Impact de la biocorrosion sur les grottes ornées et les monuments historique. Année 2022 Première année de triennale. Sous la direction de Laurent Bruxelles. 352 p.

BRUXELLES L. (2022b) Les karsts du berceau de l'Humanité en Afrique australe. Karstologia Mémoires, 2022, 18th International Congress of Speleology - Savoie Mont Blanc 2022 - SYMPOSIUM 01 – Karst, heritage and resources (21), pp.21-26.
https://hal.science/hal-03917438

BRUXELLES L., STRATFORD D. J., MAIRE R., PICKERING T. R., HEATON J. L., BEAUDET A., KUMAN K., CROMPTON R., CARLSON K. J., JASHASHVILI T., McClymont J., LEADER G.M., CLARKE R. J. (2019a) A multiscale stratigraphic invetigation of the context of StW 573 'Little Foot' and Member 2, Sterkfontein Caves, South Africa. Journal of Human Evolution
https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2019.05.008

BRUXELLES L., LEDIMO O., DANDURAND G. & CHADELLE B. (2025) First evidence of ghost-rock in Botswana: their potential for ancient hominins research. 19th International Congress of Speleology and 38 congresso Brasileiro de Espeleologia – Belo Horizonante 2025. Volume 2. Pp.35-39
https://uis-speleo.org/wp-content/uploads/2025/09/19ICS_Proceedings_Vol-II.pdf

BUFFARD R. (1984) Séries carbonatées, karsts et formes spéléologiques du Shaba, République du Zaïre. Karstologia. Volume 4, Pp.50-55
https://www.persee.fr/doc/karst_0751-7688_1984_num_4_1_947

BUMBY A.J., ERIKSSON P.G., CATUNEANU O., NELSON D.R., RIGBY M.J. (2012) Meso-Archaean and Palaeo-Proterozoic sedimentary sequence stratigraphy of the Kaapvaal Craton. Marine and Petroleum Geology 33 (2012) Pp.92-116
https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.09.010

BURKE K., GUNNELL Y. (2008) The African Erosion Surface: A Continental-Scale Synthesis of Geomorphology, Tectonics, and Environmental Change over the Past 180 Million Years. Memoir 201 - The Geological Society of America. 66 p.
https://doi.org/10.1130/2008.1201

BURROUGH S.L., THOMAS D.S.G. & BAILEY R.M. (2009) Mega-Lake in the Kalahari: A Late Pleistocene record of the Palaeolake Makgadikgadi system. Quaternary Science Reviews. Volume 28. Issue 15-16. Pp.1392-1411.
https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.02.007

BURROUGH S.L. (2016) Late Quaternary Environmental Change and Human Occupation of the Southern African Interior. Africa from MIS 6-2. Population Dynamics and Paleoenvironments. Springer. Pp. 161-174
http://doi.org/10.1007/978-94-017-7520-5_9

BURROUGH S.L. (2022) The Makgadikgadi Basin *in* ECKARDT F.D. (ed.) Landscape and Landforms of Botswana. World Geomorphological Landscape. Springer Nature Switzerland AG 2022. Chapitre 5 Pp-80-90
https://doi.org/10.1007/978-3-030-86102-5_5

BUTTRICK D.B. (1986) «Wad» and Ferroan soil developed in the dolomitic area south of Pretoria, Master of Science in the Faculty of Science, University of Pretoria, 158 p.
http://hdl.handle.net/2263/82505

BUTTON A. (1973) The Stratigraphy History of the Malmani Dolomite in the Eastern and North-eastern Transvaal. Transactions of the Geological Society of South Africa. p. 229-247

BUTTON A. (1986) The transvaal sub-basin of the transvaal sequence. *In:* Anhaeusser C.R., Maske S. (Eds.), Mineral Deposits of Southern Africa. Geological Society of South Africa, Johannesburg, pp.811-817

BUTTON A. et CAWTHORN R. G. (2015) Distribution of mafic sills in the Transvaal Supergroup, northeastern South Africa. Journal of the Geological Society, 172, p. 357-367.
https://doi.org/10.1144/jgs2014-101

CAIRNCROSS B. (2011) The thabazimbi Mine Cave, Limpopo Province, South Africa : Assessment of the Cave and its Speleothems. 20 p.
http://doi.org/10.1080/00357529.2016.1172173

CAIRNCROSS B., KRAMERS J.D., VILLA I.M. (2018) Unusual speleothem formation in the Thabazimbi mine cave, Limpopo Province, South Africa, and its chronology. Geological Society of South Africa. 11 p.
https://doi.org/10.25131/sajg.121.0020

CALLAGHAN C.C., ERIKSSON P.G., SNYMAN C.P. (1991) The sedimentology of the Waterberg Group in the Transvaal, South Africa : an overview. Journal of African Earth Science, Volume 13, Numéro 1, pp. 121-139
https://doi.org/10.1016/0899-5362(91)90047-3

CAMPBELL A. C. (1974) The cryptic cave at Cwihaba, Botswana I.(1), pp.54-60 (Gabarone)

CAMPBELL A. C. (1979) Cwihaba Caverns, pp.218-220 in the Guide to Botswana (2nd edition, Johannesburg and Gabarone, Winchester Press).

CARDOSO G. M., DU PREZZ G., TAITI S. & FERREIRA R.L. (2021) New troglobitic species of Niambia from Botswana and Namibia (Crustacea, Isopoda, Oniscidea). Subterranean Biology Volume 40. Pp.91-108
https://doi.org/10.3897/subtbiol.40.72499

CATUNEAUNU O., ERIKSSON P.G. (2002) Sequence stratigraphy of the Precambrian Rooihoogte – Timeball Hill rift succession, Transvaal Basin, South Africa. Sedimentary Geology 147 (2002) pp.71-88

CATUNEAUNU O., WOPFNER H., ERIKSSON P.G., CAIRNCROSS B., RUBIDGE B.S., SMITH R.M.H., HANCOX P.J. (2005) The Karoo basins of south-central Africa. Journal of African Earth Sciences Vol.43 pp.211-253
https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.07.007

CASSINI DE THURY C. F. (1744) Nouvelle carte qui comprend les principaux triangles qui servent de fondement à la description géométrique de la France. Paris.
https://www.loc.gov/item/2004629162/

CGMW-BRGM. THIEBLEMONT D. (Editor, BRGM), LIEGEOIS J.P., FERNANDEZ-ALONSO M., OUABADI A, LE GALL B., MAURY R., JALLUDIN M., VIDAL M., OUATTARA GBELE C., TCHAMENI R., MICHARD A., NEHLIG P., ROSSI P &. CHENE F. (2016) Geological Map of Africa at 1 : 10M scale, https://www.brgm.fr/en/reference-completed-project/new-edition-110000000-geological-map-africa

CHADELLE B. et CAMUS H. (2018) Etude morphokarstique de l'hydrosystème de la Cèze (30). Caractéristiques géométriques et karstologiques du réservoir Urgonien du plateau de Méjannes-le-Clap incisé par le canyon de la Cèze. Rapport d'étude, ZABR-AERMC, 162 p.
https://www.researchgate.net/publication/377230920_Etude_morphokarstique_de_l'hydrosysteme_de_la_Ceze_30_Caracteristiques_geometriques_et_karstologiques_du_reservoir_Urgonien_du_plateau_de_Mejannes-le-Clap_incise_par_le_canyon_de_la_Ceze

CHADELLE B. & BRUXELLES L. (2022) Mozambique and Southern Africa karsts identification by SIG.
Karstologia Mémoires, 2022, 18th International Congress of Speleology - Savoie Mont Blanc 2022 -
SYMPOSIUM 04 - Geomorphology and Speleogenesis, 5 (25), pp.199-202.
https://hal.science/hal-03916743v1

CHADELLE B. & BRUXELLES L. (2024) Dolomite outcrops, mapping and potentiel survey. 1 st International conference " Modalities of the Homo-Genus Appearance in Southern African Paleokarsts", Laurent Bruxelles; Philippe Segadika, Dec 2024, Maun, Botswana.
https://hal.science/hal-04908112

CHARSLEY T.J. (1972) The Limestone Resources of Malawi. Geological Survey Deparment. Memoir Number 6. 128 p.

CHATUPA J., DIRENG B., SEBAKA S., GABOALASWE D. & MOGALADI E. (1996) Provisional Report of the Orientation Survey Carried out un NW Ngamiland. Northwest Ngamiland Regional Geochemical survey Project. 130 p.
http://www.library.bgi.org.bw/ActiveConnect/DesktopModules/ViewDocument.aspx?ContentIndex=223

CHAN E.K.F., TIMMERMANN A., BALDI B.F., MOORE A.E., LYONS R.J., LEE S.-S., KALSBEEK A.M., PETERSEN D.C., RAUTENBACH H., FORTSCH H.E.A., BORNMAN M.S.R., HAYES V.M. (2019) Human origins in a southern African palaeo-wetland and first migrations. Pp. 185-189
https://doi.org/10.1038/s41586-019-1714-1

CHIBA T., KANETA S.-I., SUZUKI Y. (2008) Red relief image map : New visualization method for three dimensional data. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing ans Spatial Information Sciences. Vol.XXXVII. Part B2. Beijing 2008

CHISENGA C., JIANGUO Y., FADEL I., van der MEIJDE M., ATEKWANA E.A. (2020) Updated tectonic terrane boundaries of Botswana determined from gravity and aeromagnetic data. Journal of International Geoscience. IUGS Episodes. Volume 43, Number 4. Pp.919-933
https://doi.org/10.18814/epiiugs/2020/020054

CILEK V.C 1989 Industrial minerales of Mozambique

CLARK J.D. (2001) The Twin Rivers Kopje, Zambia : Stratigraphy, Fauna, and Artefact Assemblages from the 1954 and 1956 Excavations. Journal of Archaeological Science. Volume 28. Issue 3.Pp.305-330.
https://doi.org/10.1006/jasc.2000.0563

CLARKE R.J .& TOBIAS P.V. (1999) Supplement to documents nominating the fossil hominid sites of Sterkfontein, Swartkransn Kromdraai and the Environs as a Wolrd Heritage Site

COERTZE F.J., JANSEN H., WALRAVEN F. (1977) The Transition from the Transvaal Sequence to the Waterberg Group. Trans. Geol. Soc. S. Afr., 80(1977). 145-156
https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA10120750_1256

COBBING J., EALES K. & ROSSOUW T. (2016) *The Path to Sucessful Water User Associations in the North West Dolomite Aquifers. Final Report K5/2429. Report to the Water Research Commission. WRC Report No.* 2429/1/16. ISBN 978-1-4312-0808-1. 103 p.
https://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/2429-1-17.pdf

COBBING J. (2018) *An updated water balance for the Grootfontein aquifer near Mahikeng. Water SA Volume* 44, n°1. Pp.54-64.
https://www.scielo.org.za/pdf/wsa/v44n1/07.pdf
https://doi.org/10.4314/wsa.v44i1.07

COETSEE F., CLOETE A.J. (1981) Geological Survey (South Africa) 1 :250 000 geological series. 2526, Rustenburg (cartographic material) – Department of mineral and energy affairs – Printed and published in the Republic of South Africa by Government Printer, Pretoria

COETSEE F.J. (1981) Mineral Map of the Republics of South Africa, Transkei, Bophuthatswana, Venda and Ciskei and the Kingdoms of Lesotho and Swaziland

COETSEE F.J. (1991) Pretoria n°2528. Echelle : 1/250 000. Metallogenic series

COETZEE H.P.A. (1996) The stratigraphy and sedimentology of the Black Reef quartzite formation, Transvaal Sequence, in the Area of Carletonville and West Rand Goldfields. Thesis submitted in the Faculv of Natural Sciences of the Potchefstroonzse Universiteit vir Christelike Hoer Ondenuys (Potchefstroonz Universiv for Christian Higher Education) in partial fulfillment of the requirements for the degree Magister Scientiae in Geology. 154 p.
https://repository.nwu.ac.za/bitstream/handle/10394/1573/coetzee_hendrikpa.pdf?sequence=1&isAllowed=y

COHWHS (CRADLE OF HUMANKIND WORLD HERITAGE SITE) (2008a) Management, monitoring and evaluation of the Cradle of humankind fossil sites. Updated fossil site management plan for ***Kromdraai*** *2009-2013. Cradle of Humankind world Heritage Site Cultural Heritage Resources Management : Kromdraai site plan. Revised updated site management plan for Kromdraai.* 62 p.
https://sahris.sahra.org.za/sites/default/files/heritagereports/Updated%20Fossil%20Site%20Management%20Plan%20for%20Komdraai.pdf

COHWHS (CRADLE OF HUMANKIND WORLD HERITAGE SITE) (2008b) Management, monitoring and evaluation of the Cradle of humankind fossil sites. Updated fossil site management plan for ***Sterkfontein*** *2009-2013.* 34 p.
https://sahris.sahra.org.za/sites/default/files/heritagereports/Updated%20Fossil%20Site%20Management%20Plan%20for%20Sterkfontein.pdf
https://sahris.sahra.org.za/sites/default/files/heritagereports/Sterkfontein2.pdf

COHWHS (CRADLE OF HUMANKIND WORLD HERITAGE SITE) (2008c) Management, monitoring and evaluation of the Cradle of humankind fossil sites. Updated fossil site management plan for ***Minnaar's*** *site 2009-2013. CULTURAL HERITAGE RESOURCES MANAGEMENT. Minnaar's site plan.* 30 p.
https://sahris.sahra.org.za/sites/default/files/heritagereports/Updated%20Fossil%20Site%20Management%20Plan%20for%20Minnaars%20Site.pdf

Colonial Geology and Mineral Resources, Volume 1, number 2, 1950, 122 p.
https://pubs.bgs.ac.uk/publications.html?pubID=B07199

Colonial Geology and Mineral Resources, Volume 3, number 4, 1953, 165 p.
https://pubs.bgs.ac.uk/publications.html?pubID=B07209

Colonial Geology and Mineral Resources, Volume 4, number 3, 1954, 137 p.
https://pubs.bgs.ac.uk/publications.html?pubID=B07212

Colonial Geology and Mineral Resources, Volume 5, number 1, 1955, 153 p.
https://pubs.bgs.ac.uk/publications.html?pubID=B07214

Colonial Geology and Mineral Resources, Volume 5, number 2, 1955, 159 p.
https://pubs.bgs.ac.uk/publications.html?pubID=B07215

Colonial Geology and Mineral Resources, Volume 5, number 3, 1955, 181 p.
https://pubs.bgs.ac.uk/publications.html?pubID=B07216

Colonial Geology and Mineral Resources, Volume 5, number 4, 1955, 172 p.
https://pubs.bgs.ac.uk/publications.html?pubID=B07217

CONROY G. C., PICKFORD M., SENUT B., Van COUVERING J. & MEIN P. (1992) Otavipithecus namibiensis, first Miocene hominoid from southern Africa. Nature. Letters to Nature. Volume 356. Pp. 144-147
https://doi.org/10.1038/356144a0

COOKE H.J. (1973) Cave studies in Botswana. Botswana Notes & Records, Volume 5. Number 1. Pp.233-234
https://hdl.handle.net/10520/AJA052550590_625

COOKE H.J. BAILLIEUL T.(1974) The Caves of Nmagilnand: An Interim Report on Explorations and Fieldwork 1972-74, Botswana Notes & Records Vol.6, pp.147-156
https://www.jstor.org/stable/40959215 https://www.jstor.org/stable/622100

COOKE H.J. (1975a) The Palaeoclimatic Significance of Caves and Adjacent Landforms in Western Ngamiland, Botswana, The Geographical Journal, Vol.141, No.3, pp.430-444
•https://doi.org/10.2307/1796477 https://www.jstor.org/stable/1796477

COOKE H.J. (1975b) The Lobatse Caves, Botswana Notes & Records, Vol.7,pp.29-34
https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA052550590_532
https://www.jstor.org/stable/40979421

COOKE H.J. et VERHAGEN B. TH. (1977) The dating of cave development – an example from Botswana. Proceedings-of-The-7th-International-Speleological-Congress-Sheffield-England-September-1977. Pp. 122-124
http://uis-speleo.org/wp-content/uploads/2020/08/Proceedings-of-The-7th-International-Speleological-Congress-Sheffield-England-September-1977.pdf

COOKE H.J. (1979) The Origin of the Makgadikgadi pans, Botswana Notes&Records, Vol.11, pp.37-42
https://journals.co.za/doi/epdf/10.10520/AJA052550590_932
https://www.jstor.org/stable/40979568

COOKE H.J. (1980a) Landform Evolution in the Context of Climatic Change and Neo-Tectonism on the Middle Kalahari of North-Central Botswana, Transactions of the Institute of British Geographers, Vol.5, No°1, pp.80-99
https://doi.org/10.2307/622100

COOKE H.J. (1980b) On the Conservation of Natural Resources, with special reference to the Kalahari in Botswana, Botswana Notes & Records Vol.13, pp.141-143
https://www.jstor.org/stable/40979645

COOKE H.J. (1984) The evidence from northern Botswana of climatic change. In: J. Vogel (ed.):
Late Cenozioc palaeoclimates of the southern Hemisphere. A.A. Balkema, Rotterdam. 520 pp.

COOKE H.J. (1995) Exploration of two new caves, Botswana Notes&Records, Vol.27, p.19
https://www.jstor.org/stable/40980032

COOKE H.B.S. (1991) Dinofelis barlowi (Mammalia, Carnivora, Felidae) cranial material from Bolt's Farm, collected by the University of California African Expedition. Palaeontologia africana. Volume 28. Pp. 9-21.
https://core.ac.uk/download/39674771.pdf

COTTERILL F.P.D. (2001) New distribution records of leaf-nosed bats (Microchiroptera: hipposideridae) in Zimbabwe. ARNOLDIA ZIMBABWE Series of Miscellaneous Publications of the National Museums and Monuments. Volume 10 No.17, 30th July 2001. pp.187-198
https://www.researchgate.net/profile/Fenton-Cotterill/publication/236108957_NEW_DISTRIBUTION_RECORDS_OF_LEAF-NOSED_BATS_MICROCHIROPTERA_HIPPOSIDERIDAE_IN_ZIMBABWE/links/00b7d51600b705457c000000/NEW-DISTRIBUTION-RECORDS-OF-LEAF-NOSED-BATS-MICROCHIROPTERA-HIPPOSIDERIDAE-IN-ZIMBABWE.pdf

COTTERILL F. P. (2006). The Evolutionary History and Taxonomy of the *Kobus leche* species complex of south-central Africa in the context of Palaeo-Drainage Dynamics. Phd. Stellenbosch: Stellenbosch University. 424 p.
https://scholar.sun.ac.za/bitstreams/66254b4b-957b-4f05-b93a-b70e8b6df829/download

COTTERILL F.P.D., De WIT M. (2011) Geoecodynamics and the Kalahari epeirogeny: Linking its genomics recrd, tree of life and palimpsest into a unified narrative of landcape evolution. South African Journal of Geology. Volume 114. Number 3.4. Pp.489-514
https://doi.org/10.2113/gssajg.114.3-4.489

COLSON S., STAURSET S., MOTHULATSHIPI S., BURROUGH S.L., NASH D.J. & THOMAS D.S.G. (2022) Thriving in the Thirstland: New Stone Age sites from the Middle Kalahari, Botswana. Quaternary Science Reviews. 15 p.
https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107695
CRIPPEN R., BUCKLEY S., BELZ E., GURROLA E., HENSLEY S., LAVALLE M.; MARTIN J.; NEUMANN M.; NGUYEN Q.; ROSEN P.; SHIMADA J.; SIMARD M.; TUNG W. (2016). Modèle d'élévation globale NASADEM: méthodes et progrès. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Prague, Czechoslovakia July 12-19, 2016,JPL Open Repository
https://hdl.handle.net/2014/46123

CUMBE A. N. F.(2007) O Patrimonio Geologico de Moçambique : Proposta de Metodologia de Inventariaçao, Caracterizaçao e Avaliaçao – Universidade Do Minho Escola de Ciencias Departamento de Ciencias da terra, 273 p.

CUSWORTH T. (2006) Martins Drift Kimberlite EIA. EIA for DiamonEx Botswana Limited. Martin's Drif Diamond Project, Central District, Botswana. 160 p.
https://www.eib.org/attachments/pipeline/20060121_eia_en.pdf

DA SILVA R. (2011) Distribution and Geochronology of Unconformity-Bound Sequences in Paleoproterozoic Elim-Olifantshoek Red Beds: Implications for Timing of Formation of Sishen-Type Iron Ore and Heavy Carbonate Isotope Excursion – Dissertation submitted in fulfilment of the requirements for the degree Magister Scientiae in Geology in the Faculty of Science at the University of Johannesburg, Supervisor: Prof. N.J. Beukes, 110 p.
https://core.ac.uk/download/18219914.pdf

DACEL (DEPARTMENT OF AGRICULTURE, CONSERVATION, ENVIRONMENT AND LAND AFFAIRS) (1998) Application for inclusion of the World Heritage List, The fossil hominid sites of Sterkfontein, Swartkrans, Kromdraai and environs. South Africa. UNESCO. Minister of Environment Affairs and Tourism. 6 Appendix + Taung's maps from *BCK (Bapela Cave Klapwijk) (2003).* 1018 p.
https://whc.unesco.org/uploads/nominations/915bis.pdf

DANDURAND G., BRUXELLES L. (2022) *Ghost-rock karstification: principles, processes, perspectives. 18th International Congress of Speleology* – Volume IV, Karstologia Mémoires n°24, pp.225-226
https://hal.science/hal-03916726/document

DANDURAND G., DURANTHON F., JARRY M., STRATFORD D., BRUXELLES L. (2019) Biogenic corrosion caused by bats in Dortsky's Cave (the Gcwihaba Hills, NW Botswana). Geomorphology Volume 327, 284-296
https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.10.027

DANDJINOU T. M. (1988) Télédétection des paysages latéritiques. Traitement d'images, integration et synthèse de données multisources. Institut de Géologie. Strasbourg. 124 p. + Planches
https://www.theses.fr/1988STR13249

DANIELSON, J.J., & GESCH, D.B., 2011, Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010): U.S. Geological Survey Open-File Report 2011–1073, 26 p.
https://pubs.usgs.gov/of/2011/1073/

DART R. A. (1925a) A note on Makapansgat: a site of early human occupation. S. Af. J. Sci., 22, p.454.
https://hdl.handle.net/10520/AJA00382353_8594

DART R. A. (1925b) Australopithecus africanus: the Man-Ape of South Africa. Nature, Volume 115, pp.195-199.
https://doi.org/10.1038/115195a0

DART R., A. (1948a) The Australopithecus from the Central Transvaal. South African J.of Science, t.1, p.200-201

DART R., A. (1948b) The First Human Mandible from the Cave of Hearhs, Makapansgat. South African Archeol. Bulletin, vol.3, 1948, p.96-98.

DART R., A. (1950) A note on the limestone caverns of Leba, near Humpata, Angola. S. Afr. Archaeol. Bull. S (20). Pp149-151
https://www.isptundavala.ao/_files/ugd/a09383_3c751bd93add46bdb47fe091e9c46fc2.pdf?index=true

DART R., A. (1953) Union sud-africaine. In VALOIS H. V., MOVIUS M. A. L. Jr. (1953) Catalogue des hommes fossiles. Les préhominiens et les hommes fossiles. Congrès géologiques international. Comptes rendus de la dix-neuvième session. Alger, 1952. Section V Fascicule V. Pp. 294-307.

DAUTEUIL O., BOUFFETTE J. TOTEU F. FRIZON DE LA MOTTE D., GUILLOCHEAU F., A. MICHARD A., J.P. MILÉSI J.P., F. MOREAU F., D. NÉRAUDEAU D., M. POUJOL M., C. ROBIN C., D. ROUBY D., J.J. TIERCELIN J.J., DESCHAMPS F., MVONDO F., N. ROLLAND N. (2008) Visages du Continent Africain – Eléments de géologie africaine. Commission de la Carte Géologique du Monde – CD-ROM – 52 p.

DAUTEUIL O., GAUDARE L., JOLIVET M., MURRAY-HUDSON M., WOLSKI P., MAKATI K. & EDMISON M. (2024) Present-day Deformation in the Incipient Strike-slip Basin of the Okavango Delta (Botswana) : Impact on the Ecosystem. Tektonika. Volume 3.2. Pp.141-157
https://doi.org/10.55575/tektonika2024.2.2.79

DAY J.J, BILLS R. & FRIEL J.P. (2009) Lacustrine radiations in African Synodontis catfish. Journal of Evolutionary Biology. Volume 22. Issue 4. Pp.659-915
https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2009.01691.x

DAYNAC J., BESSIN P., POCHAT S., MOURGUES R. & SHUMACK S. (2024) A new workflow for mapping dune features (outline, crestline and defects) combining deep learning and skeletonization from DEM-derived data. Geomorphology Volume 463, 15 p.
https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109369

DAXER C. (2020) Topographic Openness Maps & Red Relief Image Maps in QGIS – University of Innsbruck Institute of Geology. 17 p. DOI : 10.13140/RG.2.2.18958.31047

DWA Department of Water Affair, HOLLAND M., COBBING J., WITTHÜSER K. (2008a) *Technical Series 1: Crystaline Basement Aquifers of South Africa. Strategy and Guideline Development.* https://www.dws.gov.za/ghreport/reports/GH4350.pdf

DWA Department of Water Affair (2008b) *Technical Series 2: Dolomite Aquifers of South Africa. Strategy and Guideline Development*. 37 p.
https://www.dws.gov.za/ghreport/reports/GH4351.pdf

DWA Department of Water Affair, COBBING J., HOLLAND M., LENKOE K., WITTHÜSER K., TITUS R., BUMBY A. & WIEGMANS F. (2008c) *Technical Series 3: Primary Aquifers of South Africa. Strategy and Guideline Development.* 38 p.
https://www.dws.gov.za/ghreport/reports/GH4352.pdf

DWA Department of Water Affair (2008*) Technical Series 4: Karoo Aquifers in South Africa. Strategy and Guideline Development.* 40 p.
https://www.dws.gov.za/ghreport/reports/GH4353.pdf

DE BEVER N., J. (1997) An Overview of the early-Proterozoic, auriferous Black Reef placer in the Transvaal Basin, Master of Science in Exploration Geology Faculty of Science Rhodes University Supervisor Prof John Moore p.141
https://core.ac.uk/download/pdf/145053278.pdf

DE MATOS D., NORA D., FRANCISCO R., FERNANDES J., NETO M.S., ROBAKIEWICZ E. L. (2023) Survey and Explorations of the Prehistoric Sites in the Highlands of Southwest Angola. Journal of Paleolithic Archaeology. Volume 6, 25
https://doi.org/10.1007/s41982-023-00152-0

DE RUITER D.J., PICKERING R., STEININGER C.M., KRAMERS J.D., HANCOX P.J., CHURCHILL S.E., BERGER L.R., BACKWELL L. (2009) New Australopithecus robustus fossils and associated U-Pb dates from Cooper's Cave (Gauteng, South Africa). Journal of Human Evolution Volume 56, pp.497-513
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004724840900027X

DE LAUNAY L. (1896) Les Mines d'Or du Transvaal. Etude géographique et historique, Organisation des sociétés minières, étude géologique, exploitation des gisements, traitement des minerais, résultats économiques. Paris & Liège Librairie Polytechnique Ch. Béranger. 550 p.
https://patrimoine.sorbonne-universite.fr/medias/d6/4b/5e/68/d64b5e68-c226-43c4-aea2-03c90e5157db/files/GH_000478_001_pdf.pdf

DE VILLIERS, J. (1960) , The manganese deposits of the Union of South Africa: Pretoria, Geological Survey of South Africa Handbook, 2, p. 263

DE WIT M., C.(1981) A Geophysical investigation and geological interpretation of part of the diamondiferous gravels on the farm Grasfontein (356 JP), west of Barkerville. Submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree, Magister Scientiae, in the Faculty of Science of the University of Pretoria. 93 p. + 4 cartes
http://hdl.handle.net/2263/27873

DE WIT M., C.(1992) *In* inversion tectonics of the Cape Fold Beld, Karoo and Cretaceous basins of southern africa (eds. M.J. de Wit and I.G.D. Ransome) Dissertation (MSc (Geology))--University of Pretoria, 2007. 1 p.

DE WIT M., C.(1996) The distribution an stratigraphy of inland alluvial diamond deposits in south Africa. Africa Geoscience Review. Volume 3. Pp.175-189

DE WIT M., C.(1999) Post-Gondwana Drainage and the Development of Diamond Placers in Western South Africa. Economic Geology, Volume 94, Pp.721-740
https://www.researchgate.net/publication/291774188_The_distribution_and_stratigraphy_of_inland_alluvial_diamond_deposits_in_South_Africa

DE WIT M., C. (2016a) Early Permian diamond-bearing proximal eskers in the Lichtenburg/Ventersdorp area of the North West Province, South Africa. 22p.

DE WIT M., C. (2016b) Dwyka Eskers along the Northern Margin of he Main Karoo Basin. © Springer International Publishing Switzerland 2016 B. Linol and M.J. de Wit (eds.), Origin and Evolution of the Cape Mountains and Karoo Basin, Regional Geology Reviews
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-40859-0_9

DE WIT M., C.(2018) Prospecting History leading to the discovery of Botswana's diamond mines : from artefacts to Lesedi La Rona. Présentation powerpoint. Tsodilo Resources Ltd. University of Pretoria. 44 p.
https://tsodiloresources.com/i/pdf/de-Wit-Presentation-18Sept.pdf

DE WIT M.,C. & BOTHA G., A. (1996) Post-Gondwanan continental sedimentation, Limpopo region, southeastern Africa – Journal of African Earth Sciences. Vol. 23. No. 2, pp. 163-187. 25 p.

DE WIT M., C. COTTERILL F. (2008) Tracking the Kalahari Epeirogeny: from fission tracks and cosmogenic dating to molecular clocks.

DELAUNAY A. (2018) Les mouvements verticaux de Madagascar (90-0 Ma) : une analyse couplée des formes du relief et de l'enregistrement sédimentaire des marges ouest malgaches. Science de la Terre. Université Rennes 1. Français. NNT : 2018REN1B009. Tel-01865479 - 375 p.

DESMOND CLARK J., STEPHENS E.A., CORYNDON S.C. (1966) Pleistocene Fossiliferous Lake Beds of the Malawi (Nyasa) Rift: a Preliminary Report. American Anthropologist. Pp. 46-49
https://doi.org/10.1525/aa.1966.68.2.02a00960
https://anthrosource.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1525/aa.1966.68.2.02a00960

DORLAND H.C., BEUKES N. J. GUTZMER J. (2006) Precise SHRIMP U-Pb zircon age constraints on the lower Waterberg and Soutpansberg Groups, South Africa. South African Journal of geology (2006), Volume 109 Pp. 139-165
https://people.earth.yale.edu/sites/default/files/files/Evans/21_06a-Dorland%2Bages.pdf

DIETVORST E. J.L. (1988) Early precambrian basement uplift and block faulting among the western margin of the Bushveld complex, Southeastern Botswana, Journal of African Earth Sciences, Vil 7, No 4, pp. 641-657

DIJKSHOORN J. A. (2003) SOTERSAF (SOTER database for Southern Africa, l'ISRIC (International soil Reference and Information Centre). Technical Report. Wageningen. p.32
https://data.isric.org/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/metadata/3571c1f3-159d-442c-b324-0af53d03f12e

DILL H.D., Dohrmann R., Fenner J., Gersdorf U., Kaufhold S., Kringel R., Lindenmaier F., Rudiger R. L., MC G. MILLER R., NICK A., NOELL U. & WALZER A. (2012) Entwicklung und Alterseinstufung von Duricrusts als Basis fur die palaogeografische und -hydrogeologische Modellierung im Cuvelai-Etosha-Becken in Nord-Namibia. Groundwater for the North of Namibia. Volume 1 b. Kalahari Research Project. Results of Analysis from Drill Holes on the Cubango Megafan. BRG. 50 p.
https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/F+E/Kalahari/kalahari_report_Ib.pdf?__blob=publicationFile&v=6

DIRKS P. H.G.M., ASHWAL L.D. (2002) African Geodynamics and Resource Exploration for the 21st Century. Univ. Witwatersrand, School of Geosciences. 29 p.
http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.199.01.10

DIRKS P. H.G.M., BLENKINSOP T.G., JELSMA H.A. (2003) The Geological Evolution of Africa. Geology Volume IV The Geological Evolution of Africa. Encyclopedia of Life Support System, UNESCO-EOLSS. 36 p.
https://www.academia.edu/7636843/Geological_Evolution_of_Africa
Lien

DIRKS P. H.G.M., KIBII J.M., KUHN B.F., STEININGER C., CHURCHILL S.E., KRAMERS J.D., PICKERING R., FARBER D.L., MERIAUX A.-S., HERRIES A.I.R., KING G.C.P., BERGER L. (2010) Geological Setting and Age of Australopithecus sediba from Southern Africa. Research Articles, Science Volume 328, numero 5975. Pp 205-208
https://doi.org/10.1126/science.1184950

DIRKS P. H.G.M., BERGER L.R. (2013) Hominin-bearing caves and landscape dynamics in the Cradle of Humankind, South Africa. Journal of African Earth Sciences 78, Pp.109-131
https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2012.09.012

DIRKS P. H.G.M., BERGER L.R., ROBERTS E.M., KRAMERS J.D., HAWKS J. QUINNEY P.S.R, ELLIOTT M., MUSIBA C.M., CHURCHILL S.E., DE RUITER D.J., SCHMID P., BACKWELL L.R., BELYANIN G.A., BOSHOFF P., HUNTERK.L, FEUERRIEGEL E.M., GURTOV A., HARRISSON J. du G., HUNTER R., KRUGER A., MORRIS H., MAKHUBELA T.V.,PEIXOTTO B., TRUCKER S (2015) Geological and taphonomic context for the new hominin species Homo naledi from the Dinaledi Chamber, South Africa. Research Article, Evolutionary Biology. 37 p.
https://doi.org/10.7554/eLife.09561

DIRKS P.H.G, ROBERTS E.M., HILBERT-WOLF H., KRAMERS J.D., HAWKS J., DOSSETO A., DUVAL M., ELLIOTT M., EVANS M., GRUN R., HELLSTROM J., HERRIES A.I.R., JOANNES-BOYAU R., MAKHUBELA T.V., PLACZEK C.J., ROBBINS J., SPANDLER C., WIERSMA J., WOODHEAD J., BERGER L.R. (2017) The age of Homo Naledi and associated sediments in the rising tard Cave, South Africa. Resaerch Article, Evolutionary Biology. 59 p.
https://doi.org/10.7554/eLife.24231

DIRKS P. H.G.M., PLACZEK C.J., FINK D., DOSSETO A., ROBERTS E. (2016) Using ^{10}Be cosmogenic isotopes to estimate erosion rates and landcape changes during the Plio-Pleistocene in the Cradle of Humankind. South Africa. Journal of Evolution 96 (2016), pp.19-34
https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2016.03.002

DIPPENAAR M. A., SWART D., VAN ROOY J. L., DIAMOND R. E. (2019) The karst vadose zone: Influence on recharge, vulnerability and surface stability, Water Research Commission No. TI779/19

DIXEY F. -1956 - Colonial Geology and Mineral resources supplement series the east African Rift System, Bulletin supplement n°1
https://play.google.com/books/reader?id=7Z90t6cj7kEC&pg=GBS.PP12&hl=fr
https://books.google.fr/books?id=7Z90t6cj7kEC&printsec=frontcover&hl=fr#v=onepage&q&f=false
https://pubs.bgs.ac.uk/publications.html?pubID=B04005

DRESCH M.J. (1946) Notes de géomorphologie congolaise. Séance du 7 décembre 1946. Bulletin de l'Association de géographes français, N°181-182, 23ème année, Novembre-Décembre 1946. pp 116-123
https://www.persee.fr/doc/bagf_0004-5322_1946_num_23_181_7206
https://doi.org/10.3406/bagf.1946.7206

DOM ADALBER ANCIAUX DE FAVEAUX O.S.B (1955) Les Brèches ossifères de Kakontwe. Third pan-african congress on prehistory Livington 1955 Edited by J. Desmond Clark, London, Chatto & Windus 1957 -106. Pp.98-101

DU PREEZ G.C., THERON P. & FOURIE D. (2013) Terrestrial mesofauna biodiversity in unique karst environments in Southern Africa. Conference paper. Proceedings of the 16th International Congress of Speleology. Brno, Czech Speleological Society.
https://www.academia.edu/74206329/Terrestrial_Mesofauna_Biodiversity_in_Unique_Karst_Environments_in_Southern_Africa

DU PREEZ G. C., FORTI P., JACOBS G., JORDAAN A. & TIED L.R. (2015) Hairy Stalagmites, a new biogenic root speleothem from Botswana. International Journal of Speleology. Volume 44, Issue 1. Pp.37-47
https://digitalcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1858&context=ijs
https://www.semanticscholar.org/reader/ec3c22bf461dcf8cc4ca5212fd6ca79234c2037e

DU PREEZ G.C., WEPENER V., DENNIS I. (2016) Metal enrichment and contamination in a karst cave associated with anthropogenic activities in the Witwatersrand Basin, South Africa. Environ Earth Science. Volume 75 Issue 653. 13 p.
https://www.researchgate.net/publication/301232245_Metal_enrichment_and_contamination_in_a_karst_cave_associated_with_anthropogenic_activities_in_the_Witwatersrand_Basin_South_Africa

DU PREEZ G. C., FOURIE H, ELLIS R. & JACOBS G. (2017) The Gcwihaba Caves Research Project: Past, Present and Future Undertakings. Proceedings of the 17 th International Congress of Speleology, Sydney 2017. Volume 1. Pp.79-81
http://uis-speleo.org/wp-content/uploads/2020/08/Proceedings-17th-ICS-Vol1-Ed2-screen.pdf

DU TOIT A.L. (1921) The Carboniferous Glaciation of South Africa. Trans. Geol. Soc. S. Afr., Vol.24. Pp. 188-227

DU TOIT A.L. (1933) Crustal movements as a factor in the geographical evolution of South Africa.

DU TOIT A.L. (1939) Geology of South Africa, second Edition. Oliver and Boyd, Edinburgh

DU TOIT A.L. (1954) The Geology of South Africa, Third edition. Edited and prepared for publication by Haughton. Oliver and Boyd, Edinburgh.611 p.

DUBAYAH, R.O., S.B. LUTHCKE, T.J. SABAKA, J.B. NICHOLAS, S. PREAUX, and HOFTON M.A. (2021) GEDI L3 Gridded Land Surface Metrics, Version 2. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA
https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1952

DUBOIS C., QUINIF Y., BAELE J.-M., BARRIQUAND L., BINI A., BRUXELLES L., DANDURAND G., HAVRON C., KAUFMANN O., LANS B., MARTIN J., RODET J., ROWBERRY M.D., TOGNINI P., VERGARI A. (2014) The process of ghost-rock karstification and its role in the formation of cave systems. Earth-Science Reviews 131 (2014) 116-148
https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.01.006

DUBOIS C., BINI A., QUINIF Y. (2022) Karst morphologies and ghostrock karstification Géomorphologie : relief, processus, environnement, 2022, vol. 28, n°1, p13-31 https://doi.org/10.4000/geomorphologie.16327

DUNSTAN W.R.D. (1908) Colonial Reports-Miscellaneous N°48 Nyasaland Protectorate Report on the results of the mineral survey, 1906-7 by Professor Wyndham R. Dunstan, M.A., LL.D, F.R.S., Director of the Imperial Institute, 36 p.
https://pubs.bgs.ac.uk/publications.html?pubID=B04021 (août 2022)

DUNSTAN W.R.D. (1909) Colonial reports-Miscellaneous N°60 Nyasaland Protectorate Report on the results of the mineral survey, 1907-8, N° II of Series By Professor Wyndham R. Dunstan, M.A., LL.D, F.R.S., Director of the Imperial Institute, 50 p.
https://pubs.bgs.ac.uk/publications.html?pubID=B04024 (août 2022)

DUNSTAN W.R.D. (1911) Colonial reports-Miscellaneous N°80 Nyasaland Protectorate Report on the results of the mineral survey, 1908-9, N° III of Series By Professor Wyndham R. Dunstan, M.A., LL.D, F.R.S., Director of the Imperial Institute, Printed by Darling and son, LTD., Bacon Street, 26 p.
https://webapps.bgs.ac.uk/data/publications/pubs.cfc?method=listResults&topic=OV&series=CG&subseries=RN&pageSize=100 (Colonials Reports-Miscellanous - août 2022)
https://webapps.bgs.ac.uk/data/publications/pubs.cfc?method=listResults&topic=OV&series=CG&subseries=RF&pageSize=100#RF (Colonials Reports-Miscellanous - août 2022)

DUPONT N., QUNIF Y., DUBOIS C., CHENG H & KAUFMANN O. (2018) Le système karstique de Sprimont (Belgique). Holotype d'une spéléogenèse par fantômisation. BSGF – Earth Science Bulletin 2018, 189, 1. 22 p.
https://doi.org/10.1051/bsgf/2017205

ECKARDT F.D. (ed.) (2022) Landscape and Landforms of Botswana. World Geomorphological Landscape. Springer Nature Switzerland AG 2022. 22 Chapitres. 393 p.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-86102-5

ECKARDT F.D., BARKER C.H., MEADOWS M.E. (2012) Landscape Inventories and Remote Sensing. Southern African Geomorphology : Recent Trends and New Directions, HOLME P., MEADOWS M., Chapitre 14, pp.373-399
https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/60627/9781920382360.pdf?sequence=1&isAllowed=y

EDWARDS T.R., ARMSTRONG B.J., BIRKETT-REES J., BLACKWOOD A.F., HERRIES A.I.R., PENJO-KAJEWSKI P., PICKERING R., ADAMS J.W. (2019) Combining legacy data with new drone and DGPS mapping to identify the provenance of Plio-Pleistocene fossils from Bolt's Farm, Cradle of Humankind (South Africa) PeerJ 7:e6202
https://doi.org/10.7717/peerj.6202

EDWARDS T., R, PICKERING R., MALLETT T. L., HERRIES A.I.R. (2023) Challenging the antiquity of the Cradle of Humankind, South Africa : Geochronological evidence restricts the age of Eurotomys bolti and Parapapio to less than 2.3 Ma et Waypoint 160, Bolt's Farm. 17 p.
https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2023.103334

EKOSSE G.-I., VINK B. (1998) The Kgwakgwe Manganese Oxides in the Kanye Area, Southeastern Botswana - Evidence for a Shallow Aqueous Palaeo-Environment. Botswana Notes and Records, Volume 30. Pp.147-156
https://journals.co.za/doi/abs/10.10520/AJA052550590_31

EKOSSE G.-I. (2004) Environmental mining impact on soils around the abandined Kgakgewe manganese mine, Botswana. Thesis submitted in fulfillment of the requirements for the Degree Doctor of Philosophy in Soil Mineralogy Discipline of Soil Science School of Agricultural and Environmental Sciences University of the North
Sovenga South Africa. 335 p.
http://ulspace.ul.ac.za/handle/10386/122

ELLIS R. J. (2020) Gcwihaba caves park management plan 2020. Cave development, conservation and management. A further contribution to the development and management of the caves of the Gcwihaba and Koanaka Hills. SpeleoPro (Pty) Ltd. 83 p.

ELLIS R. J. (2025) The Gcwihaba Caves Project – Botswana. Bulletin SASA. Volume 47. Pp.30-38

ELS B.G., Van den BERG W.A., MAYER J., J. (1995) The Black Reef Quartzite Formation in the western Transvaal: sedimentological and economic aspects, and significance for basin evolution. Mineral. Deposit 30, 112-123 (1995)

ENSLIN J.F., BESAANS A.J. (1969) Carte géologique d'Hekpoort, n°2527DC, série 1/50 000

ENSLIN J.F., BESAANS A.J. (1973) Carte géologique de Broederstroom, n° 2527DD, série 1/50 000

ENSLIN J.F., BESAANS A.J. (?) Carte géologique de Brits, n° 2527DB, série 1/50 000

ENSLIN J.F. (1973) Legend to accompany 1 :50 000 geological maps : 2527 (DA,DB, DC, DD) and 2528 (CA, CB, CC, CD). Department of Mines. 1 p.

ERIKSSON K.A. (1971) A Basin Analysis of the Transvaal Sequence in the Potchefstroom Synclinorium, Transvaal and Orange Free State. Thesis, Univ. Witwatersrand, Johannesburg, 79 pp. (unpublished).
https://wiredspace.wits.ac.za/server/api/core/bitstreams/c56f3e97-9a05-414a-acfe-318b26528a51/content

ERIKSSON K.A., (1972) Cyclic sedimentation in the Malmani Dolomite, Potchefstroom synclinorium. Transactions of the Geological Society of South Africa. Volume LXXV. Pp. 85-97
https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA10120750_2731

ERIKSSON K.A. et TRUSWELL J.F. (1974) Stratotypes from the Malmani Subgroup North-West of Johannesburg, South Africa. Transactions of the Geological Society of South Africa 77, pp.311-323
https://hdl.handle.net/10520/AJA10120750_1280
https://journals.co.za/doi/abs/10.10520/AJA10120750_1280

ERIKSSON K.A. et CLENDENIN (1990) A Review of the Transvaal Sequence, South Africa. Journal of African Earth Sciences, Vol.10n No.1/2, pp.101-116
https://doi.org/10.1016/0899-5362(90)90049-K

ERIKSSON P.G. (1988) Sedimentology of the Rooihoogte Formation, Transvaal Sequence. South Africa Journal of Geology. Volume 91, Issue 4, Pp.477-489
https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA10120750_923

ERIKSSON P.G., SCHWEITZER J.K., BOSCH P.J.A., SCHEREIBER U.M., VAN DEVENTER J.L. & HATTON C.J. (1993) The Transvaal Sequence : an overview. Journal of African Earth Sciences, Vol.16, No. ½, pp. 25-51

ERIKSSON P.G., RECZKO B.F.F (1995) The sedimentary and tectonic settings of the Transvaal Supergroup floor rocks to the Bushveld complex. Journal of African Earth Sciences. Vol.21, No.4, pp. 487-504
https://doi.org/10.1016/0899-5362(95)00111-5

ERIKSSON P.G. et ALTERMANN W. (1998) An overview of the geology of the Transvaal Supergroup dolomites (South Africa). Environmental Geology. Volume 36. Pp.179-188
https://doi.org/10.1007/s002540050334

ERIKSSON, P. G., ALTERMANN W., CATUNEAUNU O., VAN DER MERWE R. & BUMBY A.J. (2001) Major influences on the evolution of the 2.67 – 2.1 Ga Transvaal basin, Kaapvaal craton. Sedimentary Geology. Volume 141-142. Pp.205-231
https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00075-6

ERIKSSON P.G., ALTERMANN W., HARTZER F.J. (2006) The Transvaal Supergroup and its precursors. Chapter 10, Geology of South Africa, Edited by JOHNSON M.R., ANHAEUSSER C.R., et THOMAS R.J. Pp.237-260
https://www.researchgate.net/publication/302559973_The_Transvaal_Supergroup_and_its_precursors

EUROPEAN SPACE AGENCY, SINERGISE (2021). Copernicus Global Digital Elevation Model.
https://doi.org/10.5069/G9028PQB

EVDOKIMOV A. et PHAROE L. B. (2021) Indicator role of rare and rare-earth elements of the Northwest manganese ore occurrence (South Africa) in the genetic model of supergene manganese deposits. Journal of Mining Institute. Volume 252. Pp. 814-825
http://dx.doi.org/10.31897/PMI.2021.6.4

FARR T. G., ROSEN P. A., CARO E., CRIPPEN R., DUREN R., HENSLEY S., KOBRICK M., PALLER M., RODRIGUEZ E., ROTH L., SEAL D., SHAFFER S., SHIMADA J., UMLAND J., WERNER M., OSKIN O., BURBANK D. & ALSDORF D. (2007) The Shuttle Radar Topography Mission. Volume 45, Issue 2
https://doi.org/10.1029/2005RG000183

FAO – UNESCO (1977) Soil map of the world. 1 :5 000 000. Volume VI. Africa. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 299 p. + 3 Cartes
https://www.fao.org/3/as357e/as357e.pdf

FERGUSON A. W.F., Mc DONOUGH M.M., THIES M.L., LEWIS P.J. & GABADIRWE M. (2010) Mammals of the Koanaka Hills Region in Ngamiland : A Provisional Checklist. Botswana Notes & Records, Volume 42, 2010. Pp. 163-171
https://www.researchgate.net/publication/233379917_Mammals_of_the_Koanaka_Hills_Region_in_Ngamiland_A_Provisional_Checklist

FFS (Fédération Française de Spéléologie) (2024) *Expedition Human origins in Botswana 2023*. Expédition spéléologique et archéologique française au Botswana. Fédération française de Spéléologique. du 5 au 22 décembre 2023. Commission des relations et expéditions internationales. 90 p.

FFS (Fédération Française de Spéléologie) (2025) *Expedition Homini'Karst in Botswana 2024*. Expédition spéléologique et archéologique française au Botswana. Fédération française de Spéléologique. du 19 au 12 décembre 2025. Commission des relations et expéditions internationales. 123 p.

FIERENS R. (2019) The Oligocene to Quaternary Zambezi Depositional System (Mozambique Channel, Southwest Indan Ocean) : architecture, sedimentation and forcing factors. Earth Sciences. Université de Bretagne occidentale – 361 p.
https://theses.hal.science/tel-02928985

FIMMM G. M. (2020) Limestone Resources in Malawi. 17p.
https://www.academia.edu/43730410/Limestone_Resources_in_Malawi

FRAUENSTEIN F. (2005) Geochemie der Karnonate am Übergang vom Archaikum zum Proterozoikum: Pretoria-Postmasburg Group, Südafrika. Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Naturwissenschaften der Fakultät für Geowissenschaften der Ruhr-Universität Bochum, 216 p.
https://hss-opus.ub.ruhr-uni-bochum.de/opus4/frontdoor/index/index/year/2018/docId/518

FROST S.R. & KULLMER O. (2008) Cercopithecidae from the Pliocene Chiwondo beds, Malawi-rift. GEOBIOS. Pp. 743-749
https://doi.org/10.1016/j.geobios.2008.01.005
FRICK C.; KEYSER N. (1997) Geological map of the republic of South Africa and the kingdoms of Lesotho and Swaziland. Echelle 1/1 000 000. Council of Geoscience, Pretoria, South Africa.

FLORENCE S. (2015) Paléo-hydrologie du lac Tchad: une variabilité attestée sur un temps très long. In : Magrin G. (ed.), Lemoalle Jacques (ed.), Pourtier R. (ed.), Déby Itno I. (pref.), Fabius L. (pref.), Moatti Jean-Paul (postf.), Pourtier N. (cartogr.), Seignobos Christian (ill.). Atlas du lac Tchad. Passages, Numéro spécial 183. Pp.28-30
https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers21-03/010064584.pdf

FORD, D.C. et WILLIAMS P.W., (1989) Karst Geomorphology and Hydrology. First Edition. London, Chapman and Hall, 601 p
https://link.springer.com/book/9789401177801

FORD D. et WILLIAM P. (2007) Karst hydrogeology and geomorphology, Wiley, New York. 562 p.
https://sudartomas.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/11/karsthydrogeologyandgeomorphology1.pdf

FOSTER M. B. J. Geological control of aquifer properties of the Chuniespoort Group in the Klip river valley and Natalspruit basin Transvaal (1988) Master of Science in the Department of Geography, Rhodes University, Grahamstown. 135 p
https://core.ac.uk/download/pdf/145043358.pdf

FOUCAULT A., RAOULT J.F. (2001) Dictionnaire de Géologie, Dunod, 374 p.

FOUCAULT T., VIALLON J.-P. (2015) Aléa karstique et ouvrages sur le projet Gautrain. AFGC. La Technique Française du Béton. 11 p.
https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2015/09/D-06-Gautrain-Zone-Dolomitique.pdf

FOURVEL J.-B., BEAUDET A., DURANTHON F., BRUXELLES S., DANDURAND G., JARRY M., BRUXELLES L. (sous presse) First results of the archaeological and palaeontological survey.

FOURVEL J.-B., BEAUDET A., ZANOLLI C., DANDURAND G., MOIANA M., STRATFORD D., CHADELLE B. BRUXELLES L. (2022) The HOMME project-Human Origins in Mozambique and Malawi Environments: looking for our origin in the Mozambican karst. Karstologia Mémoires, 2022, 18th International Congress of Speleology, 25 (Volume 5. Karst sediment, Palaeontology and Archaeology. Pp.219-222.
https://hal.science/hal-03816522/document

FOURVEL J.-B., THABARD C., DURANTHON F., DANDURAND G., JARRY M., CHADELLE B., LEDIMO O., TSHUKUDU O., BRUXELLES L. (2024) *Hominins in Botswana* : à la recherche de nouveaux berceaux de l'Humanité au Botswana. Bulletin de la SERPE. Société d'études et de recherches préhistoriques Le Eyzies. Année 2024. Volume 73. Pp.55-70.
https://hal.science/hal-04746088

FOURVEL J.-B., THABARD C., PAVIA M., CAMANNI F., DELFINO M., MARCHITELLI D., DURANTHON F., LINCHAMPS P., TSHUKUDU O., DANDURAND G., GENUITE K., BEAUDET A., JARRY M., CHADELLE B., LEDIMO O., , BRUXELLES L. (2026) Discovery of new Quaternary palaeontological localities in Botswana: Gcwihaba and Koanaka hills. Sous presse

FOURVEL J.-B., THACKERAY J. F., BRINK J., O'REGAN H. et BRAGAJ. (2018) Taphonomic interprétations of a new Plio-Pleistocene hominin-bearing assemblage at Kromdraai (Gauteng, South Africa). Quaternary Science Reviews, 190, p.81-97.
https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.04.018

FUREY N. & RACEY P.A. (2016) Conservation Ecology of Cave Bats. Chapitre 15 in Bats in the Anthropocene: Conservation of bats in a changing world. Edition 1. Springer. Editors Voigt Christian, Kingston Tigga. Pp.463-500
https://doi.org/10.1007/978-3-319-25220-9_15

GARNER R. A., RITTER R. C. (1994) Re-survey of Gcwihaba Cave and Exploration of the Aha Sinkhole caves. Botswana Notes and Records, Vol.26, Pp.183-188
https://www.jstor.org/stable/40959193

GARSON M.S. Flow Phenomena in a Limestone on Changalumi Hill, Southern Nyasaland. Cambridge University Press. Geological Magazine, Volume 92. Issue 2. Pp.155-161
https://doi.org/10.1017/S0016756800063445

GARZANTI E., PASTORE G., STONE A., VAINER S., VERMEESCH P., RESENTINI A. (2022) Provenance of Kalahari Sand : Paleoweathering and recycling in a linked fluvial-aeolian system. Earth-Science Reviews, Volume 224. 23 p.
https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103867

GAUDARE L. (2024) Dynamics of the Okavango Rift System (Botswana): unravelling tectonic and hydrological deformation signals using geomorphology, remote sensing, and geodesy. Thèse de doctorat. Université de Rennes. 329 p. https://theses.fr/s297541

GAYNAC J., BESSIN P., POCHAT S., MOURGUES R., SHUMACK (2024) A new workflow for mapping dune features (outlines, crestline and defects) combining deep learning and skeletonization from DEM-derived data. Geomorphology. Volume 463. 15 p. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109369

GENUITE K., DANDURAND G. & BRUXELLES L. (2024). From caves to landscapes: reconstructing the story of Botswana cave systems with 3D mapping and geomorphology. 1 st International conference " Modalities of the Homo-Genus Appearance in Southern African Paleokarsts", Laurent Bruxelles; Philippe Segadika, Dec 2024, Maun, Botswana.

GEOLOGICAL SURVEY (SOUTH AFRICA), WILKINSON K.J. et COETSEE F. (1986) Geological Map of Wes Rand n°2626 1:250 000 Geological Series Department of mineral and energy affairs.

GEOLOGICAL SURVEY (SOUTH AFRICA), COETZEE L.E. et COETSEE F. (1986) Geological Map of East Rand n°2628 1:250 000 Geological Series Department of mineral and energy affairs.

GEOLOGICAL SURVEY (SOUTH AFRICA), HEIL A.C. et COETSEE F. (1981) Geological Map of Rustenberg n°2526 1:250 000 Geological Series Department of mineral and energy affairs.

GEOLOGICAL SURVEY (SOUTH AFRICA), COETSEE F. (1978) Geological Map of Pretoria n°2528 1:250 000 Geological Series Department of mineral and energy affairs.

GEOLOGICAL SURVEY (SOUTH AFRICA), INGRAM B.A. et VAN TONDER D.M. (2010) The Geology of the Broederstroom area. Geological. Explanation : Sheet 2527DD, Scale1 :50 000, Council of Geoscience, South Africa

GEPPERT M., RIEDEL F., GUMMERSBACH V.S., GUTJAHR S., HOELZMANN P., REYES GARZON M.D., SHEMANG E.M. & HARTMANN K. (2021) Late Pleistocene hydrological settings at world heritage Tsodilo Hills (NW Kalahari, Botswana), a site of ancient human occupation. Quaternary Science Advances. Volume 3. 22 p. https://doi.org/10.1016/j.qsa.2021.100022

GIBBON R.J., PICKERING T.R., SUTTON M.B., HEATON J.L., KUMAN K., CLARKE R.J., BRAIN C.K. et GRANGER D.R. (2014) Cosmogenic nuclide burial dating of hominin-bearing Pleistocene cave deposits at Swartkrans, South Africa. Quaternary Geochronology, Volume 24, Pp 10-15
https://doi.org/10.1016/j.quageo.2014.07.004

GRANGER D. E., GIBBON R., J., KUMAN K., CLARKE R., BRUXELLES L., CAFFEE M.W. (2015) New cosmogenic burial ages for Sterkfontein Member 2 Australopithecus and Membre 5 Oldowan. Nature, 522(7554), 85-88.
https://doi.org/10.1038/nature14268

GRANGER D. E., STRATFORD D., BRUXELLES L., GIBBON R., J., CLARKE R., J., KUMAN K. (2022) Cosmogenic nuclide dating of Australopithecus at Sterkfontein, South Africa. PNAS 2022 Vol.119 No.2
https://doi.org/10.1073/pnas.2123516119

GRANT & INGOLD (2015) Bulletin SASA South African Spelaeological Association. Volume 41. 76 p.

GROVE A. (1969) Landforms and climatic change in the Kalahari and Ngamiland. Geogr J 135(2) :191-212
https://doi.org/10.1177/03091333103793

GRUN R., PIKE A., McDermott F., EGGINS S., MORTIMER G., AUBERT M., KINSLEY L., JOANNES-BOYAU R., RUMSEY M., DENYS C., BRINK J., CLARK T. & STRINGER C. (2020) Dating the skull from Broken Hill, Zambia, and its position in human evolution. Nature. Volume 580, Pp.372-375
https://doi.org/10.1038/s41586-020-2165-4

GRINE F.E. (2016) The Late Quaternary Hominins of Africa : the Skeletal Evidence from MIS 6-2.In : JONES S.C. et STEWART B.A. (2016) Africa from MIS 6-2. Population Dynamics and Paleoenvironments. Springer. Chapter 17. Pp.323-382
https://doi.org/10.1007/978-94-017-7520-5_17

GOLDBERG P., BERNA F., CHAZAN M. (2015) Deposition and Diagenesis in the Earlier Stone Age of Wonderwerk Cave, Excavation 1, South Africa. Afr Archaeol Rev(2015) 32. Pp. 613-643
https://doi.org/10.1007/s10437-015-9192-9

GOLDSCHEIDER N., CHEN Z., AULER A.S., BAKALOWICZ M., BRODA S., DREW D., HARTMANN J., JIANG G., MOOSDORF., STEVANOVIC Z. & VENI G. (2020) Global distribution of carbonate rocks and karst water ressources. Hydrogeology Journal. Volume 28, Pp.1661-1677

https://doi.org/10.1007/s10040-020-02139-5

GOMMERY, D., THACKERAY, J.F., SENEGAS, F., POTZE, S., KGASI, L., 2008. The earliest primate (Parapapio sp) from the Cradle of Humankind World Heritage site (Waypoint 160, Bolt's Farm, South Africa). S. Afr. J. Sci. Volume 104, pp. 405-408.
https://www.scielo.org.za/pdf/sajs/v104n9-10/a1810410.pdf

GOMMERY, D., SENEGAS, F., THACKERAY, J.F., 2008b. Plio-Pleistocene fossils from femur dump, Bolt's farm, Cradle of Humankind World Heritage Site. Ann. Transvaal Mus. 45, 6776.
https://hal.science/hal-00838424

GOMMERY D., BADENHORST S., SENEGAS F., POTZE S. & KGASI L. (2012) Minaar's Cave: a Plio-Pleistocene site in the Cradle of Humankind, south Africa: its history, location and fauna – Annals of the ditsong national museum of natural history, volume 2, 2012, pp19-31
https://www.researchgate.net/publication/259779061_Minnaar'_Cave_a_Plio-Pleistocene_site_in_the_Cradle_of_Humankind_South_Africa_its_history_location_and_fauna

GOMMERY D., SENEGAS F., KGASI L., VILAKAZI N., KUHN B., BRINK J., PICKFORD M, HERRIES A. I.R., HANCOX J., SAOS T, SEGALEN L., AUFORT J., THACKERAY J.-F. (2016) Bolt's Farm Cave System dans le Cradle of Humankind (Afrique du Sud) : un exemple d'approche multidisciplinaire dans l'étude des sites à primates fossiles », Revue de primatologie, 33 p.
https://doi.org/10.4000/primatologie.2725

GOODIER S.A.M. (2010) Evolution of the African Tigerfish (Genus Hydrocynus): Phylogeographic insights into drainage evolution. Thesis. 122 p. + Annexes
http://hdl.handle.net/11427/10453

GOODIER S.A.M., COTTERILL F.P.D., O'RYAN C., SKELTON P.H & De WIT M. (2011) Cryptic Diversity of African Tigerfish (Genus Hydrocynus) reveals Palaeogeographic Signatures of Linked Neogene Geotectonic Events. Plos ONE Volume 6. Issue 12. 15 p.
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0028775

GOUDIE A.S. (1983) "Calcrete" *in* GOUDIE A.S. & PYE K. (eds) Chemical sediments and geomorphology, Academie Press, London, Pp.93-132

GOUDIE A. & VILES H. (2015) Landscapes and Landforms of Namibia. World Geomorphological Landscapes. Springer. 173 p.
https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-8020-9

GTK CONSORTIUM (2006) Noticia Explicativa da Carta Geologica 1 :250 000 Direcçao Nacional de Geologia Volume 1, Maputo

GUILLOCHEAU F. (2016) Les surfaces d'aplanissements enregistreurs de la dynamique du manteau. Résumé d'une communication dans un congrès. 1 p.
https://insu.hal.science/insu-01388125/

GUILLOCHEAU F., BRAUN J. et TopoAfrica Working group (2013a) Relief evolution of Africa since 300 Ma : outcomes of the TopoAfrica project. Geophysical Research Abstracts, Vol.15, 1 p.

GUILLOCHEAU F., DAUTEUIL O. (2012) Post-rift-uplift, paleorelief and sedimentary fluxes : the case example of the African margin of the south Atlantic. Résumé. 1 p.

GUILLOCHEAU F., ROBIN C., CALVES G, BABY G. (2013b) Cenozoic siliciclastic sediment budget at continent-scale, Africa. Conférence dans un congrés, Geophysical Research Abstracts, 1p.
https://insu.hal.science/insu-00853376

GUILLOCHEAU F., ROUBY D., ROBIN C., HELM C., ROLLAN C., LE CARLIER DE VESLUD C. et BRAUNZ J. (2012) Quantification and causes of the terrigeneous sediment budget at the scale of a continental margin: A newmethod applied to the Namibia - South Africa margin. Basin Research (2012) Vol. 24, Pp.3-30
https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2011.00511.x

GUILLOCHEAU F., SIMON B., BABY G., BESSIN P., ROBIN C., DAUTEUIL O. (2018) Planation surfaces as a record of mantle dynamics : The case example of Africa. Gondwana Research, Vol.53, Pp.82-98
https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.05.015

GUNN J.(ed.) (2004) Encyclopedia of Caves and Karst Science. Fitzroy Dearborn. Taylor and Francis Group 1940 p.
https://sudartomas.files.wordpress.com/2012/11/encyclopediaof_cavesandkarstscience.pdf

GUNNELL Y. (1998) Dénudation et longue durée (10-100 Ma) : Le cas des montagnes de marge passive du pourtour des océans atlantique et indo-pacifique. *(Long term denudation at passive margins)*. Bulletin de l'Association de géographes français, 75e année, 1998-1 (mars). L'ex-URSS. Les temps de l'érosion. pp. 133-143;
http://www.persee.fr/doc/bagf_0004-5322_1998_num_75_1_2027

GUTH P.L. & GEOFFROY T.M. (2021) LIDAR point cloud and ICESat-2 evaluation of 1 second global digital elevation models : Copernicus wins. Transactions in GIS. Volume 25. Issue 5. pp. 2245-2261
https://doi.org/10.1111/tgis.12825

GUTZMER J., DU PLOOY A.P., BEUKES N.J. (2012) Timing of supergene enrichment of low-grade sedimentary manganese ores in the Kalahari Manganese Field, South Africa. Ore Geology Reviews n°47, pp.136-153
https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.04.003

GUTZMER, J., BEUKES N. J. (1994) Karst control of the Ryedale Fe–Mn deposit in the Palaeozoic Karoo Supergroup, Western Transvaal, South Africa: Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft, Beiheft zum, European Journal of Mineralogy, 6, p. 33
https://inami.gov.mz/index.php/info-geologica

GUTZMER, J., BEUKES N. J. (1998) High-grade manganese ores in the Kalahari manganese field: Characterisation and dating of ore-forming events. Final report. Rand Afrikaans University, Johannesburg, 221p.
http://doi.org/10.13140/RG.2.2.11342.66887

GUTZMER J., SCHAEFER M.O., BEUKES N.J. (2002) Red Bed-Hosted Oncolitic Manganese Ore of the Paleoproterozoic Soutpansberg Group, Bronkhortfontein, South Africa. Economic Geology, Bulletin of the society of economic geologists, Vol.97 No.6, pp.1151-1166
https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.6.1151

GUTZMER J., BEUKES N.J. NETSHIOZWI S. & SZABO A. (2001) The genesis of world-class, high-grade iron ore deposits – the South African experience. Chapter in Book Mineral Deposits at the Beginning of the 21st Century. Pp. 1079-1083
https://doi.org/10.1201/9781003077503-277 ; lien

HADDON I.G. (2005) The Sub-Kalahari Geology and Tectonic Evolution of the Kalahari Basin, Southern Africa. A thesis submitted to the Faculty of Science, University of the Witwatersrand, Johannesburg, in
fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. 343 p. + 99 Figures
https://wiredspace.wits.ac.za/bitstream/handle/10539/193/Haddonthesistext.pdf

HADDON I.G. Mc CARTHY T.S. (2005) The Mesozoic-Cenozoic interior sag basins of Central Africa : The Late-Cretaceous-Cenozoic Kalahari and Okavango basins. Journal of African Earth Sciences Volume 43. pp.316-333
https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.07.008

HARTZER F.J. (1989) Stratigraphy, structure, and tectonic evolution of the Crocodile River Fragment. South African Journal of Geology. Volume 92. Issue 2. Pp.110-124
https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA10120750_545

HANON R., PEAN S., PATOU-MATHIS M., PRAT S., RECTOR A. & STEININGER C. (2022) Fossil Bovidae from the Hominini-bearing site of Cooper's D (Bloubank Valley, South Africa): implications for Paranthropus robustus Broom, 1938 and early Homo Linnaeus, 1758 habitat preferences. Comptes rendus Paleovol 21 (21) Pp.431-450
https://sciencepress.mnhn.fr/sites/default/files/articles/pdf/comptes-rendus-palevol2022v21a21.pdf
https://dx.doi.org/10.5852/cr-palevol2022v21a21

HAWKS J., ELLIOTT M., SCHMID P., CHURCHILL S.E., De RUITER D.J., ROBERTS E.M., HULBERT-WOLF H., GARVIN H.M., WILLIAMS S.A., DELEZENE L.K., FEUERRIEGEL E.M., RANDOLPH-QUINNEY P., KIVELL T.L., LAIRD M.F., TAWANE G., DeSILVA J.M., BAILEY S.E., BROPHY J.K., MEYER M.R., SKINNER M.M., TOCHERI M.W. VANSICKLE C., WALKER C.S., CAMPBELL T.L., KUHN B., KRUGER A., TUCKER S., GURTOV A., HLOPHE N., HUNTER R., MORRIS H., PEIXOTTO B., RAMAPELA M., Van ROOYEN D., TSIKOANE M., BOSHOFF P., DIRKS P.H.G.M. et BERGER L. (2017) New fossil remains of Homo naledi from the Lesedi Chamber, South Africa. Research Article. Evolutionary Biology. 63 p.
https://doi.org/10.7554/eLife.24232

HEINE K. et GEYH M.A. (1983) Radiocarbon dating of speleothems from the Rössing cave, Namib desert, and palaeoclimatic implications. SASQUA International Symposium Swaziland 29 August – 2 September 1983. Pp. 465-470
https://epub.uni-regensburg.de/9710/1/ubr04490_ocr.pdf

HEINE K. (1990) Some observations concerning the age of the dunes in the western Kalahari and palaeoclimatic implications. Paleoecology of Africa, Volume 21, Pp.161-178
https://epub.uni-regensburg.de/9684/1/ubr04513_ocr.pdf

HEINE K. (1992) On the ages of humid Late Quaternary phases in southern African ared areas (Namibia, Botswana). Palaeoecology of Africa, Volume 23, Pp-149-164
https://www.researchgate.net/publication/29867261_On_the_ages_of_humid_Late_Quaternary_phases_in_southern_African_arid_areas_Namibia_Botswana

HELGREN D. M. (1979) Rivers of Diamonds : an alluvial history of the lower Vaal basin, South Africa. Univ.of Chicago, Dept. Of geogr., Research Paper 185, 1979, 389 p.

HELGREN D. M. & BROOKS A. S. (1983) Geoarchaeology at Gi, a Middle Stone Age and Later Stone Age Site in the Northwest Kalahari. Journal of Archaeological Science, 10, Pp.181-197
https://doi.org/10.1016/0305-4403(83)90051-1

HERRIES A.I.R., CURNOE D., ADAMS J.W. (2009) A multi-disciplinary seriation of early Homo and Paranthropus bearing palaeocaves in southern Africa. Quaternary International Volume 202, pp.14-28.
http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2008.05.017

HERRIES A.I.R., PICKERING R., ADAMS J.W., CURNOE D., WARR G., LATHAM A. G. & SHAW J. (2013a) A Multi-Disciplinary Perspective on the Age of Australopithecus in Souther Africa *in* Chapitre 3 *in* Reed K.E.; FLEAGLE J.G. & LEAKEY R.E. (eds.) (2013) The Paleobiology of Australopithecus, Vertebrate Paleobiology and Paleoanthropology, Springer
https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-5919-0

HERRIES A. I. R. et SHAW, J. (2011) Palaeomagnetic analysis of the Sterkfontein palaeocave deposits:Implications for the age of the hominin fossils and stone tool industries. Journal of Human Evolution, 60, p. 523-539.
https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2010.09.001

HERRIES A. I. R., ADAMS J.W. (2013b) Clarifying the context, dating and age range of the Gondolin hominins and Paranthropus in South Africa. Journal of Human Evolution Volume 65, pp.676-681
https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2013.06.007

HERRIES A.I.R., ADAMS J.W., JOANNES-BOYAU R., ARMSTRONG B., BAKER S., BLACKWOOD A.F., BOSCHIAN G., CARUANA M.V., PENZO-KAJEWSKI P., MURSZEWSKI, ROVINSKY D.S. (2019) Integrating palaeocaves into palaeolandscapes: An analysis of cave levels and karstification history across the Gauteng Malmani dolomite, South Africa. Quaternary Science Reviews 220 (2019) pp.310-334
https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.02.007

HERRIES A.I.R., BOSCHIAN G., MURZSEWSKI A., MALLETT T., ARMSTRONG B. & BAKER S. (2023) Geoarchaeology of Drimolen palaeocave. Encyclopedia of Geoarchaeology. Springer International Publishing. 6 p.
http://doi.org/10.1007/978-3-030-44600-0_218-1

HUNTSMAN-MAPILA P. (2006) Bassins de rift à des stades précoces de leur développement: l'exemple du bassin de Makgadikgadi-Okavango-Zambezi, Botswana et du bassin Sud-Tanganyika (Tanzanie et Zambie). Composition géochimique des sédiments: traceurs des changements climatiques et tectoniques. Géochimie. Université de Bretagne occidentale – Brest. 257 p.
https://theses.hal.science/tel-00161196

HUTCHINSON D., KINNAIRD J.A. (2013) Complex mutlistage genesis for the Ni-Cu-PGE mineralisation in the southern region of the Platreef, Bushveld Complex, South Africa. Applied Earth Science. Transactions of the Instutions of Mining and Metallurgy: Section B. Volume 114. Issue 4. 17 p.
https://doi.org/10.1179/037174505X82125

HOBBS P.J., BUTLER M., COETZEE H., JAMISON A., LEYLAND R., VENTER J. (2011) Situation assessment of the surface water and groundwater environments in the Cradle of Humankind World Heritage Site. Report prepared for the Management Authority. Department of Economic Development. Gauteng Province. South Africa. 425 p.
https://www.researchgate.net/profile/Philip-Hobbs-2/publication/263067066_Situation_assessment_of_the_surface_water_and_groundwater_resource_environments_in_the_Cradle_of_Humankind_World_Heritage_Site/links/58da0acbaca272d801d5099b/Situation-assessment-of-the-surface-water-and-groundwater-resource-environments-in-the-Cradle-of-Humankind-World-Heritage-Site.pdf

HOBBS P.J., VAN WYK E., PIENAAR H., XU Y. (2022) Anatomy of a South African Karst Hydrosystem: The Hydrology and Hydrogeology of the Cradle of Humankind World Heritage Site. Cave and Karst Systems of the World. Springer.354 p.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-95829-9

HOLLAND M. & COBBIN J. (2009) Geohydrology Guideline Development : Implementation of Dolomite Guideline – Phase 1. Project Number : 14/14/5/2. Funding, Technical Involvement and Coordination by : Department of Water Affairs, Directorate : Water Resource Planning systems. 22 p.
https://www.dws.gov.za/ghreport/reports/GH4117.pdf

HOLLAND M. (2009) (Carte) Hydrogeology Map of Ghaap Plateau Dolomite Unit & Gauteng and Nord West Dolomite Units, Activity 19 of dolomite project Nr. 14/11/5/2
https://www.dws.gov.za/Groundwater/DolomiteP.aspx
https://www.dws.gov.za/Groundwater/Documents/Dolomite/National%20Map%20Final_200dpi.png

HOLLAND M. (2009) (Carte) Klipriver/Natalspruit Dolomite Compartments
https://www.dws.gov.za/Groundwater/Documents/Dolomite/A1%20Klipriver_Natalspruit%20Final_200dpi.png

HOLLAND M. et WIEGMANS F.E. (2009) (Carte) West Rand Dolomite Compartments
https://www.dws.gov.za/Groundwater/Documents/Dolomite/A1%20Tarlton%20Final_200dpi.png

HOLLAND M. et WIEGMANS F.E. (2009) (Carte) North West Dolomite Management Units
https://www.dws.gov.za/Groundwater/Documents/Dolomite/A1%20North%20West%20Final_200dpi.png

HOLLAND M. et WIEGMANS F.E. (2009) (Carte) Tshwane / Ekurhuleni Dolomite Compartments
https://www.dws.gov.za/Groundwater/Documents/Dolomite/A1%20Tshwane%20dolomite%20Final_200dpi.png

HOLLAND, M. (2011). Desktop Geohydrological Assessment of the Steenkoppies Dolomite. Compartment. DWAF Project No. 2006-373. Water Geosciences Consulting, Pretoria.

HOLLINGSWORTH E. (2006) Karst Regions of the World (KROW) : global Karst datasets and maps to advance the protection of Karst species and habitats worldwide. A thesis submitted in partial fulfillment Of the requirements for the degree of Master of Science in Geology By Emily Hollingsworth University of Arkansas Bachelor of Science in Geology. KIP Theses and Dissertations 15.
https://digitalcommons.usf.edu/kip_etd/15

HOLMGREN K., LAURITZEN S.-E., POSSNERT G. (1994) $^{230}Th/^{234}U$ and ^{14}C dating of a late Pleistocene stalagmite in Lobatse II Cave, Botswana. Pp.111-119
https://doi.org/10.1016/0277-3791(94)90036-1

HOLMGREN K., KARLEN W., SHAW P. (1995) Paleoclimatic Significance of the Stable Isotopic Composition and Petrology of a Late Pleistocene Stalagmite from Botswana. Quaternary Research 1995, Volume 43. Pp. 320–328
https://doi.org/10.1006/qres.1995.1038

HOLMGREN K., SHAW P. (1999) A late Pleistocene palaeoenvironmental record from Lobatse II Cave, botswana Note & Records, Vol.31, pp.73-81
https://www.jstor.org/stable/40980239

HOLT E., DIRKS P., PLACZEK C. & BERGER L. (2016) The stable isotope setting of Australopithecus sediba at Malapa, South Africa. 9 p.
http://doi.org/10.17159/sajs.2016/20150351

HOMEWOOD P.W., MAURIAUD P. et LAFONT F.(2000) Best practices in sequence stratigraphy for explorationsits and reservoir engineers. Vade-mecum de stratigraphie séquentielle : pour géologues, géophysiciens et ingénieurs réservoir. With the participation of Dumay J., Sorriaux P., and the Predictive Stratigraphy Network of Elf EP. TotalFinal Elf. 81 p.
https://www.sudoc.fr/060243929

HOPLEY P.J., READE H., PARRISH R., De KOCK M., ADAMS J.W. (2019) Speleothem evidence for C3 dominated vegetation during the Late Miocene (Messinian) of South Africa Review of Palaeobotany and Palynology, Volume 264, pp.75-89.
https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2019.02.006

HOPLEY P.J., HERRIES A.I.R., EDWARDS BAKER S., KUHN B.F., MENTER G. C. (2013) Brief Communication: Beyond the south African cave paradigm – *Australopithecus africanus* from Plio-Pleistocene paleosol deposits at Taung. American Journal of physical anthropology. 9p.
http://doi.org/10.1002/ajpa.22272

(IH) Institute of Hydrology (1986) Ramotswa well field S.E. Botswana. Digital mode study and storage estimates. 47 p.
https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/14892/2/N014892CR.pdf

ISSACS S.M., STEPHENS M. (2022) Geoconservation in Botswana, Chapter 21, in Landscapes and Landforms of Botswana, F.D.Eckardt World Geomorphogical Landscapes Springer Nature Switzerland AG 2022, 361-375 https://doi.org/10.1007/978-3-030-86102-5_21

INGRAM B.A. et VAN TONDER D.M. (2011) The Geology of the Broederstroom area. Geological. Explanation : Sheet 2527DD, Scale 1 :50 000, Council of Geoscience, South Africa. 133 p. https://maps.geoscience.org.za/download/config_geo_50k_explmaps.php?id=2

IWMI (International Water Management Institute) (2018) Hydrogeological Modelling for Ramotswa Transboundary Aquifer Area. 67 p. http://conjunctivecooperation.iwmi.org/wp-content/uploads/sites/38/2019/02/Ramotswa-HydrogeologicalModelling-2018.pdf

JANSEN H. (1977) The Geology of the country around Pretoria. An explanation of sheets 2527DA, DB, DC, DD and 2528CA, CB, CC, CD. Department of Mines Geological Survey. 143 p. https://maps.geoscience.org.za/download/config_geo_50k_explmaps.php?id=17

JUNGSLAGER E.H.A. (1999) Petroleum habitats of the Atlantic margin of South Africa In: CAMERON, N. R., BATE, R. H. & CLURE, V. S. (eds) The Oil and Gas Habitats of the South Atlantic. Geological Society, London, Special Publications, Vol.153, Pp.153-168. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.153.01.10

JOHNSON M.R. et WOLMARANS L.G. (2008). *Chronostratigraphic map of the Republic of South Africa and the Kingdoms of Lesotho and Swaziland*. Echelle 1 / 2 000 000. *Council for Geoscience. Pretoria. South Africa.*

JONES C.R. (1982) The Kalahari of southern Africa. In: The geological story of the world's deserts (edited by Smiley, T.L.). Striae, 17, Uppsala, Pp.20-34

JONES A., BREUNING-MADSEN H., BROSSARD M., DAMPHA A., DECKERS J., DEWITTE O., GALLALI T., HALLETT S., JONES R., KILASARA M., LE ROUX P., MICHELI E., MONTANARELLA L., SPAARGAREN O., THIOMBIANO L., VAN RANST E., YEMEFACK M., ZOUGMORE R., (eds.) (2013) Soil Atlas of Africa. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 176 pp
https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public_path/shared_folder/Atlases/JRC_africa_atlas_maps_FR.pdf
https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/soil-map-soil-atlas-africa

JONES S.C. & STEWART B.A. (2016) Africa from MIS 6-2. Population Dynamics and Paleoenvironments. Springer. 424 p.
https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-7520-5

JOUVES J. (2018) Origine, caractérisation et distribution prédictive des structures karstiques. De la karstologie aux modèles numériques 3D. Géologie appliquée. AMU-Aix Marseille Université. Thèse de Doctorats. 256 p.
https://www.karsteau.fr/telechargement/These_J_Jouves_Dardennes_2018.pdf

KAYSER K. (1986) Geomorphologie – Südafrika (Moçambique, Swaziland, Republik Südafrika). Afrika Kartenwerk. Gebrüder Borntraeger. Berlin Stuttgart. Serie S Beiheft S2. p.105

KENYON P.A. (2015) Botswana Gcwihaba Hills. SASA Bulletin. Volume 41. Pp.48-53

KEY R.M. & AYRES N. (2000) The 1998 edition of the National Geological Map of Botswana. Journal of African Earth Sciences, Volume 30, Number 3, Pp.427-451
https://doi.org/10.1016/S0899-5362(00)00030-0

KEYSER A.W. & MARTINI J.E.J. (1989) Bakervillegrot. Bulletin of the South African Speleological Association (SASA), n°30, P.49-53

KEYSER A.W. (1991) The palaeontology of Haasgat: a preliminary account. Palaeontologia Africana 28: 29-33
https://core.ac.uk/download/pdf/39674773.pdf
https://wiredspace.wits.ac.za/bitstreams/92ab1218-35e5-4642-b9ba-1112ba7d366d/download

KEYSER A.W. & MARTINI, J.E.J. (1991) Haasgat: a new Plio-Pleistocene fossil occurrence, Palaeoecology of Africa, vol.21, pp.19-129.

KEYSER A.W. (2000) The Drimolen skull: the most complete australopithecine cranium and mandible to date. South African Journal of Science 96, pp.189-193

KEYSER A.W., MENTER C.G., MOGGI-CECCHI J., PICKERING T.R., BERGER L.R. (2000) Drimolen: a new hominid-bearing site in Gauteng, South Africa. South African Journal of Science 96, pp.193-197
https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA00382353_8903

KINABO B. D., HOGAN J. P., ATELWANA E. A., ABDELSALAM, M. G., & MODISI M. P. (2008). Fault growth and propagation during incipient continental rifting: Insights from a combined aeromagnetic and shuttle radar topography mission digital elevation model investigation of the Okavango rift zone, northwest Botswana. Tectonics, 27(3), TC3013. https://doi.org/10.1029/2007tc002154

KING L.C. (1951) The geology of the Makapan and other caves. Transactions of the Royal Society of South Africa. Volume 33, Issue 1. Pp.121-151.
https://doi.org/10.1080/00359195109519881

KING L.C. (1954) La géomorphologie de l'Afrique du Sud recherches et résultats. Annales de géographie année 1954, 336, p113-129
https://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1954_num_63_336_14383

KING G.M. (2003) An Explanation of the 1:500 000 General Hydrogeological Map. Vryheid 2730. Department : Water Affairs and Forestry. Republic of South Africa. 53 p.
https://www.dws.gov.za/ghreport/reports/GH4365.pdf

KINNAIRD J.A., HUTCHINSON D., SCHURMANN L., NEX P.A.M. & DE LANGE R. (2005) Petrology and mineralization of the southern Platreef: norther limb of the Bushveld Complex, south Africa. Mineralium Deposita (2005) 40: pp.576-597
https://doi.org/10.1007/s00126-005-0023-9

KLIMCHOUK A., PALMER A. N., DE WAELE J., AULER A.S., AUDRA P. (2017) Hypogene Karst Regions and Caves of the World. Springer. 911 p.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-53348-3

KULLMER O., SANDROCK O., ABEL R., SCHRENK F., BROMAGE T.G. & JUWAYEYI Y.M. (1999) The first Paranthropus from the Malawi Rift. Journal of Human Evolution. Volume 37, Issue 1, Pp.121-127
https://doi.org/10.1006/jhev.1999.0308

KUMAN K., GRANGER D.E., GIBBON R.J., PICKERING T.R., CARUANA M.V., BRUXELLES L., CLARKE R.J., HEATON J.L., STRATFORD D., BRAIN C.K. (2021) A new absolute date from Swartkrans Cave for the oldest occurrences of Paranthropus robustus and Oldowan stone tools in South Africa. Journal of Human Evolution, 2021, Vol. 156. 12 p. https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2021.103000

KUMAN K. (1984) Middle Stone Age humans in southern Africa; open air sites at Florisbad and Gi. Anthro Quest (The L.S.B. Leakey Foundation News) Number 30. Pp. 14-15 https://leakeyfoundation.org/wp-content/uploads/1984/12/AnthroQuest-Vol.-1-No.-30-Winter-1984.pdf

KLEINHANS I. (2002) A critical appraisal of regional geotechnical mapping in South Africa, Magister Scientiae in Engineering and Environmental Geology in the Faculty of Natural and Agricultural Sciences University of Pretoria, p.146 http://hdl.handle.net/2263/27185

KLEINHANS I. (2017) Rehabilitation of sinkholes and subsidences on dolomitic land, Ekurhuleni metropolitan municipal area of jurisdiction, Gauteng, South Africa Submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Natural and Geology in the Faculty of Natural and Agricultural Sciences University of Pretoria, 212 p. + Annexes. http://hdl.handle.net/2263/63306

LACRUZ R.S., BRINK J.S., HANCOX P.J., SKINNER A.R., HERRIES A., SCHMID P., BERGER L.R. (2002) Palaeontology and geological context of a middle pleistocene faunal assemblage from the Gladysvale cave, South Africa. Palaeonto. Afr., 38, pp.99-114.

LAGEAT Y. (1989) Le Relief du Bushveld, une géomorphologie des roches basiques et ultrabasiques. Fascicule 30 Nouvelle série. Faculté des Lettres et Sciences humaine de l'Université Blaise-Pascal. 591 p.

LANCASTER I.N. 1976 The pans of the southern Kalahari, Botswana. Fitzwilliam College. Submitted on accordance with the regulations for the degree of Doctor of Philosophy University of Cambridge. 209 p. https://www.academia.edu/111248720/The_Pans_of_the_Southern_Kalahari_Botswana

LANCASTER I.N. 1978 The pans of the southern Kalahari, Botswana. The Geographical Journal, Vol.144, No°1, pp.81-98
https://www.jstor.org/stable/634651 •https://doi.org/10.2307/634651

LAUMANNS M. (1998) Mozambique 1998: Report on the European Speleological Project "Cheringoma 1998". *Berliner Höhlenkundliche Berichte*, 2,p.1-75

LAUMANNS M. (2001) Tanzania 1994-2000. Report on the international speleological projects in the Matumbi Hills (Kilwa district), Tanga an Zanzibar. *Berliner Höhlenkundliche Berichte*, Inhalt Band 1. ISSN1617-8572 14 p.

LAUMANNS M., SCHMASSMAN S. & SCHMASSMANN-ADRIAN H. (2007) The caves of Rwanda. 2eme edition. Report on the international speleological projects in the Matumbi Hills (Kilwa district), Tanga an Zanzibar. *Berliner Höhlenkundliche Berichte*, Band 32. ISSN1617-8572 145 p. + Plans

LAUMANNS M. (2017a) Atlas of the great caves and the karst of africa (3 rd edition) Part1: Introduction and Algeria to Madagascar. *Berliner Höhlenkundliche Berichte*, Inhalt Band 68. 184p.

LAUMANNS M. (2017b) Atlas of the great caves and the karst of africa (3 rd edition) Part2: Malawi to Zimbabwe and General references. *Berliner Höhlenkundliche Berichte*, Inhalt Band 68-69. 362p.

LAUMANNS M. (2017c) Mozambique 1998, 1999 and 2015 Expeditions to the Cheringoma Plateau, the Rio Buzi, and to Buchane. *Berliner Höhlenkundliche Berichte*, Inhalt Band 71. 124p.

LAUMANNS M., SCHMASSMANN S., SCHMASSMANN-ADRIAN H. (2001) The Caves of Rwanda. Les grottes du Rwanda. *Berliner Höhlenkundliche Berichte*, Inhalt Band 23.2ème edition. ISSN1617-8572. 134 p. + annexes

LATHAM A.G., HERRIES A.I.R. The Formation and Sedimentary Infilling of the Cave of Hearts and Historic Cave Complex, Makapansgat, South Africa (2004) Geoarchaeology: An International Journal, Vol. 19, n°4, Pp. 323-342
https://doi.org/10.1002/gea.10122

LEECE A.B., KEGLEY A.D.T., LACRUZ R.S., HERRIES A.I.R, HEMINGWAY J., KGASI L., POTZE S., ADAMS J.W. (2016) The first hominin from the early Pleistocene paleocave of Haasgat, South Africa
https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA00411752_69

LE GALL B., TSHOSO G., JOURDAN F., FERAUD G., BERTRAND H., TIERCELIN J.J., KAMPUNZU A.B., MODISI M.P., DYMENT J. & MAIA M. (2002) ^{40} Ar/^{39}Ar geochronology and structural data from the giant Okavango and related mafic dyke swarms, Karoo igneous province, northern Botswana. Earth and Planetary Science Letters. Volume 202. Issue 3-4. Pp.595-606
https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00763-X

LE PICHON (1968) Sea Floor Spreading and Continental Drift. Journal of Geophysical Research, 73, pp.3661-3697

LEAKEY, R. E. (1974). "Further evidence of lower Pleistocene hominids from East Rudolf, North Kenya, 1973." Nature, 248(5442), 653-656.

LEHMANN J., MASTER S., RANKIN W., MILANI L., A.KINNAIRD J., V.NAYDENOV K., KUMAR M. (2015) Regional aeromagnetic and stratigraphic correlations of the Kalahari Copperbelt in Namibie and Botswana, Ore Geology Review – p.169 -p.190
https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.05.009

LENHARDT N, ALTERMAN W., HUMBERT F., de KNOCK M. (2020a) Lithostratigraphy of the Palaeoproterozoic Hekpoort Formation (Pretoria Group, Transvaal Supergroup), South Africa. Geological Society of South Africa. South African Journal of Geology. Volume 123. Pp.655-668.
https://doi.org/10.25131/sajg.123.0043

LENHARDT N, BLEEKER W., NGWA C.N., AUCAMP T. (2020b) Shallow marine basaltic volcanism of the Machadodorp Member (Silverton Formation, Pretoria Group), Transvaal Basin, South Africa — An example of Paleoproterozoic explosive intraplate volcanic activity in an epeiric embayment. Precambrian Research. Volume 338. 24 p.
https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105580

LEROUX M. (1996) La dynamique du temps et du climat. Masson. 310 p.

LESCUYER J.-L. (2005) Projet Réseau SIGAfrique. Rapport final BRGM/RP-54328-FR, 185 p., 11 fig., 3 tabl., 16 ann.
https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-54328-FR.pdf

LINCHAMPS P., STOETZEL E., CORNETTE R., DENYS C., HANON R., MARINGA N., MATTEHW T. & STEININGER C (2023) Fossil micromammals and the palaeoenvironments of the Paranthropus robustus site of Cooper's Cave. Historical Biology. Volume 36. Issue 5 Pp. 905-920
https://doi.org/10.1080/08912963.2023.2196677

LISTER L.A. (1967) Geomorphology/ Erosion surfaces in Malawi. Records of the geological survey of Malawi. Volume VII. Published by the government printer. Zomba. Malawi. Reprinted from Rec. Geol. Surv. Malawi 7, 1965(1967), Pp.15-28
https://resources.bgs.ac.uk/sadcreports/malawi1965listererosionsurfaces.pdf

LISTER L.A. (1987) The Erosion Surfaces of Zimbabwe, Geological Survey, Bulletin N°90, 163 p.
https://edepot.wur.nl/493616

LINOL B. (2013) Sedimentology and sequence stratigraphy of the Congo and Kalahari basins of Southcentral Africa and their evolution during the formation and break-up of West Gondwana. Submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor in Geology in the Faculty of Sciences at the Nelson Mandela Metropolitan University. Promoter/Supervisor: Prof M. de Wit. Co-promoter/Co-supervisor: Prof F. Guillocheau. 375 p.
http://hdl.handle.net/10948/d1012148
http://vital.seals.ac.za:8080/vital/access/services/Download/vital:10655/SOURCEPDF

LINOL B., De WIT M.J., GUILLOCHEAU F., De WIT M.C.J, ANKA Z., COLIN J.-P. (2015) Formation and Collapse of the Kalahari Duricrust ["African Surface"] Across the Congo Basin, with Implications for Changes in rates of Cenozoic Off-Shore Sedimentation. Chapitre 10 in M.J. de WIT *et al.* (eds.), Geology and Resource Potential of the Congo Basin, Regional Geology Reviews Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-29482-2_10

LINOL B., De WIT M.J. (Editeur) (2016) Origin and Evolution of the Cape Mountains and Karoo Basin. . Regional Geology Reviews. Edition Springer. 193 p.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-40859-0

LLOYD A. (2016) The Coal deposits of Mozambique. *Drawing on FFF presentations from* : John Hancox, Lopo Vasconceles & Gavin Andrews. *Presentation prepared for Mozambique Energy conference and presented in a slimmed down view at the IGC35 in Cape Town.* CCIC. 86 p.
https://fr.slideshare.net/slideshow/mozambique-coal-2016geology/65812113
Lien linkedin

LOMBART M. & CHURCHILL S. (2022) revisiting Middle Stone Age hunting at Gi, botswana: a tip cross-sectional area study. Southern African Field Archaeology. Volume 17. 15 p.
https://doi.org/10.36615/safa.1.1138.2022

MACHACHA T.P. (1997) The Pre-Kalahari Geological Map of the Republic of Botswana. 1/1 500 000. Geological Survey Department, Lobatse. Geology compiled by KEY R.M.
https://www.bgi.org.bw/sites/default/files/Botswana%20Gelogical%20Map%20Prekalahari%201998.pdf

MAGOWE M. (2009) Overview of groundwater potential phase 2/3 ranches in Ngamiland. Final report, august 2009. 36 p.
https://library.bgi.org.bw/ActiveConnect/DesktopModules/ViewDocument.aspx?ContentIndex=3106

MAIRE R. et BRUXELLES L. (2018) Les chutes Victoria ou "la fumée qui gronde". Dynamiques Environnements, ISSN électronique : 2607.2653, 28/05/2018. Pp.199-200. 2 p.
https://dei.hypotheses.org/723

MAKHUBELA T.V., KRAMERS J.D., BELYANIN G.G., DIRKS P.H.G.M ROBERTS E.M. (2017) Proterozoic 40Ar/39 Ar ages from cave deposits of the Malapa, Sterkfontein and Dinaledi fossil sites, Cradle of Humankind, South Africa Journal of Geology Vol.120.1 pp.21-44.
https://doi.org/10.25131/gssajg.120.1.21

MAPEO R.B.M., RAMOKATE L.V., ARMSTRONG R.A., KAMPUNZU A.B. (2004) UPb zircon age of the upper Palapye group (Botswana) and regional implications. Journal of African Earth Sciences 40 (2004) Pp.1 – 16
http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2004.08.001

MARAIS J.C.E. (1990) The Caves at Gam, Namibia. Bulletin of the South African Speleological Association. Volume 31. P.93-95

MARGARET AVERY D., (2019) A Fossil History of Southern African Land Mammals, Cambridge University Press

MARKER M.E. (1970) Some Problems of a Karst Area in the Eastern Transvaal, South Africa, Transactions of the Institute of British Geographers, No. 50, pp.73-85

MARSHALL L. (1976) The !Kung of Nyae Nyae, Harvard University Press. 433 p.
https://www.hup.harvard.edu/books/9780873659086

MARSHALL T.R., NORTON G.A (2009) The Nature of the alluvial diamond deposits of the Ventersdorp district, Northwest Province South Africa Geological Society of South Africa, pp-109-124
https://doi.org/10.2113/gssajg.112.2.109

MARTIN D. McB., CLENDENIN C.W., KRAPEZ B et MC NAUGHTON N.J. (1998) Tectonic and geochronological constraints on late Archaean and Palaeoproterozoic stratigraphic correlation within and between the Kaapvaal and Pilbara Cratons. Journal of the Geologival Society, Volume 155, pp. 311-322
https://doi.org/10.1144/gsjgs.155.2.0311

MARTINEZ I. & BRUCHS J.M. (2009). Tsodilo Resources Pty Limited uses GIS techniques for base metal exploration and kimberlite targeting in NW Ngamiland (Botswana) – a case study exhibiting the potential for 3-D visualization of aeromagnetic terrain data and improved feature extraction based on ERDAS IMAGINE®, ER Mapper®, IMAGINE Virtual GIS® and ArcView® software
https://tsodiloresources.com/i/pdf/GISarticleIMJMB42709.pdf

MARTINI J.E.J. (1976a) The Fluorite Deposits in the Dolomite Series of the Marico District, Transvaal, South Africa. Economic Geology (1976) 71(3) : 625-635
https://doi.org/10.2113/gsecongeo.71.3.625

MARTINI J.E.J. (1976b) Bulletin SASA n°19. Transvaal Section : Caves of the Transvaal. Pp.5-6.

MARTINI J.E.J. (1979) Karst in Black Reef quartzites near Kaapsehoop, Eastern Transvaal, Annales Geol.Surv.S. Afr.13,115-128

MARTINI J.E.J. (1981) Early Proterozoic Paleokarst of the Transvaal, South Africa, Proceedings of he eighth international congress of speleology Vol.1 A Meeting of the International Union of Speleology Sponsored by The National Speleological Society Hosted by The Department of Geography and Geology Western Kentucky University Bowling Green, Kentucky, U.S.A. July 18 to 24, 1981 Edited by Barry F. Beck · Department of Geology Georgia Southwestern College Americus, Georgia, 31709, U.S.A.Pp.6-8
http://uis-speleo.org/wp-content/uploads/2020/08/1981-ICS-Proceedings-v.1.pdf

MARTINI J.E.J. (1985) Cave of South Africa, Karstologia n°5, pp.39-44
https://doi.org/10.3406/karst.1985.2087

MARTINI J.E.J. (1987a) Le phénomènes karstiques des quartzites d'Afrique du Sud. Karstologia n°9 - pp.45-52
https://doi.org/10.3406/karst.1987.2157

MARTINI J.E.J. (1987b) Caves of South Africa / Les cavités d'Afrique du Sud. Karstologia n°5. 1er semestre 1985. Pp.39-444
https://www.persee.fr/doc/karst_0751-7688_1985_num_5_1_2087

MARTINI J.E.J. (1990) The Genadenal Zn-Pb-Mn Mineralization, South Africa : A Possible Early Proterozoic Alkaline Hydrothermal System. Economic Geology, Vol.85, 1990, pp.1172-1185
https://doi.org/10.2113/gsecongeo.85.6.1172

MARTINI J.E.J. (1998a) The Loskop Formation and its relationship to the Bushveld Complex, South Africa. Journal of African Earth Sciences, 27(2), 193–222.
https://doi.org/10.1016/S0899-5362(98)00057-8

MARTINI J.E.J. (1996) Gwihabaite -(NH4, K)NO3, Orthorhombic. A New Mineral From Gcwihaba Cave, Botswana. Bulletin of the South African Speleological Association, Bulletin 36, p.19.

MARTINI J.E.J. (2000) La grotte et le karst de Cango (Afrique du Sud). Karstologia. Numéro 36. Pp. 43-54.
https://www.persee.fr/doc/karst_0751-7688_2000_num_36_1_1751

MARTINI J.E.J. MARAIS J.C.E. IRISH J. (1999) Contribution à l'étude du karst et de grottes du Kaokoland (Namibie) Karstologia n°34, Pp. 1-8
https://www.persee.fr/doc/karst_0751-7688_1999_num_34_1_2443

MARTINI J.E.J., WIPPLINGER P.E., MOEN H.F.G., KEYSER A. (2003) Contribution to the speleology of Sterkfontein Cave, Gauteng Province, South Africa. Int. J. Speleol., 32(1/4), pp. 43-69
http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.32.1.4
https://speleogenesis.com/pdf/seka_pdf4504.pdf

MARTINI J.E.J. (2007) Le problème de l'ouverture des vides initiaux pré-karstiques: cas de la dolomie siliceuse du Sous-Groupe de Malmani, Afrique du Sud. Karstologia : revue de karstologie et de spéléologie physique, n°50, 2e semestre 2007. Suivi climatique dans la grotte de Lascaux. pp. 31-38;
https://doi.org/10.3406/karst.2007.2609
https://www.persee.fr/doc/karst_0751-7688_2007_num_50_1_2609

MARTINI J.E.J. HORN G.F.J. (1994) The Delmas silica deposit, Transvaal – a mega-sinkhole filled with beach sand during the Pretoria Group transgression. S. Afr. J. Geol., 1996, 99(1), Pp. 69-76
https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/EJC-92a74263e

MARTINI J.E.J. KAVALIERIS I (1976) The karst of the Transvaal (South Africa). Int. J. Speleol. 8, pp.229-251
https://digitalcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1504&context=ijs

MARTINI J.E.J., MARSHALL C. G.A. (2002) Noodsberg cave, une grotte dans les quartzites de la province de Kwazulu-natal , Afrique du Sud Karstologia n°39,pp. 47-50 ;

MARTINI J.E.J., MOEN H.F.G. (1998b) Blue Lagoon, Afrique du Sud : une grotte à remplissage paléokarstique permien et à concrétions d'aragonite. Pp.27-38
https://www.persee.fr/doc/karst_0751-7688_1998_num_32_1_2423

MARTINI J.E.J. (2017) Hypogene Karst in Southern Africa. In : KLIMCHOUK A., PALMER A. N., DE WAELE J., AULER A.S., AUDRA P. (eds). Hypogene Karst Regions and Caves of the World. Springer. Pp. 865-878 in.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-53348-3_59

MARTEAU P., CHIPILI E. (1998) Preliminary evaluation of the coal potential of the Lower Shire area (Republic of Malawi). ChronRech.min., 1998, 530, 15-25. 10p.

MARTEAU P., RANCON J.-P. (Ed.), FULLGRAF T., CHARLES N., GOUIN J., MARTEAU P., PRIAN J.-P., MARTEL-JANTIN B., BEZELGUES S., BERTHIER H., SALMA J., KAPHWIYO C. CHRISTMANN P. (2015) Georesources of Malawi a pre-assessment. A compendium prepared by BRGM, the French Geological Survey, with contributions from the Malawi Geological Survey and Department of Mines. 74 p.
https://www.researchgate.net/publication/281289402_Georesources_of_Malawi_A_pre-assessment

MANN P.M., RITTER R.C. (1995) Further exploration and resurvey of !WaDoum Cave. Botswana Notes and Records. Vol.27. Pp.13-20
https://hdl.handle.net/10520/AJA052550590_371

MATEUS O., CALLAPEZ P. M., POLCYN M. J., SCHULP A. S., GONCALVES A. O., JACOBS L. L. (2019) The fossil record of biodiversity in Angola Through Time: A Paleontological Perspective. Springer Open. In : Biodiversity of Angola. Pp. 53-76
https://doi.org/10.1007/978-3-030-03083-4_4
Lien

MANN P. M., RITTER R. (1995) Further Exploration and resurvey of !Wadoum Cave Botswana Notes and Records, Vol.27, pp.13-18
https://www.jstor.org/stable/40980031

MAUDIT (1962) L'Afrique primitive. Connaissance de l'Afrique. Société continentale d'éditions modernes illustrées. 357 p.

MAZEBEDI R., HESSELBERG T. (2020) A preliminary survey of the abundance, diversity and distribution of terrestrial macroinvertebrates of Gcwihaba cave, northwest Botswana. Subterranean Biology. Volume 35. Pp.49-63
https://doi.org/10.3897/subtbiol.35.51445

MC DONALD (2008) Final relinquishment report. A review of exploration results from Gcwihaba resources. Prospecting licences: PL041/2003, PL042/2003, PL043/2003, PL046/2003. 69 p.
http://www.library.bgi.org.bw/ActiveConnect/DesktopModules/ViewDocument.aspx?ContentIndex=685

MC FADDEN P.L., BROCK A., PARTRIDGE T.C. (1979) Palaeomagnetism and the age of the Makapansgat hominid site. Earth and Planetary Science Letters, 44. Pp.373-382
https://doi.org/10.1016/0012-821x(79)90087-6

MC FARLANE M.J., ECKARDT F.D., RINGROSE S., COETZEE S.H. & KUHN J.R. (2005) Degradation of linear dunes in Northwest Ngamiland, Botswana and the implications for luminescence dating of periods of aridity. Quaternary International. Volume 135. Issue 1. Pp.83-90
https://doi.org/10.1016/j.quaint.2004.10.025

MC FARLANE M. J. & ECKARDT F.D. (2007) Palaeodune morphology associated with the Gumare fault of the Okavango graben in the Botswana/Namibia borderland: a new model of tectonic influence. South African Journal of Geology. Volume 110. Issue 4. Pp.535-542
https://doi.org/10.2113/gssajg.110.4.535

MC FARLANE M. J. & ECKARDT F.D. (2008) Lake Deception: A New Makgadikgadi Palaeolake. Botswana Notes & Records, Volume 38. Pp. 195-201
http://dx.doi.org/10.2307/41236000
Lien

MC FARLANE M. J., ECKARDT F.D.; COETZEE S.H. & RINGROSE S. (2010) An African surface weathering profile in the Kalahari of North West Ngamiland, Botswana: processes and products. Zeitschrift für Geomorphologie. Volume 54. Issue 3. Pp.273-303
https://doi.org/10.1127/0372-8854/2010/0054-0027

MC FARLANE & SEGADIKA P. (2001) Archaeological evidence for the reassessment of the ages of the Makgadikgadi palaeolakes. Botswana Notes and Records, Volume 33, Pp.83-89
https://www.jstor.org/stable/40980299

MC NABB J., SINCLAIR A. (2009) The Cave of Hearths: Makapan Midlle Pleistocene Research Project. Field research by Anthony Sinclair and Patricl Quinney, 1996-2001. Bar International Series 1940. 2009. University of Southampton. Series In Archeology N°.1
https://doi.org/10.30861/9781407304205

MERCADER J., SILEN P. (2013) Middle and Later Stone Age Sites from Sofala, Gorongosa (Central Mozambique) NYAME AKUMA N°80 p3-14

MERCADER J., ASMEROM Y., BENNETT T., RAJA M., SKINNER A. (2009) Initial excavation and dating of Ngalue Cave: A Middle Stone Age site along the Niassa Rift, Mozambique, Journal of Human Evolution 57 (2009) 63-74
https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2009.03.005

MENNELL F. P. (1929) The evidence for the age of Homo Rhodesiensis. South Africain Journal of Science, Volume XXVI, Pp.659-664.
https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA00382353_4035

MEYER R. (2003) An Explanation of the 1:500 000 General Hydrogeological Map Bloemfontein 2924. Department: Water Affairs and Forestry. Republic of South Africa. 46 p.
https://www.dws.gov.za/ghreport/reports/GH4355.pdf

MEYER R. (2014a) Hydrogeology of Groundwater Region 10: The Karst Belt. Report to the Water Research Commission. WRC Report N° TT 553/14. The publication of this report emanates from a project entitled Hydrogeology of Groundwater Region 10: The Karst Belt (WRC Project No. K5/1916). 285 p. https://wrcwebsite.azurewebsites.net/wp-content/uploads/mdocs/TT%20553%20web.pdf

MEYER R. (2014b) Hydrogeology of Groundwater Region 10: The Karst Belt. Report to the Water Research Commission. WRC Report N° TT 553/12. 183 p.
https://www.dws.gov.za/ghreport/reports/2.2(5433).pdf

MICHEL J.-P., CARPENTER M.S.N., FAIRBRIDGE R.W. (2004) Dictionnaire des sciences de la Terre 4e edition DUNOD

MICHON L., FAMIN V. & QUIDELLEUR X. (2022) Evolution of the east African Rift System from trap-scale to plate-scale rifting. Earth Science Review. Volume 231. 18 p.
https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104089

MILLER R. McG. (2008) Geology of Namibia. 3 volumes. Geological Survey of Namibia, 1564 pp.
https://www.mme.gov.na/files/publications/c26_general_miller_book_ad.pdf

MILLER R.McG., PICKFORD M. & SENUT B. (2010) The Geology, Palaeontology and Evolution of the Etosha Pan, Namibia : Implications for terminal Kalahari Deposition. South African Journal of Geology. Geology Society of South Africa. Volume 1113 ? 3. Pp.307-334.
https://doi.org/10.2113/gssajg.113.3.307

MILLEY J. (1960) La vie sous les tropiques. Connaissance de l'Afrique. Société continentale d'Editions modernes illustrées. 348 p.

MLILO T. (2017) Eskom : Hia study for the household electrification infrastructure of the proposed 22kv powerline for either norlim-taung (15km) and Norlim-Dikhuting (13 km) in the Buxton Area, Greater Taung Municipality, North West Province. MuTingati Environmental & Prohects Pty Ltd. Eskom Holdings SOC Limited. 62 p.
https://sahris.sahra.org.za/sites/default/files/heritagereports/Eskom%20Norlim%20Buxton%20HIA_final%2002%20May%202017.pdf

MODOSI M.P. (1994) Fracture development around Moshaneng and Kanye, Southeast Botswana. Thesis Submitted to the School of Graduate Studies in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy McMaster University. 335 p.
https://macsphere.mcmaster.ca/bitstream/11375/8113/1/fulltext.pdf
https://macsphere.mcmaster.ca/bitstream/11375/19619/1/Modisi_Motsoptse%20Phillip_1994Feb_PhD.pdf

MODOSI M.P. (1995) The Origin of Chert Breccia Around Kanye. Botswana Notes and Records, 1995, Vol. 27 (1995), pp. 299-308
https://www.jstor.org/stable/40980051

MOKATSE T., VAINER S., IRVING J., SCHMIDT C., KGOSIDINTSI B., SHEMANG E. & VERRECCHIA E.P. (2022) Geometry of sedimentary deposits an evolution of the landforms in the Chobe Enclave, Northen Botswana. Geomorphology. Volume 415. 18 p.
https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108406

MOLEN M.O. & SMIT J.J (2022) Reconsidering the glaciogenic origin of gondwana diamictites, Dwyka Groupe, South Africa. Vol.28 Issue 2 pp.83-113
https://doi.org/10.2478/logos-2022-0008
MOLENGRAAFF G.A.F (1901) Géologie de la République sud-africaine du Transvaal, Bulletin de la Société Géologique de France, Série 4, Tome 1, pp.13-92 + 2 Planches (1 carte et profils)

MOLENGRAAFF G.A.F (1903) Geology of the Transvaal. 90 p.
https://archive.org/details/geologytransvaa00ronagoog

MONTJANE A. K., TSHIBUBUDZE A., WOLDAI T. & HEATH L. (2020) The influence of geological fractures on karstic sinkhole development in eastern areas of Centurion, South Africa. Environmental Earth Sciences. Volume 79, 19 p.
https://doi.org/10.1007/s12665-020-09234-6

MOORE A. E. (1999) A reappraisal of epeirogenic flexure axes in southern Africa. South African Journal of Geology. Volume 102, Number 4. Pp. 363-376.
https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/EJC-942c6e6ad

MOORE A.E., LARKIN P.A. (2001) Drainage evolution in South-central Africa since the breakup of Gondwana, South African Journal of Geology, Vol. 104, pp.47-68
https://doi.org/10.2113/104.1.47

MOORE A.E., BRODERICKT. (2002) The role of mantle plumes in the development of continental-scale drainage patterns : The southern African example revisited. South African Journal of Geology. Volume 105. Pp.353-360
https://doi.org/10.2113/1050353

MOORE A.E., BLENKINSOP T., COTTERILL F. W. (2009a) Southern african topography and erosion history : plumes or plate tectonics ? Terra Nova, Vol.21, No.4, Pp. 310-315.
https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2009.00887.x

MOORE A.E., COTTERILL F.P.D., BRODERICKT., PLOWES D. (2009b) Landscape evolution in Zimbabwe from the Permian to present, with implications for kimberlite prospecting Geology Society of South Africa, Vol.112 Pp.65-88.
https://doi.org/10.2113/gssajg.112.1.65

MOORE A.E., COTTERILL F.P.D., MAIN M.P.L. & WILLIAMS H.B. (2007). The Zambezi River. Chapter 15 in GUPTA A. (Ed.) Large Rivers. Geomorphology and Management. John Wiley & Sons. Ltd. Pp.311-332
https://sudartomas.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/11/largerivers-geomorphologyandmanagement.pdf

MOORE A.E., COTTERILL F.P.D., ECKARDT F.D. (2012) The evolution and ages of Makgadikgadi palaeo-lakes: consilient evidence from Kalahari drainage evolution south-central Africa. South African Journal of Geology. Volume 115. Number 3. Pp. 385–413.
https://doi.org/10.2113/gssajg.115.3.385

MOORE A. et ROBERTS M. (2022) Kimberlites, Kimberlite Exploration, and the Geomorphic Evolution of Botswana *in* ECKARDT F.D. (ed.) Landscape and Landforms of Botswana. World Geomorphological Landscape. Springer Nature Switzerland AG 2022. Chapitre 4 Pp-263-285
https://doi.org/10.1007/978-3-030-86102-5_15

MULLER H.O. (1985) Dolomite Caves of the Eastern Transvaal South Africa a Free Caver Monograph. SEC Cave Library

MURSZEWSKI A., EDWARDS T.R., CRUDEN A.R., ARMSTRONG B., BOSCHIAN G et HERRIES A.I.R. (2019) Regional geological formation and speleogenesis of the « Fossil Hominind Sites of South Africa » UNESCO World Heritage Site. Earth-Science Reviews 188(2019) Pp 498-513
https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.09.016

NASH D. J. (1992) the development and environmental significance of the dry valley systems (mekgacha) in the Kalahari, central southern Africa. Volume One. Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. 414 p.
https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/5976/1/242852_VOL1.pdf
https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/5976/2/242852_VOL2.pdf

NASH J. N. (2022) Dry Valleys (Mekgacha) *in* ECKARDT F.D. (ed.) Landscape and Landforms of Botswana. World Geomorphological Landscape. Springer Nature Switzerland AG 2022. Chapitre 11. Pp-179-199.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-86102-5_11

NASA JPL (2021). NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001.
https://doi.org/10.5069/G93T9FD9

NICOD J. (1972) Pays et paysages du calcaire. Presses Universitaire de France. Collection SUP Le Géographe. 244 p.

NICOD J. (1975) Corrosion de type crypto-karstique dans les karsts méditerranéens. Bulletin de l'Association de Géographes Français. Numéro 427-428. Pp.289-297
https://www.persee.fr/doc/bagf_0004-5322_1975_num_52_427_4859

OAKLEY K.P. (1953) Dating fossil human remains. Anthropology Today. Chicago, University of Chicago Press. Pp.43-56.

OBBES A.M. (1995) The structure, stratigraphy and sedimentology of the Black Reef–Malmani-Rooihoogte succession of the Transvaal supergroup south-west of Pretoria. Thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree *Magister Scientae* in Geology in the Faculty of natural sciences at the Rand Afrikaans University. Supervisor : Prof. N.J. Beukes. 137 p.
https://search.worldcat.org/fr/title/85920462
https://hdl.handle.net/10210/12713

OBBES A.M. (2000) The structure, stratigraphy and sedimentology of the Black Reef–Malmani-Rooihoogte succession of the Transvaal supergroup south-west of Pretoria.

OOSTHUIZEN A.C. (2013) The hazard of sinkhole formation in the Centurion CBD and surrounding areas : Pretoria, Gauteng. Submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree M.Sc. Engineering & Environmental Geology In the faculty of Natural & Agricultural Sciences, University of Pretoria,Supervised by **Prof L. Van Rooy**, 194 p.
https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/24716/00front.pdf?sequence=1&isAllowed=y

OOSTHUIZEN A.C., VAN ROOY J.L. (2015) Hazard of sinkhole formation in the Centurion CBD using the Simplified Method of Scenario Supposition. J.S.Afr.Inst.Civ.Eng. Vol.57 n2 Midrand Apr./Jun. 2015. Pp.69-75
http://dx.doi.org/10.17159/2309-8775/2015/v57n2a8
https://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1021-20192015000200008

PACK A., BEUKES N.J., Van NIEKERK H.S. & GUTZMER J. (2000) Supergene Ferromanganese «wad» Deposits Derived from Permian Karoo Strata along the Late Cretaceous-Mid-Tertiary African Land Surface, Ryedale, South Africa, 18 p.
https://doi.org/10.2113/gsecongeo.95.1.203

PALES L. (1962) L'Abbé Breuil (19877-1961). Séquences africaines du Sud et de l'Est. Journal des Africanistes. Tome 32, Fascicule 1. Pp.7-52
https://doi.org/10.3406/jafr.1962.1352

PARKER H.M., KUHL T., VALENTA M. (2013) Platreef Project, Limpopo Province, Republic of South Africa, IVANPLATS LIMITED, AMEC, NI 43-101 Technical Report on updated Mineral Resource Estimate
https://ivanhoemines.com/site/assets/files/1870/2013-03-13_platreef_ni43-101.pdf
https://ivanhoemines.com/site/assets/files/5509/20021platreef22fs_220311rev1_comp.pdf

PARTRIDGE T. C. (1969) Some Geomorphic Units in the Transvaal and their Significance in Physical Development (thesis, University of Natan, Durban, 1969).

PARTRIDGE T. C. (1973) Geomorphological Dating of Cave Openings at Makapansgat, Sterkfontein, Swartkrans and Taung Nature 246, 75-79
https://www.nature.com/articles/246075a0

PARTRIDGE T. C. (1978) Re-appraisal of lithostratigraphy of Makapansgat Limeworks hominid site. Nature. Volume 279. Pp 484-488
https://doi.org/10.1038/279484a0

PARTRIDGE T. C. (1998) Of diamonds, dinosaurs and diastrophism: 150 millions years of landscape evolution in southern Africa. South African Journal of Geology. Volume 101. Number 3. Pp. 167-184
https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/EJC-947b4efa3

PARTRIDGE T. C., SHAW J., HESLOP D., CLARKE R.J. (1999) The new hominid skeleton from Sterkfontein, South Africa: age and preliminary assessment. Journal of Quaternary Science. Volume 14, Issue 4. Pp.293-298.
https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1417(199907)14:4%3C293::AID-JQS471%3E3.0.CO;2-X

PARTRIDGE T. C. (2005) Dating of the Sterkfontein hominids: progress and possibilities. Transactions of the Royal Society of South Africa, 60(2). Pp.107-109
https://doi.org/10.1080/00359190509520486

PARTRIDGE T.C. et MAUD R.R. (1987) Geomorphic evolution of southern Africa since Mesozoic. South African Journal of Geology. Volume 90. Number 2. Pp. 179-208
https://journals.co.za/doi/epdf/10.10520/AJA10120750_958

PARTRIDGE T.C. et MAUD R.R. (2000) Macro-scale Geomorphic Evolution of Southern Africa. The Cenozoic of Southern Africa. Oxford University Press. Pp. 3-18.

PARTRIDGE T. C., DOLLAR E.S.J., MOOLMAN J., DOLLAR L.H. (2010) Geomorphic proviences of South Africa, Lesotho and Swaziland: A physiographic subdivision for earth and environmental scientifists. Transactions of the Royal Society of South Africa. Volume 65. Pp-1-47.
https://doi.org/10.1080/00359191003652033
https://researchspace.csir.co.za/dspace/bitstream/handle/10204/4421/Partridge_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y

PARTRIDGE T., C., GRANGER D., E., CAFEE M., W., CLARKE R., J. (2003) Lower Pliocene Hominid Remains from Sterkfontein. Science Volume 300, N°5619, pp 607-612.
https://doi.org/10.1126/science.1081651

PAVIA M., VAL R., CARRERA L. & STEININGER C.L. (2022) Fossil birds from Cooper's D aid in reconstructing the Early Pleistocene paleoenvironment in the Cradle of Humankind (Gauteng, South Africa). Journal of Human Evolution. Volume 167. 15 p.
https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2022.103185

PEABODY F.E. (1954) Travertines and cave deposits of the Kaap escarpment of South Africa, and the Type Locality of australopithecus Africanus Dart. Bulletin of the Geological Society of America. Volume 65. Number 7. Pp.671-706
https://doi.org/10.1130/0016-7606(1954)65[671:TACDOT]2.0.CO;2

PEKKALA Y., LEHTO T., LEHTONEN M., I. (2008) Introduction to GTK Projets in Mozambique 2002-2007 - GTK Consortium Geological Surveys in Mozambique 2002 – 2007, edited by Yrjö Pekkala, Tapio Lehto & Hannu Mäkitie Geological Survey of Finland, Special Paper 48, 7-22

PERKINS J., HARRISSON M., DITHAP B., FARR J., WALKER N & KHONDOWE C. (2006) Martin's Drift Diamont Project.EIA for DiamonEx Botswana Limited. Central District. Botswana. Wellfield Consulting Services (Pty) Ltd. 149 p.
https://www.eib.org/attachments/pipeline/20060121_eia_en.pdf

PEPE J.-P., CHOPPY J et CHABERT J. (1997) Atlas des régions karstiques: Afrique, Asie, Océanie Atlas of Karst areas: Africa, Asia, Oceania (1997). KIP Monographs. 6. Spéléo-Club de Paris. 88 p.
https://digitalcommons.usf.edu/kip_monographs/6

PHAROE B. K., LUI K. (2018) Stratigraphy of the pedogenic manganese nodules in the Carletonville area, North West Province of South Africa: A case study of the General Nice Manganese Mine. Journal of African Earth Sciences. 143 (2018) Pp.79-101
https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.03.002

PHAROE B. K., EVDOKIMOV A.N., GEMBITSKAYA I.M., BUSHUYEV Y.Y. (2020) Mineralogy, geochemistry and genesis of the post-Gondwana supergene manganese deposit of the Carletonville-Ventersdorp area, North West Province, South Africa. Ore Geology Reviews 120 (140):103372. 16 p.
https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103372

PHILIPPS D., KIVIETS G.B, BARTON E.S., SMITH C.B., VILJOEN K.S. & FOURIE L.F. (1998) 40Ar/39Ar Dating of Kimberlites and Related Rocks: Problems and Solutions. International Kimberlite Conference. Extented Abstracts, 7(1), Pp.690-692
https://doi.org/10.29173/ikc2848
https://ikcabstracts.com/index.php/ikc/article/view/2848

PHILIPPS D., HARRIS J.W. (2009) Diamond provenance studies from $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of clinopyroxene inclusions : An example from the west coast of Namibia. Lithos Volume 112, Supplement 2, Pp.793-805
https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.05.003

PMG Sink hole a danger to Society & Infrastructure – Laudium
https://slideplayer.com/slide/15748612/

PICKERING R. (2005) The Stratigraphy, Chronology and Palaeoenvironment of the Pleistocene cave fill, Gladysvale Cave, South Africa. MSx thesis, University of Witwatersrand. 225 p.
https://wiredspace.wits.ac.za/items/0a185434-00db-4638-b0b2-aac0a27f5100
http://hdl.handle.net/10539/267.

PICKERING R. et KRAMERS D. (2010) Re-appraisal of the stratigraphy and determination of new U-Pb dates for the Sterkfontein hominin site. South Africa. Journal of Human Evolution. 59, p.70-86
https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2010.03.014

PICKERING R., KRAMERS J.D., HANCOX P.J., De RUITER D.J., WOODHEAD J.D. (2011a) Contemporary flowstone development links early hominin bearing cave deposits in South Africa. Earth Planet. Sci. Lett. 306, 23
https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.03.019

PICKERING R., DIRKS P.H.G.M, JINNAH Z., De RUITER D.J., CHURCHILL S.E., HERRIES A.I.R., WOODHEAD J.D., HELLSTORM J.C., BERGER L.R. (2011b) Australopithecus sediba at 1.977 Ma and implications for the origins of the genus Homo. Science. Volume 333, No 6048, pp.1421-1423
https://doi.org/10.1126/science.1203697

PICKERING R., HERRIES A.I.R., WOODHEAD J.D., HELLSTROM J.C., GREEN H.E., PAUL B., RITZMAN T., STRAIT D.S., SCHOVILLE B.J., HANCOX P.J. (2019) U-Pb-dated flowstones restrict South Africa early hominin record to dry climates phases. Nature 565, p.26-229
https://doi.org/10.1038/s41586-018-0711-0

PICKERING R., CAZENAVE M., CLARKE R.J., HEILE A.J., CARUANA M.V., KUMAN K., STRATFORD D., BRAIN C.K. & HEATON J.L. (2025) First articulating os coxae, femur, and tibia of a small adult Paranthropus robustus from Member 1 (Hanging Remnant) of the Swartkrans Formation, South Africa. Journal of Human Evolution. Volume 201. 31 p.
https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2024.103647

PICKFORD M. & MEIN P. (1988) The discovery of fossiliferous Plio-Pleistocene cave fillings in Ngamiland, Botswana. Compte-Rendu Academie des Sciences de Paris, Tome 307, Série II. Pp.1681-1686

PICKFORD M. (1990) Some Fossiliferous Plio-Pleistocene Cave Systems of Ngamiland, Botswana - Botswana Notes 1 Records, Volume 22 15 p.
https://www.jstor.org/stable/40979849

PICKFORD (1995) Fossil land snails of east Africa and their palaeoecological significance. Journal of African Earth Sciences. Volume 20. Number3-4. Pp.167-226
https://doi.org/10.1016/0899-5362(95)94397-R

PICKFORD M., MEIN P. et SENUT B. (1992) Primate bearing Plio-Pleistocene cave deposits of Humpata, Southern Angola. Human Evolution. Volume 7. Pp17-33
https://doi.org/10.1007/BF02437475

PICKFORD M. & SENUT B. (2010) Karst geology and palaeobiology of northern Namibia. Ministry of mines and energy Geological survey of Namibia. Memoir 21. Director : Dr G I C Schneider. ISBN 978-99945-71-35-2. 74 p.
https://www.mme.gov.na/files/publications/97b_Memoir%2021_2010_Pickford&Senut_Karst%20geology%20and%20paleobiology%20of%20Northern%20Namibia.pdf

PICKFORD M. (2012) Moçambique Palaeontology Reconnaissance November, 2012. 22 p.
https://biblioteca.biofund.org.mz/wp-content/uploads/2019/01/1548750015-F172.Mo%C3%A7ambique%20Palaeontology%20Reconnaissance.pdf

PICKFORD M. (2013) Motivation, Palaentological Survey, Gorongosa, November, 2013. 28 p.

PICKFORD M., MEIN P et SENUT B. (1994) Fossiliferous Neogene karst fillings in Angola, Botswana and Namibia. Suid Afrikaanse Tydskrif vir Wetenskap Volume 90 pp.227-230
https://hdl.handle.net/10520/AJA00382353_5386

PICKFORD M., SENUT B., HIPONDOKA M., PERSON A., SEGALEN L., PLET C., JOUSSE H., MEIN P., GEURIN C., MORALES J., MOURER-CHAUVIRE C. (2014) Mio-Plio-Pleistocene geology and palaeobiology of the Etosha Pan, Namibia, Communs geol. Surv. Namibia, 15(2014), 16-68

PICKFORD M. (2019) Namibia Paleontology Expedition 13 September – 6 October, 2019 18 p.

PICKFORD M., MOCKE H., SENUT B., SEGALEN L., & MEIN P. (2019). Fossiliferous Plio-Pleistocene Cascade Tufas of Kaokoland, Namibia. Communications of the geological survey of Namibia. Ministry of Mines and Energy. Vol 17, 2016, p85-112

PICKFORD M. (2023) Kaokoland Cascade Tufa Survey - 2023 Research. Communications of the Geological Survey of Namibia, 26, Pp. 39-65
https://www.mme.gov.na/files/publications/6d4_5_Pickford%202023_Kaokoland%20Cascade%20Tufa%20Survey.pdf

PIERCE Z. W. (2020) Fossil rodents from Bone Cave at The Koanaka Hills Locality, Botswana. A thesis Presented to The Faculty of the Department of Biological Sciences. Sam Houston State University. In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science. 148 p.
https://hdl.handle.net/20.500.11875/2772

PIETERSEN K., BEEKMAN H.E., HOLLAND M. & ADAMS S. (2012) Groundwater governance in South Africa: A status assessment. Water South Africa. Volume 38 n°3, Pp.453-460.
https://doi.org/10.4314/wsa.v38i3.11

PLUG I., KEYSER A.W., 1994 Haasgat cave, a pleistocene site in the Central Transvaal: Geomorphological, faunal and taphonomic considerations. Anals of the Transvaal Museum 36(9). Pp.139-145
https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA00411752_69

POIRIER N. (2012) Archéodrone. Mission en Afrique du Sud. Sites de Kromdraai et Sterkfontein. 25 juin au 4 juillet 2012. Rapport : 1. Prospection infrarouge thermique aérien par drone. TRACES, UMR. 5608. 2021.
https://univ-tlse2.hal.science/ARCHEOSCIENCE/hal-04269860v1

POLDERVAART A. (1955) Kalahari sands – Third pan-african congress on prehistory Livington 1955 Edited by J. Desmond Clark, London, Chatto & Windus 1957 -106-114 -440 p.
https://ignca.gov.in/Asi_data/6340.pdf

PONTE J.-P. (2018) La marge africaine du canal du Mozambique (le système turbiditique du Zambèze) : une approche « Source to Sink » au Méso-Cénozoïque – Thèse – Université de Rennes – 353 p.
https://theses.hal.science/tel-01865479v1

PONTE J.-P., ROBIN C., GUILLOCHEAU F., POPESCU S., SUC J.-P., DALL'ASATA M., MELINTE-DOBRINESCU M., BUBIK M., DUPONT G. & GAILLOT J.(2018) The Zambezi delta (Mozambique channel, East Africa) : High resolution dating combining bio-orbital and seismic stratigraphy to determine climate (palaeoprecipitation) an tectonic controls on a passive margin. HAL Id : insu-01868030, 77 p.
https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.07.017

PORTER GEOCONSULTANCY (2018).
https://portergeo.com.au/database/mineinfo.asp?mineid=mn126

POUYAUD B. et COLOMBANI J. (1989) Les variations extrêmes du lac Tchad : l'assèchement est-il possible? Annales de Géographie, Janvier-Février 1989, 98e Année, No.545. Pp.1-23
https://www.jstor.org/stable/23452557

QUICK J.K. (1970) The 1969 Exploration Society Expedition to Lake Ngami and Drotsky's Cave. A day-to-day account. The Falcon Magazine 1970. Pp.56-61
https://falconians.com/

QUINIF Y. (1985) Une morphologie karstique typique en zone intertropicale : les karsts du Bas Zaïre. Karstologia. Numéro 6. Pp.43-52
https://www.persee.fr/doc/karst_0751-7688_1985_num_6_1_2104

QUINIF Y. (1986) Genèse des karsts à tour en pays intertropicaux : l'exemple du bas-Zaïre. Annales de la Société géologique de Belgique. Volume 109. Fascicule 2. Pp.515-527
https://popups.uliege.be/0037-9395/index.php?id=2563

QUINIF Y. et DUPUIS C. (1989) Morphologie et hydrologie d'un karst couvert : Le réseau de Ziaka (Bas-Zaïre). Karstologia. Numéro 14. Pp.15-22
https://www.persee.fr/doc/karst_0751-7688_1989_num_14_1_2215

QUINIF Y., (1999) Fantômisation, cryptoaltération et altération sur roche nue, le triptyque de la karstification. Etudes de géographie physique, Travaux 1999 – supplément 18 University of Provence, 99. 159-164

QUINIF Y. (2010a) Fantômes de roche et fantômisation Essai sur un nouveau paradigme en karstogenèse Karstologia Mémoire n°18, 190 p.

QUINIF Y. (2010) Ghost rock structures and the nature of Azé and the Maçonnais : Fieldtrip of the 16th Cave Bear and Lion Symposium. Imprimerie Conseil Général de Saône et Loire, pp.27-39.

QUINIF Y. (2011) Ghost rock structures and the nature of Azé Caves. Quaternaire 4, 7-14 (Special Issue)

QUINIF Y. & BRUXELLES L. (2011) L'altération de type « fantôme de roche » : processus, évolution et implications pour la karstification », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 17 - n° 4 | 2011, 349-358.

RAMOKATE L.V. (1995) Ngamiland trip report. Field visit to the Okwa Inlier, Ghanzi-Chobe belt, Xangwa Valley, Aha and Tsodilo Hills with Professor R.E. Hanson and Mr Diseng B. « Diary of events and field observation ». 9-24 october 1995/ Geological survey Deparment. DGS-REP-3988-1- 8p. + une carte.
http://www.library.bgi.org.bw/ActiveConnect/DesktopModules/ViewDocument.aspx?ContentIndex=1029

RANKIN W. (2015) Cross-border correlation of the Damara Belt in Namibia and equivalent lithologies in Northwestern Botswana from potential field and magnetotelluric interpretations. A dissertation submitted to the Faculty of Science, University of Witwatersrand in the fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science. School of Geosciences, University of the Witwatersrand, Johannesburg. 542 p.
https://www.mtnet.info/papers/theses/2015_Rankin_MSc.pdf

RASMENI S. (2012) Lithostratigraphic correlation, mineralogy and geochemistry of the lower manganese orebody at the Kalagadi Manganese Mine in the Northern Cape Province of South Africa. Master of Geoscience in Geology. Supervisor Zhao & Liu, 172 p.
https://api.semanticscholar.org/CorpusID:135079244?utm_source=wikipedia
https://docplayer.net/50868299-Master-of-science-in-geology.html#download_tab_content

RAILSBACK L.B., BROOK G.A., LIANG F., RIAVO N., VOARINTSOA G., CHENG H. & EDWARDS R.L. (2018) A multi-proxy climate record from a northwestern Botswana stalagmite suggesting wetness late in the Little Ice Age (181-1820 CE) and drying thereafter in response to changing migration of the tropical rain belt or ITCZ. Palaeo. 50 p. + 15 figures
https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.06.029

REIMOLD W.U., KOABERL C. (2014) Impact structures in Africa: A review. Journal of African Earth Sciences 93, 57-175

RICHARDSON S. (2013) Sinkhole and subsidence record in the Chuniespoort group dolomite, Gauteng, South African, University of Pretoria, degree Master of Science in Engineering and Environmental Geology in the Faculty of Natural & Agricultural Sciences. p.184
https://repository.up.ac.za/handle/2263/33182

RIEDEL F., HENDERSON A.C.G., HEUSSNER K;-U., KAUFMANN G., KOSSLER A., LEIPE C., SHEMANG E. & TAFT L. (2014) Dynamics of a Kalahari long-lived mega-lake system: hydromorphological and limnological changes in th Makgadikgadi Basin (Botswana) during the terminal 50 ka. Hydrobiologia. Volume 739. Pp.25-53
https://doi.org/10.1007/s10750-013-1647-x

RINGROSE S., HUNTSMAN-MAPILA P., KAMPUNZU A.B., DOWNEY W., COETZEE S., VINK B., MATHESON W. & VANDERPOST C. (2005) Sedimentological and geochemical evidence for palaeo-environmental change in Makgadikgadi subbasin, in relation to the MOZ rift depression, Botswana. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaecology. Volume 217. Pp.265-287
https://ubrisa.ub.bw/jspui/handle/10311/794

RINGROSE S., 2022 Landscape Evolution of the Lake Ngami and Mabade Depressions Within the Okavango Rift Zone, North-central Botswana. *in* ECKARDT F.D. (ed.) Landscape and Landforms of Botswana. World Geomorphological Landscape. Springer Nature Switzerland AG 2022. Chapitre 4 Pp-57-75. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86102-5_4

RIQUIER J. (1969) Contribution à l'étude des "stone lines" en régions tropicales et équatoriale. Cahier ORSTOM, série Pédologie, Volume VII, n°1. Pp. 71-111
https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/cahiers/PTP/18541.PDF

RITTER R.C., GARNER R. A. (1994) Discovery and Preliminary Exploration of a New Cave in the Gcwihaba Valley. Botswana Notes and Records, Vol.26, Pp.55-65
https://www.jstor.org/stable/40959181

RITTER R.C., MANN P. M. (1995) Discovery and Exploration of Two New Caves in the Northest District Botswana Notes and Records, Vol.27, pp.1-12
https://www.jstor.org/stable/40980030

ROBBINS L.H., MURPHY M.L. (1998). The Early and Middle Stone Ages of Botswana. In: Pitswa Mmung, The Archaeology of Botswana (P. LANE, A. RAIND et A. SEGOBYE, Eds.). Pulsa Press and Botswana Society, Gaborone, 50–64.

ROBBINS L.H., MURPHY M.L., STEVENS N.J. BROOK G.A., IVESTER A.H., HABERYAN K.A., KLEIN R.G., MILO R., STEWART K.M., MATTHIESEN D.G. & WINKLER A.J. (1996) Paleoenvironment and Archaeology of Drotsky's Cave: Western Kalahari Desert, Botswana. Journal of Archaeological Science. Volume 23. Pp7-22.
https://doi.org/10.1006/jasc.1996.0002

ROBBINS L.H., BROOK G.A., MURPHY M.L., IVETER A.H. & CAMPBEL A.C. (2016) The Kalahari During MIS 6-2 (190ka-12ka) : Archaeology, Paleoenvironment, and Population Dynamics. In : JONES S.C. & STEWART B.A. (2016) Africa from MIS 6-2. Population Dynamics and Paleoenvironments. Springer. Pp.175-193
https://doi.org/10.1007/978-94-017-7520-5_10

RODRIGUEZ E., MORRIS C. S. & BELT E. (2006) A Global Assessment of the SRTM Performance. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Volume 72, Number 3, Pp.249-260.
https://doi.org/10.14358/PERS.72.3.249

ROLLAND T., MONNA F., BUONCRISTIANI J.-F., MAGAIL J., ESIN Y., BOHARD B. & CHATEAU-SMITH C. (2022) Volumetric Obscurance as a New Tool to Better Visualize Relief from Digital Elevation Models. Remote sensing. Volume 14. Issue 4 14 p.
https://www.mdpi.com/2072-4292/14/4/941

ROYER P. (2020) Evolution tectonique pléistocène du système des rifts Okavango-Makgadikgadi (Nord Botswana – Zambèze). Mémoire de master 2. Encadrant Olivier Dauteuil, Marc Jolivet. Université de Rennes. 26p.

RUST U., SCHMIDT H.H. & DIETZ K.R. (1984) Palaeoenvironments of the present day arid south western Africa 30 000 – 5 000 BP : results and problems. In : COETZZ J.A. & VAN ZINDEREN BAKKER Palaecology of Africa. Volume 16. Pp.109-148.

RYAN, W.B.F., CARBOTTE S.M., COPLAN J.O., O'HARA S., MELKONIAN A., ARKO R., WEISSEL R.A, FERRINI V., GOODWILLIE A., NITSCHE F., BONCZKOWSKI J., and ZEMSKY R. (2009), Global Multi-Resolution Topography synthesis, Geochem. Geophys. Geosyst., 10, Q03014
https://doi.org/10.1029/2008GC002332

SACS (South African Committee for Stratigraphy) (1980) Stratigraphy of South Africa. Part 1(comp. L.E. Kent). Lithostratigraphy of the Republic of South Africa, South West Africa/Namibia, and the Republics of Bophuthatswana, Transkei and Venda. Handbook geological survey of South Africa, vol 8. 690 p

SADC-GMI (Southern African Development Community Groundwater Management Institute) (2020) Water Resources Management Research in the Eastern Kalahari Karoo Basin Transboundary Aquifer (EKK-TBA) Transboundary Diagnostic Analysis of the Eastern Kalahari-Karoo Basin Aquifer system. Groundwater Management Institute. L2K2 Consultants (Pty) Ltd 173 p. https://sadc-gmi.org/wp-content/uploads/2024/09/Transboundary-Diagnostic-Analysis-of-the-Eastern-Kalahari-Karoo-Basin-Aquifer-System.pdf

SAID A., MODER C., CLARK S., GHORBAL B. (2015) Cretaceous-Cenozoic sedimentary budgets of the Southern Mozambique Basin: Implications for uplift history of the South African Plateau. Journal of African Earth Sciences. 109. Pp 1-10
https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.05.007

SALOMON J.-N. (2006) Précis de Karstologie. Collection "Scieteren", Presses universitaire de Bordeaux, deuxième édition, 288 p.

SANDROCK O., DAUPHIN Y., KULLMER O., ABEL R., SCHRENK F., DENYS C. (1998) Malema: Preliminary taphonomic analysis of an African hominid locality, C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes / Earth & Planetary Sciences 1999, 328, 133-1398

SASA (1994) The 1993 Chimanimani Expedition. Bulletin of the South African Spelaeological Association. Volume 35. 88 p.

SCHMIDT M., FUCHS M , HENDERSON A.C.G., KOSSLER A., LENG M. J., MACKAY A.W., SHEMANG E. & RIEDEL F. (2017) Paleolimnological features of a mega-lake phase in the Makgadikgadi Basin (Kalahari, Botswana) during Marine Isotope Stage 5 inferred from diatoms. Journal of Paleolimnology. Volume 3. Pp. 373-390.
https://doi.org/10.1007/s10933-017-9984-9

SCHRENK, F., BROMAGE, T. G., BETZLER, C. G. & RING U. (1993). Oldest Homo and Pliocene biogeography of the Malawi Rift. Nature 365, 833–836.
https://doi.org/10.1038/365833a0

SCHWARZ E.H.L (1912) South African Geology. Blackie & Son. 200p.
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5b/South_African_geology_%28IA_southafricangeol00schwrich%29.pdf

SEGALEN P. (1966) Altération des minéraux primaires, synthèse des minéraux secondaires au cours de la ferrallitisation. Cahiers ORSTOM, Vol. IV, n°4, pp.5-13
https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/cahiers/PTP/18331.PDF

SEGALEN P. (1995) Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique. Tome 1. Introduction générale, les sols ferrallitiques : leur identification et environnement immédiat. Tome 2. Les sols ferrallitiques : les facteurs de formation et les sols ferrallitiques en Amérique. Tome 3. Les sols ferrallitiques en Afrique et en Extrême-Orient, Australie et Océanie, Conclusions générales. Editions de l'ORSTOM. Institut français de recherches scientifique pour le développement en coopération. Collections Etudes et thèses. 198 p. 169 p. 201 p.
https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:42498

SEGUIN J.J. (2005) Projet Réseau SIG-Afrique. Carte hydrogéologique de l'Afrique à l'échelle du 1/10 M. Rapport RP-54404-FR. 55 p. + cartes
http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-54404-FR.pdf

SELAOLO, E.T. (1985): Evaluation of aquifer hydraulic parameters in Ramotswa, S.E. Botswana. MSc Thesis, University of London, University College London, England.

SELFE G. / GRS Consulting (2005a) Mapping of Potentially New Cave Formations in the Koanaka Hills Area, NW Botswana. Final Report. 22 February 2005. On behalf of De Beers Prospecting Botswana Ltd. 20 p.

SELFE G. / GRS Consulting (2005b) Mapping of Potentially New Cave Formations in the Drotsky's (Gcwihaba) Cave Area, NW Botswana. Final Report. 22 September 2005. On behalf of De Beers Prospecting Botswana Ltd. 18 p.

SELFE G./ GRS Consulting (2013) Follow-up Gravity Surveys for Caves in the Gcwihaba Hills Area, NW Botswana. Final Report. 25 May 2013. On behalf of the Botswana Department of National Museum and Monuments. 16 p.

SENUT B. (1996) Cercopithecoidea du Plio-Pléistocène des Koanaka Hills (Ngamiland, Botswana). C.R. Acad. Sci. Paris, t.322, série II a, Pp.423 - 428
https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k57524766

SENUT B., PICKFORD M. & WESSEL D. (1997) Panafrican distribution of Lower Miocene Hominoidea Distribution panafricaine des Hominoidea du Miocene inferieur. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences – Series II1 – earth and Planetary Science. Volume 325, Issue 9. Pp. 741-746
https://doi.org/10.1016/S1251-8050(97)89119-7

SENUT B. avec DEVILLERS M. (2008) Et le singe se mit debout. Albin Michel. Bibliothèque Sciences. 182 p.

SENUT B. Les hominoïdes fossiles : une aide pour l'éducation en Afrique. revue

SENUT B. (2016) Le renouveau de la « French connection » avec l'Afrique du Sud (1995-2015). Revue de primatologie.
https://doi.org/10.4000/primatologie.2715

SENUT B. (2017) 1987-2017 : Regard sur l'évolution de l'histoire des origines. Revue de primatologie, 8. 26 p.
https://doi.org/10.4000/primatologie.2787

SENUT B. (2020) Orrorin tugenensis et les origines de l'homme : une synthèse. Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine, Volume 204, Issue 3. Pp. 258-267.
https://doi.org/10.1016/j.banm.2019.12.018

SHAW P. (1985) Late Quaternary landforms and environmental change in northwest Botswana : the evidence of Lake Ngami and the Mababe Depression, Transactions of the Institute of British Geographers, Vol. 10, No.3, pp.333-346
https://www.jstor.org/stable/622182
https://doi.org/10.2307/622182

SHAW P. (1988) After the flood: The Fluvio-Lacustrine Landforms of Northern Botswana. Earth-Science reviews, 25. Pp. 449-456.
https://doi.org/10.1016/0012-8252(88)90011-6

SHAW P., COOKE H.J. (1986) Geomorphic evidence for the late Quaternary palaeoclimates of the middle Kalahari of northern Botswana. CATENA. Volume 13, Issue 4, Pp.349-359
https://doi.org/10.1016/0341-8162(86)90009-3

SPÖNEMANN J. (1984) Geomorphologie – Ostafrika (Kenya, Uganda, Tanzania). Reliefformen und Reliefformenkomplexe. Afrika-Kartenwerk. Gebrüder Borntraeger. Berlin Stuttgart. Serie E Beiheft E2. 176 p.

STANLEY J.R., BRAUN J., BABY G., GUILLOCHEAU F., ROBIN C., FLOWERS R.M., BROWN R., WILDMAN M., BEUCHER R. (2021) Constraining Plateau Uplift in Southern Africa by Combining Thermochronology, Sediment Flux, Topography, and Landscape Evolution Modeling. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Research Article. 34 p. https://doi.org/10.1029/2020JB021243

STAUDT M. G. 2002 Production of environmental hydrogeology maps using gis for the Ramotswa project area, south-East district, Botswana. Master Thesis International Postgraduate Masters Course "Tropical Hydrogeology". 77p. + Annexes
https://www.researchgate.net/publication/294891821_Production_of_Environmental_Hydrogeology_Maps_Using_GIS_For_The_Ramotswa_Project_Area_South_East_District_Botswana

STAUDT M. G. 2003 Environmental Hydrogeology of Ramotswa. South-East district, Republic of Botswana. Environmental Geology Division. BGR, GS LOBATSE 36p. + Annexes
https://www.researchgate.net/publication/294891820_Production_of_Environmental_Hydrogeology_Maps_Using_GIS_For_The_Ramotswa_Project_Area_South_East_District_Botswana

STEPHENS M., De WIT M., ISSACS S.M. (2022) Geodiversity of Caves and Rockshelters, Chapter 14, in Botswana Landscapes and Landforms of Botswana, F.D.Eckardt World Geomorphogical Landscapes Springer Nature Switzerland AG 2022, 247-262

STRATFORD D. J., BRUXELLES L., CLARKE R. J., KUMAN K. (2012) New Stratigraphic Interpretations of the fossil and artefact-bearing deposits of the Name Chamber, Sterkfontein. South African Archaeological Bulletin 67 (196), pp.159-167

STRATFORD D. (2017) A Review of the Geomorphological Context and Stratigraphy of the Sterkfontein cave, South Africa. In : KLIMCHOUK A.,
STORRY (2010) Le rôle du Suivi Géotechnique sur un grand projet Gautrain, South Africa. Diaporama. 54 p.
https://www.cfms-sols.org/sites/default/files/manifestations/101013/CFMS%204%20-%20Storry%20Gautrain.pdf

STONE A.E.C. & THOMAS D.S.G. (2008) Linear dune accumulation chronologies from the southwest Kalahari, Namibia: challenges of reconstructing late Quaternary palaeoenvironments from aeolian landforms. Quaternary Science Reviews. Volume 27. Pp. 1667-1681
https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.06.008

SUTHERLAND B. (2019) Cradle Conservancy Establishment. *Cradle Of Humankind World Heritage Site Association. Diaporama. 13 p.*
https://cohwhs.com/assets/files/COHWHS%20Ass%20Conservancy%20Jun2019.v.1b.pdf

SWIFT W. H. (1952) The Geology of Chishanya, Buhera District, Southern Rhodesia, Trans. Edin. Geol. Soc. Vol. XV, 1952, pp.346-359
https://www.lyellcollection.org/doi/abs/10.1144/transed.15.1.346

TADONO T.,ISHIDA H., ODA F.,NAITO S.,MINAKAWA K.,IWAMOTO H. (2014) Precise Global DEM Generation By ALOS PRISM, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, pp.71-76, Vol.II-4
http://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/II-4/71/2014/isprsannals-II-4-71-2014.pdf

TARDY Y.& ROQUIN C. (1998) Dérive des continents, Paléoclimats et altérations tropicales. Editions BRGM.473 p.

TANKARD A., WELSINK H., AUKES P., NEWTON R., STETTLER E. (2012). Phanerozoic Passive Margins, Cratonic Bains and Global Tectonic Maps. Pp.868-945
https://doi.org/10.1016/B978-0-444-56357-6.00022-6

TAIEB M., TIERCELIN J.-J. (1979) Sédimentation pliocène et paléoenvironnements de rift: exemple de la formation à Hominidés d'Hadar (Afar, Ethiopie). Bull. Soc. Géol. France, 1979, (7), t.XXI, n°3, pp.243-253.
https://doi.org/10.2113/gssgfbull.S7-XXI.3.243

TAKAKU J.,TADONO T.,TSUTSUI K. (2014) Generation of High Resolution Global DSM from ALOS PRISM, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, pp.243-248, Vol. XL-4, ISPRS TC IV Symposium, Suzhou, China
http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-4/243/2014/isprsarchives-XL-4-243-2014.pdf

TAU G.L., HOFMANN A., LEHMANN J., OWEN-SMITH T., PELLERIN A., THOMAZO C., REINKE C., WILSON A.H. (2024) The Lanseria palaeosol: Implications for palaeoweathering and terrestrial life at ~2.6 Ga on the Kaapvaal Craton. Precambrian Research. Volume 405, 16 p. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2024.107352

TAYLOR C.D., SCHULZ K.J., DOEBRICH J.L., ORRIS G.J., DENNING P.D. & KIRSCHBAUM M.J. (2009) Geology and nonfuel mineral deposits of Africa and the Middle east, USGS Open-File Report 2005-1294-E. 246 p. https://pubs.usgs.gov/of/2005/1294/e/OF05-1294-E.pdf

THACKERAY J. F. (2008) A survey of past and present work on Plio-Pleistocene deposits on Bolt's Farm, Cradle of Humankind, South Africa. Annales . Volume 45. Issue 1. https://hdl.handle.net/10520/EJC83668

THACKERAY J. F. (2016) A History of Research on Human Evolution in South Africa from 1924 to 2016. Revue de Primatologie, Bilan 2016 de la coopération Franco-Sud-Africaine en paléoanthropologie. Volume 7, 24 p. https://doi.org/10.4000/primatologie.2708

THACKERAY J. F. & DYKES S. (2023). Biochronological ages for South African Australopithecus and a Plio-Pleistocene African hominin lineage (1.5 – 3.5 Ma). The Digging Stick. Volume 40 (1). Pp.11-12 https://www.researchgate.net/publication/376271600_Biochronology_Sterkfontein_and_the_AH_Hypothesis_Thackeray_and_Dykes_2023

THERIAUT M. (1995) Systèmes d'information géographique, concept fondamentaux.

TELFER M.W. et THOMAS D.S.G. (2007) Late Quaternary linear dune accumulation and chronostratigraphy of the southwestern Kalahari : implications for aeolian palaeoclimatic reconstructions and predictions of future dynamics. Quaternary Science Reviews Volume 26. Pp.2617-2630. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.07.006

THOMAS D.S.G. & SHAW P.A. (1990) The deposition and development of the Kalahari Group sediments, Central Southern Africa. Journal of African earth Sciences, Volume 10, Number ½, Pp.187-197. https://doi.org/10.1016/0899-5362(90)90054-I

THOMAS D.S.G. & SHAW P.A. (1991) The Kalahari Environment. Cambridge University Press. 300 p. ISBN: 9780470519080; 0470519088.

THOMAS D.S.G., O'CONNOR P.W., BATEMAN M.D., SHAW P.A., STROKES S. & NASH D.J. (2000) Dune activity as a record of late Quaternary aridity in the Northern Kalahari: new evidence from northern Namibia interperted in the context of regional arid and humid chronologies. Palaegeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. Volume 156, Pp.243-259 https://doi.org/10.1016/S0031-0182(99)00143-1

THOMAS D.S.G. & BURROUGH S.L. (2013) Luminescence-based dune chronologies in southern Africa: Analysis and interpretation of dune database records across the subcontinent. Quaternary International. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.09.008

THOMAS D.S.G. (2022) Dunes of the Northern Kalahari *in* ECKARDT F.D. (ed.) Landscape and Landforms of Botswana. World Geomorphological Landscape. Springer Nature Switzerland AG 2022. Chapitre 9 Pp-155-165 https://doi.org/10.1007/978-3-030-86102-5_9

THOMAS D.S.G. & WIGGS G.F.S. (2022) Dunes of the southern Kalahari Chapitre 8 Springer Nature Switzerland *in* ECKARDT F.D. (ed.) Landscape and Landforms of Botswana. World Geomorphological Landscape. Springer Nature Switzerland AG 2022. Chapitre 8. Pp-131-154. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86102-5_8

THOMSON J. O. (2017) The opening of the Indian Ocean: What is the impact on the East African, Madagascar and Antarctic margins, and what are the origins of the aseismic ridges? 195 p. (Tome 1) + 124 Figures et cartes (Tome 2) https://archimer.ifremer.fr/doc/00415/52637/

THOMSON J. WRIGHT D.K., NIGHTINGALE S. & KALIBA P.M. (2023) Pleistocene Archaeology of the Karonga District, Norther Malawi. Beyin, A., Wright, D.K., Wilkins, J., Olszewski, D.I. (eds) Handbook of Pleistocene Archaeology of Africa . Springer, Cham. 24 p. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20290-2_46

TIERCELIN J.-J., CHOROWICZ J., BELLON H., RICHERT J.P., MWANBENE J.T., WALGENWITZ F. (1988) East African Rift System: offset, age and tectonic significance of the Tanganyika-Rukwa-Malawi intracontinental transcurrent fault zone. Tectonophysics, 148 (1988), pp.241-525 https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90133-3

TIERCELIN J.-J. & LEZZAR K.-E. (2002) A 300 million years history of rift lakes in central and east africa : an updated broad review. E.O. Odada and D.O. Olago (eds.), the East African Grat Lakes: Limnology, Palaeolimnology and Biodiversity, 3-60. 2002 Kluwer Academic Publishers, 58 p.
https://doi.org/10.1007/0-306-48201-0_1

TIMBERLAKE J., DARBYSHIRE I., WURSTEN B., HADJ-HAMMOU J., BALLINGS P., MAPAURA A., MATIMELE H., BANZE A., CHIPANGA H., MUASSINAR D., MASSUNDE J., CHELENE I., OSBRONE J. & SHAH T. (2016) Chimanimani Mountains: Botany and conservation. Report producted under CEPF Grant 63512:Royal Botanic Gardens, Kew, London, 95 p.
https://www.kew.org/sites/default/files/Chimanimani%20CEPF%20report%202016_FINAL.pdf

TINKER J., De WIT M., GROTZINGER J., (2002) Seismic Stratigraphic Constraints on Neoarchean – Paleoproterozoic Evolution of the Western Margin of the Kaapvaal Craton, South Africa. South African Journal of Geology, 2002, Volume 105, pp.107-134
https://doi.org/10.2113/105.2.107

TROLLIP N., Y.-M., G. (2006) The geology of an area south of Pretoria with specific reference to dolomite stability, Dissertation submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree Master in science in Engirneering and environmental geology in the Faculty of natural and agricultural sciences at the University of Prétoria. Supervisors: Prof L. Van Rooy and Prof PG Eriksson, 96 p.

TRUSWELL J.F. et ERIKSSON K.A. (1975) A palaeoenvironmental interpretation of the early proterozoic malmani dolomite from Zwartkops, South Africa. Precambrian Research, 2(1975) Pp. 277-303
https://doi.org/10.1016/0301-9268(75)90013-3

TOBIAS P.V. (1990) Recent Studies at Sterkfontein and Taung and a note on the Piltdown Forgery. Bulletin of the South African Speleological association(1990) Vol.31 7p.

TOZER, B, SANDWELL, D. T., SMITH, W. H. F., OLSON, C., BEALE, J. R., & WESSEL, P. (2019). Global bathymetry and topography at 15 arc sec: SRTM15+
https://doi.org/10.1029/2019EA000658

VAINER S., EREL Y. & MATMON A. (2017) Provenance and depositional environments of quaternary sediments in the southern Kalahari Basin. Chemical geology. 28p. + figures
https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.11.031

VAINER S., MATMON A., EREL Y., HIDY A.J., CROUVI O., De WIT M., GELLER Y., ASTER Team (AUMAITRE G., BOURLES D.L., KEDDADOUCHE K.) (2021) Landscape responses to intraplate deformation in the Kalahari constrained by sediment provenance and chronology in the Okavango Basin. Basin Research. Volume 33. Issue 2. Pp. 1170-1193.
https://doi.org/10.1111/bre.12509

VAINER S., SCHMIDT C., GARZANTI E., BEN DOR Y., PASTORE G., MOKATSE T., PRUD'HOMME C., LEANNI L., KING G., ASTER TEAM, VERRECCHIA E.P. (2024) Chronology of sedimentation and landscape evolution on the Okavango Rift Zone, a developing young rift in southern Africa. JGR: Earth Surface. 35 p.
https://doi.org/10.1029/2023JF007554

VAL A. (2014) Une approche 3D pour comprendre la taphonomie des homininés du site plio-pléistocène de Malapa, Province du Gauteng, Afrique du Sud. Archéologie et Préhistoire. Université de Bordeaux ; Université of the Witwatersrand (Johannesbourg, Afrique du Sud). 465 p.

VALOIS H. V., MOVIUS M. A. L. Jr. (1953) Catalogue des hommes fossiles. Les préhominiens et les hommes fossiles. Congrès géologiques international. Comptes rendus de la dix-neuvième session. Alger, 1952. Section V Fasicule V. 378 p.

VAN BRUGGEN A.C. (1966) Notes on non-marine molluscs from Mozambic and Bechuanaland, with a checklist of Bechuanaland species. Annals of the Transvaal Museum. Volume 25, Number 6, Pp.99-111 + Planches
https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA00411752_297

VAN NIEKERK H.S., GUTZMER J., BEUKES N.J. PHILIPPS D., KIVIETS G.B. (1999a) An 40Ar/39 Ar age of supergene K-MN oxyhydroxides in a post-Gondwana soil profile on the Highveld of South Africa. South African Journal of Science 95, October 1999, Research Letters. Pp.250-254
https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA00382353_9004

VAN NIEKERK H.S., GUTZMER J., BEUKES N.J. (1999b) Post-Gondwana pedogenic ferromanganese deposits, ancient soil profiltes, African land surfaces and palaeoclimatic change on the Highveld of South Africa. Journal of African Earth Sciences. Volume 29, Issue 4, Pp-761-781.
https://doi.org/10.1016/S0899-5362(99)00128-1

VERNET-HABASQUE T., DELMAS A. & LANE P. (2017) Rapport mission ANR Globafrica.IFAS-Recherche Mozambique, le 14-22 mars 2017. 40 p.

VISSER J.N.J. (1989) The Permo-carboniferous dwyka formation of Southern Africa deposition by a predominantly subpolar marine ice sheet Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaecology 70 (1989) pp. 377-391
https://doi.org/10.1016/0031-0182(89)90115-6

VISSER J.N.J. (1995) Post-glacial Permian stratigraphy and geography of southern and central Africa boundary conditions for climatic modelling Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaecology 118 (1995) pp. 213-243
https://doi.org/10.1016/0031-0182(95)00008-3

VISSER J.N.J. (1996) Controls on Early Permian shelf deglaciation in the Karoo Basin of South Africa Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaecology 125 (1996) pp. 129-169
https://doi.org/10.1016/S0031-0182(96)00027-2

VISSER J.N.J. & PRAEKELT H.E. (1996) Subduction, mega-shear systems and Late Palaeozoic basin development in the African segment of Gondwana, springer – Verlag. Geol Rundsh (1996) 85, pp.632-646.
https://doi.org/10.1007/BF02440101

WALKER N.J., SEGOBYE A. (2001) Report on the archaeology of Damtshaa Mine. Unpublished mitigation report for the National Museum. Commissioned by Debswana Diamond Company (Pty) Ltd.

WALKER N.J. (In prep) Possible Oldowan (Early Stone Age) in Botswana

WALRAVEN F., MARTINI J., E., J. (1995) Zircon Pb-evaporation age determinations of the Oak Tree Formation, Chuniespoort Group, Transvaal Sequence: implications for Transvaal-Griqualand West basin correlations. South African Journal of Geology. Volume 98 ; pp.58-67
https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/EJC-929187cc0

WARKE M. R. (2016) Stratigraphic and geochemical framework of the Palaeproterozoic rise in atmospheric oxygen: Transvaal Supergroup (South Africa). A thesis submitted to the University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Science and Engineering. 352 p. https://www.escholar.manchester.ac.uk/jrul/item/?pid=uk-ac-man-scw:308243

WARKE M. R. & SCHRÖDER S. (2018) Synsedimentary fault control on the deposition of the Duitschland Formation (South Africa): implications for depositional settings, Paleoproterozoic stratigraphic correlations, and the GOE. Precambrian Research. 44 p. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.03.001

WATER SURVEYS BOTSWANA (2000) Final Report for Nxaunxau. Rural Village Water Supply Rehabilitation Programme. Ngamiland District. Ministry of Mineral, Energy & Water Affairs Department of Water Affairs. Rapport GC69-43-1 17 p. + Figures et annexes. http://www.library.bgi.org.bw/ActiveConnect/DesktopModules/ViewDocument.aspx?ContentIndex=2572

WATER SURVEYS BOTSWANA et AQUALOGIC (PTY) LTD (2001) Final Report December 2001. Geomorphological and geophysical investigation of the Gcwihaba Hills, Ngamiland, Botswana. Ministry of Mineral, Energy & Water Affairs Department of Geological Surveys. GC69-53-1. 37 p/ + annexes http://www.library.bgi.org.bw/ActiveConnect/DesktopModules/ViewDocument.aspx?ContentIndex=2589

WATER SURVEYS BOTSWANA et AQUALOGIC (PTY) LTD (2003) Geomorphology Final Report. Northwest Ngamiland TGLP Groundwater Potential Study. TB 10/2/19/2000-2001. GC69-41-1.71 p. http://www.library.bgi.org.bw/ActiveConnect/DesktopModules/ViewDocument.aspx?ContentIndex=2523

WATTS N.L. (1980) Quaternary pedogenic calcretes from the Kalahari (southern Africa) : mineralogy, genesis and diagenesis. Sedimentology. Volume 27, Issue 6. Pp.661-686. https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1980.tb01654.x

WAYLAND E.J. (1944) Drodsky's Cave. The Geographical Journal. Volume 103, Number 5. Pp.230-233. https://doi.org/10.2307/1789108

WEGENER A. (1915) Die Entstehung der Kontinente und Ozeane Sammlung Vieweg, no 23, 1915, 94 p.
https://archive.org/download/dieentstehungder00wege/dieentstehungder00wege.pdf

WELLINGTON J.H. (1929) The Vaal Limpopo Watershed. The South African Geographical Journal, 12:1, pp.36-45
https://doi.org/10.1080/03736245.1929.11882181

WELLS H. (1953) Rhodésie du nord et Nyassaland. In VALOIS H. V., MOVIUS M. A. L. Jr. (1953) Catalogue des hommes fossiles. Les préhominiens et les hommes fossiles. Congrès géologiques international. Comptes rendus de la dix-neuvième session. Alger, 1952. Section V Fasicule V. Pp. 287-291

WENDORFF M. (2005) Outline of lithostratigraphy, sedimentation and tectonics of the Tsodilo Hills group, a Neoproterozoic-Lower Palaeozoic siliciclastic succession in NW Botswana. Annales Societatis Geologorum Poloniae. 75. Pp. 17-25.
https://bibliotekanauki.pl/articles/973688

WHITE F. (1908) Proceedings of the. Rhodesia Scientific Association, Vol. VII.

WHITE A. St-P. (2001) Map of Botswana. 1 : 1 100 000. International Motoring Productions.
http://www.nickt.com/info/tripplanning/botswana/Botswana%20Map.pdf

WRC (2010) The karst system of the Cradle of Humankind world heritage site, a collection of 13 issue papers by The South Africain Karst Working Group, WRC report NO. KV 241/10 ISBN 978-1-77005-969-6, 402p.
http://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/KV%20241-10.pdf
https://wrcwebsite.azurewebsites.net/wp-content/uploads/mdocs/KV%20241-10%20Integrated%20Water%20Resources%20Management.pdf

WILKINS J. (2021) Homo sapiens origins and evolution in the Kalahari Basin, southern Africa. Evolutionary Anthropology Issues News and Reviews. Volume 30, Issue 5. Pp.327-344
https://doi.org/10.1002/evan.21914

WILKINSON, M., J. (1973) Sterkfontein cave system: evolution of a karst form Thesis (M.A. (Geography & Environmental Studies)) – University of the Witwatersrand, Arts faculty, 1973
https://wiredspace.wits.ac.za/handle/10539/23057

WILKINSON, M., J. (1983) Geomorphic Perspectives on the Sterkfontein Autralopithecine Breccias. Journal of archaeological Science 1973, Volume 10, Pp.515-529.
https://doi.org/10.1016/0305-4403(83)90034-1

WILLIAMS B. A., ROSS C. F., FROST S. R., WADDLE D. W., GABADIRWE M. & BROOK G. A. (2012) Fossil Papio Cranium From !Ncumtsa (Koanaka) Hills, Western Ngamiland, Botswana. American Journal of Physical Anthropology. 17 p.
https://doi.org/10.1002/ajpa.22093

WOODWARD A. S. (1921) A new cave man from Rhodesia, South Africa. Nature. Volume 108. Issue 2716. Pp.371-372
https://doi.org/10.1038/108371a0;
https://dbc.wroc.pl/Content/30023/PDF/032633.pdf

YELLEN J.E (1998) Barbed Bone Points: Tradition and Continuity in Saharan and Sub-Saharan Africa. African Archaeological Reviews. Volume 15. Number 3. Pp.173-196
https://doi.org/10.1023/A:1021659928822

YELLEN J.E, BROOKS A.S., STUCKENRATH R., WELBOURNE R. (1987) A Terminal Pleistocene Assemblage from Drotsky's Cave, Western Ngamiland, Botswana. Botswana Notes and Records, Vol.19, pp.1-6
https://www.jstor.org/stable/40979783

YELLEN J.E, BROOKS A.S.(1988) The Late Stone Age Archaeology of the !Kangwa and /Xai /Xai Valleys, Ngamiland. Botswana Notes and Records, Vol.20 , pp.5-27
https://www.jstor.org/stable/40979806

YOKOYAMA R, SHIRASAWA M and PIKE RJ, 2002, Visualizing topography by Openness: A new application of image processing to digital elevation models. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 68(3) : 257-265
https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=c3d9a561fdb9e8c34a2b79152aea72b46090bb2e

ZANOLLI C., SKINNER M., SCHRENK F., BROMAGE T.G., HUBLIN J.-J., SCHILLINGER B., DULANAYA Z. & KULLMER O. (2019) Taxonomic revision of the initial Early Pleistocene HCRP-U18-501 hominin mandible from Malawi: a tooth internal structural perspective. Proceedings of the European Society for Human Evolution.
https://hal.science/hal-02379720/document

ZITHOLELE Consulting (2009) Final soil and agricultural potentiel report Project 1202 specialist study proposed Kusile railway: soil and agricultural potentiel specialist studies proponent : Eskom Holdings Limited Prepared by : Zitholele Consulting. 33p.

ZIPFEL B. et BERGER L. (2009) New Cenozoic fossil- bearing site abbreviations for collections of the University of the Witwatersrand. Technical note. Palaeontologia Africana 44. Pp77-81
https://wiredspace.wits.ac.za/bitstreams/1b224de3-f224-4d06-8831-947b085961e6/download
https://wiredspace.wits.ac.za/server/api/core/bitstreams/1b224de3-f224-4d06-8831-947b085961e6/content

15. LISTE DES SITES INTERNETS CONSULTES

Lien internet + (date de consultation)

https://www.un.org/geospatial/
https://datacatalog.worldbank.org/dataset/namibia-roads-0
https://data.humdata.org/dataset/hotosm_nam_roads
https://datacatalog.worldbank.org/dataset/botswana-roads
https://geonames.nga.mil/gns/html/
http://srtm.csi.cgiar.org/
http://www.uni-koeln.de/sfb389/e/e1/e1_download_e.htmshape géologie afrique
http://geoscienceportal.geosoft.com/Botswana/api/Extraction/Download?folder=3b2e3d05-7f3c-4d78-983a-f0eb001e7e29&file=geol-botswana.zipbotswana geologie vectorisé
https://sudartomas.wordpress.com/ indonésie
http://www.geokniga.org/ russe
https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/EuDASM/Africa/lists/s1_cmz.htm (décembre 2019)
https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/EuDASM/Africa/lists/s2_cmz.htm (décembre 2019)
https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/EuDASM/Africa/lists/s3_cmz.htm (décembre 2019)
https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/EuDASM/Africa/lists/all_k1.htm (décembre 2019)
https://www.diva-gis.org/gdata (février 2020) hydrographies et frontières pays africains
https://otlet.berkeley.edu/imls/world/NAM/ (octobre 2020)
https://dds.cr.usgs.gov/ (février 2020) SRTM USGS EROS
https://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/shuttle/sts-99/html/sts099_315_031.html
https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/ (avril 2020)
https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2014-321 (avril 2020)
http://legacy.lib.utexas.edu/maps/imw/index_africa.html carte topographique (mars 2020)
http://legacy.lib.utexas.edu/maps/ams/east_africa_500k/ (mars 2020)
http://legacy.lib.utexas.edu/maps/topo/US_Army_maps_v_17.kmz (mars 2020)
https://maps.vlasenko.net/soviet-military-topographic-map/ (mars 2020)
https://maps.vlasenko.net/soviet-military-topographic-map/map200k.html carte russe mars 2020
https://maps.vlasenko.net/soviet-military-topographic-map/map500k.html
https://www.youtube.com/watch?v=h8kVkVSOYAU
https://mapstor.com/map-sets/country-maps/mozambique.html achat des cartes russes
http://loadmap.net/ les cartes russes pour toute l'Afrique

http://legacy.lib.utexas.edu/maps/ams/south_africa/ carte militaire US 250k Afrique du Sud (avril 2020)
https://legacy.lib.utexas.edu/maps/imw/ carte militaire US 1000k (avril 2020)
https://qgis.org/downloads/ (avril 2020)
https://intranet.cen-centrevaldeloire.org/spip.php?article103 (avril 2020)
https://intranet.cen-centrevaldeloire.org/IMG/ogv/qtiles_export.ogv (avril 2020)
https://sadc-gmi.org/resource-centre/hydrogeological-maps/ (avril 2020)
http://earthwise.bgs.ac.uk/index.php/Africa_Groundwater_Atlas_Home (avril 2020)
http://earthwise.bgs.ac.uk/index.php/Atlas_Eaux_Souterraines_Afrique (avril 2020)
http://www.bgs.ac.uk/research/groundwater/international/africanGroundwater/allowDownload.cfm (avril 2020)
http://jfmoyen.free.fr/ (avril 2020) géologie et cartes Afrique du Sud
http://jfmoyen.free.fr/spip.php?rubrique33 (avril 2020)
https://www.cbga.net/uploads/documents/Granites.pdf conférence granite JF Moyen (avril 2020)
http://geoscience.org.za/cgs/ Carte géologique Afrique du Sud 2M (avril 2020)
https://geoscience.org.za/index.php/publication/downloadable-material (mars 2021)
https://www.geoscience.org.za/images/DownloadableMaterial/RSA_Geology.pdf
https://www.brgm.eu/project/new-edition-of-110000000-geological-map-of-africa
https://www.brgm.eu/project/geological-mapping-mineral-inventory-malawi
https://qcnr.usu.edu/labs/belmont_lab/resources logiciels pour trouver les zones planes et les terrasses
https://arcmap2sld.i3mainz.hs-mainz.de/Dateianlagen/ArcMap2SLD_Setup_1.4.0.zip (mai 2020)
http://sigesaqi.brgm.fr/Une-carte-geologique-de-l-Aquitaine-au-1-250000-un-support.html (mai 2020)
http://www.gdta.eu/ (mai 2020)
https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm (mai 2020) données AW3D30
https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/wkflw-elevation-part1.htm (mai 2020)
https://www.grottocenter.org/index.php?lang=Fr (juin 2020)
https://fr.wikipedia.org/wiki/Supergroupe_du_Karoo (juin 2020)
https://www.aw3d.jp/en/technology/ (juin 2020)
https://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/ (juin 2020)
http://www.bgs.ac.uk/research/groundwater/international/africanGroundwater/maps.html

http://opendata.rcmrd.org/datasets/africa-surface-lithology?geometry=8.073%2C-21.599%2C49.887%2C-14.289
https://shop.geospatial.com/product/03-ZAAG-South-Africa-250000-Geological-Maps
https://shop.geospatial.com/map?aoi=kZw7miuvBP7vnMJS&csp=Bx2h8rorrnxWm9wms
https://gisgeography.com/earth-satellite-list/
http://www.dct.uminho.pt/mest/pgg/docs/tese_cumbe.pdf
https://www.mnrem.gov.mw/index.php/services/gemmap/about-gemmap
geologie u Malawi BRGM
http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/fr/ données SIG hydro Afrique
https://data.apps.fao.org/aquamaps/
http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/regional-and-national-soil-maps-and-databases/en/
https://gorongosa.org/research/
https://databasin.org/maps/100382a48d68454fa8de9583b7fbae79/
Madagascar survey geology
http://www.cdngiportal.co.za/cdngiportal/ (avril 2021) Portail NGI Sud africain
http://www.cdngiportal.co.za/provisioning/public/provision-27949.zip
https://searchworks.stanford.edu/view/11699434 (avril 2021)
https://sourceforge.net/projects/saga-gis/files/SAGA%20-%207/SAGA%20-%207.9.0/saga-7.9.0_x64.zip/download?use_mirror=freefr&download=&failedmirror=deac-riga.dl.sourceforge.net(avril 2021)
https://sadc-gmi.org/resource-centre/hydrogeological-maps/ (avril 2021)
https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#declination déclinaison magnétique (mai 2021)
https://wiki.osgeo.org/wiki/South_African_Geodata#AFRICAN_DATA_AVAILABLE_FOR_DOWNLOAD_FROM_MadMappers_WEB_SERVER: (mai 2021)
http://www.madmappers.com/mapset.php?MS=18 (mai 2021)
http://www.madmappers.com/mapset.php?MS=182 (mai 2021)
http://www.madmappers.com/browse.php?TY=R&CO=mz (mai 2021)
http://www.madmappers.com/mapset.php?MS=235 (mai 2021)
https://whatis.at/gauteng-gaborone/ carte topographique 50k (juin 2021)
http://www.madmappers.com/index.htm carte topographique 50k (juin 2021)
https://chomikuj.pl/TROPICARTA/International+maps/South+D/00.050.000+SD-36+16*c3*9724 carte topographique 50k
https://www.peakfinder.org/fr
https://www.peakfinder.org/fr?lat=-26.0168&lng=27.7336&ele=1705&off=864&azi=163.03&alt=47.02&fov=100

&cfg=s&name=Sterkfontein%20Caves%2c%20Kromdraai%20Rd%2c%20Johannesburg%2c%20Afrique%20du%20Sud
https://www.universalis.fr/encyclopedie/afrique-structure-et-milieu-geologie/ Faure-Muret, universalis
https://www.arcgis.com/home/item.html?id=84c92aba021b48e6b0d1b688a694a584 numero des cartes geologiques 100k Angola
https://www2.bgs.ac.uk/africagroundwateratlas/downloadGIS.html
https://digitalcommons.usf.edu/ijs/vol49/iss2/5/ grottes Congo Dem Jean G. Shaw
https://digitalcommons.usf.edu/ijs/
https://www.fos.auckland.ac.nz/our_research/karst/ cartes des karsts du monde (février 2022)
https://sudartomas.files.wordpress.com/2012/11/encyclopediaof_cavesandkarstscience.pdf Encyclopedia of caves and kars science
http://www.portergeo.com.au/conferences.asp (février 2022) géologie Zambie
https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_caves_in_South_Africa#List_of_caves_in_South_Africa (mars 2022)
https://geohack.toolforge.org/geohack.php?pagename=Malapa_Fossil_Site,_Cradle_of_Humankind&params=25.8951_S_27.8013_E_type:landmark (juin 2022)
https://geohack.toolforge.org/geohack.php?pagename=Lake_Guinas&params=19.232918_S_17.352648_E_region:NA_type:landmark (juin 2022)
https://paleobiodb.org/navigator/ carte interactive des fossiles
https://sci-hub.hkvisa.net/ recherche publication
https://www.mindat.org/loc-56787.html localisation Apocalypse Pothole
https://data.humdata.org/dataset/hotosm_mwi_roads Routes Malawi
https://nla.gov.au/nla.obj-2053903552/view carte géologique Malawi (août 2022)
https://pubs.bgs.ac.uk/publications.html?pubID=B04021 (août 2022)
https://webapps.bgs.ac.uk/data/publications/pubs.cfc?method=listResults&topic=OV&series=CG&subseries=RN&pageSize=100 (août 2022)
https://pubs.bgs.ac.uk/publications.html?pubID=B07217 (août 2022)
https://play.google.com/books/reader?id=7Z90t6cj7kEC&pg=GBS.PP12&hl=fr (août 2022)
https://www.flickr.com/photos/psalmeight/16137065513 (août 2022
https://books.google.fr/books?id=7Z90t6cj7kEC&printsec=frontcover&hl=fr#v=onepage&q&f=false (août 2022)
https://pubs.bgs.ac.uk/publications.html?pubID=B04024 (août 2022)
https://webapps.bgs.ac.uk/data/publications/pubs.cfc?method=listResults&topic=OV&series=CG&subseries=RN&pageSize=100 (Colonials Reports-Miscellanous - août 2022)
https://webapps.bgs.ac.uk/data/publications/pubs.cfc?method=listResults&topic=OV&series=CG&subseries=RF&pageSize=100#RF (Colonials Reports-Miscellanous - août 2022)

https://en.wikisource.org/wiki/Africa_by_%C3%89lis%C3%A9e_Reclus/Volume_4 (février 2023)
http://gis.orasecom.org/layers/geonode:khakea_dolomiticarea (février 2023)
https://chat.openai.com/chat (février 2023)
https://www.srk.com/en/projects/kgwakgwe-hill(février 2023)
https://www.jstor.org/stable/40980211 (février 2023)
https://books.google.co.za/books?id=TGvsEAn33J4C&lpg=PA353&dq=koanaka&hl=fr&pg=PR2#v=onepage&q=koanaka&f=false (mars 2023)
https://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/TT%20670_web.pdf (avril 2023)
https://wrcwebsite.azurewebsites.net/wp-content/uploads/mdocs/TT%20553%20web.pdf (avril 2023)
https://www.youtube.com/watch?v=bzBky9TX0Zo (présentation Dauteuil Okavango – avril 2023)
https://cimera.co.za/agouron-goe-project/ (formation rooihoogte – juin 2023)
https://www.usna.edu/Users/oceano/pguth/md_help/html/openness_map.htm (openness - juin 2023)
https://archives.ungeneva.org/geological-maps?places=459&sort=alphabetic&sortDir=asc&listLimit=10
https://www.chilembwe.org/botswana/reports.html (juillet 2023))
https://uisic.uis-speleo.org/exchange/karstlink/index-fr.html (juillet 2023)
http://uisic.uis-speleo.org/wiki/karstlink/index.php/Database_-_Base_de_donn%C3%A9es (juillet 2023)
https://www.dws.gov.za/Groundwater/DolomiteP.aspx (juillet 2023)
https://www.dws.gov.za/Groundwater/Documents.aspx (juillet 2023)
https://colecoes.igc.usp.br/mapas/ZM1990.JPG (juillet 2023)
https://maps.geoscience.org.za/download/geology-maps.php (juillet 2023)
https://www.sciencedirect.com/bookseries/developments-in-precambrian-geology/vol/6/suppl/C (juillet 2023)
https://www.reeves.nl/gondwana (juillet 2023)
https://www.reeves.nl/gondwana/aac-anim-1/ (juillet 2023)
https://www.reeves.nl/gondwana/articulated-africa/ (juillet 2023)
https://www.reeves.nl/gondwana/oceansonlygrow/(juillet 2023)
https://topoafrica.univ-rennes1.fr/ (juillet 2023)
https://en.wikipedia.org/wiki/Kaapsehoop (août 2023)
https://maps.geoscience.org.za/portal/home/index.html (août 2023)
https://maps.geoscience.org.za/portal/apps/sites/#/council-for-geoscience-interactive-web-map-1 (août 2023)
https://maps.geoscience.org.za/download/geology-shapefiles.php (août 2023)
https://maps.geoscience.org.za/download/index.php (août 2023)
https://maps.geoscience.org.za/portal/apps/sites/?fromEdit=true#/interactivewebmap (août 2023)
https://eol.jsc.nasa.gov/SearchPhotos/ (août 2023)

https://eol.jsc.nasa.gov/SearchPhotos/photo.pl?mission=ISS044&roll=E&frame=103264 (août 2023)
https://eol.jsc.nasa.gov/SearchPhotos/photo.pl?mission=ISS043&roll=E&frame=244052 (août 2023)
https://eol.jsc.nasa.gov/SearchPhotos/photo.pl?mission=ISS035&roll=E&frame=5851. (août 2023)
https://eol.jsc.nasa.gov/SearchPhotos/photo.pl?mission=ISS040&roll=E&frame=9341(août 2023)
https://eol.jsc.nasa.gov/DatabaseImages/ESC/large/ISS044/ISS044-E-103263.JPG (août 2023)
https://sahris.sahra.org.za/(août 2023)
https://11003980sam.wordpress.com/page/2/ (août 2023)
http://www.soutpansberg.com/workshop/synthesis/geology.htm (août 2023)
https://www.thecrag.com/en/climbing/south-africa/magaliesberg/area/14286613 (septembre 2023)
https://whc.unesco.org/en/list/915/
https://whc.unesco.org/en/list/915/maps/ (septembre 2023)
https://core.ac.uk/reader/145039860 (septembre 2023)
https://rapideditor.org/edit (septembre 2023)
https://spacedata.copernicus.eu/en/web/guest/collections/copernicus-digital-elevation-model/ (septembre 2023)
https://portal.opentopography.org/datasetMetadata?otCollectionID=OT.032021.4326.1 (septembre 2023)
https://www.usna.edu/Users/oceano/pguth/md_help/html/srtm_15plus.htm (septembre 2023)
https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsviewer.pl?ds_id=1952 (septembre 2023)
https://opentopography.org/ (septembre 2023)
http://portal.onegeology.org/OnegeologyGlobal/ (septembre 2023)
https://programmes.insu.cnrs.fr/tellus/anciennes-actions/rift/ (octobre 2023)
https://wiredspace.wits.ac.za/communities/8c6d1de1-dd6a-4050-b3ce-68efc5c033c8 (octobre 2023)
https://grottesarcheologies.com/hon-les-carnets-de-la-mission/(novembre 2023)
https://global.jaxa.jp/press/2023/03/20230307-2_e.html (novembre 2023)
https://maps.geoscience.org.za/portal/apps/sites/#/council-for-geoscience-interactive-web-map-1-1 (novembre 2023)
https://whc.unesco.org/fr/wh-gis/ (décembre 2023)
https://www.cohwhs.com/AboutTheCradle.html (décembre 2023)
https://www.cohwhs.com/index.html (décembre 2023)
https://topoafrica.univ-rennes1.fr/ (décembre 2023)
https://images.nasa.gov/search?q=africa&page=7&media=image,video,audio&yearStart=1920&yearEnd=2023 (décembre 2023)
https://images.nasa.gov/details/iss007e14361 (Victora Falls) (décembre 2023)
https://dei.hypotheses.org/723 (décembre 2023)

https://portergeo.com.au/database/mineinfo.asp?mineid=mn126 (décembre 2023) carte zambie
https://www.amirinia.com/victoria-falls-bridge/#prettyPhoto[gallery2col]/17/ (janvier 2024)
https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/cartes-historiques-et-bases-de-donnees-des-sols/carte-faounesco-des-sols-du-monde/fr/ (janvier 2024)
https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/cartes-historiques-et-bases-de-donnees-des-sols/ensemble-de-donnees-et-cartes-regionales-et-nationales-des-sols/fr/ (janvier 2024)
https://data.isric.org/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/3571c1f3-159d-442c-b324-0af53d03f12e (janvier 2024)
https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/soil-map-soil-atlas-africa (janvier 2024)
https://www.inrap.fr/laurent-bruxelles-l-appel-de-la-grotte-14994 (janvier 2024)
https://capes-agreg-svt.univ-rennes1.fr/pages/ressourcespeda/RSA/RSAgeneralites.html (janvier 2024)
https://www.mapillary.com/app/?lat=-19.73762742939455&lng=26.480503884668565&z=4.277041155546241&pKey=297620828597436&focus=map&mapStyle=Esri+navigation (janvier 2024).
https://docs.centipede.fr/(janvier 2024)
https://uis-speleo.org/index.php/proceedings-of-the-international-congress-of-speleology-ics/#
(février 2024)
https://slideplayer.com/slide/12757022/ (février 2024)
https://www.youtube.com/watch?v=LuNVbZ1_WLE Chaîne Mine pro
https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2015/09/D-06-Gautrain-Zone-Dolomitique.pdf (mars 2024)
https://www.cfms-sols.org/sites/default/files/manifestations/101013/CFMS%204%20-%20Storry%20Gautrain.pdf (mars 2024)
https://www.fntp.fr/sites/default/files/content/publication/858_projet_gautrain.pdf (mars 2024)
https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=18662d1d4c977a168511038b81b911b252da81c9 (mars 2024)
https://www.academia.edu/101813934/The_influence_of_geological_fractures_on_karstic_sinkhole_development_in_eastern_areas_of_Centurion_South_Africa (mars 2024)
https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/pangaea (avril 2024)
https://osur.univ-rennes.fr/actualites/le-relief-de-lafrique-un-monde-de-plateaux-enregistrant-la-dynamique-passee-du-manteau (avril 2024)
https://portergeo.com.au/database/largeimages/zambiandomes.asp (avril 2024)

https://www.reddit.com/r/MapPorn/comments/l5gdvl/geological_map_of_southern_africa/#lightbox (avril 2024)
https://environmental-geology-dev.pressbooks.tru.ca/wp-content/uploads/sites/73/2021/07/Fig-5-scaled-1.jpg (avril 2024)
https://timescalefoundation.org/resources/geowhen/stages/Mokolian.html (mai 2024)
https://timescalefoundation.org/resources/geowhen/stages/Vaalian.html (mai 2024)
https://www.whymap.org/whymap/EN/Maps_Data/Gwrecowas/gwrecowas_node_en.html (mai 2024)
https://profleeberger.com/files/An_Atlas_of_southern_African_Fossil_Bearing_Sites.pdf (mai 2024)
https://geos.bgi.org.bw/GDP/Results?minLong=19.84&maxLong=29.58&minLat=-26.96&maxLat=-17.71
(octobre 2022) portail géologique du Botswana
https://geos.bgi.org.bw/GDP/api/Extraction/Download?folder=e34f6392-2b89-4063-9d16-84d2e4a0c16b&file=Lithology.zip (octobre 2022) téléchargement des données de lithologies du Botswana
http://geoscienceportal.geosoft.com/Botswana/api/Extraction/Download?folder=3b2e3d05-7f3c-4d78-983a-f0eb001e7e29&file=geol-botswana.zip (juin 2021) carte géologique du Botswana
https://www.grottocenter.org/index.php?lang=Fr (octobre 20202) inventaire de cavités
http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/fr/ données SIG hydro Afrique (octobre 20202)
https://www.speleo-berlin.de/en_publikationen.php (octobre 20202)
https://www.facebook.com/Independent-Cave-Explorers-1208987335793724/ (décembre 2021)
https://sterkfonteincountryestates.org.za/caves/ (mai 2025)
http://www.speleologiassi.it/71-namibia/ (mai 2025)
https://www.hypogees.ch/index.php/activites/expeditions/namibie-2011?start=20 (mai 2025)
https://paleo.mnhn.fr/fr/irl-homen-5917 (mai 2025)
https://www.ird.fr/projet-homen-evolution-de-la-biodiversite-au-plio-pleistocene (mai 2025)
https://www.namibweb.com/caveshis.htm (mai 2025)
https://aquasea.csir.co.za/wp-content/uploads/2019/12/Appendix-A-3_Heritage-Specialist-Assessment.pdf (juin 2025)
https://conjunctivecooperation.iwmi.org/systems/ramotswa-ngotwane-system/reports-and-publications/ (juin 2025)
https://www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/RIMS%20final%20version.pdf
(juin 2025)

https://pdfslide.net/download/link/andy-lloyd-icvl-mozambique-the-geology-of-the-moatize-coal-basins (juin 2025)
https://www2.bgs.ac.uk/africaGroundwaterAtlas/atlas.cfc?method=listResults&author_search=&category_search=&country_search=BW&title_search=&authorBoolean=AND&titleboolean=AND&pageSize=632&start=0&
https://paleo.mnhn.fr/fr/namibia-palaeontology-expedition-7133
Kaokoland(juillet 2025)
https://maps.landfolio.com/Namibia/(juillet 2025)
https://www.mme.gov.na/edn/(juillet 2025)
https://www.namibweb.com/cavesreg.htm(juillet 2025)
https://cagt.cnrs.fr/kromdraai/(juillet 2025)
https://archeologie.culture.gouv.fr/fr/kromdraai-premices-du-genre-humain(juillet 2025)
https://archeologie.culture.gouv.fr/fr/bolts-farm(juillet 2025)
https://www.ipgp.fr/en/research/teams/geomicrobiology/ (photo fantôme Sterkfontein) (juillet 2025)
https://www.ipgp.fr/en/research/phds/subsurface-life-in-deep-aquifers-and-impact-of-microbial-activity-on-karstification-processes/(juillet 2025)
https://data.oreme.org/karst3d/karst3d_map#selected_layer=karst3d_station&selected_station=51 modèle 3d grotte de Sterkfontein (Philippe Vernant) (juillet 2025)
https://maps.app.goo.gl/nFYjxNqCendMyudy8 entrée de Batcave (juillet 2025)
https://www.youtube.com/watch?v=BajbGtkTqpE Mike de Wit Conférence Palaeozoic diamond deposit of the North West Province, South Africa, du 22 avril 2021, W*its Talk*, (juillet 2025)
https://ecoconsult.co.za/(juillet 2025)
https://www.bcksa.co.za/main_page.html (juillet 2025)
https://www.brgm.fr/en/current-project/geological-mapping-mineral-inventory-malawi (juillet 2025)
https://spacedata.copernicus.eu/collections/copernicus-digital-elevation-model (août 2024)
https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm (aout 2024)
https://explore.stoneaerospace.com/interfaces/dragonsbreath/dragonsbreath.html (août 2024)
https://en.wikipedia.org/wiki/Ficus_cordata (août 2024)
https://gorongosa.org/uncovering-the-ancient-past-gorongosa-paleo-primate-team-continues-to-dig-for-clues/ (septembre 2024)
http://www.library.bgi.org.bw/ActiveConnect/DesktopModules/MediaTitleList.aspx?Subject=73&Type=Subject (octobre 2024)

https://photos.google.com/share/AF1QipPpRTXxi7ayj94mJE8qYqu95sHaxBZE0eaEFFsxZFBIoqG0akTWfQiy-

ArEEGp6WQ?key=TzJtVExyVmZoSFhhaFA3LWxxZVA4SmdmTFExRjFB (Chaos Cave 21/03/2023 - – Kyle Walton) (octobre 2024)

https://photos.google.com/share/AF1QipMZR5nTK0efGzCHUycdSIuVhr3zCE5980E5RKrKzQUOmRj1CPBQFZi_hwukvMS0AA?key=cG9lZ21yNnNpTU5UZGE2c0hUaDBPaUZnOW9kaEVR (Apocalypse 09/03/2024 – Kyle Walton) (octobre 2024)

https://photos.google.com/share/AF1QipOBeb9ZDtZ7fGhSateH7cTkNUnlVJSVFto9yimo9eFTjEgL_V9qbGle4eAK-4ITQ?key=dFlZb0lMOGhSSGVYMTE1ZkVBWmpSbkF0MHNuYUVn (Quarry cave 10/12/2023 – Steve Ensor-Smith) (octobre 2024)

https://photos.google.com/share/AF1QipNyZRot6XDlFTrRPYi0TGGmOfaEM3ZKOe76fUp2M3DvZ9uovRd8KtXD1eyRuPf-NA?key=MTdmdzhkTmdUZ2dLUjNBYkFHbExUMmF3S3dTZ2xB (Bolt's Cave 22/05/2023 – Gerrie Pretorius) (octobre 2024)

https://photos.google.com/share/AF1QipOe7NkJJ0Bz_AEy-9ixV4_tnAhVgUVb2nAGkShRQ56CLQ8r95HVNj9Ts3RUZZ0z_Q?key=b0toaVFVU1NiMEZPVk5GTXlaTHY3ekx6bHdhUWZn (Armageddon Cave 14 05 2023 – Kyle Walton) (octobre 2024)

https://photos.google.com/share/AF1QipOJ7G6_wXWEFvGudqA1F6ROOy_kRc158DzuCwHLhvsk7eKFq7cg4DjcxbmvdqB4AA?key=UlBpdzdoX3U5TC1ydUJaR01aRjRkV0hselZYQkJR (Hidden Cave 04/2023 – Kyle Walton) (octobre 2024)

https://photos.google.com/share/AF1QipO8oyGAJu5tsSj2yhGdmddnhuxKkffMCOkVZJ6ZXlcH8L-H73dyF7ki-0pN8Kz2lA?key=a01YZEk4Q2N0MzJwSlFoREJNRUpZRWNwUE9jeXNB (Sekororo Koof 04/2023 – Nina Oosthuizen) (octobre 2024)

https://photos.google.com/share/AF1QipO_z9TwjBoUal20mjRdSOJJ1FoetKmgh7mxd2ReXCmqgXHWcboyxCvfuVwGFrurPA?key=ODhOd2Rjd0JSUWd4MkVYSkFyRDJwcEc1Yk5mZlR3 (Yom-Tov Cave & Quarry cave 03/2023 – Kyle Walton) (octobre 2024)

https://photos.google.com/share/AF1QipOdrE2VlFryUa2Wv0Yd_QV_U5N5SavoNxJZEFbqYdh3fHACRr4cBFU2d2qt_prHcQ?key=c0dobk12NG1tSzBrZktXQkZ1Rzlpd1p1Q1ZHQzFR (Quarry Cave 12/2022 – Kyle Walton) (octobre 2024)

https://photos.google.com/share/AF1QipPCXVq4rkSPhKoU1kAgeA6hPvY5nnh8CozS1vpvrohHL2fZBBjUCG7gvjrT0_eQXA?key=eGxMX3ZDMlFPV1czdjg3UkdDSFBrWUlpSkRKcGJR (Bats and Porcpuette Cave 01/2023 – Kyle Walton) (octobre 2024)

https://photos.google.com/share/AF1QipPWgIIN5lG2z2J-XaDEkspOuFbIeG1A6gtijWmF_zdFNn-5c3O8UBf-1AH2Dp4oIA?key=dERESjh3TGpYd253Tng4YThoT0IwZUVOX3ItUUtn (Westeros 01/2023 – Kyle Walton) (octobre 2024)

https://drive.google.com/drive/folders/1jFJ4OfY4IkEcNO5w7E4m3fz3JdFc9ij3 (video Westeros) (octobre 2024)

https://photos.google.com/share/AF1QipPPJebtlAGlVH6XIeg1Tzg7KKv6_Tnjuu6kMTRgL57uYPQ-tc7-_R_MpHevcisxxw?key=NzdVRWtSdEtaZFpsbjBjUWtIVmNxckU2TGJaTlRn (Bolts & Deep Cave 02/2023 – Kyle Walton) (octobre 2024)

https://photos.google.com/share/AF1QipPsShSiew6ygSTwOM6jsueF_Jb3J675og8GI5lBsc9vGJYLKs9BBmFHHhROl3hxMA?key=MTh0azkydG55bW9oblplNlktWFltV19ncXZmckl3 (Deep cave 21/06/2024 – Katherine Draxl) (octobre 2024)

https://tsodiloresources.com/i/pdf/Figure6.pdf carte aéromagnétique Botswana (octobre 2024)
https://whc.unesco.org/fr/listesindicatives/2050/ (octobre 2024)
https://www.mining-technology.com/projects/lace-diamond-mine-kroonstad-south-africa/(octobre 2024)
https://palaeovertebrata.com/articles/view/356 Langebaanweg
https://blog.crei.ffspeleo.fr/?cat=83
https://issuu.com/sajs/docs/sajs_120_3-4_full_issue
https://www.chilembwe.com/botswana/reports.html
https://collections.peabody.harvard.edu/objects/details/790570
https://collections.peabody.harvard.edu/objects/details/650706?ctx=5947437c61cb4c4a77daef39bb1936ad8420db22&idx=0
https://collections.peabody.harvard.edu/objects/details/699293
https://collections.peabody.harvard.edu/objects/details/650706
(photographie de Drotsky devant la grotte de Gcwihaba)
https://collections.peabody.harvard.edu/objects/details/790570 (factures des missions de 1951 et carte à la fin)
https://www.der.org/kalfam/marshall-expeditions.html liste des membres de l'expédition des Marshall dans les années 1950 au Botswana et Namibie
https://www.der.org/kalfam/
http://www.botswana-travel-guide.com/bradt_guide.asp?bradt=1585

https://www.mindat.org/loc-5807.html
https://www.wikitree.com/wiki/Drotsky-50
https://www.tripadvisor.fr/Hotel_Review-g480161-d2462278-Reviews-Drotsky_s_Cabins-Shakawe_North_West_District.html
https://researchbuzz.me/2023/11/22/kalahari-desert-indigenous-peoples-ai-skills-training-chrome-web-store-more-wednesday-researchbuzz-november-22-2023/
https://www.uni-koeln.de/sfb389/e/e1/download/atlas_namibia/e1_download_climate_e.htm (janvier 2025)
http://www.karstworlds.com/2012/04/pristine-cave-system-discovered-in-nw.html
https://www.idref.fr/093616236
http://www.library.bgi.org.bw/ActiveConnect/DesktopModules/ViewDocument.aspx?ContentIndex=878.
https://www.history.co.zw/
https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_molluscs_of_Botswana
https://www.eliminateschisto.org/resources/field-guides-to-african-freshwater-snail-identification-guides-de-terrain-pour?utm_source=chatgpt.com
https://youtu.be/tNNiveK9lDU?si=on6ZDaAeAj4kfVxk&t=680 (vidéo Gcwihaba cave)
https://www.youtube.com/watch?v=YC3Vn2hhRzk&t=1058s
https://ibali.uct.ac.za/s/caldi/item/119168 (Ernst Westphal) (février 2025)
https://uwr.edu.pl/en/archaeological-research-in-africa/ (février 2025)
https://uwr.edu.pl/en/strong-women-in-the-cradle-of-humanity/ (février 2025)
https://earthsciencesociety.com/2021/08/05/canadian-company-recon_africa-drills-for-oil-in-the-okavango-delta/ (février 2025)
https://youtu.be/qGDzViJ8WOg?si=vWDuhzWP5gFvDx6B (documentaire CNRS Le Monde Okavango -Université de Rennes (février 2025)
https://lejournal.cnrs.fr/videos/au-botswana-un-incroyable-fleuve-dans-le-desert (février 2025)
https://gifex.com/fr/fichier/carte-geologique-de-l-afrique/ (février 2025)
http://www.library.bgi.org.bw/ActiveConnect/DesktopModules/MediaTitleList.aspx?Author=824&Type=Author (février 2025)
https://www.bgi.org.bw/product/128 (février 2025)
https://www.giscapetown.com/res/img/gallery/hi%20resolution/pdf2.pdf (février 2025)
https://www.giscapetown.com/res/img/gallery/hi%20resolution/pdf1.pdf (février 2025)
https://www.giscapetown.com/ (février 2025)
https://vimeo.com/286139625 (février 2025)

https://www.bgi.org.bw/sites/default/files/GEOSCIENCE%20DATA%20CATALOGUE%202022%20Rev%201.pdf (mars 2025)
https://cnes.fr/botswana-cuvette-de-sel-de-sowa-nouvelles-ressources-marges-boom-minier-environnement (CARROUE Laurent, mars 2025)
https://hnhp.mnhn.fr/fr/actualites/rs-prospections-et-decouvertes-recentes-en-afrique-de-lest-zimbabwe-kenya-avec-2
https://blog.crei.ffspeleo.fr/?p=1162 et https://blog.crei.ffspeleo.fr/?p=1353 (description des missions de 2023 et 2024 au Botswana par Véronique Olivier sur le blog de la FFS)
https://www.ird.fr/projet-hominines-au-botswana-programme-de-recherche-interdisciplinaire-sur-le-karst sur le projet HOMINI'KARST sur le site de l'IRD
https://www.mme.gov.na/publications/?designation=gsn
https://aeon.org.za/about-aeon-2/
https://earthwise.bgs.ac.uk/index.php/Nyasaland_%E2%80%94_Colonial_Geological_Surveys_1947%E2%80%931956
https://www.philippe-crochet.com/nouveautes/details/503/speleo-botswana-mai-2025 (juillet 2025)
https://theses.fr/s384958 (juillet 2025)
https://whc.unesco.org/fr/listesindicatives/5558/
https://tsodiloresources.com/
https://hselfe.pythonanywhere.com/blog/318/
https://www.terrestris.de/en/hoehenmodell-srtm30-wms/ (janvier 2026)
https://www.britishexploring.org/about/our-history/
https://www.sasa.caves.org.za/download/sasa-bulletin-volume-47-email%20(1).pdf
https://ia601601.us.archive.org/8/items/ScottySmith/ScottySmith.pdf (il est fait mention de Drotsky)
https://www.houseofmirthphotos.com/pages/books/1413/batawana-south-africa-bushmen-drotsky-caves-1950-photo-collection (photo de Drotsky)
https://www.rgs.org/about-us/our-work/latest-news/john-cooke-obituary (bibliographie succincte de John Cooke)
https://www.geographicus.com/P/AntiqueMap/ngamilandghanzi-stigand-1923 (ancienne carte du nord-ouest du Botswana)
http://www.botswana-travel-guide.com/bradt_guide.asp?bradt=1612
https://ghanzigesk.wixsite.com/ghanzi/martiens-andreas-drotsky
https://www.oucc.org.uk/procs/procs.htm
https://www.rufford.org/projects/richard-mazebedi/ecology-botswana-caves-vulnerable-and-scientifically-ignored-ecosystems/
https://hselfe.pythonanywhere.com/about

RESSOURCES DOCUMENTAIRES ET FILMOGRAPHIE

Certaines des missions de terrain ont eu la chance d'avoir accueilli des journalistes qui ont réalisé des reportages (Michel Izard et David Salmon de TF1) et des documentaires : France Télévision (William Japhet et Maurice Ribière) et ARTE France (Anthony Blinst, Yoann Périé, Frédéric Swierczynski et Fabrice Papillon).





Figure 1377 L'épisode 4 de TF1 est consacré à notre approche cartographique des paysages pour rechercher des grottes au Botswana.

Documentaire France Télévisions 2018
(Narration Films, Inrap)
JAPHET W., REBIERE M. (2018) MISSION H.O.N.à la recherche des origines de l'Homme 52 min.
https://www.beliane.com/fr/catalogue/science/mission-hon-a-la-recherche-des-origines-de-lhomme

Documentaire ARTE France 2023
(Anthony Blinst, Yoann Périé et Frédéric Swierczynski, Fabrice Papillon)

BINST A. (2023) Afrique, sur la piste des premiers hommes. Galaxie Presse. 52 min.
https://www.film-documentaire.fr/4DACTION/w_fiche_film/68800_0
https://www.arte.tv/fr/videos/105591-000-A/afrique-sur-la-piste-des-premiers-hommes/

6 Reportages de 8 minutes au Journal télévisé de TF1 du 4 février au 11 février 2022 sur la mission au Botswana de 2021 dirigée par Laurent Bruxelles
(Michel Izard et David Salmon)

Episode 1 (préparation de l'expédition, la route de Maun à Gcwihaba)
https://www.tf1info.fr/sciences-et-innovation/video-sur-les-traces-de-nos-ancetres-au-botswana-la-serie-exceptionnelle-de-reportages-du-13h-de-tf1-2209264.html

Episode 2 (la vie au campement, fouille de Koanaka et Bone Cave et explication des missions dirigées par Laurent Bruxelles)
https://www.tf1info.fr/voyages/video-dans-les-pas-des-premiers-hommes-au-botswana-la-serie-exceptionnelle-du-13h-de-tf1-2209750.html

Episode 3 (cours de paléonto et thèse de Camille Thabard, visite de la grotte de Gcwihaba et de la nurserie avec Marc Jarry)
https://www.tf1info.fr/voyages/video-botswana-dans-les-pas-des-premiers-hommes-episode-3-2210286.html

Episode 4 (prospection d'une dépression, analyse des paysages en drone, thèse de Bastien Chadelle, fouille du Corridor de Gcwihaba avec les paléontologues Jean-Baptiste Fourvel, Francis Duranthon et Camille Thabard, danse traditionnelle d'Oscar Nkwe dans la grotte
https://www.tf1info.fr/voyages/video-botswana-dans-les-pas-des-premiers-hommes-episode-4-2210391.html

Episode 5 (exploration spéléologique de la grotte de Diviner's sur Koanaka Hill K1)
https://www.tf1info.fr/voyages/video-botswana-dans-les-pas-des-premiers-hommes-5441-2210510.html

Episode 6 (laboratoire de terrain et thèse de Camille Thabard et dernière soirée)
https://www.tf1info.fr/voyages/video-botswana-dans-les-pas-des-premiers-hommes-2790-2210615.html

Ces reportages ont été compilés pour un documentaire de 52 minutes pour PRIMEVIDEO :

Carnet de Botswana (52 min)
https://www.primevideo.com/detail/0INMHUGXYMGFJMOCJWCY61N8IR/ref=atv_dp_share_cu_r

Autres documentaires ARTE

BARTON-HUMPHREYS T. (2022) L'Afrique vue du ciel Botswana. 52 min.
https://www.arte.tv/fr/videos/104809-006-F/l-afrique-vue-du-ciel/

Autres ressources utilisées dans cette thèse :

« Unknown caves of bones » The Homo Naledi Species & Lee Berger's Discoveries About Early Humans Explained. Netflix

https://www.primevideo.com/detail/0HBW67GGA0K92S944Y326OTZS2/ref=atv_dp_share_cu_r Film sur les plongées dans Boesmansgat Dave not coming back, 1h35

https://www.youtube.com/@s2sfutureitn206 Guillocheau 2021 Introduction to the S2S System (1'42)

https://youtu.be/5yIB9hHcs4s?si=ralzMQeIw0HNcjNp

https://www.youtube.com/watch?v=wDUANxqMEDY Guillocheau (Source Geological Data)

https://www.espace-sciences.org/conferences/mardis-de-l-espace-des-sciences/la-face-de-la-terre-un-milliard-d-annees-d-histoire

https://www.youtube.com/watch?v=bzBky9TX0Zo&t=763s Dauteuil

https://www.espace-sciences.org/conferences/mardis-de-l-espace-des-sciences/l-histoire-du-gondwana Roland Trompette L'histoire du Gondwana 2012 (1'34)

THALHEIM R., 2021, *The Billon Dollar Code* (77').

https://www.youtube.com/watch?v=I1JQcPbxHm4&t=1s Gommery sur *Bolt's farm*.

https://www.youtube.com/watch?v=bAq2oxoWpj4 sur *Bolt's farm*

https://www.youtube.com/watch?v=GDrKVUxQd24&t=4s UW 105

Film documentaire (90 minutes) "Kromdraai - A la découverte du premier humain" (réalisation, Cédric Robion ; production Blanche Guichou, Ex Nihilo / Agat Films), Prix du public "Pariscience 2021" (Diffusion France 5 le 25/11/2021)

https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/colloque/nouvelles-perspectives-pour-histoire-de-humanite/sous-la-dent-les-labyrinthes-de-humanite-origine-du-genre-homo-en-afrique-du-sud

https://www.youtube.com/watch?v=GfTmPWXM610

https://www.youtube.com/watch?v=Dtfqv9OmYGs CAGT Toulouse

https://vimeo.com/696038750 Paleo-Primate Project Gorgonsa Mozambique

16. LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 Les principales régions ayant livré des vestiges d'hominines en Afrique subsaharienne sont indiquées en couleur, tandis que la zone de prospection de la thèse et du projet HOMININ'KARST est représentée en gris. 3

Figure 2 Les gorges verdoyantes et arborées d'Ol Njorowa, au Kenya, font partie de la branche orientale du Rift est-africain. Bien que cette région n'ait pas révélé de fossiles d'Hominines, elle illustre parfaitement le rôle de corridor vert et d'axe de circulation préférentiel. (Source : Anup SHAH, Nature Picture Library – National Geographic)..... 5

Figure 3 Localisation des karsts fossilifères sud-africains (en rouge), exhumés des couvertures sédimentaires du Karoo (en violet et en vert) et du Kalahari (en jaune) par l'érosion des fleuves Orange et Limpopo (Légende Figure 7). 6

Figure 4 Évolution de la délimitation administrative du Cradle of Humankind. 8

Figure 5 Ecobuage près des grottes de Sterkfontein, le 17 juillet 2021, qui a facilité l'identification des structures géologiques en brûlant les hautes herbes qui les dissimulaient..... 10

Figure 6 Le matériel de terrain comprend une tablette captant le signal GPS (pour la géolocalisation) et intégrant des fonds de cartes géoréférencées (cartes topographiques, modèle ombré, images satellites, etc.) et classeur de minutes de terrain, en papier..... 10

Figure 7 Localisation géologique et hydrographique des karsts sud-africains ayant livré des fossiles d'Hominines (Cradle of Humankind délimité en jaune, Makapansgat et Taung). 13

Figure 8 Illustration montrant l'acquisition de MNT par le satellite DAICHI de la JAXA. (Source : JAXA)..... 22

Figure 9 Sélection de quelques cartes géologiques géoréférencées et intégrées dans le SIG. 24

Figure 10 Extrait du SIG montrant la carte géologique du karst de Buzi au Mozambique avec un modèle ombré du relief et les cavités inventoriées (en rouge) (cf. Chapitre n°5 p.1003). 24

Figure 11 Formes karstiques identifiées en surface d'après l'analyse de la carte des pentes du MNT du karst de Buzi au Mozambique et l'image satellite. 26

Figure 12 Puits d'entrée de la grotte de Lobatse n°1, au Botswana, où les racines des figuiers descendent le long du puits (cf. p.939). (Source : Hargreaves John). 27

Figure 13 Grotte de Muchakaima au Mozambique, où les guides utilisent les racines pour descendre dans la grotte (Source : Laumanns, 1997c). 27

Figure 14 Boyau en cours de désobstruction au niveau des racines d'un figtree au sommet de la colline C à Gcwihaba (Botswana). 27

Figure 15 À gauche, les racines d'un Namaqua rock fig (ficus cordata) dans l'entrée sud de la grotte de Gcwihaba, au Botswana. (Source : Crochet Philippe). 27

Figure 16 Zone d'utilisation des différents types de projections UTM. 32

Figure 17 Sélection de quelques cartes géologiques géoréférencées et intégrées dans le SIG.....33

Figure 18 Formations carbonatées potentiellement karstiques (en rouge) redessinées dans le SIG à partir des cartes géologiques. (Cf. Figure 107, p.142 et Figure 108).....33

Figure 19 Portail de visualisation des données géologiques vectorisées et du cadastre mis en place par le Council of Geoscience (Afrique du Sud). 35

Figure 20 Exemple d'un fichier MNT. 36

Figure 21 Exemples de calculs réalisés avec le SIG à partir des MNTs. De gauche à droite, on a (1) un modèle ombré (2) une hypsométrie (3) une carte des pentes et (4) une carte hydrologique montrant les talwegs et les limites de bassin versants (interfluves). 36

Figure 22 Exemple d'un traitement classique (hypsométrie, modèle ombré) d'un MNT de l'Afrique (Source : https://images-assets.nasa.gov/image/PIA04965/PIA04965~orig.jpg juin 2024).....37

Figure 23 Identification des dalles de MNT en fonction des latitudes et des longitudes. 39

Figure 24 Photogrammétrie par drone de la colline K1 de Koanaka Hills au Botswana. 46

Figure 25 Vue 2.5 D des Aha Hills (Waxhou South).....47

Figure 26 Prospection (en vert) d'une des dépressions près des grottes de Buchane, dont la profondeur avait été mesurée à une trentaine de mètre alors que sur le terrain la dépression mesurait à peine deux mètres de profondeur.....49

Figure 27 Profil topographique à travers une des dépressions, mesurée avec une profondeur de 30 m sur le MNT et ayant en réalité moins de deux mètres de profondeur sur le terrain (Coordonnées en WGS84 : 34,882 ; -21,678) (Document fourni par la JAXA par échange de mail). 50

Figure 28 Deux artefacts du MNT JAXA suggèrent la présence de collines à la frontière entre le Botswana et la Namibie, alors qu'elles n'existent pas. 51

Figure 29 En bleu, les routes photographiées sur Googlemaps.....52

Figure 30 En vert, les routes photographiées sur Mapillary. 52

Figure 31 Illustration montrant le satellite japonais "DAICHI (ALOS)" avec son triple système d'acquisition nadir, avant et arrière (Source : JAXA©).....55

Figure 32 Affichage des dalles de MNT, avant leurs harmonisations, sur le logiciel SIG ARCGIS™. 57

Figure 33 Affichage des dalles de MNT avant leurs harmonisations sur le logiciel SIG ARCGIS™. Exemple de Montpellier-le-Vieux sur le Causse Méjean. Le résultat de l'harmonisation est visible sur la Figure 38. 57

Figure 34 Ouverture de plusieurs dalles MNT avec ARCMAP (ARCGIS™). 58

Figure 35 Utilisation de l'outil Mosaic to New raster. 58

Figure 36 Réunion des dalles pour créer un MNT. 59

Figure 37 Hypsométrie de l'Afrique subsaharienne (https://ows.terrestris.de/osm/service?) calculée à partir du SRTM30. 61

Figure 38 MNT harmonisé et homogène de la région de Montpellier-le-Vieux (France). 62

Figure 39 Exemple d'hypsométrie du MNT de la région de Montpellier-le-Vieux (France). 62

Figure 40 Idem. 63

Figure 41 Classement des altitudes du MNT de la région de Montpellier-le-Vieux (France). 63

Figure 42 Rendu du relief sous Arcmap en utilisant un classement hypsométrique par la méthode Equal interval (West Rand, Bassin du Transvaal, Afrique du Sud). 64

Figure 43 Rendu du relief sous Arcmap en utilisant un classement hypsométrique par la méthode des quantiles (West Rand, Bassin du Transvaal, Afrique du Sud). 64

Figure 44 Rendu du relief sous Arcmap en utilisant un classement hypsométrique par la méthode des Natural Breaks (West Rand, Bassin du Transvaal, Afrique du Sud). 65

Figure 45 Rendu du relief sous Arcmap en utilisant un classement hypsométrique par la méthode des Geometrical Interval (West Rand, Bassin du Transvaal, Afrique du Sud). 65

Figure 46 Rendu du relief sous Arcmap en utilisant un classement hypsométrique par la méthode des Standard Deviation (West Rand, Bassin du Transvaal, Afrique du Sud). 65

Figure 47 Modèle ombré de l'Afrique subsaharienne, calculé à partir du MNT JAXA et d'un éclairage venant du NO. 66

Figure 48 Modèle ombré calculé à partir d'un éclairage venant du NO de la région de Montpellier-le-Vieux (France). 67

Figure 49 Modèle ombré calculé à partir d'un éclairage venant du NE de la région de Montpellier-le-Vieux (France). 67

Figure 50 Modèle ombré calculé à partir d'un éclairage venant du SE de la région de Montpellier-le-Vieux (France). 68

Figure 51 Modèle ombré calculé à partir d'un éclairage venant du SO de la région de Montpellier-le-Vieux (France). 68

Figure 52 Schémas du calcul des pentes d'un relief.....69

Figure 53 Carte des pentes calculées à partir du MNT30 (JAXA) de l'Afrique subsaharienne. 70

Figure 54 Carte des pentes calculées selon les paramètres de base d'Arcmap de la région de Montpellier-le-Vieux (France). 71

Figure 55 Carte des pentes calculées avec Globalmapper de la région de Montpellier-le-Vieux (France). 71

Figure 56 Carte de pentes paramétrées, où les pentes de 0 à 10 ° sont laissées en blanc et les pentes supérieures à 25° sont en noir de la région de Montpellier-le-Vieux (France). 72

Figure 57 Carte de pentes paramétrées, où les pentes de 0 à 15 ° sont laissées en blanc et les pentes supérieures à 85° sont en noir de la région de Montpellier-le-Vieux (France). 72

Figure 58 Exemple de Differential Topographic Openness au niveau de la bordure orientale dolomitique du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud. La carte est au nord géographique et la largeur mesure 33 km. 74

Figure 59 Exemple de Positif Topographic-Openness» (bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud). 75

Figure 60 Schéma du PTO. (Source : USNA United States Naval Academy). 75

Figure 61 Exemple de « Negative Topographic Openness »(bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud). 75

Figure 62 Schéma du NTO (Source : USNA United States Naval Academy). 75

Figure 63 Rendu final de la méthode RRIM mettant en évidence la dépression formée par la mine (bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud). 77

Figure 64 Carte des pentes couplées à un modèle ombré du CoH. 78

Figure 65 Méthode RRIM appliquée au CoH pour rendre compte des morphologies karstiques et notamment des poljés en noir. 79

Figure 66 Exemples de calcul des talwegs (vallées sèches ou paléovallées) et des réseaux hydrographiques à partir des MNT (JAXA) du Cradle of Humankind. 80

Figure 67 Hydrographie et limites des bassins versants (https://www.diva-gis.org/gdata) calculées à partir du SRTM de l'Afrique subsaharienne. 81

Figure 68 Courbes de niveau calculées à partir du MNT de la région de Montpellier-le-Vieux (France). 82

Figure 69 Courbes de niveau calculées à partir du MNT et colorées en fonction des altitudes de la région de Montpellier-le-Vieux (France). 83

Figure 70 Courbes de niveau calculées à partir du MNT et colorées en fonction des altitudes de la région de Montpellier-le-Vieux (France). 83

Figure 71 Image satellite et localisation des grottes à Bùzi au Mozambique. 86

Figure 72 Carte des pentes du MNT JAXA du karst de Bùzi au Mozambique. 87

Figure 73 Analyse morphokarstique du karst de Bùzi au Mozambique. 88

Figure 74 Visualisation de la crypto-karstification des dolomies sous couverture sédimentaire, soutirée par l'incision du canyon (Région de Montpellier-le-Vieux, France). 89

Figure 75 Blocs 3D du fonctionnement d'un poljé avec points d'absorption au niveau des cavités dans les dolomies d'Ottoshoop sur les dolomies, à l'ouest du bassin du Transvaal (Martini et al., 1975, Fig.4). 90

Figure 76 Identification des buttes vues sur le terrain et report sur le modèle ombré, calculé à partir du MNT JAXA (Source des photographies : Bruxelles). 91

Figure 77 Vue 2.5D exagérée des reliefs du Botswana (Source : Eckardt (2022, Fig.1.7 p.9 et 10). 92

Figure 78 Une partie des rapports de missions HOMINI'KARST qui contiennent des données primordiales concernant les karsts sud-africains. 94

Figure 79 Logo HOMINI'KARST (Source : Bruxelles L.) et fouille de Koanaka Hill au Botswana. 94

Figure 80 Interface de l'intranet du SEC Caving permettant de télécharger les bulletins spéléologiques et les topographies des grottes d'Afrique du Sud et du CoH.96

Figure 81 Comptes-rendus spéléologiques du Berliner Höhlenkundliche Berichte, dont les deux Atlas of the Great Caves and the Karst of Africa (Laumanns, 2017). 97

Figure 82 Chronologie des missions de terrain HOMINI'KARST avant la thèse. 105

Figure 83 Chronologie des missions de terrain pendant la thèse. 106

Figure 84 Géoréférencement des topographiques et calcul des déclinaisons magnétiques. 115

Figure 85 Dessin vectorisé des topographies. 115

Figure 86 Méthode de géoréférencement de la grotte de Rising Star (Dirks et al., 2015) et indication des points de calage et du quadrillage en WGS84 UTM Zone 35S. 116

Figure 87 Différentes cartes des formations carbonatées de l'Afrique. 126

Figure 88 Carte de affleurements carbonatés majeurs dans le monde (Ford et Williams, 1989). 127

Figure 89 Détail. 127

Figure 90 Carte des karsts africains par Pickford, Mein et Senut (1994, Fig. 1, p.227). 128

Figure 91 Carte des principales zones karstiques d'Afrique subsaharienne.(Gunn, 2004, p.42). 129

Figure 92 Carte mondiale des affleurements carbonatés (Salomon et Pulina, 2005). 130

Figure 93 Affleurements carbonatés en Afrique australe. 130

Figure 94 Distribution globale des roches carbonatées (en noir) d'après Paul Williams, University of Auckland, NZ, et publiée par Furey et Racey (2016, Fig.15.1 p.464). 131

Figure 95 Distribution des affleurements majeurs de roches carbonatées en Afrique, selon la carte de Ford et Williams (2007), inspirée de la carte de Gunn, (2004), ci-dessus (Figure 91). 131

Figure 96 Carte des formations carbonatées protérozoïques à l'affleurement et des pans (Dandurand et al., 2019, fig.1A, p.285). 133

Figure 97 Carte de la distribution des karsts à l'échelle du continent africain (Hollingsworth, 2006, Fig.19, p.72). 134

Figure 98 Carte des aquifères karstiques de l'Afrique (WHYMAP, 2017). 135

Figure 99 Carte des aquifères karstiques de l'Afrique australe (WHYMAP, 2017). .136

Figure 100 Portail du site internet du GMI (Groundwater Management Institute). 137

Figure 101 Carte initiale illustrant la problématique et la zone de prospection. 139

Figure 102 Carte des formations carbonatées à l'affleurement, des cavités connues et du contexte hydrologique (bassin d'érosion). 139

Figure 103 Carte des karsts et des karsts potentiels, figurés par des points. 140

Figure 104 Carte géologique des karsts et des formations carbonatées à l'affleurement 140

Figure 105 Carte des surfaces d'érosion. 140

Figure 106 Les principales régions fossilifères attestant de la présence des Hominines en Afrique subsaharienne sont indiquées en couleur, tandis que la zone de prospection de la thèse et du projet HOMININ'KARST est représentée en gris. 141

Figure 107 Formations carbonatées (karsts potentiels) et karsts identifiés en Afrique subsaharienne et leur position dans les bassins hydrographiques. 142

Figure 108 Formations carbonatées (karsts potentiels) et karsts identifiés en Afrique australe et leur position dans les bassins hydrographiques. Les numéros font référence aux karsts indiqués deux pages au-dessus. 145

Figure 109 Localisation des formations carbonatées (karsts potentiels) et des karsts à étudier en Afrique subsaharienne. Les numéros font référence aux karsts indiqués dans les pages suivantes. 146

Figure 110 À l'échelle de l'Afrique australe. 147

Figure 111 Capture d'écran de Google Earth Engine contenant les données du modèle SIG. 151

Figure 112 Interface du site internet hébergeant le SIG des karsts d'Afrique australe. 151

Figure 113 Secteurs considérés comme potentiellement karstiques en 2019, avant la thèse. 153

Figure 114 Idem mais indiqués en bleu (Source : Vernet – Habaque et al., 2017, Fig.2, p.11). 153

Figure 115 Nouvelle cartographie des formations carbonatées à l'affleurement en rouge (karsts potentiels) proposée par cette thèse pour le Mozambique et le Malawi. 155

Figure 116 La Surface Africaine photographiée par Moore et al. (2009b, Fig. 3, p. 73), à 10 km à l'est de Gweru sur la route Bulawayo – Harare, au Zimbabwe. .. 162

Figure 117 Analyse stratigraphique séquentielle du delta de l'Orange (Jungslager (1999, Fig. 2). Il existe une version modifiée par Bunke et Gunnell (2008, fig.27, p.49). 167

Figure 118 Analyse stratigraphique séquentielle du delta de la Tugela (Source : Petroleum Agency of South Africa (2003), modifiée par Burke et Gunnell, 2008, fig. 28, p.49). 167

Figure 119 Les différents taux d'érosion calculés au débouché des deltas des fleuves à partir du Crétacé inférieur et représentée sur une échelle horizontale des temps géologique. (Source : Ponte, 2018). 168

Figure 120 Position des différents karsts et des sept surfaces identifiées par Ponte (2018, p.175, modifié). 174

Figure 121 Légende de la carte précédente. 175

Figure 122 Les sept surfaces cartographiées par Ponte (2018, p.175, modifié).....176

Figure 123 Stratigraphie séquentielle sur deux grands profils (nord sud en haut et ouest-est en bas) entre le continent africain et la marge océanique du Canal du Mozambique. (Ponte, 2018, p.178). 177

Figure 124 Echelle de temps récapitulant l'âge des surfaces selon différents auteurs (King, 1982; Partridge et Maud, 1987 et Burke et Gunnell, 2008) et la dernière en bas correspond aux datations de Baby (2017). (Source : Baby, 2017). ...179

Figure 125 Dans la vallée de la Bloubank, à Sterkfontein et à Swartkrans la Surface Africaine (en rouge) est située vers 1500 m d'altitude pour Partridge (1973, modifié). 182

Figure 126 Carte géomorphologique du secteur de Sterkfontein, Swartkrans, Kromdraai , réalisée par Partridge (1969, modifiée), indique la Surface africaine (AS, en hachures rouges, ainsi que des surfaces d'érosion locales (EB), pour local erosion bench). 184

Figure 127 Report de la Surface Africaine, en hachures rouges dans l'emprise de la carte levée par Partridge (1969). 186

Figure 128 À Makapansgat, Partridge (1973) a calculé la position de la Surface africaine (en rouge) à 1505 m d'altitude. 187

Figure 129 Analyse des surfaces d'aplanissement pour l'Afrique australe selon Partridge et Maud (1987, modifié). Nous avons indiqué les grands fleuves et rivières en bleu, la position des formations carbonatées potentiellement karstifiées en rouge et les cavités karstiques extraites du SASA Cave Register. 189

Figure 130 Courbes de niveau de la Surface Africaine selon Partridge (1998). 190

Figure 131 Courbes de niveau de la Surface Post-Africaine 1 selon Partridge (1998). 190

Figure 132 Le réseau hydrographique au Crétacé, selon Partridge (1998), se jette uniquement sur la cote est. 190

Figure 133 Réseau hydrographique du Plio-Pléistocène selon Partridge (1998).....190

Figure 134 Surfaces d'érosion principales en Afrique australe selon Moore et al. (2009b, Fig.11, p.80, modifié) et positionnement des différents profils topographiques. Regardons les âges indiqués ci-dessous dans la version de Partridge (1998, (Fig.2, p.170) et voir aussi Partridge et Maud (2000, Fig.1-3 p.6). 192

Figure 135 Profils morphologiques N°1, 2 et 3 de Partridge et Maud (1987, coloré et traduit).....194

Figure 136 Surfaces d'érosion en Afrique australe. 195

Figure 137 Sols de l'Afrique subsaharienne d'après les cartes FOA/UNESCO (Segalen, 1995 et Tardy et Roquin, 1998). 196

Figure 138 Légende (Segalen, 1995). 196

Figure 139 Carte géologique simplifiée des principaux bassins sédimentaires de l'Afrique subsaharienne érodés par les principaux fleuves. La légende est indiquée sur la figure suivante. 198

Figure 140 Carte géologique simplifiée des principaux bassins sédimentaires d'Afrique australe. 199

Figure 141 Localisation des karsts fossilifères sud-africains et notamment le CoH qui est préservé de l'érosion régressive initiée depuis les grands fleuves du Limpopo et de l'Orange. 200

Figure 142 Plusieurs discordances sédimentaires ont recouvert les karsts fossilifères sud-africains. 201

Figure 143 Mise en évidence cartographique des discordances sédimentaire ayant recouvert les dolomies du Cradle of Humankind et de Makapansgat, notamment celles du Karoo, en violet et vert, qui sont aujourd'hui partiellement érodées. 202

Figure 144. Bassin géologique du Transvaal. La légende se situe sur la page suivante. Les cavités sont indiquées par des cercles rouges et sont issues du SASA Cave Register. 204

Figure 145 Log stratigraphique synthétique du Bassin du Transvaal et du Cradle of Humankind. 205

Figure 146 Coupe schématique d'une cryptodoline et de la crypto-altération selon Quinif (1999, Fig.2). 207

Figure 147 Épaisse couverture d'altérite au-dessus des dolomies (Source : Storry, 2010). 209

Figure 148 Crypto-karst (Source : Storry, 2010). 209

Figure 149 Détails des couloirs fantômisées (Source : Storry, 2010). 209

Figure 150 Morphologies du toit des dolomies après l'évacuation de la couverture d'altérite. On voit très bien le pendage des dolomies (Source : Storry, 2010). 210

Figure 151 Coupe stratigraphique typique des dolomies fantômisées, recoupées par un crypto-karst (Source : Bounatirou et al. 2009, fig.1 p.55, modifié). 210

Figure 152 Coupe stratigraphique montrant la morphologie en pinacle des dolomies en gris. (Source : Storry, 2010). 210

Figure 153 Pinacles dolomitiques de la carrière de Lyttelton au nord de Centurion CBD (Source : Venter, 1981 in Oosthuizen, 2013, p.53). 211

Figure 154 Ruiniformes et pinacles dolomitiques correspond à la karstification par crypto-altération (Source de la photographie : Richardson, 2013). 211

Figure 155 Coupe stratigraphique de morphologies karstiques (Source : Kleinhans, 2002, fig.D.2). 212

Figure 156 Modèle conceptuel des morphologies karstiques rencontrées sur les chantiers (Source : Kleinhans, 2002, Fig.47, p.147). 213

Figure 157 Morphologie karstique montrant des pinacles de dolomies sous la couverture d'altération (Residual Chert) (Source : Kleinhans, 2002). 213

Figure 158 À gauche en carrière les dolomies non fantômisées (carrière de Bolt's farm à Sterkfontein) et à droite les dolomies fantômisées dans une grotte du CoH (Source photographie de droite : SEC Caving). 216

Figure 159 Coupe schématique d'un fantôme de roche selon Quinif (2010, Fig.3-17, p.61 et 1999, Fig.3, modifié). 217

Figure 160 Schéma évolutif d'un massif karstifié par fantômisation selon Dupont et al. (2018, Fig.17a, p.19). 218

Figure 161 Exhumation des surfaces karstifiées et ouverture des grottes en surface (Bruxelles et Bruxelles, 2002 ; Bruxelles et Dandurand in FFS, 2024, Fig.4, p.45). 219

Figure 162 Modalité de karstogenèse selon Dubois et al.(2014). Le schéma A montre la formation d'un karst "classique". Le schéma B illustre la formation d'un karst fantômisé en deux étapes : formation du fantôme et son évacuation (Source : Dubois et al., 2014, modifié). 220

Figure 163 Remplissage karstique allochtone présentant un fort pendage. 222

Figure 164 Profil vertical stratigraphique fond de la cavité de Sterkfontein montrant le fantôme de roche en place et effondré (Bruxelles, 2019, p.42). 223

Figure 165 Le Type-Site (1482 m d'altitude) au-dessus de la grotte de Sterkfontein. La flèche rouge indique la localisation où a été trouvé le crâne de Mrs Ples en 1947. 224

Figure 166 Brèches du Type Site de Sterkfontein, composées de clastes de taille variée, principalement constituées de dolomies. 225

Figure 167 Brèches calcitées du Type Site de Sterkfontein (Cradle of Humankind, Afrique du Sud) 225

Figure 168 Stalagmites prises dans une brèche rose à Koanaka Hills au Botswana (Source : Bruxelles L.). 226

Figure 169 Vide intrabréchique (dans la brèche) comblée par de la calcite (Type Site). 227

Figure 170 Schéma d'évolution de la vallée de la Bloubank et du creusement des grottes (sans échelle) (Bruxelles, 2019, p.51, modifié). 228

Figure 171 Carte orohydrographique du Cradle of Humankind et de la vallée Bloubank. 232

Figure 172 Position de la nouvelle datation de Little Foot (Granger et al., 2015) sur le tableau fourni par Pickering et al. (2019) (Source du tableau : Pickering et al., 2019, modifiée). 235

Figure 173 Karst de Makapansgat en relief (2.5 D) où l'on identifie deux paléosurfaces planes qui correspondent à des paléo-poljés (en vert). Les cavités sont représentées en jaune. 239

Figure 174 Analyse morphokarstique du karst de Makapansgat : grottes, surfaces planes, poljés et couloirs d'altération (fantômes). 240

Figure 175 Diagramme de fonctionnement d'un poljé (Martini et al., 1976, Fig.4, p.236, modifié). 243

Figure 176 Profil schématique vertical montrant le fonctionnement d'un poljé, ses bordures de corrosion (en vert), les paléosurfaces associées et les réseaux karstiques en profondeur (Chadelle et Camus, 2018, modifié). 243

Figure 177 Anciens travertins fossilifères du plateau karstique de Ghaap, appelé le Pinacle de Raymond Dart, où le crâne d'un Australopithèque a été trouvé, indiqué par la flèche (selon Hopley P.J et al., 2013). (Source : DACEL, 1998, modifié). 245

Figure 178 Carte de localisation des grottes de la carrière selon Peabody (1954). 246

Figure 179 Localisation des cavités (par des triangles rouges) et du travertin (en bleu) dans l'ancienne carrière ayant livré un crâne d'australopithèque (Source : BSK 2003 in DACEL, 1998, modifié). 246

Figure 180 Carte géologique du Plateau de Ghaap où se situe la carrière de Buxton Norlim d'où provient le crâne de l'Australopithèque Taung et la grotte de Wonderwerk. 248

Figure 181 Analyse du crypto-karst de Ryedale, près de Lichtenburg (Source : VAN NIEKERK et al. 1999, modifié). 250

Figure 182 Coupe géologique du gisement de Ryedale (Source : Pack et al., 2000, Fig.3, p.205). 251

Figure 183 Interprétation des saprolites de Waterval, de la mine de Ryedale, comme permiennes (formation Ecca), soulignée en rouge selon Van Niekerk (2006, Fig.6, p.207, modifié). Notons la présence des brèches au toit des dolomies (en rose). 252

Figure 184 Affleurement des dolomies de Malmani à Ventersdorp (Source : De Wit, Conference Palaeozoic diamond deposit of the North West Province, South Africa, du 22 avril 2021, Wits Talk, lien 13'56''). 253

Figure 185 Affleurement des dolomies de Malmani à Lichtenburg (Source : De Wit, Conference Palaeozoic diamond deposit of the North West Province, South Africa, du 22 avril 2021, Wits Talk, lien 13'56''). 254

Figure 186 Coupe stratigraphique idéalisée (Martini, 1998b). La formation Ecca est constituée d'argilite, de grès, de charbons, à la base de lentilles d'argile réfractaire blanche (kaolinite et smectite) remaniées du paléosol et des résidus karstiques pré-Ecca. 255

Figure 187 Le profil stratigraphique de la cavité montre la répartition de la brèche, en violet, qui serait pour Martini la formation Ecca (Martini, 1998b). 255

Figure 188 Log stratigraphique dans le Bassin du Transvaal d'après Schwartz (1912, fig.53, p.182, colorisé) montrant les épisodes de plissement antérieurs à la discordance du Karoo (en violet). Le Karoo lui-même n'étant pas déformé au contraire des formations sous-jacentes. 256

Figure 189 Coupe géologique du secteur du paléokarst de Malapa (Source : Dirks et Berger, 2013, Fig.4, p.114, modifiée). La position de la coupe est indiquée sur la Figure 393 (p.434). 258

Figure 190 Analyse stratigraphique de la formation de Rooihoogte indiquant une phase de karstification pré-Pretoria, indiquée par un remplissage karstique à la base (basal in situ kart-fill). (Source : Catuneaunu et Eriksson, 2002, fig.4, p.78, colorisé). 259

Figure 191 Interprétation en stratigraphie séquentielle des différents faciès au-dessus des dolomies de Malmani selon Catuneaunu et Eriksson, 2002 ; Eriksson et al., 2005. (Source Catuneaunu et Eriksson 2002, Fig.10, p.84, Eriksson et Reczko, 2005, Fig.7, p.59 colorisé). 260

Figure 192 Répartition et différences de faciès de la formation Roohoogte dans le bassin du Transvaal selon Catuneau et Eriksson (2002). (Source : Catuneau et Eriksson, 2002, coloré et modifié, Fig.6, p.79). Nous avons localisé les différents karsts que nous étudions, en rouge ("Berceau de l'Humanité", Makapansgat, Lobatse) et en bleu (Krokodil Fragment, Minor Hall Fragment). 261

Figure 193 Vue 2.5D des formations altérées, oxydées, bréchifiées et conglomératiques dans les dolomies. Les couleurs font référence à la Figure 190 (p.259). 262

Figure 194 Zoom sur la carte précédente. Les traits rouges dans le groupe de Pretoria correspondent aux niveaux riches en fer qui n'ont pas d'importance ici. ...262

Figure 195 Modèle de Van Niekerk et al. (1999a, Fig.6, p.16, traduit et colorisé). .264

Figure 196 Interprétation glaciaire des brèches, du manganèse et de la formation Penge selon Beuke et al., 2016 (Source : Beuke et al., 2016). 265

Figure 197 Hypothèses de karstification du CoH, selon Foster (1988, Fig.5, p.23). 266

Figure 198 Carte orohydrographique du Cradle of Humankind et des cavités. 272

Figure 199 Collines karstifiées et fossilifères du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai dans la vallée de la Bloubank et situées dans le sud du Cradle of Humankind. (Vue 2.5D exagérée dix fois). 273

Figure 200 Autres vues des collines karstiques fossilifères. La vallée est creusée dans les dolomies paléoprotérozoïques, à l'exception du relief indiqué Black Reef et des roches mafiques de l'Archéen. (Vue 2.5D exagérée dix fois). Le fond de la carrière est à 1475 m et le sommet à 1500 m. 274

Figure 201 Répartition des dalles du MNT du CDNGI pour le secteur de Swartkrans, Sterkfontein, Kromdraai. 276

Figure 202 Emprise du MNS Pléiades de Lans et du LIDAR de Caruana. 277

Figure 203 Emprise des différentes sources de données altimétriques pour le secteur de Swartkrans, Sterkfontein, Kromdraai. 277

Figure 204 Amont de la Bloubank montrant les reliefs et les nombreux gisements fossilifères karstiques (Source : Arte). 290

Figure 205 Depuis le sommet du gisement fossilifère de Swartkrans, en rive gauche. (Source : Arte). 290

Figure 206 Vallée de la Bloubank depuis Swartkrans vers l'aval et le knickpoint de Swartkop. 292

Figure 207 Analyse morphokarstique du panorama. 292

Figure 208 Carte du Cradle of Humankind (secteur de Sterkfontein) (MNT Caruana, MNS Pléiades Benjamin Lans et CDNGI). 293

Figure 209 Cartographie des paléosurfaces du Cradle of Humankind (secteur de Sterkfontein) (MNT Caruana, MNS Pléiades Benjamin Lans et CDNGI). 294

Figure 210 Panorama depuis la grotte de Sterkfontein. 295

Figure 211 Analyse morphokarstique du panorama. 295

Figure 212 Classes des altitudes du MNT du bassin versant de la Bloubank. Les valeurs d'altitude sont représentées en abscisse et leur fréquence d'occurrence en ordonnée. 296

Figure 213 Identification des paléosurfaces des dolomies du West Rand Transvaal Basin à l'ouest du CoH. 296

Figure 214 Classe des altitudes des entrées de grottes connues sur un fond géologique. 297

Figure 215 Classe des altitudes des entrées de grottes sur un fond hypsométrique. 297

Figure 216 Profil vertical (exagéré dix fois) du plateau dolomitique du Central Rand. (Cf. Figure 350 et localisation du profil sur la Figure 349 p.394). 298

Figure 217 Observations géologiques (arrêt n°1 à 5) des couvertures des altérites sur les dolomies. Ces formations superficielles n'ont pas été cartographiées par les géologues. 299

Figure 218 Localisation géologique des observations. 299

Figure 219 Localisation des affleurements A1 et A2 sur la photographie aérienne. Les flèches noires indiquent l'orientation du panorama. 301

Figure 220 Localisation des affleurements A1 et A2 sur la carte géologique. Les flèches noires indiquent l'orientation du panorama. 301

Figure 221 Altérites remaniées sur le bord de la route. 302

Figure 222 L'altérite est constituée de clastes de différentes lithologies. 302

Figure 223 Claste de dolomie enrobé par des oxydations de fer et de manganèse. 302

Figure 224 Claste de dolomie blanche et poreuse (décalcifiée? désilicifiée?). Pas de cortex d'altération. Les dolomies ont été démantelées et broyées par l'érosion. 302

Figure 225 Clastes à angles aigus, peu transportés, constitués majoritairement de dolomies blanches, pris dans l'altérite (shale de la Rooihoogte?). 303

Figure 226 Microgrès (formation Timeball Hill) arrondi en raison de son évolution au sein de l'altérite. 303

Figure 227 Détail sur les dolomies non altérées. 303

Figure 228 Lapiaz dolomitique sur le versant. 303

Figure 229 Coupe stratigraphique de la formation de Rooihoogte incisée par la rivière Upper Riet. 304

Figure 230 Conglomérats de la formation de Rooihoogte. 304

Figure 231 Dans la formation de Rooihoogte, on trouve un conduit karstique d'un diamètre d'un mètre rempli d'un ciment oxydé rougeâtre et délimité par un enduit noir qui pourrait être du manganèse. 304

Figure 232 Interbanc de chert préservé dans la formation de Rooihoogte. 304

Figure 233 Carte topographique indiquant d'anciennes exploitations : "diggings". 305

Figure 234 Localisation de la tranchée observée sur une image satellite. Nous remarquons qu'une couverture sédimentaire orange recouvre les dolomies. 305

Figure 235 Paysage du secteur de Valkdrift 161 IQ, constituée de sols Hutton en surface, puis d'altérites et enfin des dolomies de Malmani. 306

Figure 236 Hutton soil. 307

Figure 237 Séquence stratigraphique du puits d'entrée de la grotte d'Armaggedon selon Boshoff, 2019, p.85. 307

Figure 238 Tranchée observée près de la ligne de haute tension. 308

Figure 239 Photographie et analyse de la tranchée d'Eljeesee Agricultural Holdings montrant la surface d'aplanissement à 1600 m, une couverture sédimentaire altérée composée au sommet par les sols Hutton puis par des altérites. Le cadre noir correspond à la photographie de droite. 308

Figure 240 Altérite remaniée (pisolithes de fer, roulés, de taille homogène et cimentés) qui montre un certain pendage, de gros blocs de substrat emballés et des petits gravillons roulés de quartzite blanc. 308

Figure 241 Croûte de fer caractéristique du front d'altération. 309

Figure 242 Agglomérats de pisolites formant la croûte de fer, caractérisant le front d'altération. 309

Figure 243 Front d'altération entre l'altération et l'encaissant. Il est caractérisé par des minéralisations. 309

Figure 244 Encaissant visible sous la saprolite. 309

Figure 245 Encaissant dolomitique altéré au niveau du front d'altération. 309

Figure 246 Dolomie moins altérée sous le front d'altération. 309

Figure 247 Plusieurs blocs de brèches minéralisés extraits de l'altérite lors de la réalisation des tranchées. 310

Figure 248 Bloc de brèche emballé dans l'altérite. 310

Figure 249 Sol altéré. 311

Figure 250 Sol altéré. 311

Figure 251 Sol latéritique. 311

Figure 252 Le sol est constitué d'une accumulation de blocs de fer. 311

Figure 253 Minéralisation caractérisant le front d'altération. 312

Figure 254 Croûte de fer. 312

Figure 255 Carte géologique du Central Rand, du CoH et du Farwest Rand. 316

Figure 256 Visualisation des reliefs avec la méthode RRIM. 318

Figure 257 Bloc 2.5D (exagéré) du Central Rand, du CoH et du Farwest Rand. 319

Figure 258 Profondeur du toit des dolomies entre Carletonville et Fochville et hypsométrie. 320

Figure 259 Profondeur du toit des dolomies entre Carletonville et Fochville et géologie. 321

Figure 260 Sill de la colline d'Oaktree. 322

Figure 261 Idem. 322

Figure 262 Idem 323

Figure 263 Volumes de brèches importantes au sommet de la colline d'Oaktree. .323

Figure 264 Brèches à mi-pente de la colline d'Oaktree. 323

Figure 265 Détail de l'image satellite à Batcave montrant des sols sombres correspondant à une absence de dolomies. 324

Figure 266 Cartographie succincte de la structure complexe à Oaktree. 325

Figure 267 Panorama de Protea Ridge montrant une vallée à Krugersdorp, à 1676 m d'altitude caractérisée par des sols orangés de la formation d'Orange Groove. 326

Figure 268 Image satellite montrant le vallon de Protea Ridge. 326

Figure 269 Panorama vers le nord depuis Weldevreden. 327

Figure 270 Carte géologique en relief de l'entonnoir de percée cataclinale d'Hekpoortspruit. Le panorama précédent (Figure 269) est indiqué par le point rouge et les deux flèches. Le cercle rouge sur la coupe en bas à droite localise les crêts en quartzites de Pretoria. Cette figure est disponible en grand (p. 467).....328

Figure 271 Analyse hypsométrique et lithologique du panorama depuis Weltevreden. Au premier plan, la formation de Timeball Hill est dégradée par la rivière Hekpoortspruit et forme une cuvette. Cette rivière est un affluent de la Magaliesrivier qui traverse la chaîne du Witwatersberg. 329

Figure 272 Percée cataclinale d'Hekpoortspruit. 331

Figure 273 Quartzites de la formation de Klapperkop Quartzite. 332

Figure 274 Faciès d'altération important des quartzites de Klapperkop : présence de cortex d'altération (croûte blanche) et de fissures. 332

Figure 275 Cortex d'altération en profondeur des quartzites de Klapperkop. 332

Figure 276 Sur le relief de Krugersdorp, on trouve un paléokarst à 1716 m d'altitude. 334

Figure 277 Photographie montrant les blocs remplissant le paléokarst (indiqué par le n°4 sur la figure précédente). Cette nappe de blocs recouvre une grande superficie de cette surface plane (indiquée par le n°6 sur la figure précédente). Ce sont plutôt des éléments issus du démantèlement d'une stone-line que des alluvions. 334

Figure 278 Frange d'altération autour des blocs formés dans la lithologie Hospital Hill montrant qu'ils sont plutôt issus du démantèlement d'une stone-line que d'une rivière. 334

Figure 279 Résidualisation et stone-line des roches mafiques Dans le bassin versant de la Krokodil River, vers Hennebech, près de Cradlestone, le long d'Utopia Road. 336

Figure 280 Localisation de Protea Ridge. 337

Figure 281 Surface d'érosion S1 sur des roches mafiques à 1580 m (Source : Google Maps). 337

Figure 282 Panorama vers le sud-est depuis Sterkfontein. 338

Figure 283 Panorama depuis Sterkfontein montrant Protea Ridge et la surface à 1580 en-dessous. 338

Figure 284 Panorama de l'église d'Hennebeth. 339

Figure 285 Localisation du panorama. 339

Figure 286 Tranchée montrant des stone-lines. 339

Figure 287 Localisation du panorama de Bolt's Farm, ci-dessous. 340

Figure 288 Le lapiaz dolomitique à 1510 m d'altitude, à Bolt's Farm. 340

Figure 289 Dalle siliceuse. 341

Figure 290 Dalle siliceuse vue sous un autre angle. 341

Figure 291 Contacts stratigraphiques : silicifications et bréchification dolomie grise, dalle siliceuse, brèches. On observe ici le passage de la silicification des dolomies grises à la bréchification de la dalle silicifiée. X = 572454 (UTM 35S) ; Y = 7122289 ; Z=1477 m. 342

Figure 292 Au sommet de Swartkrans, situées vers 1485 m d'altitude sont conservées, sous forme de relique, des dolomies silicifiées. Les formations silicifiées sont plus résistantes à l'érosion. Ces dolomies silicifiées sont rarement en place car elles ont été totalement bréchifiées. 343

Figure 293 Etape 1 : Altération correspondant à la Surface Africaine. 344

Figure 294 Etape 2 : Abaissement de la surface topographique, démantèlement et bréchification. 344

Figure 295 Localisation du panorama ci-dessous. 345

Figure 296 Surface d'aplanissement des dolomies, à 1470 m d'altitude, en contre-bas de Sterkfontein, au sud. On y distingue une formation superficielle sombre pouvant être du fantôme de dolomie résiduelle. 345

Figure 297 Panorama depuis le sud, de la surface en contre-bas de Sterkfontein (paléo-poljé). 345

Figure 298 Lapiaz dolomitique au-dessus du gisement de Cooper. 346

Figure 299 Altération différentielle du bloc. Silicification et cavité au cœur du bloc. 346

Figure 300 Vallée de la Bloubank depuis Swartkrans vers l'aval et le knickpoint de Swartkop. 347

Figure 301 Analyse morphokarstique du panorama. 347

Figure 302 Diagramme de fonctionnement d'un poljé (Martini et al., 1976, Fig.4, p.236, modifié). 349

Figure 303 Profil schématique vertical montrant le fonctionnement d'un poljé, ses bordures de corrosion (en vert), les paléosurfaces associées et les réseaux karstiques en profondeur (Chadelle et Camus; 2018, modifié). 349

Figure 304 Paléo-poljé de la Bloubank à Sterkfontein et Kromdraai et éléments lithostructuraux. 350

Figure 305 Vue 2.5D du poljé de la Bloubank (exagérée 5 fois). 351

Figure 306 Vue 2.5D du poljé de la Bloubank (exagérée 5 fois). 351

Figure 307 Grand replat, en bleu, qui correspond à un paléo-poljé lorsqu'il se développe sur les dolomies (en vert) c'est-à-dire surtout dans la vallée de la Bloubank. 352

Figure 308 Mise en place d'un grand replat dont la partie située sur les dolomies, dans la vallée de la Bloubank et un poljé. 353

Figure 309 Alluvions, datées à 3.55 Ma, à l'ancienne mine de Kromdraai. 354

Figure 310 Replat sur le Black Reef à l'ancienne mine de Kromdraai, daté à 3.5 Ma. https://maps.app.goo.gl/adh5H8axDHrBbQfd6 355

Figure 311 Conglomérats du Black Reef à l'ancienne mine d'or de Kromdraai. 355

Figure 312 Pisolites du Black Reef. 356

Figure 313 Colluvions au bord de la route. 356

Figure 314 Vue 2.5D montrant les surfaces et la position des prises de vue panoramiques. 358

Figure 315 Plaine située à 1450 m. 359

Figure 316 Accumulations indurées de pisolites de fer. 359

Figure 317 Pisolite de fer. 359

Figure 318 Localisation des alluvions sur la surface S4, indiquée par le cercle rouge. 360

Figure 319 Travaux routiers faisant apparaître de gros galets fluviatiles (alluvions) à 1425 m d'altitude (surface S4). 360

Figure 320 Détails des alluvions à 1425 m d'altitude. 361

Figure 321 Surface sur les roches de Ventersdorp à Muldersdri. 361

Figure 322 Panorama de Len's Den montrant l'aplanissement à 1430 m sur les granito-gneiss. 362

Figure 323 Tranchée permettant de voir les stones-lines sur les gneiss..... 362

Figure 324 Stone-line. 362

Figure 325 Brèches silicifiées sur la colline au-dessus du gisement de Cooper's. .. 363

Figure 326 Coupe géologique et morphokarstique des réseaux de Swartkrans, Sterkfontein, Cooper's et Kromdraai. 364

Figure 328 Localisation des dolomies silicifiées (en rose), d'une zone caractérisée par une absence de dolomies (en marron) et des formations de brèches silicifiées (en rose) et le réseau karstique de la grotte de Sterkfontein (en rouge). ... 365

Figure 329 Niveau de « brèche de chert schisteux » SCB (Slaney Chert Breccia) (Hobbs et al., 2011) dans les dolomies, au sud de la colline de Sterkfontein, qui forme un petit escarpement que l'on suit jusqu'à la colline de Cooper's et jusqu'au gisement de Kromdraai. Wilkinson (1973, Fig.7.1) a cartographié cet affleurement (carte suivante) et indique que c'est un sille de dolérite. 366

Figure 330 Niveau de « brèche de chert schisteux » SCB (Slatey Chert Breccia) (Hobbs et al., 2011) dans les dolomies, au sud de la colline de Sterkfontein. 366

Figure 331 Report de la carte de Sterkfontein, Lincoln et Fault selon Wilkinson (1973, Fig.7.1, modifié). 367

Figure 332 Affleurement de dolomies très altérées, de poches de silices cristallisées et présence d'une couverture sédimentaire sombre (fantôme de dolomies ?). 368

Figure 333 Cristaux automorphes de silice. 368

Figure 334 Amas de cristaux automorphes de silice exhumé d'une couverture sédimentaire sombre pouvant être du fantôme de dolomies. 368

Figure 335 Détails sur les cristaux centimétriques automorphes de silice tels que trouvés à l'affleurement, altérés et colorés. 369

Figure 336 Détails des cristaux centimétriques automorphes de silice observés sur une cassure fraîche. 369

Figure 337 Affleurement de Slatey Chert Breccia que nous suivons jusqu'aux paléokarsts de Cooper et au gisement de Kromdraai. 371

Figure 338 Carte du relief formant la pinède montrant la complexité des filons SCB, cartographiés en orange lorsqu'ils sont trouvés in-situ et en pointillé blanc quand ils sont très résiduels ou supposés. Ce pourrait être les brèches de type n°1 (Dirks et Berger, 2013). 372

Figure 339 Localisation du CoH sur les fonds de cartes géologiques au 1/250 000 : Wes Rand (n°2626), Est Rand (2628), Pretoria (2528) et Rustenberg (2526).

Remarquons l'interruption de la cartographie des altérites à l'est de la feuille n°2626. 378

Figure 340 Localisation du CoH sur les fonds de cartes géologiques au 1/50 000. Nous remarquons que les feuilles n°2627BA et 2627BB sont manquantes. 378

Figure 341 Carte géologique inédite du Cradle of Humankind. 379

Figure 342 Contexte géologique du Cradle of Humankind (Vue 2.5D exagérée vingt fois). 380

Figure 343 Contexte géologique de la vallée de la Bloubank et des grottes fossilifères majeures (Wonder et Motsetse ne sont pas fossilifères et Haasgat et Minnaar n'ont pas livré de fossiles d'Hominines uniquement de la faune) (Vue 2.5D exagérée vingt fois). 380

Figure 344 Carte géologique du sud du Cradle of Humankind. 381

Figure 345 Géologie de la vallée de la Bloubank et du secteur de Sterkfontein. 383

Figure 346 Reconstitution de la ligne de rivage de la mer paléoprotérozoïque et de la distribution spatiale des différentes formations des Dolomies de Malmani et des différents faciès (stromatolites, laminations alguaires, oolithes, etc.) selon Foster (1988, Fig.8, p.40).....390

Figure 347 Log synthétique des formations composant les dolomies de Malmani (Source : Obbes, 2000 in Ingram, Obbes et Van Tonder, 2011, fig.35, p.59, modifié, légende en table 8, p.47). 391

Figure 348 Dolomies de Malmani, riches en niveaux de chert, de la région karstique d'Hoogland, à une quarantaine de kilomètres à l'ouest du CoH. 392

Figure 349 Vue 2.5 D du sud du Bassin du Transvaal où se situe le Cradle of Humankind délimité en jaune. 394

Figure 350 Coupe géologique des dolomies du Potchestroom Synclinorium et du Central Rand entre Carletonville, le « Berceau de l'Humanité » et le lac de Hartbeespoortdam. 395

Figure 351 Panorama depuis le Walter Sisulu National Botanical Garden. 399

Figure 352 Analyse géologique du panorama précédent. 399

Figure 353 Cartographie 2.5D des paléosurfaces régionales du Cradle of Humankind (exagération verticale x5).....401

Figure 353 Cartographie 2.5D des paléosurfaces du Cradle of Humankind (exagération verticale x5).....402

Figure 355 Carte hypsométrique et hydrologique régionale du Coh (en rouge). Les pointillées blanc délimitent les dolomies. 403

Figure 356 Analyse morphokarstique (2.5 D) de la Bloubank à Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai et ses surfaces d'aplanissement remarquables (paléoniveaux de base)..... 404

Figure 357 Même carte que précédemment avec ajout des lithologies..... 404

Figure 358 Analyse des surfaces de la Bloubank dans le secteur de Sterkfontein depuis le sommet de Swartkrans..... 405

Figure 359 Comparaison de la typologie des surfaces montrant l'apport de cette thèse à la connaissance des surfaces morphokarstiques du Cradle of Humankind. 406

Figure 360 Coupe géologique et répartitions des cavités dans le Cradle of Humankind à Sterkfontein et Minaar's cave. 406

Figure 361 Détail de la coupe géologique. 407

Figure 362 Analyse morphokarstique dans le Cradle of Humankind à Sterkfontein et Minaar's cave..... 407

Figure 363 Synthèse morphokarstique du Cradle of Humankind à Sterkfontein et Minaar's cave..... 408

Figure 364 Vue 2.5D du profil morphokarstique n°1. 408

Figure 365 Profil morphokarstique des cavités dans le Cradle of Humankind à Swartkrans. En gras, le nom des cavités fossilifères. 409

Figure 366 Profil morphokarstique des cavités dans le Cradle of Humankind à Kromdraai, Cooper's et Drimolen..... 410

Figure 367 Vue 2.5D du profil morphokarstique n°3. 410

Figure 368 Profil morphokarstique des cavités dans le Cradle of Humankind à Polver's Lake et Wonderwerk. 411

Figure 369 Carte géologique de la Bloubank (Vue 2.5D exagérée 20 fois). 412

Figure 370 Carte hypsométrique de la Bloubank (Vue 2.5D exagérée 20 fois)..... 412

Figure 371 Carte morphokarstique du bassin versant de la Bloubank. 413

Figure 372 Vue 2.5D (exagérée 20 fois) de la carte morphokarstique précédente. 413

Figure 373 Les dolomies de Malmani, non altérées affleurent dans la carrière abandonnée de Bolt's Farm. On distingue des bancs de dolomies grises métriques et des niveaux de silex décimétriques, de couleur bleue..... 414

Figure 374 Localisation des nouvelles fouilles dans le gisement de Swartkrans dans la vallée de la Bloubank où ont été exhumés les outils taillés les plus vieux d'Afrique du Sud (Kuman et al., 2021). Les études stratigraphiques et la compréhension du phénomène de fantômisation des carbonates montrent qu'il est logique de découvrir des remplissages plus anciens en direction de l'aval-pendage et en sortant du fond de la cavité..... 415

Figure 375 Boxworks dans la grotte n°764 du SASA Cave Register, visité le 15/08/2021. (Position GPS : -26.39354167 ; 27.74251389, 1657 m, puits d'accès de 89 m).....417

Figure 376 Boxworks d'une grotte du CoH (Source : SEC Caving, groupe WhatsApp). 417

Figure 377 Coupe stratigraphique du fond de la cavité de Sterkfontein (Source : Bruxelles, 2019, p.42).....418

Figure 378 Couloir dans Chaos Cave (Source : SEC Caving 21/03/2023 lien). 419

Figure 379 Couloir dans Boon's cave (Source : SEC Caving, modifié). 420

Figure 380 Profil topographique de la grotte de Sterkfontein (Source : Bruxelles, 2019).....422

Figure 381 Différents profils topographiques de la grotte de Sterkfontein (Martini et al., 2003, colorisé). 423

Figure 382 Plan topographique de la grotte de Sterkfontein avec indication de la position des profils ci-dessus (Martini et al., 2003, colorisé). 423

Figure 383 Localisation de la carrière de Bolt's Farm. 424

Figure 384 Couloirs de fantômes (notés f), subverticaux, recoupés par les fronts de taille de l'ancienne carrière de Bolt' Farm (Sterkfontein Quarry). 425

Figure 385 Détails d'un couloir fantômisé. 425

Figure 386 Ancien fantôme (couloir d'altération) recoupé par le front de taille. En bleu, nous avons indiqué la stratigraphie de l'encaissant (dolomies à niveaux de silex).....426

Figure 387 Pseudo-endokarsts recoupés par le front de taille. 427

Figure 388 Analyse des pseudo-endokarsts. 427

Figure 389 Front de taille de la carrière de Sterkfontein qui a recoupé un couloir de fantôme et qui montre une accumulation des silex à la base des couloirs. .428

Figure 390 Report des cavités, en rouge, des couloirs. 429

Figure 391 Cartographies succinctes des cavités, en rouge, des couloirs (cercle blancs) et des filons de calcite sur le modèle ombré de la carrière. 430

Figure 392 Fantômes de roche à Minnaar (Position : -26.007070, 27.737283 ; https://maps.app.goo.gl/65oNHP1hXoSPiMYN9). 431

Figure 393 Sur cette carte géologique (Source : Dirks et Berger, 2013, Fig.3, p.114, modifiée) la formation de la Rooihoogte est présente au niveau du contact entre les dolomies de Malmani et le groupe de Pretoria puis est aussi trouvé le long de failles (dykes). On repère aussi des lambeaux de la formation Ecca (en rose). 434

Figure 394 Localisé dans le même secteur que celle de (Source : Dirks et Berger, 2013, Fig.5, p.116). La position de cette carte est indiquée par le rectangle noir sur la carte précédente. La légende est identique à celle de la figure précédente. 435

Figure 395 Cartographie en surface du paléokarst de Malapa par Dirks et al. (2010, Fig.1, p.205, modifié). La position de la coupe N-S de la Figure 189 (p.258) est indiquée par les flèches. 436

Figure 396 Le retrait de la couverture sédimentaire met à l'affleurement un réseau de fractures, organisées en couloir et cartographié sommairement en rouge. 437

Figure 397 Analogie entre les paléokarsts de Malapa, plus précisément les « chert fracture vein & stockwork », en orange et les couloirs de fantômisation, en rouge..... 438

Figure 398 Étape 1. 441

Figure 399 Étape 2. 442

Figure 400 Étape 3. 442

Figure 401 Étape 4. 443

Figure 402 Étape 5. 443

Figure 403 Étape 6. 444

Figure 404 Étape 7. 444

Figure 405 Coupe stratigraphique de la grotte de Sterkfontein (Source : Bruxelles, 2019, Fig. 41, p.72). 445

Figure 406 Détail du panorama de la Figure 351 (p.399) précédent montrant les différentes formes du paysage selon qu'affleurent les roches de Ventersdorp, les dolomies de Malmani ou les quartzites de Witwatersrand (Swartkop). Dans les dolomies, le paysage karstique est caractérisé par des vallées d'où émergent des buttes karstiques (Kromdraai). On distingue aussi les reliefs en roche dure qui émergent des carbonates. Ce sont les quartzites du Mont Swartkop et des chaînes de Magaliesberg et du Witwatersberg en arrière-plan. 446

Figure 407 Profil topographique, non exagéré, de la Bloubank dans le Cradle of Humankind qui montre le faible contraste d'altitude, caractéristique des plateaux carbonatés. 447

Figure 408 Profil topographique à travers le CoH (exagéré verticalement dix fois). 447

Figure 409 Cette coupe géologique est un détail de la coupe géologique plus grande de la Figure 350 (p.395), où est indiquée la légende et le numéro des cavités. 448

Figure 410 Panorama depuis Wondercave en direction du relief de Swartkop et de la chaîne en quartzites de Witwatersrand. La position de ce panorama est indiquée en rouge sur la Figure 412.....449

Figure 411 Analyse des surfaces et de formations géologiques du panorama depuis Wonder cave. Au premier plan, les dolomies forment une surface plane à 1500 m d'altitude. 449

Figure 412 La position du panorama (Figure 410) est indiquée par le point rouge sur la carte topographique (Source : NGI) en relief de Swartkop et de la confluence de la Bloubank et de la Krokodil.....451

Figure 413 La position du panorama (Figure 410) est indiquée par le point rouge sur la carte géologique de Swartkop et de la confluence de la Bloubank et de la Krokodil. Au-dessous, nous avons indiqué la légende complète de la Figure 341 (p.379). 452

Figure 414 Éléments morphologiques majeurs du paysage du Cradle of Humankind. 454

Figure 415 Au Crétacé et établi la Surface Africaine et des reliefs émergent. 455

Figure 416 La karstification par fantômisation des dolomies, indiquée par des traits rouges, débute sous la Surface Africaine. 455

Figure 417 Organisation du drainage de la rivière cataclinale de Magaliesrivier. ...456

Figure 418 Percées anaclinales et érosion régressive en amont de Seekoeihoek. ..457

Figure 419 Erosion de la vallée Krokodil sur les granites. 458

Figure 420 Poljé de la Bloubank. 460

Figure 421 Creusement de la vallée de la Bloubank en amont du knickpoint du Swartkop, au moins à partir de 3.65 Ma (âge des remplissages les plus anciens connus). 460

Figure 422 Mise en place de la vallée de la Honingklip.....461

Figure 423 Vague d'érosion régressive en amont de la Bloubank : le Riet. 462

Figure 424 Erosion régressive de la vallée de Skeerpoort au minimum à 2.4 Ma. ..463

Figure 425 Percées anaclinales et formation des cuvettes d'Hekpoort et de Dorings. 464

Figure 426 Coupe schématique synthétique du Cradle of Humankind. 466

Figure 427 Analyse des paléosurfaces et des surfaces structurales (Black Reef) sur le profil géologique schématique de la Bloubank dans le Cradle of Humankind. 467

Figure 428 Synthèse. 468

Figure 429 Coupe géologique et morphokarstique des réseaux de Swartkrans, Sterkfontein, Cooper's et Kromdraai. 469

Figure 430 Carte des formations carbonatées à l'affleurement potentiellement karstifiées. 470

Figure 431 Carte hypsométrique et organisation hydrologique (Carte en grand format Figure 911 p.905). 471

Figure 432 Le Delta de l'Okavango est visible depuis l'ISS. (Source : NASA https://images.nasa.gov/details/iss040e095229 modifié). 476

Figure 433 Le Delta de l'Okavango est situé à l'extrémité du Rift est-africain, dont les failles principales sont représentées en rouge. 478

Figure 434 Les karsts étudiés sont situés à 150 km à l'ouest du Delta de l'Okavango, dont le bassin versant actuel en pointillé, est endoréique. 479

Figure 435 Chronologie des évènements géologiques (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003, Fig.1). 480

Figure 436 Emplacement de l'ATLAS n°2 sur l'ATLAS n°1. 482

Figure 437 Emplacement des autres atlas sur l'ATLAS n°3. 482

Figure 438 ATLAS n°1 : géologie et hydrologie des karsts de l'Afrique australe. 483

Figure 439 Légende de la carte précédente. 484

Figure 440 ATLAS n°2 : géologie du nord-ouest du Botswana montrant les grottes étudiées, le Rift de l'Okavango, le Delta de l'Okavango et les marais salants de Makgadikgadi. 486

Figure 441 Légende de l'ATLAS n°2 et schéma structurale du Rift de l'Okavango. 487

Figure 442 ATLAS n°2 : Carte géologique pré-Kalahari des formations carbonatées et du Karoo au nord-ouest du Botswana. 489

Figure 443 Légende de la carte précédente. 490

Figure 444 ATLAS n°3 : géologie du horst occidental du Rift de l'Okavango (adaptée de la carte géologique de Machacha (1997) et des cartes du Water Surveys Botswana et Aqualogic (2001, Fig.2; 2003, Fig.5). 492

Figure 445 ATLAS n°3 : géologie pré-Kalahari du horst occidental du Rift de l'Okavango (adaptée de la carte géologique de Machacha (1997) et des cartes du Water Surveys Botswana et Aqualogic (2001, Fig.2; 2003, Fig.5). La position des forages est indiquée sur la Figure 687 (p.684). 493

Figure 446 Légende de la carte précédente. 494

Figure 447 ATLAS n°3 : géologique pré-Kalahari (BGI, 2022, modifié). 495

Figure 448 ATLAS n°3 : levés aéromagnétiques d'après Lehmann (2015, Fig.7, p.179) et Rankin (2015, Fig.6.19, p.190) pour la partie namibienne des Aha Hills. Les trames blanches, qui ne sont pas indiquées en légende signalent les formations carbonatées sous couverture ou subaffleurantes. 496

Figure 449 ATLAS n°4 : Hypsométrie et prospections de 2015 à 2024 dans le nord-ouest du Botswana. 497

Figure 450 ATLAS n°4 : Image satellite (ARCGIS WB_2016_R15) du nord-ouest du Botswana. 498

Figure 451 Le karst à buttes des Aha Hills (lire p.541). 499

Figure 452 Les collines dolomitiques karstifiées de Gcwihaba et la paléovallée de Gewidum creusée dans des dépôts lacustres (lire p.554) (Figure 772 p.775). 499

Figure 453 Les paléolacs et les collines karstifiées de Koanaka Hills (lire p.594) (Figure 837 p.813). 499

Figure 454 ATLAS n°4 : Analyse morphologique en relief. 500

Figure 455 ATLAS n°4 : Analyse morphologique. 501

Figure 456 Un banc de marbre dolomitique (formation de Koanaka) près de la fouille de la colline de Bone Cave (K2) à Koanaka. 503

Figure 457 Lapiaz dolomitique et pendage important au pied de la colline de grotte de Gcwihaba (formation de Koanaka). 504

Figure 458 Dolomies (formation de Koanaka) à l'intérieur de la grotte de Gcwihaba, entrée nord (Source : Crochet P.). 504

Figure 459 Pendage vertical des dolomies (formation de Koanaka) sur le versant sud de la colline K1, près du tube d'entrée de la grotte de Gecko et des déblais du forage (n°BHZ12391). 505

Figure 460 Pendage des dolomies (formation des Aha Hills) du versant de la colline où s'ouvre la grotte de Waxhou north. 505

Figure 461 Dolomie à bancs de silex à Waxhou (formation des Aha Hills). 505

Figure 462 Dolomies, à banc de silex (groupe d'Otavi), au niveau de la grotte de Scorpion Maze, à Harasib en Namibie (Source : Bruxelles C.). 506

Figure 463 Effondrement karstique dans les dolomies d'Harasib (groupe d'Otavi), à Otavi, en Namibie. 506

Figure 464 Caractéristiques physiques des dunes de la région de Gcwihaba, mesurées à partir des données du MNT JAXA et schématisées ici (pas à l'échelle). 509

Figure 465 Dunes de sable linéaires, vues par avion, du désert du Kalahari au Botswana (Source : Thomas et Wiggs, 2022. Fig.8.2 p.133). 509

Figure 466 Dunes linéaires du groupe du Kalahari à Tsodilo (Source : Gaudare, 2024, Fig. 1.8, p.29). 510

Figure 467 Interruption des dunes par la faille de Gumare (Source : Gaudare, 2024, Fig. 1.8, p.29, modifié). 511

Figure 468 Analyse des dunes au sud du Rift de l'Okavango. 511

Figure 469 Sables blanc dans les espaces interdunaires. 512

Figure 470 Sables rouges au sommet des dunes (Source : Bruxelles C.). 512

Figure 471 Schéma de la section d'une dune de sables à Artesia-Palla Road (Poldervaart, 1955, modifié). 512

Figure 472 Identification des auréoles de sols rouges autour des buttes dolomitiques dans les Aha Hills sur les blocs 2.5D produit par Benjamin Lans (Source : Bruxelles et al., 2016). 513

Figure 473 Profil d'altération révélé par le forage n°9698 (Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003, Fig.7, modifié). 514

Figure 474 Lame rocheuse de la grotte de Wadoum et détail à droite (Source : Crochet P.). 515

Figure 475 Lame rocheuse de Blue Cave (Source : Crochet P.). 515

Figure 476 Lame rocheuse de Blue Cave (Source : Crochet P.). 515

Figure 477 De vastes superficies de calcrètes sont trouvées entre Xai-Xai et Quangwa (point C de la Figure 449 p.497). 517

Figure 478 Encroûtement alguaire constituant les calcrètes du pan de Koanaka, indiqué "calcrètes à oncolithes" sur la Figure 822 (p.801). 517

Figure 479 Replat à calcrètes au sud du talweg de Gewidum à Gcwihaba et vues en détail sur les encroûtements alguaires (Source : Auriol P.). 518

Figure 480 Silcrète trouvée au pied de la colline E de Gcwihaba. 519

Figure 481 Silcrète trouvée dans le vallon de Gewidum à Gcwihaba (localisation p.727). 519

Figure 482 Affleurement de brèches ferrugineuses à Waxhou North. 520

Figure 483 Affleurement de jaspe rouge à Waxhou North. 520

Figure 484 À l'intérieur de la grotte on trouve des fissures remplies de brèches. . 522

Figure 485 Les fissures peuvent être larges. 522

Figure 486 Brèches résiduelles dans les fissures. 522

Figure 487 Idem. 522

Figure 488 Détail des brèches rouges trouvées dans les fissures à l'intérieur de la grotte. 523

Figure 489 Les brèches contiennent des dragées de fer (insolubles) qui proviennent de la surface et qui montrent le lien entre les brèches dans la grotte et la surface. 523

Figure 490 Idem. 523

Figure 491 Brèches trouvées en surface au-dessus de la grotte. Elles ont le même faciès que les brèches trouvées dans la grotte. On suppose que l'ensemble du secteur est recouvert des brèches pédologiques sous les sables.....523

Figure 492 Brèches pédologiques à clastes rectangulaires rosâtres et à matrice blanchâtre, près de l'aven de Waxhou north. 524

Figure 493 Brèches similaires à la précédente mais altérées, près de l'aven de Waxhou north.....524

Figure 494 Brèches à clastes de 1 cm sur les buttes vers Quangwa (Botswana).....524

Figure 495 Idem.....524

Figure 496 Légende de la figure suivante.....526

Figure 497 Modèle géométrique et sédimentaire des brèches observées au Botswana.....527

Figure 498 Conduits verticaux de crypto-corrosion au toit des formations carbonatées et sous les sables du Kalahari, que nos fouilles ont enlevé. Koanaka Hill K2. 528

Figure 499 Extension supposée du paléolac Déception en perspective (2,5D), exagérée verticalement 10 fois). (Version avec les paléolacs : Figure 857 p.831). 530

Figure 500 Agrandissement de la vue 2,5D précédente (exagérée verticalement 10 fois).....530

Figure 501 Trois régions morphologiques caractérisent la bordure ouest du Rift de l'Okavango. (bloc 2.5D exagéré verticalement 10 fois). 531

Figure 502 Analyse morphokarstique de la bordure ouest du Rift de l'Okavango (Bloc 2.5D hypsométrique, exagérée verticalement 10 fois).....532

Figure 503 ATLAS n°5 : Prospection des Aha Hills depuis 2015. 535

Figure 504 ATLAS n°5 : Image satellite (ARCGIS WB_2016_R15).....536

Figure 505 ATLAS n°6 : Prospection à Waxhou. 537

Figure 506 ATLAS n°6 : Cavités et trajets des prospections dans les Aha Hills (image satellite MAXAR).....538

Figure 507 ATLAS n°6 : Cavités et trajets des prospections dans les Aha Hills (image satellite : ARCGIS WB_2016_R15).....539

Figure 508 ATLAS n°7 : Détail des prospections à Waxhou South. 540

Figure 509 Une partie des collines des Aha Hills vue par drone à 140 m de haut (Source : Bruxelles L., 29/11/2022). 542

Figure 510 Panoramas et agrandissements des Aha Hills observées depuis le nord de la colline de K1 à Koanaka Hills. 542

Figure 511 L’accès difficile de Waxhou North (Source : Bruxelles L.)..... 543

Figure 512 Coupe topographique de Waxhou North selon Cooke et Baillieul (1974). 544

Figure 513 Coupe topographique de Waxhou North selon Bruxelles et al. (2017, Fig.14). 544

Figure 514 Coupe topographique de Waxhou North selon Dickie en 2009 (Grant & Ingold, 2015, p.26)..... 544

Figure 515 Coupe topographique déformée de Waxhou North (Grant & Ingold, 2015, p.25)..... 544

Figure 516 Coupe topographique de Waxhou North selon Howell en 1979 (ANON, 1979, modifié), où des ossements de koudou sont indiqués en rouge. 545

Figure 517 Entrée de Waxhou South (Source : Bruxelles L.). 546

Figure 518 Le versant karstifié de l’entrée. L’aven d’entrée photographié à gauche est indiqué en rouge. 546

Figure 519 Plan de Waxhou North (Independence Cave) (ANON, 1979, p.8)..... 547

Figure 520 Coupe de Waxhou South (Source : Grant & Ingold, 2015, p.24)..... 547

Figure 521 Indication de brèches dans l'entrée (Grant & Ingold, 2015, p.24). 547

Figure 522 Coupe topographique de Waxhou South selon Cooke et Baillieul (1974). 547

Figure 523 Plan de Small Cave (Grant & Ingold, 2015, p.22)..... 548

Figure 524 Panorama depuis la grotte de Waxhou South..... 549

Figure 525 Panorama depuis le sommet de la colline de la grotte de Waxhou South. Le nom des collines fait référence aux cartes suivantes (Figure 527). 549

Figure 526 Idem. 549

Figure 527 Trajet de prospection du 27/11/2024 de Waxhou South à Small Cave sur un modèle ombré (JAXA) en haut et sur une image satellite (MAXAR) en bas. Sont indiquées les collines visibles sur le panorama de la Figure 526. En annexe, le récapitulatif des prospections des Aha Hills est réalisé (Figure 1192 p.1219)..... 550

Figure 528 Idem mais avec une image satellite (Arcgis Wayback 2022-05-18) montrant plus de détail pour les collines dolomitiques..... 551

Figure 529 Barre rocheuse où se situe Small Cave..... 552

Figure 530 Entrée de Small Cave. 552

Figure 531 Entrée de la cavité. 552

Figure 532 Intérieur de la cavité impénétrable. 552

Figure 533 Lithologie où s'ouvre l'entrée de la galerie. 553

Figure 534 Os récent trouvé dans la grotte.....553

Figure 535 Empreintes fraîches de félins dans les sables sur la piste que l'on suit. 553

Figure 536 Panorama vers le sud depuis la colline de Wadoum, où on observe la colline de Dimapo et la colline de Gcwihaba. (Source : Bruxelles L.) (Coordonnées WGS : -20.0161111 ; 21.35416668 ; Lien Google Maps). 555

Figure 537 Même endroit que le panorama précédemment mais on distingue la pente sableuse qui se développe vers l'ouest au pied de la grotte de Gcwihaba (Source : Crochet P.).....555

Figure 538 Premier plan de Gcwihaba et indication des zones fossilifères (Source : Pickford, 1990, Fig.2, p.9, modifié). 556

Figure 539 Collines karstifiées de Gcwihaba et altitudes des réseaux karstiques. ..558

Figure 540 Hypsométrie des collines karstifiées de Gcwihaba et altitudes des réseaux karstiques. 560

Figure 541 Réseaux karstiques de la région de Gcwihaba. 562

Figure 542 Secteurs propices aux piégeages de sédiments au niveau de la colline de la grotte de Gcwihaba. 564

Figure 543 Cartographie de la colline de la grotte de Gcwihaba. 565

Figure 544 Avens qui s'ouvrent sur le versant ouest de la colline de la grotte de Gcwihaba.....566

Figure 545 En orange les zones à brèches découvertes par Pickford (1990) sur le versant ouest de la colline de la grotte de Gcwihaba (Source : Pickford, 1990, Fig. 3, p.10, modifié).....566

Figure 546 Détail de la photographie précédente. 567

Figure 547 Limite entre les dolomies en haut et le remplissage en bas correspondant à une ancienne paroi de grotte.....567

Figure 548 Brèches à gros clastes de dolomies et à gros grains de quartz. 567

Figure 549 Limite entre les dolomies en haut et le remplissage en bas correspondant à une ancienne paroi de grotte. Remarquons un bloc de quartz qui pourrait avoir été taillé.....567

Figure 550 Interface du logiciel de photogrammétrie et position des photographies pour réaliser l'orthophotographie de la face nord du vestibule. 568

Figure 551 Séance du levé de la coupe stratigraphique du vestibule.....568

Figure 552 Levé stratigraphique brute du vestibule du Corridor South de la grotte Gcwihaba.....569

Figure 553 Coupe stratigraphique du vestibule du Corridor South de la grotte de Gcwihaba. 569

Figure 554 Analyses stratigraphiques des photographies de Main Chamber du Corridor South de la grotte de Gcwihaba..... 570

Figure 555 Relevé stratigraphique de Main Chamber (face nord) du Corridor South de la grotte de Gcwihaba. 570

Figure 556 Relevés photogrammétriques de la coupe de Main Chamber du Corridor South de la grotte de Gcwihaba utilisée pour lever la coupe. 571

Figure 557 Relevé stratigraphique de la coupe de Main Chamber du Corridor South de la grotte de Gcwihaba. 571

Figure 558 Calage en altitude (JAXA) du relevé de l'entrée sud et du commencent du Corridor south (face est). 572

Figure 559 Relevé brut de la face ouest du Corridor south..... 573

Figure 560 Relevé brut de la face est du Corridor south. 574

Figure 561 Petite galerie impénétrable au sud de l'entrée sud de la grotte de Gcwihaba. 575

Figure 562 Profil topographique de la grotte de Gcwihaba par Cooke et Baillieul (1974, Fig.4, p.153). 575

Figure 563 Profil topographique de la grotte de Gcwihaba par Cooke, Glyn et Rohrmann en 1973 (Cooke, 1975, Fig.4, p.435). 576

Figure 564 Ajout d'un contour succinct par Dandurand et al. (2018) à la suite de la visite de 2015..... 576

Figure 565 Profil topographique de la colline calculé à partir du modèle 3D réalisé par photogrammétrie drone (MNS, en vert la végétation) et du MNT JAXA. 576

Figure 566 Vue du modèle 3D de la cavité de Gcwihaba, réalisé par Kim Genuite ajouté au modèle 3D photogrammétrique par drone de la colline (Source : Genuite et al., 2024, modifié)..... 576

Figure 567 Topographie de la grotte de Dimapo découverte en 2008 (Source : Du Preez et al., 2015). 577

Figure 568 Lapiaz dolomitique à 1011 m d'altitude au sommet de la colline de la grotte de Wadoum, qui est plus basse en altitude que les collines de Gcwihaba et Dimapo, en arrière-plan. 578

Figure 569 Morphologie typique d'un fantôme évidé dans la grotte de Wadum. . 580

Figure 570 Des encoches sont visibles sur les parois. 580

Figure 571 Détail des encoches. 580

Figure 572 Certaines encoches sont concrétionnées (flèche rose) d'autres sont vides (flèche rouge), indiquant une histoire complexe. 580

Figure 573 Plan topographique de Wadoum (Source : Mann et Ritter, 1995, Fig.1, p.14). 581

Figure 574 Relevé gravimétrique de la grotte de Wadoum à Gcwihaba, réalisé par Poseidon Geophysics (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers)). 582

Figure 575 Liste de la faune découverte sur la colline C de Gcwihaba étudiée et publiée par Pickford et Mein (1988). 584

Figure 576 Plan des cavités tronquées par la surface topographique sur la colline C selon Pickford (1990, Fig.4, p.11). En bas, est indiqué le profil topographique de la colline montrant un lapiaz au sommet. 584

Figure 577 Levé gravimétrique (Selfe / GRS Consulting, 2013, Fig.2, p.8) et données de terrain concernant le paléokarst fossilifère de la colline C. 585

Figure 578 Réseau karstique supposée par la gravimétrie (GRS Consulting, 2013, Fig.2, p.8) et données de terrain. 586

Figure 579 Gisement paléontologique sur le versant ouest de la colline C, le 24/11/2024. En arrière-plan, on distingue la colline où se situe la grotte de Gcwihaba. Entre les deux se situe la vallée de Gewidum. A droite, on distingue le commencement d'une vaste surface plane. 587

Figure 580 Galerie de cavité tronquée par le versant, encore remplies de fantôme calcité. Elle est située à l'extrémité de la cavité supposée par le relevé gravimétrique. 587

Figure 581 Détail sur le fantôme calcité. 587

Figure 582 Prospections de la colline C le 22/11/2021 et le 24/11/2024 et prospection de la colline de Wadoum le 07/12/2024 588

Figure 583 Lapiaz situé au pied de la colline E (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic,2001, Fig.5c, d). 589

Figure 584 Lapiaz au pied de la colline C, cartographié sur la Figure 577 (p.585). ..589

Figure 585 Brèches cimentées par un dépôt blanchâtre sur la colline C à Gcwihaba. 590

Figure 586 Déblais d'un ancien forage. 590

Figure 587 Prospection de la doline, en rose, située au niveau d'une dune de sable linéaire orientée E-O. Fond cartographique constitué par des courbes de niveau, un modèle ombré et une carte des pentes. 592

Figure 588 Image satellite (MAXAR) de la zone prospectée montrant les sables blancs à l'intérieur d'une doline, située sur une dune de sable linéaire. 592

Figure 589 Carte élargie montrant les dépressions, les forages et la courbe de niveau à 1000 m d'altitude. Des dolomies karstifiées pourraient affleurer dans les zones en rouge et entre les deux traits bleus. 593

Figure 590 Localisation des Koanaka Hills par rapport à Gcwihaba Hills et nom des vallées (Le rectangle noir correspond à l'emprise de la Figure 597 p.599) (Voir version avec l'analyse géomorphologique en annexe Figure 1368 p.1408).594

Figure 591 Analyse du panorama des collines K1 et K2 de Koanaka Hills et informations concernant les réseaux karstiques (altitude des têtes de forage, profondeur des forages et étagement des réseaux karstiques et des fouilles (grottes trépanées par la surface topographique). 594

Figure 592 Premier plan de Koanaka réalisé en 1990 (Source : Pickford, 1990, fig.5, p.12, modifié). 595

Figure 593 Koanaka Hills, d'après les données satellitaires JAXA (taille du pixel : 30 m). 598

Figure 594 Koanaka Hills, d'après les données de la navette SRTM (Botswana SRTM DEM 30meters disponible sur le site Africa geoportal (lien)). 598

Figure 595 Koanaka Hills, d'après les données GPS différentielles mesurées sur le terrain par Selfe Gavin et le GRS Consulting (taille du pixel : 25 m). 598

Figure 596 Koanaka Hills, d'après nos modèles 3D photogrammétriques par drone. 598

Figure 597 Hypsométrie de Koanaka Hills (K1 et K2) issue du relevé au GPS différentiel (Gavin Selfe / GRS Consulting). Changer altitude K2 1068..... 599

Figure 598 Réseaux karstiques de Koanaka Hills (K1 et K2). 600

Figure 599 Analyse de l'image satellite (Bing Maps) de Koanaka Hills : identification des collines dolomitiques, des paléopans, des réseaux karstiques et des fouilles. 602

Figure 600 En haut, image satellite (ESRI Arcmap) et en bas, levé gravimétrique. 604

Figure 601 Ajout du levé gravimétrique réalisée par Selfe / GRS Consulting (2005a) sur la carte précédente. 605

Figure 602 En haut, autre répartition des sols sombres sur l'image satellite (ESRI Arcgis). 606

Figure 603 Ajout du, levé gravimétrique réalisée par Selfe / GRS Consulting (2005a) sur la carte précédente. 607

Figure 604 Report des réseaux topographiques sur les levés gravimétriques pédestres de Selfe / GRS Consulting (2005a, modifié) (Bouguer Gravity Field) ayant permis de découvrir le réseau karstique, indiqué ici en noir. 608

Figure 605 Ajout sur le levé gravimétrie des courbes de niveau de la topographie actuelle issues des levées au GPS Différentiel de Selfe / GRS Consulting. .. 609

Figure 606 La colline karstifiée et fossilifères de K1. 610

Figure 607 Analyse du panorama de la colline K1, depuis la colline K2, à Koanaka Hill. 610

Figure 608 La grotte se développe au contact de deux formations géologiques, les dolomies et des schistes. 612

Figure 609 Relevé topographique d'une partie du réseau karstique de K1 (il manque Fossil Cave et Mongongo Cave), avec les altitudes et notamment l'altitude du forage d'entrée de Diviner's situé à 1070 m (MNT JAXA) (Source : Cardoso et al., 2021, Fig.4, p.97, modifié). 612

Figure 610 Réseau karstique de la colline de K1 à Koanaka Hills. (Cf. Figure 780 p.784). 613

Figure 611 Premier plan topographique de la première salle de Fossil Cave d'après Alan Grant (Source : Document fourni par Selfe Gavin) (En grand Figure 1332 p.1375) 615

Figure 612 Plan topographique du réseau de Fossil Cave (Source : Ellis, 2020, p.41) (En grand Figure 1337 p.1379). 615

Figure 613 Report de la topographie du réseau karstique de Fossil Cave. 615

Figure 614 Calage d'un premier relevé gravimétrique (Geophysic Poseidon). 615

Figure 615 Calage d'un deuxième relevé gravimétrique et dessin du réseau karstique hypothétique (en vert). 616

Figure 616 Proposition d'un autre calage n°1 du relevé gravimétrique. 616

Figure 617 Fouille archéologique du versant sud de la colline de K1 à Koanaka, qui est fouillé depuis 2023. Les deux personnes entourées en blanc donnent l'échelle. 617

Figure 618 Secteur de la fouille débuté en 2023 correspondant à la partie de la grotte de Mongongo éventrée par la surface topographique actuelle. 618

Figure 619 Idem. 618

Figure 620 La fouille montre que les remplissages karstiques ont des morphologies arrondies typiques de la corrosion sous couverture. 618

Figure 621 Deux photographies d'une stalagmite prise dans la brèche. L'ensemble était traversé par plusieurs générations de fissures, certaines étant cimentées par des sédiments clairs. 619

Figure 622 Deux photographies d'une autre stalagmite en place emballée dans la brèche. L'ensemble était traversé par une fissure recimentée. 619

Figure 623 Localisation des fouilles au niveau de la cavité recoupée par le versant topographique et cartographie (en rouge) du contact entre les remplissages karstiques et la paroi dolomitique. 621

Figure 624 Analyse morphokarstique du versant nord-ouest de la colline K2 à Koanaka. 623

Figure 625 Molaire de Cercopithèque (Parapapio) in situ dans une brèche de remplissage. (Source : Senut, 2008, p.80). 624

Figure 626 Crâne de babouin (mâle) trouvé dans la grotte de Bone Cave en 1997. Il est daté de > 317 000 ± 114 000 ans (Source : Williams et al., 2012, modifié). 625

Figure 627 Plan et coupe de l'amphithéâtre au nord de la colline de K2 à Koanaka et localisation de l'entrée de Bone Cave selon Pickford (1990, Fig.7). (Source: Pickford (1990, Fig.7, modifié). 626

Figure 628 Topographie de Bone Cave (Source : Ritter et Mann, 1995). 627

Figure 629 Report des cartes de Pickford (1990) et du plan topographique de Bone Cave levé par Ritter et Mann (1995) sur une image satellite. 628

Figure 630 Plans et coupes de Pickford (1990, modifiés). 628

Figure 631 Plan et coupe du réseau karstique de Bone Cave sur la colline K2 à Koanaka (Source : Ritter et Mann, 1995 p.3, modifié). 629

Figure 632 Cartographie synthétique de la colline de K2 à Koanaka. 631

Figure 633 Cartographie de la colline. 632

Figure 634 Légende de la carte de la colline K2 de Koanaka. 633

Figure 635 Plan de la fouille commencé en 2021. 634

Figure 636 Plan de l'amphithéâtre et de la fouille commencée en 2024 634

Figure 637 Carte du versant ouest 635

Figure 638 Carte de Bone Cave 636

Figure 639 Localisation des photographies par drone de la colline K2. 637

Figure 640 Modèle hypsométrique ombré de la colline K2 par photogrammétrie drone. 637

Figure 641 Modèle ombré de la colline K2 par photogrammétrie drone. 637

Figure 642 Orthophotographies géoréférencées des fouilles, à la fin de la mission de 2022, sur le versant est de la colline de K2 à Koanaka. 638

Figure 643 Calage de l'orthophotographie de la fouille sur l'orthophotographie de la colline. 638

Figure 644 Calculs photogrammétriques directement sur le terrain. 638

Figure 645 Vue en perspective de la colline K2 où se situe la grotte de Bone Cave et les fouilles correspondant aux parties de la grotte tronquées par la surface topographique. 639

Figure 646 Relevés topographiques brutes en plan (en haut) et en coupe (en bas) (Source : Bruxelles L.). 640

Figure 647 Profil vertical de Bone Cave issue de la modélisation 3D par scan laser terrestre. 641

Figure 648 Comparaison des topographies de la grotte de Bone Cave (en jaune la topographie topodroid et en gris la topographie au scanner). 641

Figure 649 Profil morphokarstique et stratigraphique de la colline de K2 (Koanaka) et de la grotte de Bone Cave. 642

Figure 650 Galerie de grotte tronquée par le versant de la colline. Sur la gauche de la photographie, l'ancienne paroi est délimitée par le contact entre les remplissages karstiques et la paroi de la cavité creusée dans les dolomies. À droite, l'ancienne paroi est masquée par des blocs effondrés provenant de l'effondrement de la voûte de la grotte. 643

Figure 651 Ancienne paroi délimitée par des remplissages karstiques et la dolomie en place et masquée par des blocs de dolomies effondrées issues de la voûte de la grotte. 643

Figure 652 Ancienne paroi de grotte délimitée par des dolomies à "peau d'éléphant" et des remplissages karstiques. Entre les deux, on trouve un banc de quartz blanc. 644

Figure 653 Sur le versant nord de K1, pinacle dolomitique correspondant à la voûte de la grotte de Bone Cave et indiqué sur la Figure 658 (p.647) et sur le plan de Pickford (1990) (p.628).....644

Figure 654 Limite d'une ancienne paroi de grotte indiquée par le contact entre les remplissages karstiques et la dolomie en place. 644

Figure 655 Localisation des profils n°1 et n°2 de la fouille sur versant est de la colline K2 à Koanaka. 645

Figure 656 Profil vertical n°1 de la fouille archéologique sur le versant est de la colline K2, à Koanaka, débutée en 2021.....646

Figure 657 Profil vertical n°2 de la fouille archéologique sur le versant est de la colline K2, à Koanaka, débutée en 2021.....646

Figure 658 Coupe stratigraphique du versant nord de la colline K2 (Bone Cave) en 2022.....647

Figure 659 Profil topographique de la cavité de Bone Cave et du versant nord en 2022. 647

Figure 660 Profil topographique de la cavité de Bone Cave et du versant nord selon Pickford (1990). (Source : Pickford, 1990, fig.7, modifié). 647

Figure 661 Paléopan et la colline de K1 à Koanaka (Source : Auriol P.) 648

Figure 662 Colline K3 vue par drone (Source : Bruxelles L.).....649

Figure 663 Colline K3 qui émerge des sables du Kalahari (Source : Bruxelles L.).... 649

Figure 664 Détail (Source : Bruxelles L.). 649

Figure 665 Vue du sommet de la colline K3 (Source : Crochet P.). 650

Figure 666 Entrée naturelle de Blue Cave sur K3 en 2024 (Source : Bruxelles L.)... 650

Figure 667 Pendage des dolomies dans la grotte de Blue Cave (Source : Crochet P.). 650

Figure 668 Les dolomies bleues éponymes de la grotte de Blue Cave (K3 à Koanaka Hills)(Source : Crochet P.). 650

Figure 669 Réseau karstique fantômisé (en rouge) de la grotte de Blue Cave sur K3 (Koanaka). 651

Figure 670 La topographie de Blue Cave montre que la grotte se développe sur plusieurs étages (Ritter et Mann, 1995, modifié). 652

Figure 671 Image satellite des Koanaka Hills, en perspective(2.5D sous SIG) et exagérée 10 fois..... 653

Figure 672 Profil morphokarstique synthétique des karsts du nord-ouest du Botswana (Voir les autres profils dans la synthèse page 877). 654

Figure 673 Collines karstifiées de Gcwihaba et image satellite. Nous avons localisé la position du profil topographique de la page 654. (Version géologie p.614). 656

Figure 674 Relevé topographique d'une partie du réseau karstique de K1 (il manque Fossil Cave et Mongongo Cave), avec les altitudes (Source : Cardoso et al., 2021, Fig.4, p.97). 657

Figure 675 Différence de dimensions des réseaux karstiques de la colline K1 et de la colline K2 660

Figure 676 Exemple des mesures de gravimétrie (en haut) et des mesures électro-magnétique en bas permettant la découverte de la grotte de Dimapo sur la colline G2 à Gcwihaba (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2001, Appendix A8). 663

Figure 677 Synthèse des données géologiques de la région de Gcwihaba : carte aéromagnétique (Lehmann, 2015), lignes de mesures gravimétriques et aéromagnétiques (en vert) (d'après Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2001, Fig.11)) reportées sur une image satellite : ESRI World Imagery (Wayback 2016-08-31), disponible à cette adresse : lien. 664

Figure 678 Synthèse des données géologiques de Gcwihaba Hills (forages, lignes géophysiques, anomalie magnétique) à Gcwihaba Hills. 665

Figure 679 Levé gravimétrique de la région de Gcwihaba (Source : Selfe / GRS Consulting, 2013, Fig.1, p.7). Les valeurs en mGal sont données pour exemple et ne correspondent pas exactement à ce relevé mais à la figure 6. Les cadres

en jaune correspondent à des levées gravimétriques plus précis consultables dans le document original (Selfe / GRS Consulting, 2013). 670

Figure 680 Levé gravimétrique de la région de Gcwihaba avec les courbes de niveau de la topographie mesurées au GPS différentiel. 671

Figure 681 Image satellite de la carte précédente. 672

Figure 682 Image satellite sans les courbes de niveau. 673

Figure 683 Légende géologique de la carte suivante. 679

Figure 684 Position des forages et des coupes stratigraphiques d'après Water Surveys Botswana et Aqualogic (2003, Fig.42) sur la carte géologique pré-Kalahari de la bordure ouest du Rift de l'Okavango. 680

Figure 685 Position des forages et des coupes stratigraphiques sur une image satellite, en relief.....681

Figure 686 Légende de la carte suivante (Figure 687). 683

Figure 687 Forages et carte géologique pré-Kalahari de la région étudiée. La légende est située à la page 683. 684

Figure 688 Forages dans la région étudiée et image satellite en relief. 685

Figure 689 Forages et carte géomorphologique de la région étudiée. 686

Figure 690 Données du forage BH9697 (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic (2003, Fig.16, modifié). 687

Figure 691 Ligne de corrélation des forages n°6 (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003, Fig.40, modifié). 690

Figure 692 Forage n°9895 (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003, Fig.29) 692

Figure 693 Forage n°9894 (Lien) (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003, Fig.30). 693

Figure 694 Forage n°9893 (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003, Fig.31). 694

Figure 695 données du forage 9931 (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003, Fig.32). 696

Figure 696 Données du forage BH9892 (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003, Fig. 33). 697

Figure 697 Données du forage 9867 (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003, Fig.28). 698

Figure 698 Forage JB1 (Source : Bruchs, 2008). 699

Figure 699 Forage JB2 (Source : Bruchs, 2008). 699

Figure 700 Forage JB4 (Source : Bruchs, 2008). 701

Figure 701 Forage JEB1 (Source : Bruchs, 2008). 701

Figure 702 Forage JEB2 (Source : Bruchs, 2008). 702

Figure 703 Forage JEB3 (Source : Bruchs, 2008). 702

Figure 704 Corrélation altitudinale des forages de la ligne 7 (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2003). 703

Figure 705 Synthèse des données géologiques (forages, lignes géophysiques, anomalie magnétique) à Gcwihaba Hills. 707

Figure 706 Nom des forages. 713

Figure 707 Altitude de la nappe aquifère. 713

Figure 708 Versant de la vallée de Gewidum constitué de calcrètes subhorizontales karstifiées. 718

Figure 709 Détail des calcrètes sub-horizontales entaillées de diaclases concrétionnées et occupées par les porcs-épics. 718

Figure 710 Analyse du talweg de Gewidum à Gcwihaba (Source : Auriol P.). 718

Figure 711 Carte géologique (vectorisée et géoréférencée) de Gcwihaba d'après Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975). 719

Figure 712 Calcrètes 1 et 2, définies par Cooke et Baillieul (1974) et Cooke (1975), et retrouvées au niveau du versant de Gewidum à Gcwihaba le 01/12/2024. 721

Figure 713 Même échantillon observé après cassure. Les clastes sont minéralisés (parties sombres) et altérés en surface (parties rougeâtres). 721

Figure 714 Alluvions allochtones de quartz blanc. Celui en haut, qui est poli a été trouvé près de notre campement. 723

Figure 715 Détail sur les structures. 724

Figure 716 Observation à la cassure. 724

Figure 717 Un autre bloc de calcrète 3. 724

Figure 718 Autre face. 724

Figure 719 Calcrètes à coquille du talweg de Gewidum. 726

Figure 720 Détails des coquilles recristallisées. 726

Figure 721 Gastéropode de l'échantillon de calcrètes de Gewidum. 726

Figure 722 Gastéropode en relief. 726

Figure 723 Vue de la face exposée de la silcrète. 727

Figure 724 Cavités dans les silcrètes, à la cassure. Des cristallisations sont visibles. 727

Figure 725 Vacuoles allongées dans les silcrètes, à la cassure. 727

Figure 726 Tableau récapitulatif des âges radiocarbones publié par Thomas et Shaw (1991, Appendix 1B, p.246). 728

Figure 727 Analyse morphokarstique et prospection de la colline E de Gcwihaba. 731

Figure 728 Bloc 2,5D de la colline E. 732

Figure 729 Idem. 732

Figure 730 Trottoir vue de profil montrant le fort pendage des dolomies. 733

Figure 731 Trottoir vue de face. La personne indique la hauteur du trottoir. 733

Figure 732 Le versant sud-ouest de la colline E (Affleurement A4) conserve le trottoir creusé dans les dolomies par le paléopan (vue de face). 733

Figure 733 Calcrète de la colline E. 733

Figure 734 Calcrète de la colline E. 733

Figure 735 Panorama du paléopan au niveau de l'affleurement A2 (Figure 727). ..734

Figure 736 Affleurement (A2 sur la Figure 727) de calcrètes 3 en place formant le plancher du paléopan exhumé de sa couverture sableuse. La personne entourée donne l'échelle. 734

Figure 737 Détail des calcrètes 3. 734

Figure 738 Détail des calcrètes 3 montrant des vacuoles de dissolution. 734

Figure 739 Image satellite de la colline F de Gcwihaba. 735

Figure 740 Coupe géologique schématique de la vallée de Gewidum creusée dans les calcrètes (en mauve) et les dolomies (en gris). (Sans échelle). Voir le profil à l'échelle (Figure 756, p.759). 736

Figure 741 Analyse morphokarstique des profils topographiques de Gcwihaba (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2001, Fig.9; modifié). 738

Figure 742 Report de la carte géologique levée par Baillieul (Cooke et Baillieul, 1974 ; Cooke, 1975) et localisation des profils topographiques de la page précédente : A, B et C et du profil topographique que nous avons réalisé (Figure 756, p.759). 739

Figure 743 Analyse morphologique du secteur de Gcwihaba. 740

Figure 744 Une différence de couleur des sols est indiquée sur cette image satellite en vert (et sur la Figure 539 (p.558)) et pourrait correspondre à l'érosion de la dune sable. 741

Figure 745 Schéma de formations des pans par déflation selon Lancaster (1976, Fig.7.1, p.179). 743

Figure 746 Vue 2.5 D de la formation Ecca en place, à l'est du granite archéen de Johannesburg et près du CoH. On repère de nombreuses dépressions fermées sur la formation Ecca, en orange. Elles forment la Pan Belt de Chrissiesmeer.

Ce seraient des pans, mis en place par déflation éolienne (Wellington, 1929, 1943) et ne se trouveraient que sur les grès feldspathiques de l'Ecca moyen (Lageat, 1989, fig.101, p.352-360)..... 744

Figure 747 La base de la dune OGS est datée de 4 millions d'années à 65 m de profondeur (Source : Vainer et al., 2021)..... 747

Figure 748 Calculs des âges à différentes profondeurs dans les dunes permettent de comprendre leurs édifications (Source : Thomas et al., 2000, fig.4, p.9) 748

Figure 749 Portail du BGI. 750

Figure 750 Forages du Botswana. 750

Figure 751 Synthèse des forages recensés à Gcwihaba Hills. 751

Figure 752 Document original concernant l'anomalie magnétique n°11471A (Mc Donald, 2008, p.46). 753

Figure 753 Données géologiques originales du forage n°11471A (Source : Mc Donald, 2008, p.54, modifié). 753

Figure 754 Document original concernant le forage n°11471A (Source : Mc Donald, 2008, p.54). 756

Figure 755 Coupe géologique schématique de la vallée de Gewidum complétée par le forage n°11471A (Mc Donald, 2008). (Voir aussi Figure 896 p.885). 758

Figure 756 Interprétation d'une vallée incisée à Gcwihaba. 759

Figure 757 Profil topographique à l'échelle, sans exagération verticale. 759

Figure 758 759 Interprétation du forage n°11471A de Gcwihaba comme une vallée incisée. 760

Figure 760 Interprétation du forage n°11471A de Gcwihaba comme un vaste paléopan profond. 761

Figure 761 Les deux interprétations du forage n°11471A de Gcwihaba. 761

Figure 762 Identification d'un graben vers Tsodilo Hills par Nash (1992). 762

Figure 763 Forages, et leurs numéros, à Gcwihaba. 764

Figure 764 Calcrètes à l'affleurement d'après la carte géologique de Cooke (1975) (Figure 711 p.719) et forages BGI traversant des calcrètes et des calcaires lacustres à Gcwihaba. 764

Figure 765 Synthèse cartographique de la région de Gcwihaba. 768

Figure 766 Visualisation 2,5D de la vallée de Gewidum, vue depuis l'est, montrant les calcrètes (en violet) et les dolomies (en trames grises) sur une image satellite. Vue exagérée verticalement 10 fois. 770

Figure 767 Idem avec une analyse hypsométrique des reliefs. 770

Figure 768 Visualisation 2,5D de l'analyse morphologique de la vallée de Gewidum. Exagérée verticalement 10 fois. 771

Figure 769 Zoom sur la vallée de Gewidum et les collines karstifiées de Gcwihaba. Exagérée verticalement 10 fois. 772

Figure 770 Analyse morphokarstique et hypothèse concernant la vallée incisée indiquée par le forage n°11471A. Exagérée verticalement 10 fois. 773

Figure 771 Visualisation 2,5D plus large de la vallée de Gcwihaba. Exagérée verticalement 10 fois. 774

Figure 772 Analyse morphokarstique de la figure précédente. Le forage indiquant les calcrètes en profondeur est indiqué en vert. Exagérée verticalement 10 fois. 775

Figure 773 Modélisation d'une transgression jusqu'à l'altitude de 1005 m sur la figure précédente. Exagérée verticalement 10 fois. 776

Figure 774 Visualisation 2.5 D encore plus large de la vallée de Gewidum à Gcwihaba et de la plaine de l'Okavango en arrière-plan. Exagérée verticalement 10 fois 777

Figure 775 Analyse morphokarstique de la vallée de Gewidum à Gcwihaba et de la plaine de l'Okavango en arrière-plan. 778

Figure 776 Transgression jusqu'à l'altitude de 1005 m. 779

Figure 777 Gcwihaba Hills et Koanaka Hills depuis la plaine de l'Okavango. 780

Figure 778 Analyse morphokarstique. 780

Figure 779 Transgression jusqu'à l'altitude de 1005 m. 781

Figure 780 Carte synthétique des données de terrains autour de la colline K1. 784

Figure 781 Légende. 784

Figure 782 Cartographie géomorphologique de la colline K1. 785

Figure 783 Légende. 785

Figure 784 Image satellite de la colline K1 (réseau karstique de Diviner's en rouge) et du vaste paléopan caractérisé par des calcaires bioclastiques. 786

Figure 785 Échantillon prélevé de calcaire bioclastique (Source : Olivier V.). 787

Figure 786 Matrice sombre. 787

Figure 787 Idem. 787

Figure 788 Détails sur les coquilles présentes dans les calcrètes (Source : Bruxelles L.). 788

Figure 789 Calcaire coquillier en place à 1030 m d'altitude (Calcrètes 4 de Cooke ?) (Source : Bruxelles L.). 788

Figure 790 Vaste surface plane, exhumée des sables, au pied de la colline de K1 caractérisée par des calcaires coquilliers. 789
Figure 791 Détail des calcaires. 789
Figure 792 Ces dépôts sont parfois bréchifiés. 789
Figure 793 Détail des brèches. 789
Figure 794 Calcaires altérés et corrodés. 789
Figure 795 Affleurements de calcaires à coquilles silicifiées (silcrètes ?) perforés par les lithophages. 790
Figure 796 Surface aplanie et corrodée au toit des calcaires. 790
Figure 797 Vaste surface plane caractérisée par des calcrètes corrodées. De petits bosquets poussent à travers les larges trous centimétriques dus à la crypto-corrosion sous les sables. 790
Figure 798 Blocs de calcrètes. 791
Figure 799 Détail des calcrètes, elles sont homogènes. 791
Figure 800 Bloc arrondi de calcaire coquillier à matrice sombre. 792
Figure 801 Calcaire bioclastique sombre. 792
Figure 802 Détail sur des petites coquilles blanches. 792
Figure 803 Monticules de blocs de dolomies et de galets de calcaires coquilliers. 792
Figure 804 Calcaire riche en fragments de coquilles trouvé au pied de la colline K2. 793
Figure 805 Calcaire bioclastique avec une vacuole trouvée au pied de la colline de K2. 793
Figure 806 Calcaires coquilliers, à ciment sombre, riche en matière-organique. ... 793
Figure 807 Calcaires coquilliers, à ciment clair. 793
Figure 808 Vue du dessus par drone (10 décembre 2022) (Source : Bruxelles L.). . 794
Figure 809 Plan orthonormé de cet objet. 794
Figure 810 Affleurement exhumé des sables montrant des calcrètes bréchifiées. 795
Figure 811 Détails des brèches infrabréchiques. 795
Figure 812 Calcrètes grises homogènes montrant des fissures récentes au sommet. 796
Figure 813 Vue du dessous montrant la crypto-corrosion réalisée sous les sables. 796
Figure 814 Cartographie en cours des affleurements de calcrètes identifiés en 2024. 797

Figure 815 Brèches claires à gros clastes, trouvées, le 03/12/2024, au pied du versant ouest de la colline K1 (Koanaka) à 1040 m d'altitude (20° 8'33.54"S; 21°12'30.49"E) (-20,14265000; 21,20846944). 798

Figure 816 Détail des gros clastes. 798

Figure 817 Brèches claires à gros clastes, trouvées le 09/12/2022 (20°8'33.24"S, 21°12'30.85"E) (-20,14256667; 21,20856944). 798

Figure 818 Les premiers niveaux du versant nord au pied de la colline de K2 sont constitués d'une brèche à gros clastes). 799

Figure 819 Détail des brèches à gros clastes et ciment rougeâtre (pendage 10°S). 799

Figure 820 Brèches à gros clastes sur versant nord de la colline K2 à Koanaka. 800

Figure 821 Détail des clastes. 800

Figure 822 Analyse de l'image satellite de Koanaka Hills (K1 et K2). 801

Figure 823 Autre version des dolomies subaffleurantes d'après l'analyse de l'image satellite (ESRI Arcgis). 802

Figure 824 Hypsométrie de Koanaka Hills (K1 et K2). 804

Figure 825 Analyse morphokarstique de Koanaka Hills. 805

Figure 826 Rajout des données d'interprétation des données gravimétriques de Selfe/GRS Consulting (2005). 806

Figure 827 Rajout des données d'interprétation des données gravimétriques de Selfe/GRS Consulting (2005). En bleu foncé les dolomies profondes, en bleu les dolomies peu profondes, en jaune les contacts géologiques. 807

Figure 828 Vue en relief (2,5D) des collines de Koanaka, exagérée 10 fois. 808

Figure 829 Analyse morphokarstique, en relief, des collines de Koanaka –(exagérée 10 fois). 809

Figure 830 Vue en relief (2,5D) des collines de Koanaka, exagérée 10 fois. 810

Figure 831 Vue en relief (2,5D) des collines de Koanaka, exagérée 10 fois. 810

Figure 832 Panorama photographique. 811

Figure 833 Image satellite en relief (2.5D) issue du SIG , exagérée 10 fois. 811

Figure 834 Analyse morphokarstique. 811

Figure 835 Image satellite de K1 et K2 à Koanaka Hills, en perspective et exagérée 10 fois. 812

Figure 836 Analyse morphokarstique de K1 et K2 à Koanaka Hills. Légende ci-dessous. 812

Figure 837 Transgression jusqu'à 1030 m. 813

Figure 838 Image satellite des Koanaka Hills, en perspective(2.5D sous SIG) et exagérée 10 fois..... 814

Figure 839 Analyse morphokarstique des Koanaka Hills. Légende ci-dessous. 814

Figure 840 Transgression jusqu'à 1043 m. 815

Figure 841 Inselbergs en quartzites de Tsodilo Hills au Nord-Ouest du Botswana (Source : Arte L'Afrique vue du ciel, Botswana). 816

Figure 842 Paléolacs de Tsodilo Hills (Geppert et al., 2021, Fig.7). 816

Figure 843 Fragments de pointes barbelées en os trouvés à Tsodilo Hills (Source : Robbins et al., 1994, Fig.7, p.1100) 816

Figure 844 Mise en évidence de la bordure des paléolacs sur un modèle ombré (Mc Farlane et Eckardt, 2008). 818

Figure 845 Analyse du profil (Moore et al., 2012, 2022). 818

Figure 846 Au Crétacé, ouverture en trois étapes des bassins océaniques autour de l'Afrique australe (Source : Mc Carthy and Rubidge, 2005 in Moyen, 2008, Fig.1.25 p.25). 821

Figure 847 Evolution du taux de sédimentation du Zambèze (Walford et al., 2005 in Saïd, 2015, fig.7). 822

Figure 848 Evolution du taux de sédimentation du Limpopo (Saïd et al., 2015, Fig. 7). 822

Figure 849 Cadre structurale du Rift de l'Okavango et du Delta de l'Okavango en lien avec la branche occidentale du Rift est-africain (inspiré de Kinabo et al., 2008 ; Cotterill, 2006, fig.4.1a p.107 et aussi Moore et Larkin, 2001, Fig.10, p.55 et Moore et al., 2007, Fig.15-14, p.323). 824

Figure 850 Coupe structurale du Rift de l'Okavango montrant la faille de Gumare (Source : Gaudare, 2024, Fig.1.4, p.21). La position de la coupe est indiquée sur la Figure 849. 825

Figure 851 Coupes géologiques régionales à travers le Rift de l'Okavango, localisées sur la Figure 849 (Source : Rankin, 2015, p.321, modifié). 825

Figure 852 Coupe dans le bassin de Makgadikgadi (Source : De Plessis 1998 in Moore, Cotterill et Eckardt, 2012,t Fig.8, p.400, modifié). La position de la coupe est indiquée sur la Figure 849. 826

Figure 853 Datations des sédiments du groupe du Kalahari dans le forage 9696 (OGN) (Source : Vainer et al., 2001, Fig.3, p.1177). 827

Figure 854 Datations des sédiments du groupe du Kalahari dans le forage OGS (Source : Vainer et al., 2001, Fig.3, p.1177). 828

Figure 855 Paléolacs dans le Rift de l'Okavango, indiqués par des courbes de niveau. 830

Figure 856 Profil topographique du Rift de l'Okavango mettant en évidence les paysages formées par la présence des paléolacs (Source : Moore, Cotterill et Eckardt, 2012, Fig.3B, modifié). 830

Figure 857 Extension supposée du paléolac Déception et des autres paléolacs, en relief exagéré 10 fois. 831

Figure 858 Réseau hydrographique au Crétacé (Moore et Larkin, 2001, Fig.14a; Moore et al., 2007, Fig.15.13a). Voir aussi Ponte, 2018 (p.81). 833

Figure 859 Réseau hydrographique au Paléogène supérieur (Moore et al., 2007, Fig.15.13b, modifié). Voir aussi Ponte, 2018, p.81. 834

Figure 860 Groupe du Kalahari, représenté en jaune (Moore et al., 2007, Fig.15.13b, modifié). 834

Figure 861 Réseau hydrographique à l'Oligocène (Moore et al., 2007, Fig.15.13c). 835

Figure 862 Réseau hydrographique du Miocène (23 Ma) au Pliocène (5 Ma) (Moore et al., 2007, Fig.15.13 ; Moore, Cotterill et Eckardt 2012, Fig.7A). 835

Figure 863 Réseau hydrographique à la fin du Pliocène (2.6 Ma) (Ponte, 2018, Fig.2.20, p.81; Fierens (2019, Fig.III.14B ; Moore, Cotterill et Eckardt 2012, Fig.7B, p.399). 836

Figure 864 Réseau hydrographique et Lac Deception au Pléistocène inférieur (~ 1.8 Ma) (Ponte, 2018, Fig.2.20, p.81; Moore, Cotterill et Eckardt 2012, Fig.7C et bassins versants du Zambèze (Fierens, 2019, Fig.III.15A) et du Lac Deception. 838

Figure 865 Extrait du Tableau 72 (p.1273) de Cotterill et De Wit (2011, Table 2, p.506). 839

Figure 866 Réseau hydrographique et Lac Makgadikgadi entre 1.5 Ma et 800 000 ans (Moore, Cotterill et Eckardt 2012, Fig.7D). 841

Figure 867 Réseau hydrographique et Lac Thamalakane du Pléistocène moyen vers 800 000 ans (Moore, Cotterill et Eckardt 2012; Cotterill , 2006, Fig.5.6, p.230). 841

Figure 868 Oro-hydrographie actuel, localisation du Delta de l'Okavango et des bassins versants et des failles de rift. Voir aussi Figure 434 p.479. 842

Figure 869 Importants massifs de concrétions de la grotte de Gcwihaba (Source : Fonds photographique Marshall d'Harvard University, 1950). 848

Figure 870 Âges moléculaires de la divergence des poissons-tigres Hydrocynus (Source : Goodier et al., 2011, Fig.6, modifié). 859

Figure 871 Outils lithiques MSA, en silcrète, trouvés Waxhou North.....863

Figure 872 Affleurement de silcrète à Waxhou North. 864

Figure 873 Outil lithique MSA en silcrète de Waxhou North. 864
Figure 874 Dolomies à silex de Waxhou North. 864
Figure 875 Affleurement de silcrète à Waxhou North. 864
Figure 876 Trajet de prospection des buttes au sud-ouest de Waxhou North et points remarquables..... 865
Figure 877 Brèches de Waxhou North..... 865
Figure 878 Carte des principaux gisements lithiques dans le nord-ouest du Botswana. 866
Figure 879 Carte synthétique des sites ESA (Source : Moore et al., 2007, Fig.15.15, p.324)..... 867
Figure 880 Carte synthétique des découvertes lithiques (Cotterill, 2006, Fig 5.5, p.221)..... 868
Figure 881 Outils lithiques LSA d'Orapa (K006). (Perkins et al.2006, Plate 5.13, p.79). 870
Figure 882 Mine de Damtshaa (Source : internet). 870
Figure 883 Planche des outils lithiques MSA trouvés à Gweta. 872
Figure 884 Planches des outils lithiques LSA et MSA trouvés à Gi (Yellen et Brooks, 1988 ; Lombart et Churchill, 2022)..... 873
Figure 885 Datations (Source : Helgren et Brooks, 1983) 874
Figure 886 Calcrètes et pans à Gi (Source : Helgren et Brooks, 1983). 874
Figure 887 Relation entre les artefacts lithiques et les paléo-nivaux de lac (Helgren et Brooks, 1983)..... 874
Figure 888 Biface Sangoa à N'gonye (Cotterill, 2006, p.188) (Source : Northern Rhodesia Information Department). 875
Figure 889 Profil morphokarstique actuel du Rift de l'Okavango. 881
Figure 890 Position du paléolac Deception à 995 m. 882
Figure 891 Ajout du karst de Gcwihaba Hills. 882
Figure 892 Position du paléolac Deception à 995 m. 883
Figure 893 Ajout de la vallée actuelle de Gewidum à Gcwihaba (-7 m)..... 883
Figure 894 Ajout des forages des paléopans de Koanaka (K1 et K3). 884
Figure 895 Détail de la vallée actuelle de Gewidum et de la vallée incisée. 885
Figure 896 Schéma de la vallée incisée et niveau d'étagement des galeries des grottes de Gcwihaba (Voir aussi Figure 755 à Figure 761 p.758). 885
Figure 897 Légende de la figure suivante. 887

Figure 898 Modèle géométrique et sédimentaire des différents karsts (1 : paléokarst à sables, 2 : paléokarst à brèches pédologiques et 3 crypto-karsts) observées au Botswana. 888

Figure 899 Légende de figure suivante. 891

Figure 900 Modèle géométrique et sédimentaire prenant en contact les paléoenvironnements aquatiques (lacustres), notamment la surface d'érosion transgressive. 892

Figure 901 Corrélations schématiques (et sans échelle) entre la surface karstique à 1000 m (collines de Gcwihaba, vallée de Gewidum) recouverte par les dunes de sables et les dépôts lacustres (calcrètes) des forages JB1, JB7et JEB 1 de la plaine de l'Okavango. 893

Figure 902 Coupe stratigraphique entre les deux forages selon Linol et al. (2015) (Source : Linol et al., 2015). 894

Figure 903 Coupe géologique de Bäumle (AA') à travers le Rift de l'Okavango, localisée sur la Figure 849 (Pas à l'échelle et profil topographique exagéré 500 fois)(Source : Bäumle et al., 2019, Fig.1, modifié). 895

Figure 904 Coupe géologique conceptuelle de l'évolution du Rift de l'Okavango montrant des dépôts lacustres en profondeur (en mauve) (Source : Bäumle et al., 2019, Fig.13, modifié). 896

Figure 904 Les karsts étudiés en Afrique australe (Vue 2.5 D exagérée verticalement. 901

Figure 906 Cote ouest occupée par les grands bassins versants de l'Orange et le Vaal. 902

Figure 907 Cote est érodée par les fleuves du Limpopo et du Zambèze. 902

Figure 908 Grands profils morphokarstiques des zones étudiées en Afrique australe. 903

Figure 909 Profil morphokarstique des karsts de Namibie et du Botswana. 904

Figure 910 Profils morphokarstiques synthétiques des karsts de l'Afrique australe. 904

Figure 911 Karsts et karsts potentiels étudiés (cercles blanc) et grands profils morphokarstiques réalisés (traits rouge et blanc). 905

Figure 912 Karsts et karsts potentiels entre le Cradle of Humankind et le Rift est-africain. La légende est sur la figure suivante. En rouge, sont indiquées les formations carbonatées à l'affleurement (karsts potentiels). 906

Figure 913 Légende de la carte précédente. 907

Figure 914 Karsts connus et karsts potentiels entre l'Orange et le Limpopo. 909

Figure 915 Détail de la carte précédente sur le Bassin du Transvaal montrant la répartition des cavités, en rouge, des formations carbonatées à l'affleurement, en bleu ciel, et des quartzites qui les surmontent, en bleu foncé. 910

Figure 916 Altimétrie et position des karsts et des karsts potentiels pour rechercher des remplissages karstiques plio-pléistocènes. 910

Figure 917 Localisation du karst de Vlakplaats et d'Hoogland, à 40 km à l'est du Cradle of Humankind (« Berceau de l'Humanité »). Les zones en orange marquent la base au sud et le sommet au nord des formations carbonatées karstifiées des dolomies de Malmani. 912

Figure 918 Schéma des paléosurfaces identifiées dans le Cradle of Humankind au karst d'Hoogland-Vlakplaast. 914

Figure 919 Prolongement de l'identification des surfaces du Cradle of Humankind jusqu'au karst d'Hoogland-Vlakplaats. 914

Figure 920 Analyse morphokarstique de la Hennops River et du karst d'Hoogland-Vlakplaats. 915

Figure 921 Analyse des surfaces d'aplanissement dans le secteur d'Hoogland-Vlakplaats. 916

Figure 922 Localisation des cavités dans le secteur d'Hoogland et Vlakplaats. 916

Figure 923 Localisation des cavités dans le secteur de Vlakplaats et d'Hoogland. Leur nom et l'altitude sont donnés ci-dessous. 917

Figure 924 Analyse hypsométrique et localisation des cavités le long de la Hennops River. La limite sud d'affleurement des dolomies est indiquée en bleu ciel et le Black Reef en noir. 918

Figure 925 Zoom et analyse hypsométrique et localisation des cavités le long de la Hennops River. 919

Figure 926 Vue en arrivant depuis l'est sur le karst à buttes d'Hoogland. Au pied des buttes la surface est à 1340 m. d'altitude. 921

Figure 927 Vue panorama depuis l'ouest (25°49'12.06''S 28°0'54.81''E). 921

Figure 928 Colline des cavités de Caracal et de Two Rabbits and aloe. Des brèches sont visibles en bas de la pente. 921

Figure 929 Panorama (sud à gauche et nord à droite) depuis le sommet de la colline où se situent les grottes de Caracal et Two Rabbits and an Aloe. 922

Figure 930 Détail du panorama précédent. Les cavités de Vlakplaats qui contiennent des fossiles (Adams et al., 2010) et des concrétions datées de -5.8 à -4.8 Ma (Hopley et al.2019) s'ouvrent au-dessus de la surface, indiquée en vert, à 1440 m. Au-dessus de cet ensemble, la surface S2, désignée par deux flèches

jaunes, à 1510 m d'altitude, s'étend jusqu'au sud (à gauche) et correspond aux replats sur les reliefs (le Renosterkom et le relief sans nom à 1545 m).....922

Figure 931 Zoom sur le panorama précédent montrant le vallon perché, à 1430 m d'altitude, où s'ouvrent les grottes de Vlakplaats, paysage relique du Pliocène où devaient circuler les Hominines. 923

Figure 932 Détails du panorama précédent montrant le vallon perché à 1440 m d'altitude et précisant l'emplacement des cavités. 923

Figure 933 Analyse du panorama de la Figure 930. 924

Figure 934 Panorama orienté NO-SE depuis le Lion & Safari Park montrant le karst de Vlakplaats-Hoogland. 925

Figure 935 Localisation des karsts du Cradle of Humankind, de Makapansgat, de Lobatse, de Ramotswa et d'Ottoshoop dans le Bassin du Transvaal. Le volcan alcalin du Pilanesberg, à 50 km au nord du CoH et l'impact de la météorite de Vredefort, à 50 km au sud, sont indiqués. 926

Figure 936 Dolomies paléoprotérozoïques, en bleu ciel, de l'ouest du bassin du Transvaal et du bassin de Kanye. Les formations du groupe de Pretoria sont indiquées en bleu foncé et les formations de Waterberg en marron clair. .927

Figure 937 Détail de la carte précédente sur la région karstique de Lobatse au Botswana. 927

Figure 938 Analyse hypsométrique succincte de la région de Lobatse montrant des reliefs karstiques, en foncé. Les traits rouges correspondent aux formations carbonatées affleurantes. 927

Figure 939 Localisation des grottes de Lobatse (Source : Baillieul, 1973). 929

Figure 940 Le géoréférencement de cette carte de King (1951, fig.6, p.147) indique que la grotte indiquée « Cave (no red sand) » n'a pas été retrouvée par Stephens et al.(2022) ni par le Mother Lode Grotto (2006). Ce secteur est entouré en orange sur la carte (Figure 942 p.934). 929

Figure 941 Données sur les datations de spéléothèmes dans la grotte de Lobatse n°2 selon Braun et al., 2019, Table 1. 933

Figure 942 Synthèse cartographique des cavités de Lobatse, trouvées pendant les différentes expéditions. 934

Figure 943 Report de la carte géologique (Dietvorst, 1988, Fig.1, p.642) et de la carte hypsométrique du karst de Lobatse. Des failles ont été indiquées par des traits en pointillé noir. 935

Figure 944 Carte (modèle ombré et pentes) du karst de Lobatse montrant des buttes karstiques et des surfaces subhorizontales. 936

Figure 945 Localisation des cavités (n°1, 3 et 4) de Lobatse, sur une image satellite (Bing). Le trajet de prospection est indiqué en noir. 937

Figure 946 Détail de la figure précédente. La localisation des cavités au pied des figuiers montre que chaque zone boisée peut être une cavité. 937

Figure 947 Aven d'entrée de la grotte n°1 (Source : Bruxelles L.). 939

Figure 948 Le puits d'accès de la cavité n°1. (Source : Laurent Bruxelles). 939

Figure 949 L'accumulation actuelle en-bas du puits d'entrée de la cavité, en particulier sa géométrie, est un bon analogue des remplissages karstiques fossilifères que nous étudions (Source : Laurent Bruxelles). 939

Figure 950 Brèches rouges dans la cavité. (Source : Laurent Bruxelles). 940

Figure 951 Corrosion des spéléothèmes et des remplissages. 940

Figure 952 Important remplissage bréchifiée rouge dans la grotte de Lobatse n°1. (Source : Laurent Bruxelles). 940

Figure 953 Le remplissage rouge est venu combler les anciennes parties fantômisées dans les dolomies, soulignées par des flèches blanches. La fantômisation du banc de dolomies est interrompue par l'interbanc de cherts. Nous avons indiqué deux interbancs de chert par des flèches rouges. (Source : Laurent Bruxelles). 941

Figure 954 Plan topographique de la grotte de Lobatse n°2 par Cooke (1975). 942

Figure 955 Photographie de la grotte de Lobatse 2 (des phases de concrétionnements vers 197 000 ans et 21 000 BP (Holmgren et Shaw, 1999, p.78). 943

Figure 956 Photographie de l'entrée de la grotte n°2 (Source : Stephens et al., 2022, p.252). 943

Figure 957 Photographie de la grotte n°3 (Source : Stephens et al., 2022, p.252). 944

Figure 958 Entrée de la grotte de Lobatse n°4 en 2006. 945

Figure 959 Entrée de la grotte en 2024 (Source : Laurent Bruxelles). 945

Figure 960 Topographie de cette petite cavité (Source : https://www.chilembwe.com/botswana/reports.html). 945

Figure 961 Géoréférencement des cartes de Martini et Kavaleries (1976, p.234-235). Voir aussi Martini (1976a, Fig.3, p.628). 947

Figure 962 Carte géologique simplifiée du karst d'Ottoshoop. 947

Figure 963 Report en surface de la grotte de Wonderfontein (Du Preez et al. 2016, Fig.1, p.653). 948

Figure 964 Crypto-karst d'Ottoshoop. 949

Figure 965 localisation des grottes connues du karst de Kaapsekor. 951

Figure 966 Carte géologique de Kaapsekor. 952

Figure 967 carte hypsométrique des cavités du karst de Pilgrim'rest. 953

Figure 968 Carte géologique de Pilgrim'rest. 954

Figure 969 Hypsométrie RRIM de la région de Makapansgat et position de la coupe (trait noir ouest-est). 955

Figure 970 Analyse morphokarstique de la région de Makapansgat. 956

Figure 971 Analyse morphokarstique de la région de Makapansgat. 956

Figure 972 Géologie de Makapansgat. 957

Figure 973 Géologie de la région de Makapansgat adaptée de Kinnaird et al., 2005, Fig. 2 et Hutchinson et al., 2013 (Fig. 1). 958

Figure 974 Coupe géologique, orientée ouest-est de la région de Makapansgat, à travers les vallées de Sterkrivier, Mogalakkwena (Mokopan) et de la vallée d'Olifants river (Chuniespoort). En gras, le nom des cavités fossilifères. La mine de Marsfontein est indiquée en noir. 959

Figure 975 Carte géologique des dolomies de Malmani (bleu ciel) et du groupe de Pretoria (bleu foncé) du Marble Hall Fragment. 961

Figure 976 Coupe géologique entre le karst de Marble Hall Fragment et le karst fossilifère de Makapansgat. La position de cette coupe est indiquée sur la Figure 915 (p.910). 961

Figure 977 Les analyses RRIM, décrites page 76, permettent de mieux visualiser les reliefs karstiques du Marble Hall Fragment. Les dolomies sont délimitées en rouge. 962

Figure 978 Hypsométrie, modèle ombré et carte de pentes des carbonates du Marble Hall Fragment. 963

Figure 979 Identification de dolines et de buttes à Marble Hall. Les altitudes indiquées ont été mesurées sur le MNT produit par la JAXA. Les dolines sont estimées à une vingtaine de mètres et les buttes à une vingtaine de mètres. Certaines dépressions mesurent 500 m de longueur. L'affleurement de carbonates, orienté NS, est limité par les deux traits rouges. La localisation de cette carte est indiquée sur la Figure 975. 964

Figure 980 Dolomies de Malmani (en bleu clair) et le groupe de Pretoria (en bleu foncé) du Krokodil River Fragment. Les formations altérées (fer) et oxydées de la Penge (en rouge), les pendages des formations et la position de la coupe (trait noir) sont indiqués. 965

Figure 981 Coupe géologique NS des dolomies de Malmani et du groupe de Pretoria qui les recouvre, au niveau du Krokodil River Fragment, près de la ville d'Assen, au milieu du Bassin du Transvaal. 966

Figure 982 Analyses hypsométriques et géomorphologiques de la région de Krokodil River Fragment. Les dolomies à l'affleurement sont délimitées en rouge. ..967

Figure 983 Formation oxydée de Rooinekke (Source : Frauenstein 2005, Abbildung 12 p.40). 969

Figure 984 Formation Duitschland qui sont des dolomies non altérées qui sont situées stratigraphiquement au-dessus de dolomies altérées. (Source : Frauenstein 2005, Abbildung 19 p.47). 969

Figure 985 Coupe géologique de Du Toit (1954) montrant le plateau de Ghaap à l'est (Kaap plateau). 970

Figure 986 Profil sismique interprété à travers le bassin sédimentaire montrant les dolomies (Source : Tinker et al., 2002, p.112-113, modifié). Longueur de la coupe : 160 km. 970

Figure 987 Carte géologique simplifiée (produite avec les données numériques CGS_RSA1M Geological polygon au 1/1 000 000 du Council of Geoscience) et proche de celle de d'Altermann et Nelson (1998, Fig.1, p.228)) du plateau de Ghaap où se situe la carrière de Buxton Norlim (n°14 sur la carte) d'où provient le crâne de l'Australopithèque de Taung (Dart, 1925b ; DACEL, 1998). Les autres points indiqués sont des cavités connues issues du SASA Cave Register. La légende est disponible page 248. 971

Figure 988 Carte hypsométrique et hydrologique du Plateau karstique de Ghaap. Notons l'emplacement de la figure suivante (Figure 989). A comparer avec la p.248 972

Figure 989 Détail sur le karst du bord du Plateau de Ghaap. L'emplacement de cette carte est indiqué sur la carte précédente. 974

Figure 990 Carte géologique et colonne stratigraphique du Plateau de Ghaap selon Beukes (Beukes et al., 2016). 975

Figure 991 Localisation des coupes géologiques et des affleurements des équivalents des dolomies de Malmani du Bassin du Transvaal (en bleu clair) et des cavités (cercles rouges). Légende (p.243 978

Figure 992 Coupe géologique NS du Bassin du Transvaal (Kruger, 2005 in PARKER et al., 2013, modifié). 979

Figure 993 Bloc géométrique des coupes Rz-254, 255 et 256 montrant la géométrie des dolomies de Malmani dans l'ouest du Bassin du Transvaal (Tinker et al., 2002, modifié). 979

Figure 994 Coupes géologiques AG et OB de Tinker et al. 2002 (fig.11 et 12 p.125, modifié). 980

Figure 995 Cartographie des formations carbonatées de l'Afrique du Sud et de la Namibie et du Botswana où elles sont différenciées. On localise dans le coin sud-est le Bassin carbonaté du Transvaal avec le karst du Cradle of Humankind et le karst de Lobatse. 981

Figure 996 Cartographie des formations carbonatées de la Namibie, du Botswana et de l'Afrique du Sud. On localise dans le coin sud-est le Bassin carbonaté du Transvaal avec le karst du Cradle of Humankind et le karst de Lobatse. 982

Figure 997 Carte géologique en relief des cavités dans la région d'Otavi en Namibie. 983

Figure 998 Visualisation en relief du karst d'Harasib en utilisant les données de relief Tandem-x, présentées dans la 1 (p.89) et traités par Benjamin Lans (Bruxelles et al., 2015, 2016).....984

Figure 999 Carte géologique du Bassin de Kanye 985

Figure 1000 Carte des reliefs de Palapye (hypsométrie), indication des formations carbonatées à l'affleurement par le contour bleu. 986

Figure 1001 Carte des reliefs de Palapye (modèle ombré), indication des formations carbonatées à l'affleurement par le contour bleu. 986

Figure 1002 Modèle ombré du secteur carbonaté, en violet, d'Okwa. 987

Figure 1003 Modèle ombré du secteur d'Okwa.....988

Figure 1004 Karsts connus et karsts potentiels (en rouge) au Zimbabwe. 991

Figure 1005 Localisation du karst de Lomagundi. 992

Figure 1006 Localisation des formations carbonatées à Lomagundi où potentiellement des grottes peuvent se trouver.....993

Figure 1007 Cartographie des quartzites de Chimanimani et localisation de "grottes" identifiées par les spéléologues du SASA (1994). 994

Figure 1008 Massifs karstiques de la Zambie. 995

Figure 1009 Massifs karstiques dans le bassin versant du Zambèze. 997

Figure 1010 Hypsométrie, classement des altitudes et carbonates (en trame noire) du bassin versant du Zambèze. 997

Figure 1011 Carte des sols (Unesco, 1977) avec modèle ombré. 998

Figure 1012 Carte des sols (Unesco, 1977) sans modèle ombré. 998

Figure 1013 Carte des sols (Unesco, 1991). 999

Figure 1014 Carte des surfaces. Légende Figure 121 p.175. 999

Figure 1015 Carte hypsométrique de la région karstique de Lusaka. 1000

Figure 1016 Carte des sols (Unesco, 1991). 1000

Figure 1017 Cibles potentiels déterminées par l''étude et l'analyse des formations carbonatées à l'affleurement. 1005

Figure 1018 Exemple d'itinéraire et estimation des temps de trajet pour le début de la mission. 1006

Figure 1019 Cibles à prospecter (en rouge) et trajets de prospection (en noir) envisagés avant la mission et issue du travail de préparation de la mission. 1008

Figure 1020 Karsts potentiels de la région de Tete (Légende : Figure 1022 p.1012). 1010

Figure 1021 Karsts potentiels de la région de Tete (Légende : Figure 1022 p.1012). 1011

Figure 1022 Log stratigraphique synthétique du Mozambique récapitulant les formations carbonatées. 1012

Figure 1023 Karsts potentiels de la région de Fingeo. 1013

Figure 1024 extrait de la carte géologique de la région de Fingeo au Mozambique (Source : carte 1 / 250 000 n°1530-1531, GTK Consortium, 2006. 1014

Figure 1025 Coupe géologique de la région de Fingeo au Mozambique (Source : carte 1 / 250 000 n°1530-1531, GTK Consortium, 2006). 1014

Figure 1026 Détail de la coupe géologique montrant les formations carbonatées, en orange, susceptible d'être karstifiées (Source : GTK Consortium, 2006). . 1015

Figure 1027 Formations géologiques de la coupe géologique précédente (Source : GTK Consortium, 2006). 1015

Figure 1028 Localisation des formations carbonatées en bleu, et de la grotte de Ngalue en rouge (Source : GTK Consortium, 2006)..... 1016

Figure 1029 Vue 2.5 D des pentes en relief du secteur de la grotte de Ngalue et délimitation des formations carbonatées par le contour bleu. La grotte est située à droite..... 1017

Figure 1030 Formation carbonatée de Tete (Source : Lloyd, 2016). 1018

Figure 1031 Carte géologique du Monte Pitao((Source : GTK Consortium, 2006). 1019

Figure 1032 Localisation des formations carbonatées de Dacata. 1020

Figure 1033 La position du paléokarst est indiquée en rouge. L'image satellite permet d'identifier les formations carbonatées plissées. 1021

Figure 1034 Localisation du paléokarst en rouge. Il a été recoupé par le talus de la route On repère des bancs calcaires au nord (cf. Figure 1037). 1022

Figure 1035 Paléokarst à bauxite (bx) raboté par la surface topographique et tronqué par le talus de la route..... 1023

Figure 1036 Identification de la bauxite (de couleur blanche)..... 1023

Figure 1037 Bancs calcaires arasés et karstifiés plus au nord sur le plateau. 1023

Figure 1038 Remplissages de bauxite du paléokarst tronqué par la route..... 1024

Figure 1039 Affleurement aplani des calcaires plus au nord. L'axe rouge indique la position d'une fissure remplie de calcite et est indiqué sur la Figure 1037. 1024

Figure 1040 Détail de la calcite automorphe. 1024

Figure 1041 Brèches pédologiques trouvées en surface (de nuit). 1026

Figure 1042 Détails des brèches pédologiques dans les fissures de la grotte. 1026

Figure 1043 Fissure remplies de brèches pédologiques dans la grotte de Buchane. 1026

Figure 1044 Typologie et localisation des remplissages de la grotte de Buchane (Topographie de Laumanss, 1998, p.125). 1027

Figure 1045 Prospection des grottes et des 2 dépressions de Buchane au Mozambique 1028

Figure 1046 Carte de localisation des grottes de Laumanns (1998, p.112). 1028

Figure 1047 Photographie de l'entrée de Caverna Cagi par Laumanns (Source : Laumanns, 1998, p.114). 1029

Figure 1048 Topographie de la Caverna Cagi d'après Cilex, 1989 in Laumanns, 1998 (p.96). 1029

Figure 1049 Entrée de la Caverna Cagi, prospectée le 02/09/2022 (Source : Bruxelles L.). 1030

Figure 1050 Identification d'un remplissage bréchique pédogénique. 1030

Figure 1051 Localisation des brèches. On observe aussi de nombreuses biocoupoles au plafond. 1030

Figure 1052 Karsts (points rouges) et karsts potentiels (surfaces rouges) au Malawi 1034

Figure 1053 Extrait de la carte géologique de Bloomfield et al. (1966) montrant les formations carbonatées (en bleu) et l'indication "Shallow Hole". Nous avons indiqué notre trajet de prospection. 1036

Figure 1054 Image satellite de la région de Kirk Range, sur laquelle des reliefs potentiellement karstiques ont été identifiés et délimités en bleu, les replats en violet, les forêts en vert et les escarpements en marron. 1037

Figure 1055 Traitement géomatique, comme expliqué dans le Chapitre n°1 (p.56) des reliefs pour identifier des buttes karstiques. 1037

Figure 1056 Trajet de prospection du karst de Kirk Range et identification des cavités par des triangles rouges. 1038

Figure 1057 Coordonnées GPS fournis par David Kloser pour rejoindre les grottes. 1038

Figure 1058 Coupes topographiques de Changalumi Pothole(Bloomfield, 1965, p.155). 1040

Figure 1059 Description de la grotte (Bloomfield, 1965, p.156). 1040

Figure 1060 Localisation des sites prospectés à Karonga. 1042

Figure 1061 Report de la carte géologique d'Andrew et al., (1910, fig.3, p.202) et localisation des formations carbonatées (en violet) de Karonga, notées A, B à F. En rouge, les formations des Chiwongo beds et des Chitimwe beds. 1043

Figure 1062 Plaine constituée des formations du Permien à Karonga au nord du Malawi. 1044

Figure 1063 Carte géologique du lac Malawi et détail du bassin de Mpata (Source Andrew et al., 1910, fig.3, p.202). 1045

Figure 1064 Photographie du bassin de Mpata et des choppers trouvés au sommet des collines au milieu du bassin. 1046

Figure 1065 extrait de la coupe géologique montrant la structure en rift de la zone de Karonga (Source : GENMAP BRGM GFK CGS, 2021). 1046

Figure 1066 Extrait de la carte géologique de Karonga (Source : GENMAP BRGM GFK CGS, 2021). 1047

Figure 1067 Contexte stratigraphique de la mandibule d'Hominines de Malema. La discordance des niveaux fluviatiles de Chitimwe beds sur les niveaux lacustres de Chiwondo beds est indiquée en rouge. 1047

Figure 1068 Lumachelle pliocène. 1048

Figure 1069 Carrière de Mpatha (Mwawembe) (Longitude : 9.95268292°S; 33.83641541°E; Altitude : 80 m). 1048

Figure 1070 Karsts potentiels et karsts connus de la République démocratique du Congo et contexte oro-hydrographique. 1052

Figure 1071 Cartographie des karsts du sud de la République démocratique du Congo. 1053

Figure 1072 Interface du modèle SIG des karsts d'Afrique australe sous Google Earth Engine. 1059

Figure 1073 Interface du code que nous avons réalisé du modèle SIG. 1059

Figure 1074 Exemple de l'interface. 1060

Figure 1075 Zoom. 1060

Figure 1076 Traitement RRIM des reliefs directement accessible sur l'interface. 1061

Figure 1077 Le Cradle of Humankind, situé dans le Bassin du Transvaal, est érodé par la Crocodil, un affluent du Limpopo qui se jette dans l'Océan Indien. 1065

Figure 1078 Le bassin d'érosion du fleuve Limpopo atteint le nord du Cradle of Humankind via la rivière Crocodil, tandis que le sud est érodé par la Vaal. 1065

Figure 1079 Vague d'érosion régressive dans la vallée de la Bloubank un affluent du Krokodil, initiée par l'érosion du knickpoint. 1066

Figure 1080 Erosion de la vallée de la Bloubank et localisation des cavités sur un fond hypsométrique (Voir Figure 370 p.412). 1066

Figure 1081 En Afrique australe, se situe le modèle endoréique de l'Okavango et le modèle exoréique du Cradle of Humankind. 1068

Figure 1082 Détail de la vue précédente montrant les deux modèles. 1068

Figure 1083 Modèle endoréique de l'Okavango et extension supposée du Paléolac Deception (à 995 m), du Paléolac Makgadikgadi (à 945 m) et du Paléolac Thamalakane (à 936 m) (Voir p.824). 1069

Figure 1084 Extension supposée du paléolac Déception et des autres paléolacs, en relief exagéré 10 fois. 1069

Figure 1085 Vue 2D ½ de l'érosion du continent de l'Afrique australe par les fleuves du Limpopo et du Zambèze. 1071

Figure 1086 Coupe morphokarstique synthétique des différents karsts étudiés. 1071

Figure 1087 Version du code du modèle SIG des karsts potentiels d'Afrique australe sous Google Earth Engine. 1074

Figure 1088 Portail de visualisation et de téléchargement des données géographiques de l'Afrique du Sud. 1109

Figure 1089. Plusieurs gamme de couleurs sont disponibles sur le logiciel Arcmap. 1110

Figure 1090 Raster NTO (Negative Topographic Openness) (bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud). 1112

Figure 1091 Raster PTO (Positive Topographic Openness) (bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud). 1112

Figure 1092 Rendu du relief par Differential Openness calculé en utilisant la Calculette Raster(bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud). 1113

Figure 1093 Résultat obtenu avec modification du contraste du Differential Openness(bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud). 1114

Figure 1094 Réglages initiaux des paramètres de valeur Min/max dans Qgis pour l'étape 3. 1115

Figure 1095 Réglage des paramètres de valeur Min/max : en moyenne /- déviation standard dans Qgis pour l'étape 3. 1116

Figure 1096 Résultat obtenu avec rééchantillonnage du Differential Openness(bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud). 1117

Figure 1097 Réglage des paramètres du rééchantillonnage lors de l'étape 4 dans Qgis pour dépixéliser. 1118

Figure 1098 Carte des pentes réalisées avec Qgis. On aurait pu la réaliser avec GlobalMapper(bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud). 1119

Figure 1099 Changer la symbologie du raster de pente par la Color ramp : Reds.1120

Figure 1100 Résultats de la carte des pente avec la palette Reds (bordure orientale du Plateau de Ghaap, Afrique du Sud). 1121

Figure 1101 Courbes de niveaux réalisées avec QGIS 1126

Figure 1102 Courbes de niveaux simplifiées Generalized 5k 1126

Figure 1103 Courbes de niveaux simplifiées Generalized 21k 1126

Figure 1104 Courbes de niveaux simplifiées Generalized 40k 1127

Figure 1105 Courbes de niveaux simplifiées Generalized 100k 1127

Figure 1106 Procédure d'extraction des données GPS avec GlobalMapper. 1131

Figure 1107 Paramètres d'extraction. 1132

Figure 1108 Paramètres d'impression au format pdf. 1132

Figure 1109 Calcul de la déclinaison magnétique pour la topographie de la grotte de Grobler, levé en 2017. 1134

Figure 1110 La déclinaison est donc de 18°34'W, soit 18,57° anti-horaire. 1134

Figure 1111 Plan topographique de la grotte de Grobler calé par rapport au nord de la boussole (noté « Nm 2017 »). 1134

Figure 1112 Plan topographique de la grotte de Grobler recalé par rapport au nord géographique (noté « ng »). 1134

Figure 1113 Portail de téléchargement de différents types de cartes et à différentes échelles. 1135

Figure 1114 Le portail interactif du Council of Geoscience indique que les cartes géologiques, au 1/50 000, du Cradle of Humankind sont les cartes : Hekpoort 2527Dc, Broederstroom 2527DD, Randfontein 2627BA et Roodepoort 2627BB, etc. 1135

Figure 1115 Ouverture de la carte géologique au format pdf avec Photoshop. 1136

Figure 1116 Définition de la zone à rogner. 1136

Figure 1117 Ouverture de l'outil « Georeferencing » : Menu > Customize >Toolbars> Georeferencing. 1137

Figure 1118 Intégration du raster dans l'outil « Georeferencing ». 1137

Figure 1119 Ouverture à droite de la fenêtre du « Viewer » correspond au raster que l'on souhaite géoréférencer et affichage à gauche de la carte géoréférencée qui va servir de support de calage, ici c'est le raster d'OpenStreetMap, en serveur wms. 1138

Figure 1120 Définition des premiers points de calage pour caler provisoirement le raster. 1138

Figure 1121 Passage du mode « Data view » à « Layout View ». 1139

Figure 1122 Clic-droit sur la carte pour ouvrir le menu Properties, un cadre bleu va apparaitre, nous pouvons maintenant demander d'afficher une grille de référencement (« measured grid » ou « graticule »). 1140

Figure 1123 Définition d'une « measured grid » ou de « graticule » pour géoréférencer un raster 1140

Figure 1124 Affichage de la grille géodésique, des frontières vectorisées et géoréférencées de l'Afrique du Sud en rouge et du raster. En utilisant quelques points de calage sur la cote et le long de frontière, nous remarquons que le raster est mal calé. Nous allons alors utiliser de nouveaux points de calage sur les grilles géodésiques. 1141

Figure 1125 Elimination des premiers points de calage, le long de la côte, de 1 à 11. 1142

Figure 1126 Etape d'ajustement du raster en prenant en compte tous les points de calage. 1142

Figure 1127 Utilisation du géoréférencement en utilisant tous les points de calage. 1143

Figure 1128 Après élimination des premiers points de calage, nous n'avons gardé que les points positionnés sur les grilles géodésiques et nous avons choisi d'ajuster le calage avec tous les points. Nous voyons que le raster coïncide parfaitement avec les frontières vectorisées en rouge. 1143

Figure 1129 Actualiser le géoréférencement. 1144

Figure 1130 Exemple du géoréférencement de la carte géologique GTK_MZ_1834 du Mozambique. 1145

Figure 1131 Fenêtre d'exportation sous GLOBALMAPPER. 1146

Figure 1132 Carte géologique vectorisée colorisée à l'échelle 1/1 000 000 de 1987 ouverte sous Mapinfo à partir des données tab dont nous venons d'expliquer l'utilisation. 1148

Figure 1133 ARCGIS™ permet d'indiquer le nom des formations géologiques pour chaque polygone de la carte géologique précédente, géoréférencée et exportée en tiff. 1148

Figure 1134 Emplacement des fichiers MNT dans l'ordinateur, avec Arcmap. 1153

Figure 1135 Chronologie des évènements géologiques en Afrique australe depuis 4.6 Ga. (Voir aussi Johnson et Wolmarans, 2008). 1156

Figure 1136 Chronologique des évènements géologiques en l'Afrique australe depuis le Paléozoïque. Notons la contemporanéité entre les surrections du continent, les surfaces d'érosion africaines et la mise en place des profils d'altération. Les profils d'altération sont issus de Van Niekerk et al. (1999) (par datation $^{40}Ar/^{39}Ar$ sur des cryptomélanes) et Gutzmer et al. (2012) (par datation $^{40}Ar/^{39}Ar$ sur des todorokites et des manganomélanes). L'âge des discordances du Crétacé a été déterminé par stratigraphie séquentielle des marges offshores du Canal du Mozambique (Baby, 2017). 1157

Figure 1137 Synthèse chronologique des Surfaces d'érosion africaine et des phases de surrection..... 1158

Figure 1138 Coupes géologiques du Bassin du Transvaal proposées par Button (1973, modifié). 1161

Figure 1139 Coupe géologique synthétique du karst d'Ottoshoop (Martini, 1976, modifié). 1163

Figure 1140 Coupe géologique montrant l'érosion des dolomies de Malmani dans le secteur des grottes de Berlin (décrites par Martini, 1987a) (Source : Molengraaff, 1901, fig.3, Planche II, colorisée et modifiée). En jaune : Horizon du Diggers-Leaders équivalent au gisement de Barrett's Berlin et au Tweefontein Reef, correspondant à l'accumulation des produits inaltérés par la karstification par crypto-corrosion des dolomies sur les quartzites du Black Reef et montrant ce faciès de lapiaz et de pinacles. 1164

Figure 1141 Position du karst de Berlin, décrit par Martini (1987a), et des pinacles de Devil's Katoor (de la photographie précédente) en bordure de plateau comme l'indique cette coupe de Molengraaff (Source : Molengraaff, 1901, fig.3, Planche II, colorisée et modifiée). 1165

Figure 1142 1165

Figure 1143 Coupe expliquant l'altération des quartzites du Black Reef en wad- (Source : Martini-1987). 1165

Figure 1144 Cartographie en surface du karst de Berlin, en rouge selon Martini (1987, Fig. 2, p. 47) montrant les ruiniformes du Black Reef en bleu foncé (en photo Figure 1142), l'organisation des dykes de diabase, en marron et la répartition des grottes et des avens (SASA Cave Register). 1166

Figure 1145 Vue 2.5 D des grottes de Berlin (en rouge selon Martini, 1987b) la carte géologique en relief du plateau dolomitique karstifié de Berlin (est du Bassin du Transvaal). Les points jaunes correspondent à l'inventaire des cavités du SASA Cave Register. 1167

Figure 1146 Vue 2.5 D hypsométrique des grottes de Berlin (en rouge selon Martini, 1987b) du plateau dolomitique karstifié de Berlin (est du Bassin du Transvaal).

Les points jaunes correspondent à l'inventaire des cavités du SASA Cave Register..... 1167

Figure 1147 Bloc diagramme schématique de la vallée de la Kliprivier, au nord-ouest du Cradle of Humankind (Foster, 1988, Fig. 2, p.6, traduite et colorisée). 1168

Figure 1148 Profil stratigraphique montrant la répartition des couloirs d'altération (fantômes) et leurs profondeurs (~30 m) au niveau d'une ancienne carrière de Pretoria (Trollip, 2006, coloré). Notons que la base des couloirs est subhorizontale et pourrait correspondre au niveau de base. 1169

Figure 1149 Profil synthétique (Trollip, 2006) du toit des dolomies de Malmani et de leurs altérations à l'est au contact du sill de syénites. 1169

Figure 1150 Localisation des atlas n°1 à 5. 1172

Figure 1151 Localisation des atlas n°4 et 5. 1172

Figure 1152 Carte des cavités du Cradle of Humankind (Inventaire : SASA Cave Register). 1174

Figure 1153 Carte géologique du Cradle of Humankind. 1175

Figure 1154 Carte géologique détaillée (distinction des formations du groupe géologique de Pretoria) du Cradle of Humankind. 1176

Figure 1155 Détails des formations des Dolomies de Malmani, qui sont incomplètes vers l'ouest. 1177

Figure 1156 Détails des faciès de la formation Rooihoogte, au-dessus des Dolomies de Malmani. 1178

Figure 1157 Carte hypsométrie et hydrographique du Cradle of Humankind dans les bassins versants de Magaliesrivier, de la Bloubank et de la Krokodil. 1179

Figure 1158 Bassins versants hydrographiques du Cradle of Humankind. 1180

Figure 1159 Particularités géomorphologiques ou karstologiques du Cradle of Humankind (contour jaune). 1181

Figure 1160 Bassins versants hydrologiques du Cradle of Humankind et lithologies. 1182

Figure 1161 Carte hydrologique du Cradle of Humankind..... 1183

Figure 1162 Carte morphokarstique du Cradle of Humankind. 1184

Figure 1163 Analyse des surfaces dans le Cradle of Humankind. 1185

Figure 1164 Carte géologique du Cradle of Humankind montrant le lien entre les lithologies en roche dure et les surfaces élevées de la carte précédente. 1186

Figure 1165 Hypsométrie du Cradle of Humankind et localisation des cavités.... 1187

Figure 1166 Carte des bassins versants en amont de Swartkop qui impactent les cavités de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai et rappel de la lithologie. 1188

Figure 1167 Carte géologique des roches intrusives du bassin versant de la Bloubank en amont du Swartkop. 1189

Figure 1168 Légende de la figure précédente : typologie des dykes des roches intrusives paléoprotérozoïques ou jurassiques. 1190

Figure 1169 Carte géologique distinguant les formations Oaktree, Monte-Christo, Lyttelton, Eccles (légende Figure 1155 p.1177). 1192

Figure 1170 Carte des compartiments hydrogéologiques du bassin versant de la Bloubank (d'après Hobbs, et al., 2011) et lithologie. 1193

Figure 1171 Carte hypsométrique (par classe d'altitude) du bassin versant de la Bloubank et lithologie..... 1194

Figure 1172 Carte morphokarstique du bassin versant de la Bloubank et lithologie. 1195

Figure 1173 Localisation des gisements et paléokarsts fossilifères (cercles rouges) de la vallée de la Bloubank du Cradle of Humankind..... 1198

Figure 1174 Carte satellite (Google Maps) du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai. 1199

Figure 1175 Carte hypsométrique de localisation des sites archéologiques et des cavités fossilifères de la vallée de la Bloubank..... 1200

Figure 1175 Différentes cartes géologiques ont été compilées pour faire la carte géologique du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai (page suivante). 1201

Figure 1176 Géologie de la vallée de la Bloubank et du secteur de Sterkfontein. 1202

Figure 1177 Lithologie et structurale..... 1203

Figure 1178 Carte hypsométrique (par classes d'altitudes) et lithologique du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai..... 1204

Figure 1179 Carte des surfaces morphologiques du secteur de Sterkfontein, Swartkrans et Kromdraai et lithologie. 1205

Figure 1180 Méthode RRIM appliquée au Cradle of Humankind. 1206

Figure 1181 Localisation des atlas cartographiques n°4 et 5. 1207

Figure 1182 Carte satellite du secteur des gisements fossilifères de Sterkfontein, Swartkrans. 1209

Figure 1183 Carte des surfaces du secteur des gisements fossilifères de Sterkfontein, Swartkrans. 1210

Figure 1184 Réseaux karstiques (en rouge) et entrées de grotte ou paléokarsts (en jaune)..... 1211

Figure 1185 Ajout des faille (en rouge) et du volcanisme (en marron) d'après Wilkinson (1973). 1212

Figure 1186 Détail du MNT (Caruana) du secteur de Sterkfontein..... 1213

Figure 1187 Image satellite de la grotte de Sterkfontein (Google Maps 1214

Figure 1188 Modèle ombré (protocole pour réaliser un modèle ombré p.66) issue du modèle numérique de terrain (LIDAR de Matthew V. CARUANA). 1215

Figure 1189 Report du nuage de points issue du modèle 3D (acquisition Benjamin LANS). 1216

Figure 1190 Report de la topographie du réseau de Lincoln-Fault (Boshoff, 1990). 1217

Figure 1191 Différenciation des salles (chamber) de la topographie de Sterkfontein. Elles sont reproduites et décalées vers le bas (Martini et al., 2003). 1218

Figure 1192 Différenciation des salles (chamber) (Boshoff, 1990 ; Martini et al., 2003). 1219

Figure 1193 Report des avens (entrées et puits) issues des topographies de Boshoff (1990) et Martini et al. (2003)..... 1220

Figure 1194 Report des ouvertures en surface et de la salle de Silberberg où est tombé Little foot. 1221

Figure 1195 Superposition des photographies infrarouges, réalisées par Nicolas Poirier (27/06/2012 - drone FLIRT620) au-dessus de la grotte de Silberberg (en noir), où se situait Little Foot. Ces photographies ont permis de localiser l'aven par lequel il était tombé dans la grotte. Le réseau de Sterkfontein et Lincoln Fault sont indiqués en blanc. (Poirier, 2012). 1222

Figure 1196 Dolomies silicifiées (en mauve), formations bréchifiées (en rose), dykes (en orange) et déblais (en violet) au niveau de la grotte de Sterkfontein. 1223

Figure 1197 Report du réseau de la grotte de Sterkfontein et de Lincoln-Fault sur la carte précédente..... 1224

Figure 1198 Report du réseau karstique de Rising Star en plan (en haut) et en coupe (en bas) ,selon Makhubela (2019)..... 1225

Figure 1199 Report des cavités du secteur de Rising Star (calcul des déclinaison Tableau 60 p.1106). En jaune, la calcite de surface et en orange, les filons hydrothermaux (Chert Stockwork veins) cartographiés par Dirks et al. (2015), seulement autour de Rising Star, il doit exister d'autres filons qui n'ont pas été cartographiés..... 1226

Figure 1200 Report en surface de la grotte de Rising Star (topographie levée par Harris J., Rees D., Möller H., Priddle C., van der Hoodt R. en 1985 et géoréférencée

par Dirks et al. (2015, fig.2 p.5) et de la grotte de Yom-Tov (topographie levée par van Rooyen D., Hlophe M., Tucker S., Ramalepa M. en 2016) et image satellite (Google Maps). 1227

Figure 1201 Report surface de la grotte de Yom-Tov. Sur cette image satellite, on identifie bien les calcaires. 1227

Figure 1202 Report en surface des topographies de la grotte de Nico I, levé par Trucker en 2016, la déclinaison était déjà prise en compte, et de Nico 2, levé par Harris J.M., Kenny P.J., Lloyd T.D., Möller H.O., van der Hooft R.E. en 1993 et dont le calcul de la déclinaison a été estimé via la stratigraphie des bancs carbonatés visibles sur l'image satellite (Google Satellite). 1228

Figure 1203 Cartographie des affleurements carbonatés et mise en valeur des roches intrusives et des zones fantômisées. 1229

Figure 1204 Log stratigraphique synthétique du Bassin du Transvaal et du CoH. 1233

Figure 1205 Carte de la région fournis par le Muséum en 2021. 1243

Figure 1206 Pistes d'accès aux secteurs de Gcwihaba Hills et de Koanaka Hills... 1244

Figure 1207 Reconstitution des paléodrainages (Source : De Wit, 2009). 1245

Figure 1208 Reconstitution des paléodrainages (Source : Moore et Larkin 2001). 1246

Figure 1209 Drainages au Pliocène supérieur (Source : Cotterill, 2006, p.230). ... 1247

Figure 1210 Drainages au Pléistocène inférieur(Source : Cotterill, 2006, p.232). 1247

Figure 1211 Drainages au Pléistocène moyen(Source : Cotterill, 2006, p.230). ... 1248

Figure 1212 Drainages au début du Pléistocène supérieur(Source : Cotterill, 2006, p.232). 1248

Figure 1213 Reconstitution des paléodrainages (Source : Moore, Cotterill, Main et Williams, 2007, Fig.15.13, p.322). 1249

Figure 1214 Reconstitution des paléodrainages (Source : Goodier, 2010). 1250

Figure 1215 Drainages au Miocène (Source : Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Fig.7, p.15). 1251

Figure 1216 Drainages au Pliocène supérieur (Source : Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Fig.7, p.15). 1252

Figure 1217 Drainages au Pléistocène inférieur (Source : Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Fig.7, p.15). 1253

Figure 1218 Drainages au Pléistocène moyen (Source : Moore, Cotterill et Eckardt (2012, Fig.7, p.15). 1255

Figure 1219 Reconstitution des paléodrainages (Source : Ponte, 2018, fig.2.20). 1256

Figure 1220 Drainages au Miocène (Source : Fierens, 2019). 1257

Figure 1221 Drainages au Pliocène (Source : Fierens, 2019). 1257

Figure 1222 Drainages au Pléistocène inférieur (Source : Fierens, 2019). 1258

Figure 1223 Drainages du Pléistocène inférieur à moyen (Source : Fierens, 2019). 1258

Figure 1224 Drainages au Pléistocène terminal (Source : Fierens, 2019)..... 1259

Figure 1225 Drainage actuel (Source : Fierens, 2019)..... 1259

Figure 1226 Les sept épisodes tectoniques (A à G) et les 17 évènements phylogéographiques et leurs datations moléculaires (Source : Cotterill et De Wit, 2011, Fig.4, p.495). 1270

Figure 1227 Tableau récapitulatif de l'histoire de ces paléolacs (Source : Ringrose, 2022, Table 4.1 p.63)..... 1274

Figure 1228 ATLAS n°2 : Levés aéromagnétiques (Total Magnetic Intensity) d'après Chisenga et al. (2020, Fig.2). 1275

Figure 1229 ATLAS n°2 : Anomalies magnétiques de Bouguer d'après Chisenga et al. (2020, Fig.2)..... 1276

Figure 1230 ATLAS n°2 Levés aéromagnétiques (Total Magnetic Intensity) d'après Lehmann et al. (2015, Fig.7)..... 1277

Figure 1231 Corrélation des cartes géologiques de Tsumke (karst d'Otavi) et de la carte aéromagnétique de Rankin (2015, Fig.6.19, p.190) où se situent les karsts du Nord-Ouest du Botswana..... 1278

Figure 1232 Corrélation des cartes géologiques de Tsumke (karst d'Otavi) et du modèle ombré JAXA, où se situent les karsts du Nord-Ouest du Botswana. 1278

Figure 1233 Interprétation de la carte aéromagnétique de Rankin (2015, Fig.6.19, p.190) que nous allons réinterpréter pour rendre compte des dolomies de la colline K3 de la grotte de Blue Cave à Koanaka. 1281

Figure 1234 ATLAS n°2 : Carte géologique pré-Kalahari (sans le groupe du Kalahari) selon le BGI (2022). 1282

Figure 1235 ATLAS n°3 : Carte géologique pré-Kalahari (BGI, 2022, modifié)..... 1282

Figure 1236 Légende de la carte (BGI, 2022). 1283

Figure 1237 Carte géologique du Water Surveys Botswana et Aqualogic (2001, Fig.2). 1284

Figure 1238 Carte géologique du Water Surveys Botswana et Aqualogic (2003, Fig.5). 1285

Figure 1239 Cartes géologiques du nord-ouest du Botswana selon Mondillon (2020). 1286

Figure 1240 Cartes géologiques du nord-ouest du Botswana selon Rankin (2015). 1287

Figure 1241 Détail de la carte géologique de Rankin (2015) sur le secteur d'étude. 1288

Figure 1242 Carte géologique selon Key & Ayres (2020). 1289

Figure 1243 Détail de la carte géologique de Key & Ayres (2020). sur le secteur étudié. 1290

Figure 1244 Légende de la carte de Key & Ayres (2020). 1291

Figure 1245 Carte géologique selon Pryer (1997). 1292

Figure 1246 Carte géologique du secteur d'étude selon Pryer (1997). 1293

Figure 1247 Légende de la carte de Pryer (1997). 1294

Figure 1248 Carte géologique de Mondillon (2020). 1295

Figure 1249 Légende de la carte géologique de Mondillon (2020). 1296

Figure 1250 Carte géologique adaptée de celle de Machacha (1997). 1297

Figure 1251 Carte géologique sans la couverture sédimentaire des Sables du Kalahari. 1298

Figure 1252 Carte aéromagnétique de Rankin (2015, Fig.6.19, p.190) que nous allons réinterpréter pour rendre compte des dolomies de la colline K3 de la grotte de Blue Cave à Koanaka. 1299

Figure 1253 Réinterprétation de la carte aéromagnétique de Lehmann (2015, fig.7, 179, modifié) pour prendre en compte la colline dolomitique de Blue Cave que nous avons prospectée. 1300

Figure 1254 Détail sur l'anomalie située à l'est de notre secteur d'étude, et sur les dykes de dolérites qui apparaissent en relief sur cette carte géophysique en 2.5D (Source : De Wit Tsodilo Resources). 1300

Figure 1255 Réinterprétation selon la carte de Lehman (2015) (Figure 1253). 1301

Figure 1256 Carte géologique de Gcwihaba levée par Baillieul et publiée par Cooke (1975, fig.3). 1302

Figure 1257 Carte géologique de Gcwihaba levée par Baillieul et publiée par Cooke et Baillieul (1974, Fig.3). 1302

Figure 1258 ATLAS n°2 D : Image satellite du nord-ouest du Botswana. 1303

Figure 1259 Report de la carte en relief par GPS différentiel et échelle altitudinal brute fournis par le GPS différentiel (Selfe / GRS Consulting, 2005a). 1305

Figure 1260 Vue 2.5D. 1305

Figure 1261 A gauche, les courbes de niveau issues du SRTM 30 m et à droite, en couleur les données précises mesurées avec le GPS différentiel. 1306

Figure 1262 Courbes de niveau issues du SRTM 30 m. 1306

Figure 1263 Courbes de niveau calculées à partir du SRTMV2. 1307

Figure 1264 Localisation des modèles 3D de la colline de Gcwihaba et de celui de la vallée. 1308

Figure 1265 Chronologie succincte des grandes explorations des grottes du nord-ouest du Botswana de 1932 à aujourd'hui. 1311

Figure 1266 Photographie de 1950 dans la grotte de Gcwihaba (Source : F.D. du Toit van Zyl / Harvard). 1314

Figure 1267 Martinus Drotsky, Laurent Kennedy Marshall et « Senator » Gideon Bran van Zyl. 1315

Figure 1268 Martinus Drotsky et sa femme puis Dr van Zyl. 1315

Figure 1269 Série de photographies de la grotte de Gcwihaba lors de l'expédition de 1950 (Source : F.D. du Toit van Zyl / Harvard). 1315

Figure 1270 Plan de la grotte publié par Bent en 1954 (Source : Bent, 1954). 1316

Figure 1271 Logo du Falcon College. 1317

Figure 1272 Topographie de la grotte de Drotsky (Gcwihaba) levée par les élèves du Falcon College. 1317

Figure 1273 Plan des fouilles de 1969 dans l'entrée nord de la grotte de Gcwihaba (Yellen et al., 1987) 1318

Figure 1274 Dessin des silex taillés trouvés dans le sondage A (Yellen et al., 1987) 1318

Figure 1275 Photographies réalisées par Cohler des expéditions de 1969 et 1970 issues de The Magazine of Falcon College de 1970 (Quick, 1970). 1319

Figure 1276 Profil verticale de la grotte de Gcwihaba (Cooke et Baillieul, 1974, Fig.4, p.153). 1320

Figure 1277 Report du réseau et de la colline (Cooke et Baillieul, 1974, Fig. 5, p.154). 1320

Figure 1278 Echantillon provenant de la découverte de J G. Roger en 1971 sur la colline C de Gcwihaba et conservé dans les collections de paléontologie de l'Université de Lyon 1 (Source : Emmanuel Robert). 1321

Figure 1279 Echantillon provenant de Koanaka (Source : Emmanuel Robert). 1321

Figure 1280 Information concernant le permis de prospection de la S.A. Vendôme en 1971. (Source : https://www.lac.org.na/laws/GGsa/rsagg3220.pdf) 1322

Figure 1281 Coupe topographique de Waxhou South selon Cooke et Baillieul (1974). 1323

Figure 1282 Coupe topographique de Waxhou North selon Cooke et Baillieul (1974). 1323

Figure 1283 Tableau des âges des concrétions et des échantillons géologiques de Gcwihaba (Cooke et Verhagen, 1977). 1325

Figure 1284 Plan de Waxhou North (Independence Cave) (ANON, 1979, p.8). 1326

Figure 1285 Coupe topographique de Waxhou North selon Howell en 1979 (ANON, 1979, modifié), où des ossements de koudou sont indiqués en rouge. 1327

Figure 1286 Molaire de Cercopithèque (Parapapio) in situ dans une brèche de remplissage provenant de Koanaka Nord (échelle : 1 cm) (Source : Senut, 2008, p.80). 1329

Figure 1287 Localisation des sites fossilifères plio-pléistocènes (en orange) à Gcwihaba Hills (Gcw A, Gcw C N et Gcw C S) et noms des collines Gcw A, Gcw B jusqu'à Gcw F (Source : Pickford, 1990, Fig. 2, p.9, modifié). 1330

Figure 1288 Localisation des deux sites fossilifères de la Colline C (Gcw C) à Gcwihaba (Gcw C N et Gcw C S) qui correspondent à d'anciennes cavités trépanées par la surface topographique (Source : Pickford, 1990, Fig. 4, p.11, modifié). 1330

Figure 1289 Brèches fossilifères découvertes par Pickford (1990) et indiquées en orange (Gcw A N et Gcw A S) sur le versant ouest de la grotte de Gcwihaba, puis réidentifiées par Bruxelles et al. (2016, p.68). (Source : Pickford, 1990, Fig. 3, p.10, modifié). 1331

Figure 1290 Localisation des sites fossilifères à Koanaka : Koa N et Koa S. 1332

Figure 1291 Plan et coupe de l'amphithéâtre au nord de la colline de K2 à Koanaka et localisation de l'entrée de Bone Cave selon Pickford (1990, Fig.7). (Source: Pickford (1990, Fig.7, modifié) 1334

Figure 1292 Photographie des fouilles de 1991 dans l'entrée nord de la grotte de Gcwihaba (Robbins et al., 1996). 1335

Figure 1293 Topographie de la grotte de Wadum (Source: Garner et Riter, 1994). 1336

Figure 1294 Topographie de 1991 redessinée et publiée en 1994 par Garner et Riter (1994). 1339

Figure 1295 Nouvelle topographie de la grotte de Wadoum (Source : Mann & Ritter, 1995). 1340

Figure 1296 Topographie de Blue Cave montre que la grotte se développe sur plusieurs étages (Ritter et Mann, 1995, modifié). 1341

Figure 1297 Crâne de babouin (mâle) trouvé dans la grotte de Bone Cave en 1997. Il est daté de 317 000 ± 114 000 ans (Source : Williams et al., 2012, modifié). 1342

Figure 1298 Localisation du crâne de babouin trouvé dans Bone Cave en 1997 par Williams (Source : Ritter et Mann, 1995, modifié..... 1343

Figure 1299 Planche photographique des missions de gravimétrie en 2005 (Source : Gavin). 1344

Figure 1300 Mesure d'altitude par GPS différentiel à Gcwihaba (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005b). 1345

Figure 1301 Mesures de gravité à Gcwihaba (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005b). 1346

Figure 1302 Mesures de gravité à Gcwihaba (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005b). 1347

Figure 1303 Interprétation des mesures de gravité à Gcwihaba (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005b). 1348

Figure 1304 Mesures du champ magnétique à Gcwihaba (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005b). 1349

Figure 1305 Mesure d'altitude par GPS différentiel à Koanaka (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005a)..... 1350

Figure 1306 Interprétation en termes de grottes potentielles à Gcwihaba (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005a)..... 1351

Figure 1307 Mesure des anomalies de gravité à Gcwihaba (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005a)..... 1352

Figure 1308 Mesures de la dérive verticale à Koanaka (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005a)..... 1353

Figure 1309 Levé gravimétrique pédestre réalisé par le GRS Consulting en 2005 et ayant permis de découvrir les réseaux karstiques de K1 (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005a)..... 1354

Figure 1310Interprétation des mesures gravimétriques (Source : Selfe / GRS Consulting, 2005a; modifié). 1355

Figure 1311 Compilation des deux cartes précédentes montrant où des grottes pourraient affleurer en surface..... 1356

Figure 1312 Levé gravimétrique qui permet de connaitre la topographie de la grotte de Motswantsweng (Independent Cave Explorers, lien)..... 1357

Figure 1313 Topographie de la grotte de Dimapo découverte en 2008 (Source : Du Preez et al., 2015)..... 1358

Figure 1314 Topographie de la grotte de Gcwihaba par scan laser terrestre, réalisé par Kim Genuite et Gregory Dandurand en 2023. (Source : FFS, 2024). ... 1361

Figure 1315. Ajout du maillage 3D de la cavité de Gcwihaba au modèle 3D par photogrammétrie drone de la colline. En haut, vue en perspective et en bas, vue en profil (Source : Genuite et al., 2024). 1362

Figure 1316 Carte des recherches de cavités sur la colline de Wadoum (Source : Selfe G. par mail). 1363

Figure 1317 relevé gravimétrique de la grotte de Wadoum à Gcwihaba (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers). 1364

Figure 1318 (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers). 1365

Figure 1319 Plan topographique de Gecko Chamber 1366

Figure 1320 Localisation des forages et des anomalies électro-magnétiques visant à rechercher la jonction entre Gecko Chamber et Diviner's Cave sur la colline K1 de Koanaka. 1367

Figure 1321 Plan topographique de Gecko Chamber à Tseloakgopo Chamber (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers). 1368

Figure 1322 Plan topographique de Gecko Chamber à Tseloakgopo Chamber (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers). 1368

Figure 1323 Plan topographique de Tselakgopo Chamber (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers). 1369

Figure 1324 Plan topographique (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers). 1369

Figure 1325 Plan topographique de Medusa Chamber – Nqumtshaa Cave (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers). 1370

Figure 1326 Plan topographique du réseau de Nqumtshaa Cave. 1370

Figure 1327 Plan topographique du réseau karstique de Diviner's Cave (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers). 1371

Figure 1328 Plan topographique du réseau karstique de Nqumtshaa Cave et Diviner's Cave (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers). 1372

Figure 1329 Plan topographique (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers). 1373

Figure 1330 Levé topographique de Nqumtshaa Cave sur K1 (source : Blog Howard Brian Sefe (lien)) 1373

Figure 1331 Plan topographique de la première salle de Fossil Cave d'après Alan Grant (Source : Document fourni par Selfe Gavin, modifié). 1374

Figure 1332 Plan topographique du réseau de Fossil Cave (Source : Ellis, 2020, p.41, modifié). 1375

Figure 1333 Comparaison des levés gravimétriques et des relevés topographiques des grandes salles du fond du réseau de Fossil Cave (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers). 1376

Figure 1334 : Report du plan topographique de la première salle découverte de Fossil Cave sur le relevé gravimétrique (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers). 1377

Figure 1335 Relevé gravimétrique et interprétation d'un réseau karstique potentiel à l'intérieur de la colline K1 de Koanaka (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers). 1378

Figure 1336 Report de la topographie de la première salle découverte de Fossil Cave sur le relevé gravimétrique (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers). 1378

Figure 1337 Plan topographique de la grotte de Fossil Cave (Source : Ellis 2020, p.41). 1379

Figure 1338 Plan topographique de Mongongo cave (Source : Ellis, 2020, p.50). 1380

Figure 1339 Jonction hypothétique (The Ultimate Link) entre Mongongo Cave et Diviner's Cave (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers) (Lien internet). 1381

Figure 1340 Ajout du réseau de Gecko Chamber au document précédent (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers)..... 1382

Figure 1341 Ajout du plan topographique de la première salle découverte de Fossil cave sur la jonction hypothétique (Source : Groupe ICE (Independent Cave Explorers) (Lien internet). 1383

Figure 1342 Structures en éventail à l'est de la colline K1 à Koanaka au Botswana. 1386

Figure 1343 Détail sur les éventails. 1386

Figure 1344 Vue moins large des éventails que l'on retrouve dans toute la région. 1386

Figure 1345 Image satellite. 1387

Figure 1346 Image satellite avec relief. 1387

Figure 1347 Image satellite. 1388

Figure 1348 Image satellite avec relief. 1388

Figure 1349 Carte satellite entre Gcwihaba et les Aha Hills (Source : Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2001, Fig.6). 1389

Figure 1350 Détail de la figure précédente. 1389

Figure 1351 Image satellite de la région de Xai-Xai. 1390

Figure 1352 Modèle ombré (MNT JAXA) et carte des pentes de la région de Xai-Xai (en noir les pistes). 1390

Figure 1353 Détail de l'image satellite du village de Xai-Xai. 1391

Figure 1354 Détail du modèle ombré (MNT JAXA) et de la carte des pentes du village de Xai-Xai (en noir les pistes). 1391

Figure 1355 Image satellite de la plaine du village de Xai-Xai. 1392

Figure 1356 Type de coquilles trouvées en abondance dans les sables du Corridor South Entrance de la grotte de Gcwihaba. 1397

Figure 1357 Xerocerastus subteres. (Source : Laura Kelsall in Van Bruggen (1966, Plate 10)). 1398

Figure 1358 Localisation du lac Etosha en Namibie par rapport à l'Okavango. 1399

Figure 1359 Profil topographique O-E de la Namibie et du Botswana localisant les karsts de Kaokoland, d'Harasib (région d'Otavi) et de Gcwihaba Hills (Aha Hills et Koanaka Hills) et des paléoniveaux de l'Okavango. 1400

Figure 1360 Xerocerastus burchelli trouvé à Etosha en Namibie (Pickford et al., 2009, fig.39, p.131). 1400

Figure 1361 Calcrète à nombreuses coquilles de Xerocerastus burchelli trouvée à Etosha en Namibie (Pickford et al., 2009, fig.41, p.133). 1400

Figure 1362 Tableau de Pickford et al., 2009 (Table 1 , p.20, colorisé) indiquant la position chronologique ubiquiste de Xaerocerastus (en bleu). 1402

Figure 1363 Orage sur le paléopan de Koanaka (Source : Auriol P.). 1404

Figure 1364 Orage à la colline K2 Koanaka (Source : Auriol P.). 1404

Figure 1365 Des pare-feu ont été entrepris dans la région (image satellite Yandex début 2016). 1405

Figure 1366 Photographies des pares-feux (Source : Ellis, 2020, p.152). 1406

Figure 1367 Image satellite Terra color. 1407

Figure 1368 Analyse géomorphologique de Gcwihaba Hills à Koanaka Hills (Voir Figure 590 p.594). 1408

Figure 1369 Analyse géomorphologique de Gcwihaba Hills à Koanaka Hills (en bleu les secteurs où les dunes de sables ont été arasées, en violet les zones de paléopans. 1409

Figure 1370 Identification d'une zone où les dolomies sont en subsurfaces (point bleu) et des petites collines dolomitiques (points violet). 1409

Figure 1371 Relevé aéromagnétique. 1410

Figure 1372 Localisation des pans et des dolomies entre Gcwihaba Hills et Koanaka Hills. 1411

Figure 1373 Relevé aéromagnétique de Lehman. 1412

Figure 1374 Report des réseaux de Codzo River Cave et Ninga Miriango. 1413

Figure 1375 Grotte de Codzo River Cave (Source : Laumanns, 2017c, p.19). 1414

Figure 1376 Grotte de Ninga Miriango (Source : Laumanns, 2017c, p.26). 1415

Figure 1377 L'épisode 4 de TF1 est consacré à notre approche cartographique des paysages pour rechercher des grottes au Botswana. 1525

17. LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Tableau récapitulatif des différentes sources et types de données de relief. 43

Tableau 2 Cavités connues par pays en Afrique subsaharienne. 108

Tableau 3 Nombre de cavités connues par pays. Source des données pour les cavités par pays. 109

Tableau 4 Sources des données des cavités d'Afrique du Sud 110

Tableau 5 Données spéléologiques pour les autres pays. 112

Tableau 6 Synthèse des données géologiques des karsts du Mozambique. 113

Tableau 7 Déclinaisons magnétiques des topographies de grotte. 120

Tableau 8 Anciennes cartes des karsts du monde ou de l'Afrique. 124

Tableau 9 Cavités de Makapansgat. Les numéros de la sixième colonne font référence à la Figure 174. Les cavités en gras sont les cavités fossilifères ayant livré des hominines. 242

Tableau 10 Altitudes des entrées de grottes et des gisements fossilifères de la vallée de la Bloubank. 279

Tableau 11 Altitudes des sites fossilifères et du niveau de base actuel (lacs souterrains) du CoH (Hobbs, 2011, p.5, voir aussi p.192 à 194). 280

Tableau 12 Coordonnées de la grotte de Waxhou North. 543

Tableau 13 Coordonnées de la grotte de Waxhou South. 546

Tableau 14 Coordonnées de la grotte de Small Cave. 548

Tableau 15 Altitudes des collines de Gcwihaba. 554

Tableau 16 Evolution de la précision des coordonnées de la grotte de Gcwihaba. 563

Tableau 17 Coordonnées GPS de la grotte de Dimapo (WGS 84). 577

Tableau 18 Coordonnées GPS de la grotte de Wadoum mesurées au GPS garmin (WGS 84). 579

Tableau 19 Position GPS du bloc et des brèches à mammifères de la colline C de Gcwihaba. 583

Tableau 20 Coordonnées des brèches blanchâtres de la colline C à Gcwihaba. 590

Tableau 21 Coordonnées du forage au sommet de la colline C (WGS 84). 590

Tableau 22 Coordonnées de la grande doline à Gcwihaba. 591

Tableau 23 Coordonnées de la petite doline à Gcwihaba. 591

Tableau 24 Coordonnées GPS du forage d'entrée de la grotte de Fossil Cave. 614

Tableau 25 Coordonnées de la grotte de Bone Cave sur K2 (Koanaka). 625

Tableau 26 Coordonnées de la grotte de Bone Cave sur K2 (Koanaka). 648

Tableau 27 Evolution de la précision des coordonnées de la grotte de Gcwihaba. 649

Tableau 28 Coordonnées de la grotte de Blue Cave sur K3 (Koanaka). 651

Tableau 29 de l'étagement des réseaux karstiques (en m JAXA) à partir de l'altitude des entrées de grottes, des forages et de la profondeur des forages.Comparaison des réseaux karstiques de la colline K1 et de la colline K2 659

Tableau 30 Résumé des anomalies gravimétriques et électromagnétiques : Interprétation des changements de faille et/ou de géologie (Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2001, Table 7). 667

Tableau 31 Résumé des anomalies gravimétriques et électromagnétiques : interprétation possible de la grotte (Water Surveys Botswana et Aqualogic, 2001, Table 8). 668

Tableau 32 Coordonnées des anomalies magnétiques (Mc Donalds, 2008, Table 1). 674

Tableau 33 Coordonnées des forages en WGS84. 677

Tableau 34 Données du forage BH9895 issue du portail BGI (Lien). 688

Tableau 35 Données du forage BH9895 issue du portail BGI (Lien). 692

Tableau 36 Données du forage BH9893 issue du portail BGI (Lien). 695

Tableau 37 Forage JB3 (Source : Bruchs, 2008, modifié). 700

Tableau 38 Coordonnées des forages en eau (fournis par Ledimo Oatse, géologue du Muséum de Gaborone et indiquées en annexe (p.1242)). Les altitudes sont calculées à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT JAXA). 708

Tableau 39 Altitude de la nappe. Mettre les altitudes et regarder le tableau 2 Water Surveys Botswana et Aqualogic (2003). 712

Tableau 40 Coordonnées des alluvions de la vallée de Gewidum. 723

Tableau 41 Coordonnées du forage et de l'anomalie. 752

Tableau 42 Données géologiques du forage n°11471A (Source : Mc Donald, 2008, p.54, modifié). 755

Tableau 43 Adaptation des profondeurs si le forage Waterbore hole 2 correspondant au forage n°11471A. 757

Tableau 44 Données concernant les forages à Gcwihaba selon le portail géologique du BGI. 763

Tableau 45 Description du forage n°12386. 765

Tableau 46 Description du forage n°12389. 766

Tableau 47 Description du forage n°12388. 767

Tableau 48 Données concernant les forages à Koanaka selon le portail géologique du BGI. 803

Tableau 49 Récapitulatif des paléolacs dans le Rift de l'Okavango. 850

Tableau 50 Informations issues des sites archéologiques autour du bassin de Makgadikgadi. 871

Tableau 51 Cavités du Botswana ont Lobatse (Source : Stephens et al. 2022, Table 14.4 p.249, modifié). 932

Tableau 52 Cavités de la carte précédente. 973

Tableau 53 Cavités en bordure du Plateau de Ghaap. 974

Tableau 54 Cavités de la Zambie. 996

Tableau 55 Karst ou karst potentiel de la République démocratique du Congo.Inventaire des grottes (source : Grottocenter) 1053

Tableau 56 Inventaire des cavités de la République démocratique du Congo (Source : Grottocenter). 1054

Tableau 57 Données de la carte géologique utilisée. 1055

Tableau 58 des sources des données géologiques (raster ou vecteur dans la deuxième colonne) pour localiser les carbonates et les karsts potentiels (Nom du fichier : Tableau-des-donnees-v25). 1089

Tableau 59 des cavités de l'Afrique subsaharienne. 1090

Tableau 60 des déclinaisons des topographies de grottes. 1106

Tableau 61 Description du calcul des talwegs. 1124

Tableau 62 Opération pour calculer des courbes de niveau avec Arcgis. 1125

Tableau 63 Méthode pour détecter des dolines sur le MNT. 1128

Tableau 64 Procédure d'extraction des données issues de GROTTOCENTER. 1129

Tableau 65 Processus pour convertir des données GPS. 1130

Tableau 66 Datation des formations géologiques du Bassin du Transvaal. (Source : Ingram et Van Tonder, 2011, Table 1, p.16). 1159

Tableau 67 Coordonnées GPS des entrées de grottes fournis par Oatse L. 1238

Tableau 68 Données GPS fournies par le Muséum. 1242

Tableau 69 Tableau 1 traduit de Moore, Cotterill et Eckardt (2012, p.388). 1266

Tableau 70 Tableau 2 de Moore, Cotterill et Eckardt (2012, p.390). 1269

Tableau 71 Les 17 enregistrements phylogéographiques (de A1 à G2) de vertébrés d'Afrique centrale et du Sud et leurs datations moléculaires des temps de divergence. 1271

Tableau 72 Chronologie des épisodes tectoniques (A à G) à l'origine des 17 enregistrements phylogéographiques sélectionnés de vertébrés d'Afrique centrale et du Sud (A1 à G2) du tableau précédent. (Source : Cotterill et De Wit, 2011, Table 1, p.506). 1273

18. RESUME

En Afrique subsaharienne, deux grandes régions fossilifères, considérées comme des **berceaux de l'Humanité**, ont préservé des fossiles d'hominines parmi lesquels figurent nos ancêtres, les premiers représentants du genre Homo. Ces régions sont : (1) le **Rift est-africain** en Afrique de l'Est, où les fossiles sont disséminés au sein d'anciens dépôts fluvio-lacustres et (2) les **karsts sud-africains** (***Cradle of Humankind (CoH)***, Ghaap, Makapansgat), où les fossiles sont retrouvés au sein de remplissages karstiques, que ce soit à l'intérieur de grottes ou bien en plein-air, lorsque la surface topographique a érodé le toit des cavités comme c'est le cas du « *Type Site* » de la grotte de Sterkfontein.

L'objectif de cette thèse est de chercher de nouveaux karsts susceptibles de receler des hominines anciens et donc de faire le lien entre ces deux régions, plus précisément entre le ***CoH*** en Afrique du Sud et le débouché du **Rift est-africain** au nord du Malawi. Pour cela, nous avons développé une méthode spécifique, basée sur la cartographie et le traitement des données satellitaires, qui nous a permis d'identifier des karsts et surtout d'en estimer l'ancienneté en analysant leur contexte géomorphologique.

En Afrique australe, les karsts sont exclusivement cantonnés aux affleurements dolomitiques d'un ancien bassin marin paléoprotérozoïque, dont le **bassin sédimentaire géologique du Transvaal** (où se situent le *CoH* et Makapansgat) et le **plateau karstique de Ghaap** constituent des fragments ayant échappé à l'érosion des rivières et des fleuves (Molopo, Vaal, Orange, Crocodile, Limpopo, Olifants). Ces formations carbonatées ont été recouvertes par plusieurs centaines de mètres d'épaisseur de dépôts sédimentaires (Karoo, Kalahari) puis arasées par des **paléosurfaces d'érosion** successives **(les Surfaces Africaines)**.

En caractérisant la géologie, la géomorphologie et la géoarchéologie du *CoH* grâce à une cartographie de terrain fine, nous avons établi plusieurs **critères morphokarstiques** concourant au piégeage et à la conservation des fossiles plio-pléistocènes. Ce **modèle de karstification du *CoH*** constitue le premier résultat majeur de la thèse. Il indique que, outre la présence indispensable de roches karstifiables (1), les grottes fossilifères du *CoH* se situent toujours à faible profondeur sous la surface africaine (2), exhumée de ses altérites (3), au toit de formations carbonatées fantômisées (4), en position d'interfluves de bassins versants hydrographiques (5), plus précisément en tête de vallées peu profondes (6) bloquées par des *knickpoints*, où les taux d'érosion sont restés très faibles (7).

Nous avons ensuite recherché ces critères dans les autres karsts potentiels d'Afrique australe. Pour cela nous avons exploité les mesures de relief par satellite *(JAXA ALOS Daichi)* afin d'identifier les morphologies karstiques présentes en surface des formations carbonatées à l'affleurement, indiquant l'existence possible de grottes en profondeur. Cette étape n'a été appliquée que sur les régions considérées comme prioritaires mais elle doit à terme être testée sur tous les karsts d'Afrique.

Ces étapes (établissement du modèle de karstification du *CoH*, identification des karsts potentiels d'après les cartes géologiques et analyse des reliefs par satellites) constituent le **« Système d'Information Géographique des karsts de l'Afrique**

australe ». Ce **SIG** nous a permis de produire, en amont des missions de terrain, des **atlas cartographiques** inédits, de haute résolution et parfaitement adaptés aux problématiques de recherche. Il a guidé efficacement les prospections dans plusieurs pays d'Afrique australe à la recherche de karsts fossilifères.
Développé dans un premier temps à distance, le SIG a ensuite été confronté au terrain lors de missions en Afrique du Sud (Hoogland), au Mozambique, au Malawi, au Botswana (Lobatse et *Aha Hills*) et en Namibie (Harasib). Une prospection au Zimbabwe a permis d'écarter le massif de Chimanimani, dépourvu de roches karstifiables. Au Mozambique, un nouveau karst a été découvert dans le secteur de Pitao, tandis que le karst de Buchane s'est révélé trop récent pour présenter un intérêt majeur.
Les missions menées dans les collines karstifiées et fossilifères du nord-ouest du Botswana (projet HOMINI'KARST) ont par exemple apporté des informations cruciales sur les niveaux de base de paléolacs, intrinsèquement liés à la karstification (débourrage des fantômes de roche). Ces données ont permis de perfectionner encore les modèles et le SIG, dont une version simplifiée est accessible à l'adresse suivante : https://www.karstesien.fr/gee.html.
Sur cette base, et avec l'intégration de nouvelles observations de terrain, les modèles et le SIG continueront d'évoluer afin de mieux caractériser ces karsts et faciliter leur détection à l'échelle du continent, d'autant plus que la résolution des données satellitaires ne cesse de progresser.

Mots-clés : géologie, géomorphologie, géoarchéologie, SIG, karst, grotte, fossile, hominine, paléosurface, *Cradle of Humankind*, berceau de l'humanité, surface africaine, paléoenvironnement, 3D, MNT.

Abstract

In sub-Saharan Africa, two large fossil-rich regions, considered to be the **"Cradles of Humankind"**, contain preserved hominin fossils, including those of our ancestors, the first representatives of the genus Homo. These regions are: (1) the **East African Rift** in East Africa, where fossils are scattered within ancient fluvial-lacustrine deposits, and (2) the **South African karsts** (**Cradle of Humankind (CoH)**, Ghaap, Makapansgat), where fossils are found in karstic fills, either inside caves or in the open-air, when the topographic surface has eroded the cave roofs, as is the case at the Sterkfontein Cave « Type Site ».

This PhD dissertation aims to identify new karsts that are likely to contain ancient hominin remains, thereby establishing a link between these two regions, more specifically between the CoH in South Africa and the outlet of the **East African Rift** in northern Malawi. To this end, I developed a specific method based on mapping and satellite data processing, which enabled me to identify karsts and, above all, to estimate their age by analyzing their geomorphological context.

In southern Africa, karsts are exclusively confined to the dolomitic outcrops of an ancient Paleoproterozoic marine basin, of which the **Transvaal Geological Sedimentary Basin** (where the CoH and Makapansgat are located) and the **Ghaap Karst Plateau** are fragments that have escaped erosion by rivers and streams (Molopo, Vaal, Orange, Crocodile, Limpopo, Olifants). These carbonate formations were covered by several hundred meters of sedimentary deposits (Karoo, Kalahari) and then leveled by successive **paleo-erosion surfaces (the African Surfaces)**.

By characterizing the geology, geomorphology, and geoarchaeology of the CoH through detailed field mapping, we have established several **morphokarstic criteria** that contribute to the trapping and preservation of Pliocene-Pleistocene fossils. This **model of karstification in the CoH** is the first major result of this research. It indicates that, in addition to the essential presence of **karstifiable rocks** (1), the fossil-bearing caves of the CoH are always located at shallow depths below the **African surface** (2), exhumed from its weathered layers (3), at the top of **ghost-rocked carbonate formations** (4), in the **interfluves** of hydrographic watersheds (5), more precisely at the head of **shallow valleys** (6) blocked by **knickpoints**, where erosion rates have remained **very low** (7).

I then searched for these criteria in other potential karsts in southern Africa. To this end, I used **satellite relief measurements** (JAXA ALOS Daichi) to identify karst morphologies present on the surface of exposed carbonate formations, indicating the possible existence of caves at depth. I applied this step only to regions considered to be priorities, but it must ultimately be tested on all karsts in Africa.

These steps (establishment of the CoH karstification model, identification of potential karsts based on geological maps, and analysis of satellite relief data) constitute the **"Geographic Information System for Karsts in Southern Africa."** This GIS enabled me to produce, prior to field missions, unique, high-resolution **cartographic atlases** that were perfectly suited to the research issues

at hand. It effectively guided prospecting in several southern African countries in search of fossiliferous karsts.
Initially developed remotely, we then tested the GIS in the field during missions in South Africa (Hoogland), Mozambique, Malawi, Botswana (Lobatse and Aha Hills), and Namibia (Harasib). A survey in Zimbabwe ruled out the Chimanimani massif, which lacks karstifiable rocks. In Mozambique, I discovered a new karst in the Pitao area, while the Buchane karst proved too recent to be of major interest.
For example, missions carried out in the karstified and fossiliferous hills of northwestern Botswana **(HOMINI'KARST project)** provided crucial information on paleolake base levels, which are intrinsically linked to karstification (clearing of ghost rocks). These data have further refined the models and GIS, a simplified version of which is available at: https://www.karstesien.fr/gee.html.
On this basis, and with the integration of new field observations, the models and GIS will continue to evolve to better characterize these karsts and facilitate their detection on a continental scale, especially as the resolution of satellite data continues to improve.

Keywords: geology, geomorphology, geoarchaeology, GIS, karst, cave, fossil, hominin, paleo surface, Cradle of Humankind, African surface, paleoenvironment, 3D, MNT.