

Thèse de doctorat



Université de Limoges

ED 613 - Sciences de la Société, Territoires, Sciences Économiques et de Gestion (SSTSEG)

GEOLAB UMR 6042 CNRS équipe Dynamiques Géoenvironnementales Actuelles

Thèse pour obtenir le grade de :
Docteur de l'Université de Limoges

Discipline : Géographie et aménagement

présentée et soutenue publiquement par

Radouane HOUT

le 25 Septembre 2020

Téledétection Radar SAR et photogrammétrie : Application à la géographie limnologique avec l'exemple de l'étude du ravinement littoral au lac de Rambla de Algeciras (Murcia, Espagne)

Thèse dirigée par :

Mme. Véronique MALEVAL, Maître de conférences HDR en géographie Université de Limoges
M. Éric ROUVELLAC, Professeur de géographie Université de Limoges

Rapporteurs :

M. Laurent TOUCHART, Professeur de géographie Université d'Orléans
M. Hervé PIEGAY, Directeur de recherche CNRS ENS de Lyon

Examineurs :

M. Gabriel VASILE, Chargé de recherche CNRS Université de Grenoble
M. Gil MAHE, Directeur de Recherche IRD/HydroSciences Université de Montpellier



Résumé

Le lac de Rambla de Algeciras en Murcia est un réservoir d'eau potable. Il contribue aussi à la réduction des inondations. Avec un climat semi-aride et la nature très friable des formations géologiques au niveau des berges lacustres, l'apparition et le développement des ravines de berges sont favorisés et posent un problème majeur d'envasement du lac. Ce travail de thèse a pour objectif le suivi des apports sédimentaires des ravines des berges lacustres, grâce aux photos aériennes, aux données LiDAR et aux images radar SAR. En 2018, trois ravines de différentes morphologies ont été modélisées en haute résolution à l'aide de la photogrammétrie par drone afin d'obtenir leur faible changement topographique. Les nuages de points LiDAR du projet PNOA ont été ainsi utilisés pour étudier la variabilité et la dynamique sédimentaire annuelle sur une échelle spatiale plus large couvrant toutes les berges lacustres. Ceci permet alors de guider les gestionnaires des lacs à mettre en œuvre des stratégies pour prendre en compte les contributions des ravines de berges lacustres qui sont généralement sous-estimées dans les bilans hydro-sédimentaires des lacs. Comme tous les terrains touchés par le phénomène de ravinement se heurtent au manque de données sur le bilan sédimentaire, nous avons proposé l'utilisation de la technique d'interférométrie SAR (InSAR) sur les versants des ravines érodées pour déterminer avec une précision millimétrique les faibles changements topographiques sur les versants en recouvrements. L'analyse de l'effet de déclenchement du ravinement sur les changements de la cohérence dans les versants en recouvrements a montré que le signal sur ces derniers est souvent suffisamment cohérent afin de produire une phase InSAR théoriquement utilisable. Cette phase a été exploitée pour déterminer la vitesse de l'érosion des versants des ravines après avoir modifié quelques paramètres liés à la phase du signal radar SAR sur les versants en recouvrements. L'application de cette technique InSAR multi-temporelle avec des données Sentinel-1 sur les versants des ravines en recouvrements et la comparaison de leur précision avec des données drone démontre la pertinence des données SAR pour le suivi du bilan sédimentaire sur les versants des ravines en recouvrements dans des zones semi-arides. D'une manière générale cette thèse contribue à améliorer le suivi régulier des ravines dans les zones semi-arides difficilement accessibles avec une très haute précision.

Mots-clés : Lac – Rambla de Algeciras- Ravinement – Climat semi-aride -Berges lacustres - Drone – Photogrammétrie - LiDAR- Radar SAR – Versant en recouvrements – Cohérence - InSAR.

Abstract

The Rambla de Algeciras lake in Murcia is a reservoir of potable water, and also contributes to the reduction of flooding. With a semi-arid climate and a very friable nature of the geological formations at the lakeshore level, the emergence and development of bank gullies is favored and poses a major problem of siltation of the lake. The objective of this thesis work is to follow the sedimentary contributions of the lake shore gullies, using aerial photos, LiDAR data and Radar SAR images. In 2018, three gullies of different types were modelled in high resolution using UAV photogrammetry to obtain their low topographic change. The LiDAR point clouds of the PNOA project were thus used to study the variability and annual sedimentary dynamics on a larger spatial scale covering all the lake banks. This then helps guide lake managers to implement strategies that take into account the contributions of lake shore gullies that are generally underestimated in lake water budgets. Since all areas affected by the gully phenomenon are confronted with a lack of data on sediment budgets, we proposed the use of the SAR interferometry technique (InSAR) on the slopes of eroded gullies to determine with millimetric precision the slight topographic changes on the layover areas. The analysis of the gully trigger effect on changes in coherence on the layover areas showed that the signal on the layover areas is often sufficiently coherent to produce a theoretically usable InSAR phase. This phase has been exploited to determine the erosion rate of gully slopes after modifying some parameters related to the phase of the radar SAR signal on the folded slopes. The application of this multi-temporal InSAR technique with Sentinel-1 data on layover areas and the comparison of their accuracy with UAV data demonstrate the relevance of SAR data for monitoring the sediment budget on layover areas in a semi-arid climate. In general, this thesis contributes to improve the regular monitoring of gullies in semi-arid zones that are difficult to access with very high accuracy.

Keywords : Lake - Rambla de Algeciras- Gullies - Semi-arid climate - Lake banks - UAV - Photogrammetry - LiDAR- Radar SAR – Layover -Coherence - InSAR.

Remerciements

Cette thèse est le fruit d'un travail personnel. Mais elle n'aurait pas pu voir le jour sans la contribution de nombreuses personnes. Je vais ainsi tenter de toutes les remercier dans cette première partie, paradoxalement rédigée à la fin de cette étude.

Mes premiers remerciements seront pour mes encadrants de thèse, en commençant par Véronique MALEVAL. Son soutien fut permanent malgré toutes les difficultés que nous avons pu rencontrer dans le cheminement de cette thèse. Son encadrement fut stimulant et sa confiance en mon travail ainsi que ses conseils mais aussi ses remarques pertinentes m'ont permis d'aller au bout de ce projet. Merci aussi pour son soutien moral important tout au long de cette thèse. Je remercie également Éric ROUVELLAC, mon deuxième encadrant pour ses remarques qui m'ont beaucoup aidé. Merci également pour ses conseils et pour son accompagnement sur le terrain lors de missions parfois périlleuses.

Je souhaite également remercier Rémi Crouzevialle et Fabien Cerbelaud pour leur participation à mon travail de terrain et toute l'équipe et le laboratoire Géolab, de Limoges jusqu'à Clermont-Ferrand pour m'avoir accueilli et permis de faire ce travail. Je souhaite également remercier Frederic RICHARD, le Directeur Adjoint de GEOLAB à Limoges pour m'avoir bien accueilli.

Mes remerciements s'adressent aussi à Gil Mahe pour avoir cru en moi, et pour ses conseils durant ce travail. Merci de m'avoir donné la chance d'intégrer le projet TOUBKAL ainsi que pour avoir financé une partie de ma thèse.

Merci à Gabriel VASILE chargé de recherche CNRS à l'université de Grenoble pour son aide précieuse, ses remarques pertinentes et ses échanges enrichissants. Merci aussi pour sa participation au jury de cette thèse.

Je tiens à remercier Laurent TOUCHART, professeur de géographie à l'Université d'Orléans. Vous m'avez fait part de nombreuses critiques constructives. Je vous en remercie pleinement.

Je souhaite également remercier Hervé PIEGAY directeur de recherche CNRS à l'ENS de Lyon. Vous avez accepté d'être rapporteur, trouvez ici le témoignage de ma plus sincère reconnaissance.

Et évidemment un énorme merci à mon père, ma mère, ma tante 'haja' et mes frères et sœurs : Abdo, Driss, Mohand, Asmaa, Hassna, Aicha, Zineb, SAMI, CHIHAB, Choukri, Hamza, Azzdine, Zanoba, Hanane pour leur soutien indéfectible depuis toujours, ceux sans qui rien de tout cela ne serait possible.

Merci à mes amis et compagnons de route, d'ici et d'ailleurs, Mamade Hassane, Reda el Ouddane, Manon COUTEAU, Marie-France COUTEAU Boubker BOUKILI, Nacir MOU-TAOUAKIL et Yacoubou Issaka pour leurs soutiens permanents, avant, pendant et je l'espère après cette thèse.

Le dernier remerciement sera pour ma grand-mère qui aurait été je l'espère fière de mon parcours.

...

Table des matières

1	Introduction générale	1
2	L'état de l'art des processus d'érosion et présentation de la zone d'étude	6
2.1	L'érosion hydrique	7
2.2	Les facteurs de l'érosion	7
2.2.1	Le type de sol	7
2.2.2	Le rôle de la végétation	8
2.2.3	Le rôle de la topographie	8
2.2.4	Le rôle du climat dans les phénomènes érosifs	9
2.2.5	Le rôle de l'activité anthropique sur l'érosion	9
2.3	L'érosion ravinatoire	10
2.3.1	L'érosion par des ravines permanentes	10
2.3.2	L'érosion par ravins éphémères	10
2.3.3	L'érosion par ravines de berge	10
2.4	Présentation du terrain d'étude et des ravines étudiées	12
2.4.1	La présentation du lac Rambla de Algeciras	13
2.4.2	Les ravines étudiées	18
3	LiDAR et la photogrammétrie par drone	21
3.1	Introduction	22
3.2	Méthodologie	24
3.2.1	Chaîne de traitement des photos prise par le drone	24
3.2.2	Chaîne de traitement des données LiDAR PNOA	31
3.2.3	La modélisation des erreurs des données SfM-MVS	33
3.2.4	La détection de changements géomorphologiques	38
3.3	Résultats et discussion : des pluies efficaces aidées par la dégradation des sols issue des activités anthropiques parfois anciennes provoquent une sédimentation importante dans le lac	41
3.3.1	Analyse des précipitations	41
3.3.2	L'agressivité climatique	44
3.3.3	Traitement des photos prise par le drone	46
3.3.4	Modélisation des erreurs	49
3.3.5	Détection des changements géomorphologiques par drone	55
3.3.6	Détection des changements géomorphologiques par LiDAR	63
3.3.7	Fluctuation du niveau lacustre	67
3.3.8	Occupation du Sol et activité anthropique	70
3.4	Conclusion	72

4	La télédétection RADAR SAR	73
4.1	Introduction	74
4.2	État de l'art	75
4.3	Méthodologie	80
4.3.1	Le principe de modèle de recouvrement sur les ravines	80
4.3.2	Les données SAR	81
4.3.3	Détection des changements cohérents	85
4.3.4	Interférométrie radar SAR PSI <Persistent Scatterer Interferometry>	86
4.4	Résultats et discussion : La fiabilité des données SAR utilisées pour mesurer l'évolution morphologique des ravines	95
4.4.1	La détection des changements	95
4.4.2	L'interférométrie radar SAR multi-temporal	101
4.5	Conclusion	113
5	Conclusion	114
6	Annexes	117

Liste des figures

2.1	La localisation de la zone d'étude (R. Hout, 2019)	14
2.2	Une photo Panoramique du Lac de Rambla de Algaciras prise par (V.Maleval 2018)	15
2.3	La carte géologique	17
2.4	La localisation des ravines étudiées (R. Hout, 2019)	19
2.5	A : les photos des berges lacustres de Rambla de Algeciras; B : La ravine B,G-3; C : La ravine B,G-1; D : La ravine B,G-2(R. Hout 2019).	20
3.1	Exemple de processus SfM (sourceUNAVCO)	22
3.2	A : Le drone DJI Inspire1v2; B : le GPS différentiel DGPS Trimble Geo 7x; C : La mire; D : La caméra ZENMUSE X3	26
3.3	La trajectoire du vol des deux missions LiDAR-PNOA,(R. Hout, 2019)	32
3.4	Les différentes techniques de validation des données	34
3.5	Le principe de base de la technique C2C	35
3.6	La technique de validation croisée appliquée sur les nuages de points décimés	36
3.7	Les étape de l'algorithme M3C2 ,(source : [85])	39
3.8	Le graphe des précipitations mensuelles entre 2003 et 2018	41
3.9	Le graphe des précipitations journalières entre 24/11/2009 et 24/08/2016	42
3.10	Le graphe des précipitations mensuelles entre 24/11/2009 et 24/08/2016	42
3.11	Le graphe des précipitations journalières en 2018	43
3.12	Le graphe de facteur-R entre 2009 et 2016	45
3.13	Le graphe de facteur-R en 2018	45
3.14	Le graphe de variation de la moyenne et l'écart-type du rugosité en fonction de la résolution spatiale pour le site 1	48
3.15	Le graphe de variation de la moyenne et l'écart-type du rugosité en fonction de la résolution spatiale pour le site 2	48
3.16	Le graphe de variation de la moyenne et l'écart-type du rugosité en fonction de la résolution spatiale pour le site 3	49
3.17	L'incertitude des nuages de points estimée par la validation croisée sur la ravine (G, B-1) (Hout 2019)	52
3.18	L'incertitude des nuages de points estimée par la validation croisée sur la ravine (G, B-2) (Hout 2019)	53
3.19	L'incertitude des nuages de points estimée par la validation croisée sur la ravine (G, B-3) (Hout 2019)	54
3.20	La technique DoD entre la mission I et II; B : La technique DoD entre la mission II et III; C : La technique DoD entre la mission I et III; D : Le bilan sédimentaire; E : L'histogramme de répartition de volume, sur la ravine B.G-1 (Hout 2019)	57

3.21 La technique DoD entre la mission I et II; B : La technique DoD entre la mission II et III; C : La technique DoD entre la mission I et III; D : Le bilan sédimentaire; E : L'histogramme de répartition de volume, sur la ravine B.G-2 (Hout 2019)	59
3.22 Le changement du niveau du lac(R. Hout, 2019)	60
3.23 La technique DoD entre la mission I et II; B : La technique DoD entre la mission II et III; C : La technique DoD entre la mission I et III; D : Le bilan sédimentaire; E : L'histogramme de répartition de volume, sur la ravine B.G-3 (Hout 2019)	61
3.24 L'élévation des changements géomorphologiques(R. Hout, 2019)	63
3.25 Le bilan sédimentaire établi à partir des données LiDAR PNOA(R. Hout, 2019)	64
3.26 L'histogramme de répartition de volume, sur les ravines des berges lacustres(R. Hout, 2019)	65
3.27 Le bilan sédimentaire établi à partir des données LiDAR PNOA (Hout 2019)	66
3.28 Le graphe de la fluctuation du niveau lacustre entre 2009 et 2016	67
3.29 Le sapement des berges entre 2009 et 2016 (R. Hout, 2019)	68
3.30 Le sapement des berges entre 2009 et 2016 (R. Hout, 2019)	69
3.31 Le volume et la surface érodées par le ravinement selon l'occupation du sol(R. Hout, 2019)	71
4.1 La Géométrie des images Radar SAR (Radouane Hout, 2019)	75
4.2 L'interaction entre la surface terrestre et les ondes hyperfréquence (source ESA modifiée par Radouane Hout, 2019)	77
4.3 L'effet de l'humidité du sol sur l'interférométrie SAR (source :[112])	78
4.4 Le phénomène de recouvrement sur les ravines des berges(R. Hout 2019).	80
4.5 Le satellite Sentinel-1 et ces modes d'acquisitions (source :ESA)	83
4.6 Les traitements appliqués sur les images Sentinel-1 pour générer les pixels PS sur les versants en recouvrements des ravines	89
4.7 La ligne de base spatiale et temporelle des images utilisées(R. Hout 2019)	90
4.8 Les lignes de base spatiale et temporelle(R. Hout 2019).	91
4.9 Le graphe des changements de la cohérence sur la digue de barrage de Rambla de Algeciras(R. Hout, 2019)	96
4.10 Le graphe des changements de la cohérence sur les trois ravines étudiées(R. Hout, 2019)	96
4.11 Les cartes des variations temporelles de la cohérence sur les ravines des berges du lac Rambla de Algeciras(R. Hout, 2019)	97
4.12 Les cartes des variations de la cohérence temporelle avec un seuil de 0,6 (Hout, 2019)	99
4.13 Carte A : Image Sentinel-2 (NDVI); Carte B : Image Sentinel-2 (Composition fausse couleur 8,4,3) (R. Hout, 2019)	100
4.14 Le graphe de la variation de la cohérence SAR en fonction des précipitations(R. Hout, 2019)	101
4.15 Le schéma explicatif des valeurs de PSI négatives sur les versants en recouvrement des ravines des berges (R. Hout 2019)	103
4.16 Le schéma explicatif des valeurs de PSI positifs sur les versants en recouvrement des ravines des berges (R. Hout 2019)	105
4.17 Les 18 interférogrammes utilisées pour identifier les pixels PS(R. Hout 2019)	106
4.18 La vitesse moyenne de déplacements des PS en 2018 sur les berges lacustres (R. Hout, 2019)	107

4.19 L'interpolation par krigeage de la vitesse des pixels PS (R. Hout 2019)	110
4.20 La densité des ravines (R. Hout 2019)	112

Liste des tableaux

2.1	Les caractéristiques morphométriques du lac et du bassin versant de Rambla de Algeciras	13
3.1	Les caractéristiques du Caméra ZENMUSE X3	25
3.2	Les caractéristiques des missions de prise de photos par drone	28
3.3	Les règles du modèle FIS	37
3.4	Le nombre de jours pluviaux durant la période 2003-2018	44
3.5	La corrélation entre les paramètres de la caméra	47
3.6	Les erreurs RMES en X, Y et Z des trois ravines pendant les trois missions . .	50
3.7	Les valeurs des distances absolues calculées par l’algorithme C2C	50
4.1	Les caractéristiques des différentes modes d’acquisition (S1)	84
4.2	Les caractéristiques des images SAR (Sentinel-1)	88

Chapitre 1

Introduction générale

La limnologie peut se définir étymologiquement comme étant l'étude rationnelle des eaux douces et stagnantes[1]

C'est en Suisse en 1892 que François Alphonse Forel [2] crée ce terme afin de qualifier cette discipline qui, sous sa forme initiale, est une étude géographique des eaux et des lacs. Elle se détache ensuite petit à petit des sciences humaines pour devenir une science naturelle. Et depuis 1992, la géographie limnologique complète la limnologie issue des sciences exactes, en prenant en compte les faits de sociétés mais également en s'appuyant sur les changements d'échelles (N. Broc, 2010)[3]. Ce qui la caractérise est qu'elle place le plan d'eau (lac naturel, artificiel ou étang) et son environnement comme étant un objet d'étude à part entière sans qu'il n'y ait de prédominance quant à la dimension ou l'origine de celui-ci. Elle se distingue également dans sa façon d'appréhender les recherches sur les territoires de l'eau, c'est à dire que la géographie limnologique, en France, forme un courant qui, bien que de taille restreinte, étudie les limnosystèmes, la structuration physique des échelles spatio-temporelle à l'extérieur et à l'intérieur du plan d'eau, la gestion des barrages artificiels et des étangs piscicoles par les sociétés, en plaçant le plan d'eau au centre des recherches scientifiques[4]. Elle repose sur une réflexion épistémologique ainsi que sur une mise en perspective de ses expérimentations et mesures inédites de terrain. Aujourd'hui, la limnologie est plutôt définie comme étant une science qui regroupe plusieurs spécificités que sont la géomorphologie, l'hydrologie, la biogéographie, ainsi que les relations entre l'homme et les lacs [5].

Son rôle dans le domaine de la recherche est important puisque, dans le monde, les lacs naturels auraient une capacité de 230 000 km³ [6], mais aussi parce que pour de nombreux lacs artificiels, leur pérennité est un enjeu considérable, notamment lorsqu'ils alimentent des populations en eaux potables.

Les lacs de barrages artificiels localisés dans les zones arides et semi-arides sont touchés par une problématique prépondérante : l'érosion ravinaire de leurs berges. C'est cet objet qui va intéresser le travail de cette thèse et notamment sa mesure grâce aux méthodes de télédétection.

L'érosion des berges entraîne un autre processus d'envergure qui est la sédimentation. En effet, cette dernière provoque elle-même l'envasement des cuvettes lacustres. Ceci engendre notamment une perte des capacités de stockages pour les barrages. Pour les pays comme le Maroc et le sud de l'Espagne situés dans des zones arides ou semi-arides, le stockage et la consommation de l'eau sont de véritables enjeux, notamment dans le contexte du changement climatique.

Ce processus d'érosion est, à l'origine, engendré par plusieurs facteurs naturels et anthropiques qui accentuent désormais son accélération. Les causes naturelles peuvent notamment être un écosystème vulnérable suite à l'agressivité climatique et à l'irrégularité des précipitations parfois violentes, une topographie accidentée, ainsi que des formations géologiques friables. D'autre part, la densité démographique, la surexploitation forestière, le surpâturage ainsi que des pratiques culturelles inadaptées sont des facteurs provoquant une dégradation.

Nous pouvons également noter que la dégradation spécifique entraîne une eutrophisation des eaux lacustres en raison de la présence de fertilisants transportés par les eaux.

Enfin, la sédimentation des cuvettes conduit à des problèmes financiers. En effet, le manque d'eau en aval des barrages cause une perte économique, que ce soit pour les habitants dont les terres agricoles se réduisent, ou pour les sociétés (ou états) exploitantes des barrages avec une perte de production énergétique. L'investissement essentiel au rétablissement des fonctions normales des barrages participe à cette perte économique.

Ainsi, pour pouvoir remédier à cette situation et trouver des solutions visant à contrer ce phénomène, il faut tout d'abord pourvoir le quantifier, le relever, le mesurer.

La méthode qui était utilisée auparavant consistait à mesurer l'érosion in situ, Cette méthode avait l'inconvénient d'être très chronophage. Elle est aussi trop peu précise et sa mise en place sur des terrains étendus est fastidieuse et parfois impossible.

C'est notamment pour ces raisons que nous avons choisi d'utiliser la télédétection et plus particulièrement trois de ces différentes techniques que sont le LiDAR et le drone, connus comme étant les plus utilisées pour ce type de travail, mais également le Radar qui constitue une technique de mesure intéressante.

Contrairement à la méthode décrite au début de ce paragraphe, la télédétection dans son ensemble permet de faire des mesures à distance avant de les analyser.

Tout d'abord la méthode LiDAR (Light Detection And Ranging) mesure la distance entre le capteur et une cible grâce à l'envoi d'un faisceau laser (lumière infra-rouge). Plusieurs mesures permettent de recueillir des nuages de points formant une carte que l'on appellera Modèle Numérique de Terrain (MNT) pour la cartographie 3D. Cette technique a été utilisée sur notre terrain d'étude en 2009 et 2016. Les données de ces missions sont en accès libre et gratuit. Ce fut donc l'occasion de faire une comparaison avec les données obtenues grâce au drone, mais aussi une opportunité pour quantifier le bilan sédimentaire de la retenue d'eau entre 2009 et 2016.

La méthode d'acquisition d'images aéroportées, utilise des photographies aériennes prises par le drone avec la méthode de traitement SfM-MVS pour créer des Modèles Numériques de Terrain (MNT). Cette technique a l'avantage d'être très précise. C'est aussi la plus utilisée pour la quantification des bilans sédimentaires des ravines. Toutefois, il est compliqué de l'utiliser sur des zones trop étendues.

Le principal point négatif de ces deux méthodes est le coût élevé des missions de terrain,

pour collecter les données LiDAR et Drone contrairement à la méthode RADAR. Enfin, le Radar basé sur les ondes hyperfréquences peut calculer les déplacements de terrain et créer des modèles en 3D grâce à la technique d'interférométrie radar SAR. Les capteurs sont basés sur des constellations de satellites et sont efficaces quel que soit les conditions météorologiques (contrairement au LiDAR et Drone dont les capteurs ne sont pas adaptés à un temps nuageux). De plus cette technique est moins coûteuse que les deux premières puisque les données utilisées dans ce travail de thèse sont libres et gratuites. Elle a également l'avantage de pouvoir couvrir de larges zones d'études. A

notre connaissance cette technique n'a encore jamais été utilisée pour mesurer l'érosion. D'ailleurs, plusieurs études ont tenté de démontrer que le radar ne peut pas quantifier l'érosion à cause de la cohérence qui se dégrade lors des changements des propriétés physiques de la surface du sol (comme l'érosion en nappe).

Pour mieux comprendre l'objet de cette thèse il nous faut faire un petit historique explicatif. Ainsi, au commencement de cette thèse en 2016, le projet était de travailler sur le barrage marocain Sidi Mohamed Ben Abdellah (SMBA). Quatre autres thèses étaient inscrites dans ce projet. La particularité de celle-ci est que le matériel utilisé afin de prendre des photographies est le drone. Il a donc fallu faire des demandes d'autorisation d'utilisation, sur le sol Marocain, de drone du laboratoire de géographie de l'université de Limoges, GEOLAB. Deux demandes ont été envoyées à l'administration des douanes et impôts indirects Marocaine afin d'avoir leur accord. La première ayant été refusée, nous avons fait une deuxième demande plus formelle, envoyé par l'université de Limoges via l'ambassade. Nous avons essuyé un second refus. Les durées de traitements respectifs de ces demandes ont été de six mois et un an, et le motif de leur refus était la sécurité. Nous avons enfin contacté un bureau d'étude marocain qui aurait pu effectuer le travail de prise de vue à notre place. Le devis annonçait un prix de 28 000 euros pour chaque mission. Or, le nombre de mission nécessaire étant de 3, le prix total de 84 000 euros était impossible à financer.

Ceci implique une perte de temps non négligeable dans l'élaboration de cette thèse, puisqu'à la fin de l'année 2017 il a fallu trouver un nouveau terrain d'étude. Cette recherche d'un terrain aux caractéristiques géomorphologiques similaires à celles du barrage marocain ne fut pas aisée. Il fallut en effet chercher notamment à partir de l'application Google Earth un lac au sud de l'Europe où les autorités seraient d'accord pour que nous puissions réaliser nos missions. Ainsi nous avons choisi le barrage Rambla de Algeciras dans la région de Murcie en Espagne. Les autorités espagnoles ont accepté que nous accomplissions trois missions de prises de vues sur ce barrage durant l'année 2018. Le but premier était de comparer les résultats acquis grâce au drone avec les résultats Radar afin de pouvoir appliquer la méthode du Radar sur le barrage Marocain. Malheureusement les données des précipitations journalières au Maroc n'étaient pas disponibles. Le travail de cette thèse qui a concrètement débuté en 2018 a donc été effectué uniquement pour le barrage espagnol Rambla de Algeciras.

Ce contre temps n'a cependant pas changé les deux hypothèses de départ qui animent cette thèse. La première est de savoir si la mesure de l'activité ravinatoire sur les berges lacustres à l'aide de la photogrammétrie par drone est pertinente. Cette technique de mesure qui, à notre connaissance n'a jamais été réalisée, permettrait de voir l'évolution de la cuvette lacustre. Selon notre expérience, elle doit permettre d'acquérir des données plus précises et d'effectuer un travail plus rapide qu'avec les autres techniques.

La seconde hypothèse de cette étude est de pouvoir démontrer que le radar peut mesurer le déplacement du sol sur les versants des ravines. Pour cela il faudra être en mesure

de mettre en évidence que la cohérence sur les terrains qui subissent un changement de propriétés physique (érosion) reste élevée. Ceci facilitera à l'avenir le suivi de l'érosion ravinatoire, notamment pour des terrains dont l'accès est difficile.

Pour répondre à ces hypothèses, nous avons établis trois chapitres.

- Le premier nous rendons compte de l'état de l'art en matière d'érosion ravinatoire. Nous présentons également les caractéristiques particulières du terrain géographique que nous avons choisi.
- Le deuxième chapitre est consacré aux deux techniques de télédétection optiques que nous avons mises en œuvre pour réaliser des relevés sur le terrain à savoir, la photogrammétrie par drone et la technique LiDAR. Nous préciserons également nos méthodes et résultats concernant chaque technique employée.
- Le troisième et dernier chapitre est consacré à la télédétection Radar SAR pratiquée pour le suivi et la quantification du processus de ravinement des berges lacustres. Nous développerons également les résultats et leur interprétation.

La conclusion permettra de savoir si notre travail a permis de confirmer nos hypothèses ou si au contraire il les aura invalidées.

Chapitre 2

L'état de l'art des processus d'érosion et présentation de la zone d'étude

« Citation »

Auteur

Sommaire

2.1 L'érosion hydrique	7
2.2 Les facteurs de l'érosion	7
2.2.1 Le type de sol	7
2.2.2 Le rôle de la végétation	8
2.2.3 Le rôle de la topographie	8
2.2.4 Le rôle du climat dans les phénomènes érosifs	9
2.2.5 Le rôle de l'activité anthropique sur l'érosion	9
2.3 L'érosion ravinatoire	10
2.3.1 L'érosion par des ravines permanentes	10
2.3.2 L'érosion par ravins éphémères	10
2.3.3 L'érosion par ravines de berge	10
2.4 Présentation du terrain d'étude et des ravines étudiées	12
2.4.1 La présentation du lac Rambla de Algéciras	13
2.4.2 Les ravines étudiées	18

2.1 L'érosion hydrique

L'érosion hydrique du sol est la forme d'érosion la plus répandue dans le monde [7]. Elle est définie comme le processus géomorphologique caractérisé par le détachement des fragments de roches, des particules du sol, et de la matière organique, transportés ensuite vers un lieu de dépôt sous l'action associée de l'eau pluviale et du ruissellement [8]. La faible densité du couvert végétal, la surexploitation des terres et le surpâturage ainsi que le régime torrentiel des écoulements dû à l'irrégularité des précipitations, sont tous des facteurs favorables au déclenchement et même à l'accélération du phénomène d'érosion hydrique [9][10] [11].

L'érosion hydrique du sol est devenue actuellement un problème mondial, elle menace non seulement les services écosystémiques tels que la production alimentaire, le stockage du carbone, la filtration de l'eau de ruissellement [12] ..., mais également la quantité et la qualité des eaux du fait des dépôts issus de la dégradation de la ressource vitale et non renouvelable [13].

Dans la nature, on peut distinguer plusieurs formes d'érosion, à savoir l'érosion en nappes, en rigoles, le ravinement et enfin le sapement des berges [14]. Dans ce qui suit, nous allons mettre l'accent sur les formes de ravinement.

2.2 Les facteurs de l'érosion

2.2.1 Le type de sol

La sensibilité du sol à l'érosion, ou l'érodabilité du sol, est souvent liée d'une part aux propriétés du sol, notamment la stabilité de ses agrégats, sa teneur en matière organique et sa porosité [15]. D'autre part, l'état de la surface du sol et notamment l'encroûtement, l'humidité du sol, la rugosité, le taux du couvert végétal et la litière ont également une influence importante sur les taux d'érosion ainsi que sur les taux d'infiltration et de ruissellement [16]. Pourtant, ces propriétés varient en fonction des conditions environnementales tels que le climat, la topographie, ou encore le couvert végétal [17].

La texture du sol a aussi un rôle important dans le transport des particules, les plus grosses résistant au transport en raison de la grande force nécessaire pour les déplacer et les transporter; les particules les plus fines peuvent aussi résister au détachement en raison de leur forte cohésion [18]. Les moins résistantes sont généralement les sables fins, les sols ayant une teneur en limons supérieur à 40% ou en argiles variant entre 9 et 30% [19] [20], mais également les sols marneux à cause de leur pourcentage en sodium et un pH relativement élevé.[21]

Dans les sols du pourtour méditerranéen, nous trouvons généralement des couches d'argiles, de marnes, de grès tendres ou de schistes alternant avec du calcaire dur ou des strates de grès. De plus ces sols sont pauvres en matière organique à cause de la faible productivité végétale, avec des températures élevées et un manque d'eau. Toutes ces conditions accélèrent la minéralisation des matières organiques du sol et les rendent fragiles, faiblement structurés et prédisposés au tassement et à la formation de croûtes de battance. En conséquence ces sols sont en général très sensibles à l'érosion [22], comme c'est le cas de notre terrain d'étude espagnol.

2.2.2 Le rôle de la végétation

La couverture forestière joue le rôle d'une couche protectrice entre l'atmosphère et le sol, lui permettant d'absorber l'énergie des gouttes de pluie. Par conséquent la végétation réduit fortement le transfert des sédiments en réduisant l'érosion et en favorisant le dépôt des particules du sol, à travers deux effets principaux [23] [24] :

- L'augmentation de la rugosité et la résistance du substrat
- La diminution de la vitesse de l'écoulement et la force de cisaillement.

La mise en place d'une végétation herbacée et arbustive donne lieu à la formation des zones tampons qui améliorent le piégeage des sédiments, et retardent le ruissellement des eaux en favorisant leur infiltration (Molina et al. 2012). Aussi les racines des plantes réduisent le ravinement temporaire à travers l'amélioration des propriétés physiques du sol comme la stabilité structurale et la résistance à l'écoulement concentré. L'effet des racines dépend essentiellement de leurs caractéristiques (racines fibrilles de moins de 1 mm de diamètre densément réparties dans les 30 premiers centimètres du sol [25]).

Lors d'un changement de couverture végétale, comme c'est le cas dans la région de Murcie en Espagne (et de Shoul au Maroc) qui subissent une forte dégradation par surexploitation pastorale, les différentes composantes du cycle hydrologique à savoir l'évapotranspiration, l'infiltration et le ruissellement sont affectées. Afin de concrétiser cet effet, des essais expérimentaux réalisés sur des parcelles de quelques cm^2 à 1 m^2 dans les Andes tropicales [26] ont montré que l'occupation du sol contrôle le processus hydrologique avec un coefficient de ruissellement plus élevé sur les jachères, en comparaison avec les champs cultivés récemment labourés.

2.2.3 Le rôle de la topographie

L'inclinaison et la longueur de la pente sont des paramètres fondamentaux pour expliquer l'importance des phénomènes érosifs. En effet, la vitesse d'érosion augmente avec l'augmentation de l'inclinaison et de la longueur, en raison de l'augmentation de la vitesse et du volume des eaux de ruissellement [17].

Pour un degré de pente donnée (S), une surface de drainage (A) est nécessaire pour produire un volume de ruissellement capable de se concentrer et d'initier le ravinement. Une relation entre A et S a été établie, $S = aA^b$, avec a et b des constantes déterminées à partir des caractéristiques environnementales. Ainsi, les valeurs de AS^2 comprises entre 48 et 814 m^2 sont considérées comme un indicateur du point de départ des ravines [25]. Valentin et al 2005 ont constaté que les pentes raides augmentent la vitesse de ruissellement et favorisent la création des ravines dans la plupart des régions du monde. Mais sous certaines conditions climatiques, comme au nord de la Thaïlande [27], où les volumes de ruissellement sont faibles et où les pentes sont douces, des ravines sont également creusées en raison du faible encroûtement des sols [25].

Sur notre terrain d'étude tout comme aux abords du lac marocain, la topographie des berges lacustres est généralement faite de pente très raide favorisant la dégradation du sol par le sapement des berges et par le ravinement.

2.2.4 Le rôle du climat dans les phénomènes érosifs

L'érosion hydrique est étroitement liée à l'indice d'agressivité climatique [28] [29] qui calcule le potentiel des pertes de sols. Ce phénomène est généré d'une part par le ruissellement en pente qui détache et entraîne les produits de l'érosion, et d'autre part par l'intensité de l'énergie cinétique des gouttes de pluie (<L'érosivité des pluies >). FARRES (1980) [30] a estimé que ces deux facteurs sont déterminants pour le déclenchement de l'érosion par suppression de la cohésion des agrégats du sol. L'abondance et la fréquence des pluies a également beaucoup d'importance puisque ces paramètres règlent le déficit de saturation du sol. Habituellement, au début de la saison des pluies (automne), les premières averses qui tombent sur les sols nus forment un lit de semence alors que durant l'hiver, les sols sont vite engorgés et ruissellent plus rapidement [31]. Dans ces cinq rapports, le GIEC a tiré la sonnette d'alarme à propos du changement climatique. Dans la région de Murcie (et de Shoul) où le climat est de type semi-aride voir subhumide, le réchauffement des températures affecte les variables climatiques et provoque une hausse de la fréquence des événements extrêmes[32], notamment des températures et des épisodes de précipitations agressives. Ces changements vont bouleverser les facteurs de ruissellement ainsi que l'humidité du sol résultant à une accélération du processus d'érosion hydrique.

2.2.5 Le rôle de l'activité anthropique sur l'érosion

Le développement du ravinement dans les derniers 1500 ans est dû à la combinaison entre les activités anthropiques et les pluies extrêmes [33]. Cela entraîne des effets socio-économiques et environnementaux négatifs tels la dégradation du capital sol, l'ensablement des réservoirs d'eau potable ou encore un dysfonctionnement hydrologique. L'homme peut être la cause directe du déclenchement de l'érosion par ses différentes pratiques notamment :

- Le changement de l'occupation du sol (dégradations forestières).
- Le travail continu du sol qui diminue la cohésion des agrégats.
- La mise en place d'un seul système de culture pendant de longues périodes détermine l'évolution cyclique des états de surface.
- Le surpâturage expose directement des surfaces importantes aux effets des gouttes de pluies et de ruissellement.
- L'agriculture et l'élevage augmentent le taux d'érosion du sol à 28 Gt/an [34].
- La construction des routes non goudronnées et l'activité urbaine contribuent au développement des ravines [25] [35].

Par ailleurs, en Espagne comme au Maroc, les statistiques montrent une forte densité démographique avec une mauvaise répartition sur l'ensemble des sites. Ceci peut être la cause directe du déclenchement de l'érosion.

2.3 L'érosion ravinatoire

Le ravinement est un processus mondial qui se produit dans les zones urbaines, forestières et même rurales [21]. On trouvera à cet effet le terme ravin en plusieurs langues, il est appelé, "gully" en Anglais, "wadi" en arabe, "cárcava" en Espagne, "lavaka" à Madagascar, "donga" en Afrique du Sud, "voçoroca" au Brésil et "barranco" en Argentine [21]. A l'échelle mondiale, le ravinement présente 10 à 94% du total des sédiments produits par l'érosion hydrique [33], avec une contribution moyenne entre 50-80% dans les zones arides [36]. Dans les pays d'Europe occidentale, le même processus génère entre 30 et 80% [33] des sédiments. En outre Vanmaercke et al (2016) [37] ont montré que le ravinement et les ravines de berges sont les principales sources de pertes en sédiments. Ils ont également des effets hors site [38] tel que la dégradation de la qualité des eaux, l'envasement des retenues et des cours d'eau, la pollution, la dégradation des terrains agricoles, la diminution de l'humidité du sol, le dysfonctionnement hydrologique, ou encore les transferts de fertilité [39].

Les travaux de Vanmaercke et al (2016) [37] ont confirmé que le taux de recul des têtes des ravines de berges varie entre 0,01 m/an et 135,2 m/an avec une moyenne de 5 m/an, et une médiane de 0,89 m/an.

Dans la plupart des paysages qui sont soumis à différentes conditions climatiques et à différentes activités anthropiques, on peut observer la présence des diverses formes d'érosion par ravinement, à savoir des ravins éphémères, des ravines permanentes ou classiques et des ravines de berges [33].

2.3.1 L'érosion par des ravines permanentes

Les ravines sont définies comme un processus d'érosion où l'eau s'accumule et repasse souvent dans de petites ravines étroites (de plus de 50 cm de profondeur), et sur une courte durée. Ceci entraîne les particules du sol de cette zone étroite jusqu'à des profondeurs considérables. Sur les terres agricoles, elles sont nommées par le terme "chenaux trop profonds" <*channels too deep*>, avec une profondeur comprise entre 0,5 et 25 à 30 m (SSSA, 2018)[40]. Lorsque la surface primitive a complètement disparu, on parle alors de badlands.

2.3.2 L'érosion par ravins éphémères

Ce sont de petits chenaux érodés par un flux concentré pouvant être facilement remplis par un simple travail du sol. Ils se reforment ensuite au même endroit par des événements de ruissellement supplémentaires (SSSA,2018) de ravinement généralisé [40].

2.3.3 L'érosion par ravines de berge

Les ravines des berges (<*bank gullies*>) sont une forme d'érosion linéaire qui se forme lorsque le flux d'eau est concentré, sur les berges ayant une pente très raide (presque verticale). Elles se forment rapidement en surface ou sous la surface du sol par érosion hydrique, et forment des tunnels <*Piping*> ou des rides <*fluting*>, petits mouvements de masse.

Processus

L'érosion par ravine de berge est un processus discontinu qui peut être attribué aux mécanismes suivants :

- La variation spatiale des précipitations

ou

- L'activité des fissures de tension, qui favorise l'affaissement des berges et le recul des têtes de ravine[41].

Les travaux de Vandekerckhove et al. (2001) [42], Chaplot et al (2011)[43] et Irene Marzloff et al (2011) [44] sur les ravines de berges actives ont montré que la source principale des sédiments se produit par l'affaissement des versants des ravines par la voie de ruissellement. Le travail de Vandekerckhove et al (2000) [41] a lié l'activité des ravines de berges aux propriétés du sol, dans les sols qui se caractérisent par une forte teneur en limons, une conductivité électrique élevée et une faible teneur en sable. L'érosion se fait par le *Piping*. Pour les sols qui ne contiennent pas assez de fragments de roche et qui ont un fort indice de dispersion, l'érosion des ravines de berges se fait par le *fluting* (creusement des raides).

Mesures

Les chercheurs abordent la question de ravinement selon différentes approches : l'approche basée sur l'estimation quantitative du bilan sédimentaire, à l'aide de mesures directes sur le terrain, et l'approche indirecte fondée sur la modélisation des sous-processus de ravinement ou bien l'utilisation des modèles de Deep Learning afin de mettre en place un modèle numérique ou statistique de prévision de ravinement.

Les mesures directes sur terrain

Les premières mesures de ravinement ont été effectuées avec des techniques conventionnelles, tel que le ruban à mesurer, les stations totales, les GPS différentiel... [45]. Ces techniques prennent beaucoup de temps et se limitent plus souvent à des études à petite échelle. Avec le développement des techniques de télédétection spatiale, la photographie aérienne, le suivi multi-temporel et multi-échelle des ravines, les mesures sont devenues plus précises et plus rapides, et sur une échelle spatiale très large.

Les modèles de prédiction

Il existe deux catégories de modèles pour prédire le taux de croissance des ravines, la première catégorie a une base empirique comme SCS (Soil Conservation Service)[46], les modèles de Thompson [47] et Seginer [48]; la deuxième catégorie utilise des modèles conceptuels tels que AnnAGNPS[49], EGEM (Ephemeral Gully Erosion Model)[50], GULTEM (model to Predict Gully Thermoerosion and Erosion) [51], ou encore CHILD (Channel-Hillslope Integrated Landscape Development)[52].

Nous pouvons noter que plusieurs modèles de deep learning, tels que SVM, arbre de décision, réseau de neurone, etc., ont récemment été utilisés afin de modéliser et prédire le développement des ravines à partir de facteurs géoenvironnementaux.

Selon Poesen (2018)[17], il n'existe pas de modèle fiable (c'est à dire validé) permettant de prédire le taux d'érosion ravinaire, en raison de la croissance non linéaire des ravins sur une longue période de temps, mais aussi en raison du manque de données de surveillance de bonne qualité pour étalonner et valider ces modèles.

2.4 Présentation du terrain d'étude et des ravines étudiées

Selon le cinquième rapport du GIEC (IPCC, 2013)[53], le bassin méditerranéen est classé comme un <hot spot >climatique. En effet, caractérisé par sa grande irrégularité, les débits pluvieux sont faibles alors que, paradoxalement, les inondations sont fréquentes [54]. En outre, les bassins versants méditerranéens ont en majorité une taille moyenne, en partie dû au fait qu'ils ont un régime pluvial ou pluvio-nival ainsi qu'une variabilité saisonnière et interannuelle élevée. En règle générale, dans la zone méditerranéenne et plus particulièrement dans le sud-est de l'Espagne, les ramblas et les ravins constituent les principaux systèmes de transfert de sédiments depuis les bassins versants vers les barrages [54]. Il se produit en effet, suite à de fortes pluies, un transfert de volumes de sédiments conséquent, sur de courtes périodes (régime torrentiel). La rugosité des berges des ravins couplées à la charge de fonds des ramblas enregistrent des phénomènes de transport complexes [55].

Dans la région de Murcia le paysage raviné présente 14,63 % de la superficie totale de la région, avec un taux d'érosion supérieur à 50 t/ha/an [56]. Cela génère un envasement progressif des barrages construits dans le bassin hydraulique de Segura et une réduction annuelle de leur capacité de stockage comprise entre 0,3 et 3,9%.

2.4.1 La présentation du lac Rambla de Algeciras

Au sud de l'Espagne, à Alhama de Murcia, le barrage de La Rambla de Algeciras a été bâti en 1995 sur la rivière de Rambla de Algeciras. Torrentielle, elle prend sa source à la ravine de Valdelaparra et se jette dans la rivière de Guadalentín (Figure 2.1 et 2.2) . Le barrage mesure 80 m de haut et si la superficie du lac est de 235,50 ha, son volume est de 44.91 hm³ (tableau 2.1)

TABLEAU 2.1 – Les caractéristiques morphométriques du lac et du bassin versant de Rambla de Algeciras

Caractéristique du lac et bassin versant	
Région	Murcia
Commune	Alhama de Murcia
Rivière	Rambla de Algeciras
Bassin hydraulique	Segura
Superficie de bassin versant du lac	44,91 km ²
Altitude maximale de bassin versant du lac	1320 m
Surface du lac (NMN)* ¹	235,50 ha
Volume du lac (NMN)	42,13 hm ³
Description du barrage	
Coordonnées	Latitude. : 37° 53' 23" 9 N
	Longitude. : 1° 23' 05" W
Type d'ouvrage	Terre (marnes et conglomérats)
Pente en amont	3,5/1 (h/v), 3,0/1 (h/v) et 2,25/1 (h/v)
Pente en aval	2,75/1 (h/v) et 2,08/1 (h/v)
Hauteur	80,00 m
Hauteur de la crête	274,00 m
Longueur de la crête	636,00 m
Largeur de la crête	14,00 m
Profondeurs maximum et moyenne	Inconnues

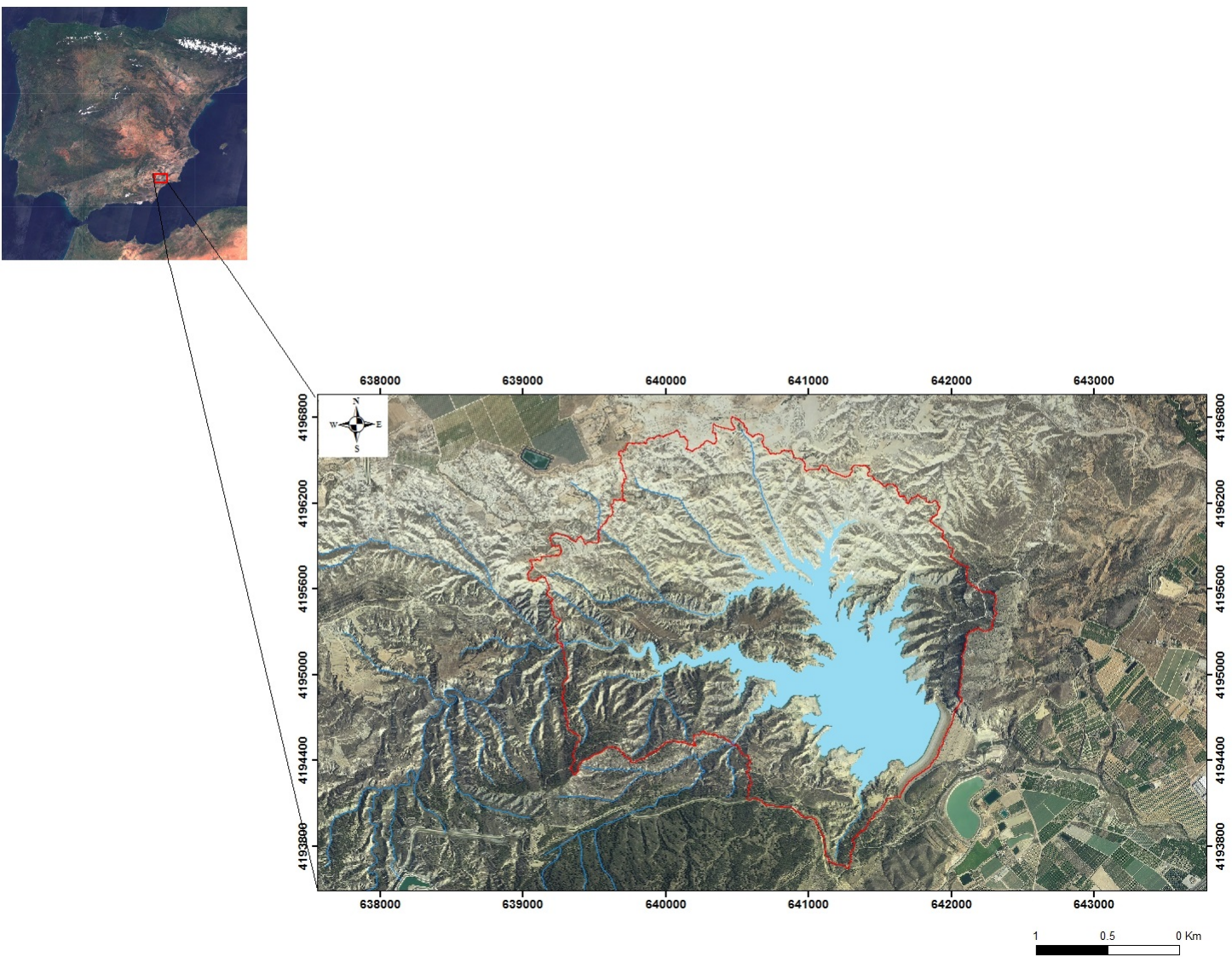


FIGURE 2.1 – La localisation de la zone d'étude (R. Hout, 2019)



FIGURE 2.2 – Une photo Panoramique du Lac de Rambla de Algaciras prise par (V.Maleval 2018)

Il fut construit grâce au projet de valorisation et de régularisation des ressources en eau dans le bassin versant de Segura au sud-est de l'Espagne, nommé <Plan General de Defensa contra Avenidas de la Cuenca del Segura >. Il comporte des intérêts socio-économiques pour la population, tels que :

- La sécurité des populations des communes de Librilla et Alhama de Murcia contre les inondations car les dimensions du barrage ont été déterminées afin de résister aux crues provenant des versants orientaux de la chaîne Sierra de Espuña.
- L'alimentation en eau potable et le développement de l'activité agricole grâce à l'amélioration de l'irrigation

Le barrage Rambla de Algeciras est situé dans le bassin versant du même nom, au sud-ouest de la ville de Murcie à la limite nord de la dépression de la rivière Guadalentín (rive gauche). Il est entouré par las sierras del Cura, de Espuña et de La Muela. Ce bassin versant s'étend sur une superficie de 44.91 km², et une longueur de 15 km, avec une altitude qui varie entre 200 et 1320 m au-dessus du niveau de la mer. Il subit un taux élevé d'érosion atteignant 100 t/ha/an (*Atlas global de la region de Murcia 2002*), lié au caractère torrentiel des précipitations et à la nature détritique du sol composé de marnes et de conglomérats polygéniques.

Le climat

Le climat du bassin versant du lac Rambla de Algeciras est de type méditerranéen, c'est à dire aride, semi-aride et subhumide, selon l'altitude du bassin :

- Le climat aride se distingue par des températures moyennes annuelles d'environ 18°C et des précipitations inférieures à 300 mm. Il règne dans les zones de basse altitude entre 600 et 700 m.
- Le climat semi-aride, se définit par des températures moyennes annuelles qui varient entre 14 et 18°C et des précipitations comprises entre 300 et 500 mm. Il est typique des zones situées au-delà de 600 à 700 m d'altitude.
- Le climat subhumide se trouve au-dessus de 900 à 1000 m et se caractérise par des températures moyennes annuelles inférieures à 14°C et des précipitations supérieures à 500 mm.

Localement, le lac de Rambla de Algeciras a un climat de type semi-aride, avec de courts épisodes de précipitations intenses. Les précipitations moyennes annuelles sont de 393 mm, dont 60% concentrées sur 3 à 4 jours/an.

La géologie

Les berges et le substrat du lac de Rambla de Algeciras sont constitués par différentes formations du Tortonien (Miocène supérieur) (Figure 2.3) :

- Le Tortonien supérieur distingue deux formations marneuses, à savoir les marnes bleues inférieures et les marnes gypsifères supérieures. Elles sont dominantes sur les berges du lac.
- Le Tortonien moyen correspond à des formations de calcarénites et de molasses du Cerro del Castro de la Atalaya, de couleur ocres, similaires à ceux de la Sierra de la Muela, en discordance avec les marnes du Tortonien supérieur.
- Le Tortonien inférieur présente des alternances de couches tendres et consolidées de conglomérats polygéniques dans une matrice de sable marneux et des fragments

de phyllite, quartzite, dolomie, calcaire et grès. Cette formation correspond à la col-line de la rive droite du barrage.

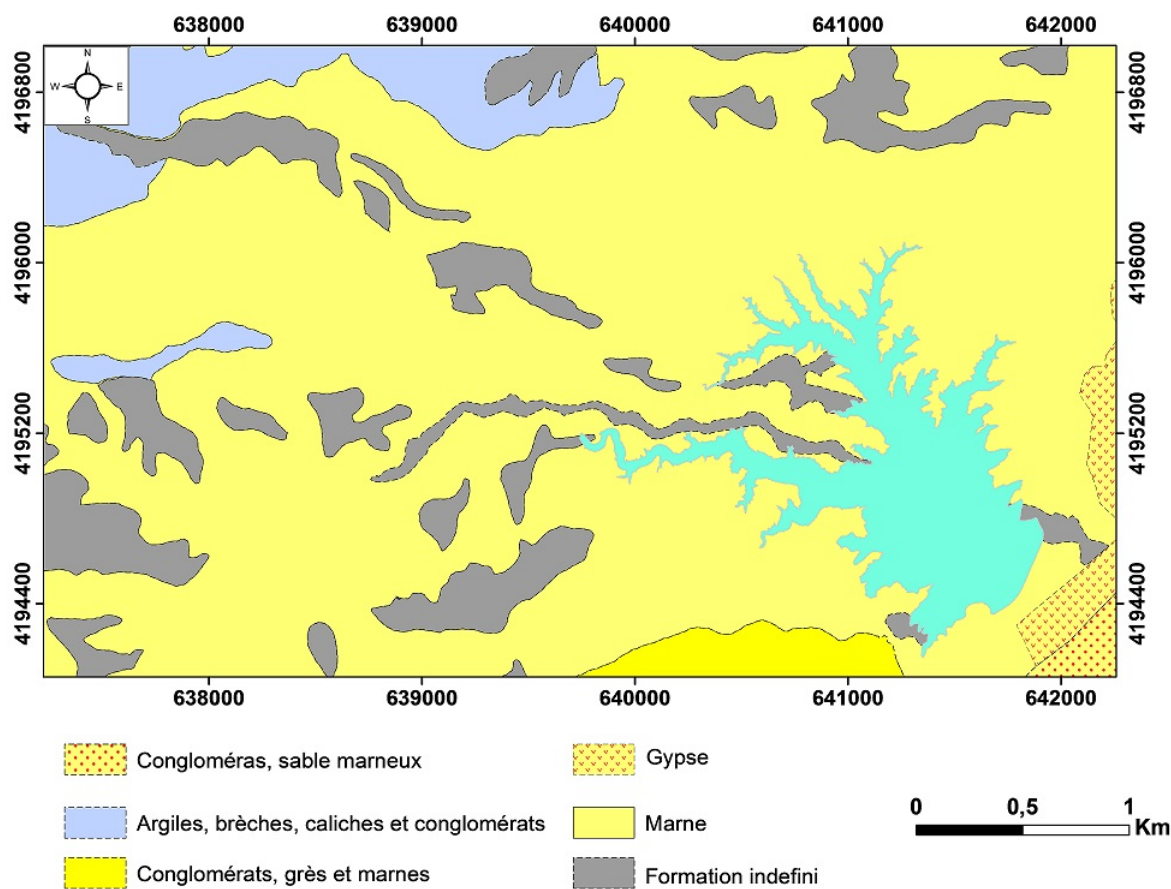


FIGURE 2.3 – La carte géologique

La couverture végétale

Comme partout en Méditerranée, les zones montagneuses de la région de Murcia ont subi une déforestation massive et importante pour l'agriculture, pendant les XVIe, XVIIe mais surtout au XVIIIe et XIXe siècle. La diminution de la capacité productive du sol et de sa fertilité ainsi que les taux élevés de perte des sols étaient donc une suite logique des conséquences du changement de l'occupation du sol et de la pression anthropique exercée sur ces milieux. De fait, à la fin du XIXe siècle le gouvernement espagnol a mis en place dans la région de Murcia des programmes de restauration hydrologique et forestière.

Le sud-ouest du lac est marqué par la présence de forêts de conifères (*Pinus halepensis*), qui couvrent 40% des berges lacustres. Cet espace forestier résulte des travaux de reboisement réalisés dans les années 70 par ICONA (l'Institut de Conservation de la Nature, Instituto de Conservación de la Naturaleza). Au contraire, dans la partie nord du lac, les berges sont occupées par une dominance de steppes (*Gypsophilatalia*) et de formations herbacées à *Thero-Brachypodietea*, avec un recouvrement assez faible du sol.

2.4.2 Les ravines étudiées

Le choix des ravines visait à représenter le plus fidèlement possible l'activité d'érosion sur les berges lacustres, dans un contexte climatique semi-aride. Ce choix prend en compte plusieurs paramètres telles que la forme, l'exposition, la tête des ravines, la densité du couvert végétal, et la lithologie. D'après la photo-interprétation diachronique des photos aériennes (PNOA) sur les versants lacustres de Rambla de Algeciras fortement ravinés, trois modèles ravinaires ont été retenus (Figure 2.4).

Site 1

La première ravine de berge (B.G-1) (Figure 2.5,C), s'étend sur environ 130 m. Elle est en forme de V dans sa partie amont et moyenne, pour prendre ensuite une forme de U en aval, où les versants sont raides et exposés au sud sud-ouest (absence de végétation) ou au nord nord-est (faible couverture herbeuse). L'amont de la ravine (tête) est recouvert par des strates arborées, plantées dans le cadre du projet de restauration (*Proyecto de correccion y repoblacion forestal de las cuencas de las Ramblas de Belen, Librillas y Algeciras. Provincia de Murcia*). Les ravines orientées nord - sud ont été reboisées et sont difficilement accessibles. Ainsi nous avons étudié la B.G-1 qui se situe à 250 m du réservoir.

Site 2

La deuxième ravine de berge (G.B-2)(Figure 2.5,D) est en forme de U. Elle est orientée est-ouest avec des versants très raides exposés au Nord (végétation herbacée) et au sud (sol nu). Elle mesure 110 m de long, et reçoit des ravines affluentes.

Site 3

La troisième ravine de berge (G.B-3) (Figure 2.5,B) a une forme complexe et résulte d'une combinaison de ravinement en tunnel (*pipig*). Les versants de la ravine (G.B-3) ont une pente assez forte et un sol nu. D'après la photo-interprétation, la ravine G.B-3 a commencé à se développer après la régression du niveau du lac. Il est probable qu'elle se transforme en badlands.

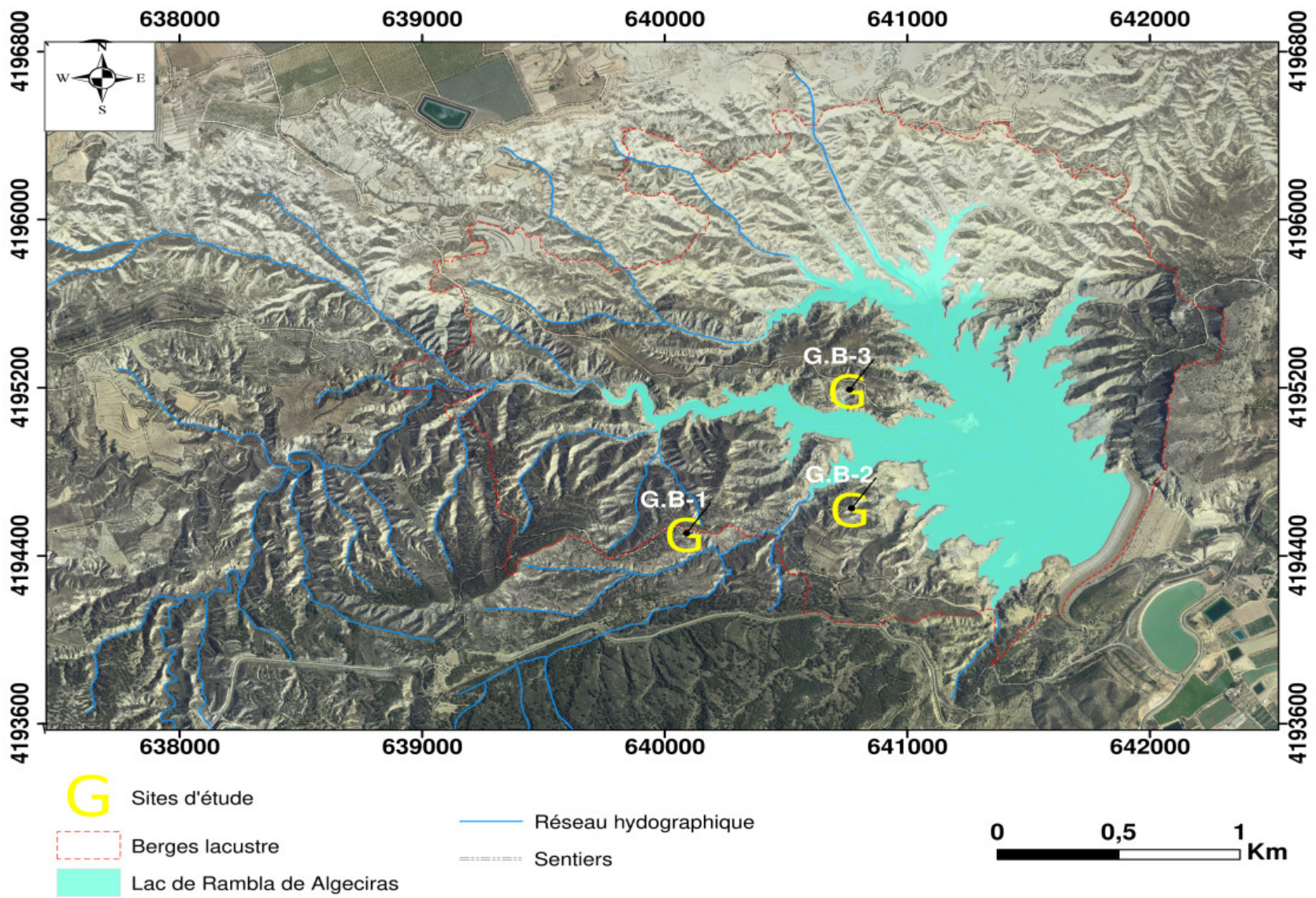


FIGURE 2.4 – La localisation des ravines étudiées (R. Hout, 2019)

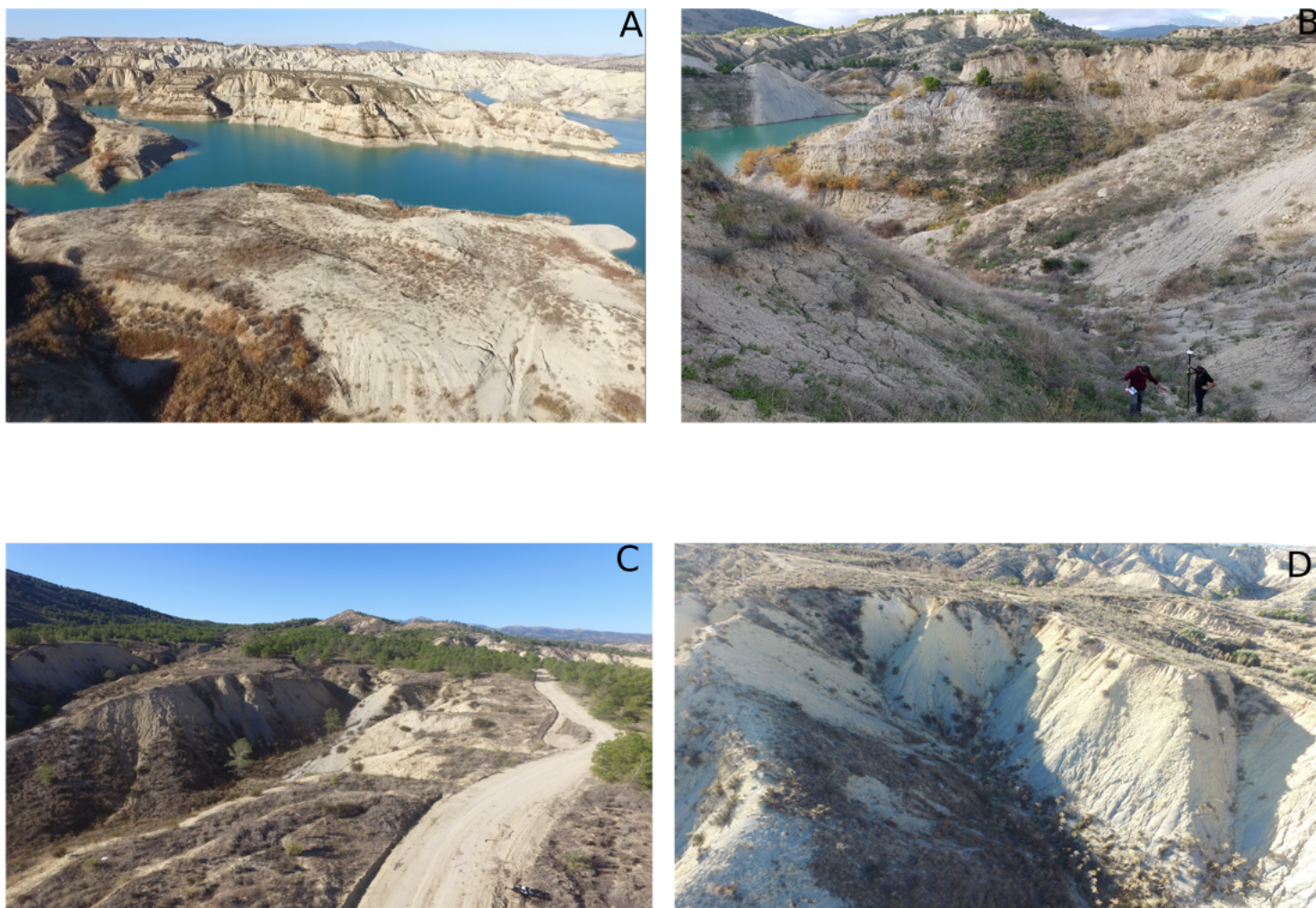


FIGURE 2.5 – A : les photos des berges lacustres de Rambla de Algeciras ; B : La ravine B,G-3 ; C : La ravine B,G-1 ; D : La ravine B,G-2(R. Hout 2019).

Chapitre 3

LiDAR et la photogrammétrie par drone

« Citation »

Auteur

Sommaire

3.1 Introduction	22
3.2 Méthodologie	24
3.2.1 Chaîne de traitement des photos prise par le drone	24
3.2.2 Chaîne de traitement des données LiDAR PNOA	31
3.2.3 La modélisation des erreurs des données SfM-MVS	33
3.2.4 La détection de changements géomorphologiques	38
3.3 Résultats et discussion : des pluies efficaces aidées par la dégradation des sols issue des activités anthropiques parfois anciennes provoquent une sédimentation importante dans le lac	41
3.3.1 Analyse des précipitations	41
3.3.2 L'agressivité climatique	44
3.3.3 Traitement des photos prise par le drone	46
3.3.4 Modélisation des erreurs	49
3.3.5 Détection des changements géomorphologiques par drone	55
3.3.6 Détection des changements géomorphologiques par LiDAR	63
3.3.7 Fluctuation du niveau lacustre	67
3.3.8 Occupation du Sol et activité anthropique	70
3.4 Conclusion	72

3.1 Introduction

Les données spatiales de très haute résolution semblent répondre à plusieurs questions traitées par les géomorphologues dans leurs travaux notamment pour identifier et mesurer les processus morphologiques ayant causé des petits changements topographiques. Cependant, ces données ont également changé l'échelle et la précision d'analyse ainsi que la fréquence du suivi de plusieurs phénomènes morpho-dynamiques. Il faut noter que ces mesures de très haute résolution peuvent être effectuées d'une manière répétitive et précise sur le terrain. Cette perfection résulte du développement de plusieurs plates-formes aériennes et spatiales ainsi que de l'apparition des ordinateurs puissants et des algorithmes de traitement très sophistiqués comme SfM-MVS.

SfM-MVS (*Structure from Motion and Multi View Stereo*) est une méthode de photogrammétrie développée dans les années 1990 par *Computer Vision Community*[57]. Cette méthode permet de reconstituer, à faible coût, les objets physiques ou la topographie de terrain en 3D à partir d'une série d'images prises en 2D, dès lors que les images se chevauchent et que le capteur se déplace. La méthode SfM est basée sur la technique de la vision stéréoscopique ainsi que sur le calibrage de la caméra (Figure 3.1).

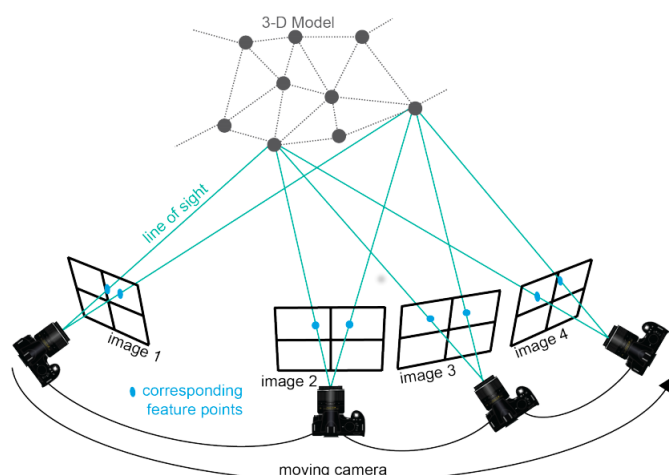


FIGURE 3.1 – Exemple de processus SfM (source UNAVCO)

L'application de la technique SfM-MVS nécessite deux composantes majeures. Tout d'abord les composantes d'acquisition de données à savoir la plateforme d'acquisition des images, le type et la configuration de la caméra, les points de calages. Il y a ensuite les composantes de traitement et post-traitement qui comprennent les algorithmes SfM-MVS, le calage et le géoréférencement des modèles, la décimation des nuages de points, la génération des MNS/MNT et les orthophotos. Viennent enfin l'analyse et la validation des nuages de points et de MNS/MNT.

En raison de sa démocratisation, cette méthode a été appliquée dans plusieurs domaines de géosciences (géomorphologie, géodésie, hydrologie, exploitation minière, géologie structurale, glaciologie, ...). Ainsi, son utilisation se développe très rapidement, d'autant que la précision des enquêtes est du même ordre que celle obtenue par les méthodes de très haute résolution classiques (GNSS, TLS, ALS...).

Marteu et al (2017)[58] ont signalé que malgré la simplicité et la performance de la technique SfM-MVS, et quelle que soit la stratégie adoptée pour établir un modèle numérique de terrain, les résultats de cette technique contiennent toujours des incertitudes produites lors de l'acquisition et le traitement des données. Pour les minimiser il est né-

cessaire d'adopter en amont une méthodologie de travail appropriée pour l'acquisition et le traitement des levés topographiques multi-temporels de très haute résolution, et garantir des produits de bonne résolution ainsi qu'une cohérence des missions de terrains. Les plateformes aériennes, à savoir les avions, les drones, les hélicoptères, etc., permettent d'acquérir des photos aériennes de très haute qualité et maximisent ainsi le recouvrement entre les photos. Ces plateformes constituent la solution idéale pour cartographier les grandes surfaces hétérogènes. Il est reconnu dans beaucoup de cas d'étude que le drone est la plate-forme la plus utilisée pour réaliser des acquisitions aériennes et ceci pour plusieurs raisons que sont la rapidité, l'efficacité en basse altitude et dans les zones inaccessibles ainsi que le coût très économique par rapport aux autres plateformes. D'autant plus que l'acquisition et le traitement des données prises par le drone nécessitent souvent moins de compétences techniques. Mais la basse altitude du vol et la faible autonomie des drones par rapport à d'autres plateformes aériennes tels que les avions et les hélicoptères posent des inconvénients majeurs dans son utilisation sur les surfaces étendues.

Il est intéressant de noter que les LiDAR <Light Detection And Ranging> terrestres (TLS <Terrestrial Laser Scanner>) et aéroportés (ALS <Aerial Laser Scanning>) sont des techniques de levé topographique très précises et très rapides. Ils sont bien employés pour la quantification des bilans sédimentaires. En revanche, le coût des levés LiDAR relativement élevé par rapport au drone et le traitement très spécifique, peuvent limiter les missions de terrain multi-temporelles. Dans le cas des études géomorphologiques, les terrains sont généralement accidentés et complexes. L'acquisition par le TLS ne couvre pas l'ensemble du terrain (zones inaccessibles)[59], et la densité des points n'atteint pas toujours la précision requise pour le LiDAR aéroporté [60] [61].

D'ailleurs les deux techniques, LiDAR et drone, ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherches. Parmi ces recherches, nous pouvons citer les travaux de RL Perroy, et al 2010 [62]; B Höfle et al; 2013 [63]; Á Gómez-Gutiérrez et al, 2014 [64]; C.Castillo et al, 2016[21] qui ont comparé la précision des deux techniques dans la quantification de bilans sédimentaires et dans la dynamique des ravinements.

Les trois missions effectuées sur le lac du barrage de Rambla de Algeciras en Espagne avaient pour but de tester la précision des modèles numériques de terrain dérivés de la technique de SfM-MVS, afin de mettre en relief la variation spatio-temporelle du bilan sédimentaire à l'échelle des ravins de berges du lac. Cette même technique a par la suite été utilisée de manière à valider les résultats issus de la technique multi-temporal InSAR, afin d'évaluer les limites des images RADAR SAR dans la détection de l'érosion à l'échelle des pentes et des ravines de berges. Les résultats obtenus sur les versants lacustres de Rambla de Algeciras mettent en lumière le rôle majeur des ravines de berges dans l'envasement des lacs.

Le deuxième objectif de cette partie était d'explorer la capacité des données LiDAR PNOA dans la détection des changements géomorphologiques due au ravinement, ainsi que la quantification des sédiments provenant des berges immédiates du lac de Rambla de Algeciras

3.2 Méthodologie

3.2.1 Chaîne de traitement des photos prise par le drone

Entrant parfaitement dans le domaine de compétences des géographes, le suivi et la cartographie des berges lacustres, reste un des objectifs très important en matière de gestion des réservoirs d'eau potable. Les acquisitions topographiques de très haute résolution ont considérablement amélioré notre capacité à mieux connaître le fonctionnement et l'évolution des changements géomorphologiques des berges lacustres. L'émergence de nouvelles techniques de photographie aérienne, durant ces dernières années, facilite grandement la modélisation numérique de terrain et l'analyse géomorphologique. Cette aisance est due essentiellement à l'apparition des drones civils (Unmanned Airborne Vehicles, UAVs) et aux algorithmes de photogrammétrie 3D SfM-MVS, mais aussi au développement de la puissance de calcul des ordinateurs. Cette méthode est de plus en plus utilisée dans la modélisation et la quantification du ravinement dans plusieurs régions du monde et dans différents contextes climatiques, avec des travaux menés par exemple au Maroc [65], en Espagne [66], en Chine [67], en Italie [68], en Éthiopie [69], aux Etats-Unis [70] ou encore en Australie [71].

Dans le cadre de cette thèse, la technique photogrammétrique a été utilisée pour déterminer le volume des bilans abrasion/dépôt sur les ravines des berges du barrage espagnol durant l'année 2018. Ce travail a été réalisé à partir d'une série diachronique des modèles numériques de terrain.

Dans cette partie de thèse, nous allons présenter en détail la méthode (SfM-MVS-4D) mise en place pour la collecte et le traitement des données SfM-MVS multi-temporelles prises par le drone, afin de quantifier les changements géomorphologiques liées aux ravinements des berges dans le lac de Rambla de Algeciras en Espagne.

Acquisition des photos aériennes

Drone et Caméra

Les missions de prises de vues aériennes ont été effectuées facilement et à faible coût par le drone quadricoptère DJI Inspire1v2 (figure 3.2, A), équipé de la caméra métrique et multispectrale ZENMUSE X3 de 12 mégapixels (figure 3.2, D) sans distorsion ni aspect et avec une distance focale de 20 mm (tableau 3.1). Le DJI Inspire1 V2 est vendu "prêt à voler", et est conçu pour avoir une vitesse maximale de 22 m/s (mode ATTI, sans vent), et un temps de vol maximal d'environ 18 minutes. Il peut atteindre 4500 m d'altitude en vol. De plus, il est équipé d'un système de positionnement par satellite qui utilise les signaux GLONASS et GPS.

Inspire1v2 est couplé avec un système de positionnement GPS de 0,5 m de précision verticale et 2,5 m en précision horizontale. Cela nous a permis de garantir une résolution adéquate. La planification des missions de vol s'est effectuée en mode navigation via l'application mobile Pix4Dcapture. Après la définition de quelques paramètres de vol, l'application prend en charge le pilotage automatique du drone. Parmi ces paramètres nous pouvons répertorier :

- Le plan de vol (la limitation de la zone d'étude)
- Les lignes d'incidence de la prise de vue,
- L'altitude de vol (la visibilité des mires sur les photos),
- Le taux de recouvrement des photos (le recouvrement de chaque surface par trois photos au minimum [61]),

— Le point de départ et le point d'arrivée du drone.

Les acquisitions des photos aériennes par drone ont été menées selon deux configurations, pour les deux ravines (B.G 1; 2) les photos ont été prises avec des acquisitions nadir. Cependant, par contraintes géomorphologiques de 3 ravines nous avons combiné les deux modes d'acquisitions nadir et oblique à ($\sim 30^\circ$) afin de modéliser en 3D les zones en surplomb de la ravine G.B-3.

Le choix du drone comme plate-forme d'acquisition des photos dépend bien sûr de la couverture et de la résolution spatiale des données SfM-MVS. Le vol en basse altitude du drone couvre des surfaces complexes et restreintes par rapport aux données LiDAR aéroporté. Lors de l'utilisation de système LiDAR aéroporté, la principale difficulté réside dans la collecte des données sur la topographie complexe puisque le signal Laser n'atteint pas tous les points des zones en surplomb et verticales.

Certains facteurs ont été pris en compte lors de la mission de prise des photos aériennes à savoir les conditions météorologiques optimales, l'heure de prise des photos, les conditions d'éclairage, le relief, la visibilité des cibles et le nombre de photos [61] [72] [73].

TABLEAU 3.1 – Les caractéristiques du Caméra ZENMUSE X3

Nom	X3
Modèle	FC350
Nombre total de pixels	12,76 M
Taille d'image max.	4 000 x 3 000
Plage ISO	100 à 1 600 (photo)
Vitesse d'obturation électronique	8 s à 1/8 000 s
Champ de vision	94°
Capteur CMOS	1/2,3" CMOS
Objectif	20 mm (équivalent 35 mm) ouverture f/2.8 à ∞
	9 éléments en 9 groupes
	Anti-distorsion
Modes photo	Prise de vue unique
	rafale : 3/5/7 clichés
	AEB (Auto Exposure Bracketing)
Formats de photo	JPEG, DNG
Plage de températures de fonctionnement	0° à 40°.
Types de carte SD pris en charge	Micro SD avec une capacité max. de 64 Go.



FIGURE 3.2 – A : Le drone DJI Inspire1v2; B : le GPS différentiel DGPS Trimble Geo 7x; C : La mire; D : La caméra ZENMUSE X3

Mires

La précision horizontale du système de positionnement de DJI Inspire 1V2 est d'environ 2,5 m et 0,5 m en vertical. Cette précision n'est pas satisfaisante pour une quantification détaillée du bilan sédimentaire. Pour obtenir des modèles numériques de terrain et des orthomosaïques précis, nous avons positionné des cibles sur le terrain, avant le vol. Selon Francisco Agüera-Vega et al. [74], l'incertitude du modèle numérique de terrain (MNT) et de l'orthomosaïque n'est pas liée à l'altitude du vol ou à la topographie de terrain. Elle est principalement liée à la précision et au nombre ainsi qu'à la répartition spatiale des points de contrôles sur la zone d'étude (GCPs). Dans le cas idéal un minimum de trois points de calages s'est avéré suffisant pour prendre en compte la rotation et la translation du modèle lors de l'ajustement de faisceaux.

La prise des données SfM-MVS nécessite une première étape de collecte des points de contrôle. Cette étape vise deux objectifs qui sont le géoréférencement des nuages de points dense SfM-MVS, ainsi que la validation et la détermination de l'incertitude des produits SfM-MVS. Pour cette étape primordiale, nous avons utilisé des cibles détectables automatiquement par le logiciel. Ces cibles ont été imprimées sur des papiers cartonnés (figure 3.2, C), les coordonnées en X, Y et Z de chaque cible ont été mesurées lors de chaque mission afin d'examiner la variance des levées entre les différentes missions.

Les levées ont été effectuées par le DGPS Trimble Geo 7x (Figure 3.2, B), qui comprend les paramètres suivants : L'ellipsoïde GRS 1980, le datum European Terrestrial Reference System 1989, le système de coordonnées ETRS89 / UTM zone 30N, avec une précision horizontale de 1 cm + 1 ppm, et vertical de 1,5 cm + 2 ppm.

Lors de chaque mission un minimum de 7 cibles de calages (*Ground Control Points <GCPs>*) est requis sur chaque site au milieu et sur les bords, afin d'avoir des résultats optimaux [75].

Le nombre et la répartition spatiale des points de calage placés sur chaque ravine sont significativement affectés par l'étendue du site, la topographie et le réseau de photos utilisées, d'autant que 90% des points de calages ont été installés sur les bords stables de chaque ravine.

Dans le but de garantir une bonne cohérence des missions multi-temporelles [76] [77] [78], les mêmes cibles ont été employées dans chaque mission drone réalisée (sauf pour celles qui ont été couvertes par les sédiments), et les coordonnées de chaque cible ont été mesurées avant chaque vol, afin d'assurer la stabilité des produits SfM-MVS multi-dates (Tableau 3.2).

Conditions d'éclairage

Un des problèmes survenus lors de prise de photos aériennes par le drone sur les systèmes ravinaires est le mauvais éclairage des versants des ravines. Puisque la position du soleil et la nébulosité déterminent le niveau de contraste dans chaque photo aérienne, nous avons bien défini l'heure exacte dans la journée et les conditions météorologiques optimales pour effectuer les missions de prise des photos par drone.

Pour visualiser tous les points sols et les points homologues sur les photos aériennes lors du traitement, les acquisitions se sont déroulées entre 10h00 et 11h00 et de 14h00 jusqu'à 17h00 (heure locale) (Tableau 3.2). Pendant ces horaires, le soleil est suffisamment haut pour éviter l'effet d'ombre des versants sur les photos. De plus, l'angle d'incidence du rayonnement solaire n'était pas perpendiculaire à la surface ce qui minimise l'effet de réflexion.

Il est clair que la couche nuageuse au moment des prises des photos influe sur la qualité

des photos. Cela paraît logique étant donné que l’insolation évolue inversement à la nébulosité. Généralement, moins la couverture nuageuse est importante, plus le sol est ensoleillé, on remarquera alors l’apparition des zones surexposées au rayonnement solaire dans certaines photos. Pendant les missions de terrain, le ciel n’était pas parfaitement dégagé. La nébulosité varie entre 1/8 et 3/8 Octas. Ces conditions d’éclairage homogène (diffusé) nous permettent de limiter l’impact de la réflexion du soleil à la surface du sol sur la visibilité des points de contrôles et de calages ainsi que les points homologues sur les photos aériennes et d’obtenir les meilleurs résultats après le traitement des données SfM.

TABLEAU 3.2 – Les caractéristiques des missions de prise de photos par drone

Ravines étudiées	Dates des missions	Heure locale	Hauteur du vol (m)	Nébulosité (Octas)	Nombre d’image	Densité(pts/m ²)	Couverture (Ha)	Nombre de GCPs	L’angle de visée (°)
G.B-1	22/01/18	11h	27,6	02/08	436	517	2,95	7	90
	04/06/18	15h	36,4	01/08	304	408	2,34	7	90
	18/12/18	16h	27,5	03/08	422	524	2,7	7	90
G.B-2	22/01/18	15h	31.3	02/08	646	425	4,3	13	90
	04/06/18	11h	29.4	01/08	465	455	1,79	13	90
	18/12/18	15h	30	03/08	384	397	2,02	10	90
G.B-3	22/01/18	17h	37,4	02/08	741	394	2,28	16	90 + 30
	04/06/18	10h	28,9	01/08	520	433	1,28	14	90 + 30
	18/12/18	10h	33,3	03/08	602	328	2,5	11	90 + 30

Traitement

Le processus de traitement des photos aériennes est basé sur la technique de photogrammétrie SfM-MVS. Nous avons choisi le logiciel commercial *Agisoft PhotoScan* pour traiter toutes les photos prises par le drone, en générant des nuages de points denses et des orthomosaiques. Ce logiciel génère des jeux de données exportables et dispose ainsi de flux de travail plus complets et plus facile à utiliser en comparaison avec d’autres logiciels de photogrammétrie commerciales et open source. Les étapes suivantes sur *PhotoScan* ont consisté à établir des nuages de points denses qu’on à exporter au format PTS <XYZ RGB >.

L’alignement des photos

Il consiste à aligner les photos sur le logiciel *Agisoft PhotoScan*. Ceci vient après que nous ayons supprimé toutes les photos floues. Nous avons ensuite importé et corrigé les distorsions de chaque photo aérienne. À ce stade le logiciel *PhotoScan* oriente les photos avec la technique SfM pour combiner les différentes trajectoires et position de la caméra, calculer les orientations internes et externes de la caméra et établir une assimilation de la scène en 3D à l’aide du modèle d’ajustement des faisceaux <bundle adjustment >. Dans notre cas nous avons les coefficients de distorsion par défaut de *PhotoScan* (Fit f, cx, cy, k1, k2, k3, p1, p2) pour déterminer le modèle initial d’ajustement des faisceaux dans le but

de définir les réseaux de points homologues sur chaque photo. L'identification idéale des jeux de points homologues sur plusieurs photos se fait aussi ensuite grâce à l'algorithme d'alignement et reconnaissance des objets SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*) qui est invariable aux changements d'échelle, à l'angle de rotation et à l'éclairage des photos. À la fin de ce stade le logiciel produit un modèle en nuage de points clairsemés. Des études théoriques montrent que pour prendre en compte la rotation et la translation du modèle lors de l'étape d'ajustement de faisceaux nous avons besoin de collecter un minimum de trois points GCP.

Le géoréférencement

Pour éliminer l'effet de dôme *<dome effect>* et les erreurs systématiques [79], nous avons géoréférencé les nuages de points clairsemés seulement avec les coordonnées XYZ des points GCPs, sans utiliser les informations de géolocalisation présentes dans les photos aériennes qui ne sont pas assez précises. Généralement, les points GCPs doivent être identifiés et localisés manuellement sur au moins deux photos. Par la suite, le logiciel prédit leurs positions sur les autres photos. Après le géoréférencement, le logiciel calcule de nouveau le modèle d'ajustement de faisceau puis il optimise l'alignement afin de minimiser les déformations non linéaires des modèles finaux.

L'extraction de nuage de points très denses

Le logiciel utilise l'algorithme MVS pour générer un nuage de point très dense au niveau de chaque pixel [80] [81], cette étape de traitement prend généralement quelques jours. Plusieurs études ont utilisé le modèle numérique de terrain issu directement des logiciels SfM-MVS, qui ne peut pas garantir des MNT fiables, puisque les erreurs sont moins transparentes. Afin d'éviter au maximum les erreurs générées par le logiciel *PhotoScan*, et d'évaluer la qualité des nuages de points denses, nous avons exporté les résultats en format PTS dans le but de nettoyer, décimer et interpoler les nuages de points.

Post-traitement

La technique SfM-MVS est reconnue comme la technique la plus rapide et est en outre peu coûteuse. Par contre, pour la modélisation en 3D et le post-traitement de jeux de données SfM-MVS nécessite un temps de travail allant de quelques semaines à plusieurs mois pour le trait, le nettoyage, le coregistration et la décimation des nuages de points. Le post-traitement a été appliqué sur les nuages de points bruts obtenus par la technique SfM-MVS avant de générer le modèle numérique de terrain. L'étape de post-traitement a été effectuée par trois logiciels externes open source : le logiciel *CloudCompare*, *ToPCAT* et le logiciel *SAGA GIS*.

Le filtrage et la double coregistration des données

Le logiciel open source *CloudCompare* est conçu pour le traitement et la comparaison de nuages de points 3D. Il a été initié à partir de 2004 dans le cadre d'une thèse CIFRE financée par EDF R&D et encadrée par l'École Nationale Supérieure des Télécommunications (ENST – désormais Telecom ParisTech – laboratoire TSI, équipe TII). Les nuages de points 3D denses obtenus ont été importés sous formats PTS XYZRGB dans le logiciel *CloudCompare*. Nous avons ensuite filtré les nuages de points grâce au filtre SOR. Une fois les nuages de points filtrés nous avons appliqué l'algorithme de coregistration ICP pour

mettre en correspondance les points homologues de nuages de points multi-temporels, afin que chaque nuage de points dense réfère à la même zone.

Le filtrage des nuages de points

Le nettoyage manuel des nuages de point peut causer une perte d'information sans éliminer les artefacts, alors que le filtre SOR (Statistical Outlier Removal) de la bibliothèque PCL (Point Library Cloud) consiste à éliminer minutieusement les valeurs aberrantes dans chaque nuage tout en conservant la représentation de leurs complexités topographiques. Le filtre SOR suppose que la distance entre chaque point et leurs voisins suit une distribution gaussienne avec un écart type et une moyenne. Les points les plus éloignés sont rejetés. Dans notre cas d'étude nous avons utilisé le filtre SOR avec une distance de 8 plus proches voisins pour chaque point, et un facteur de multiplicateur de 1 pour l'écart-type. Le filtre SOR permet de nettoyer significativement et rapidement les nuages de points denses sans dégrader la qualité des nuages de points (Figure 4).

La double coregistration des nuages de points

Pour superposer parfaitement les nuages de points multi-dates nous avons choisi l'algorithme ICP (*Iterative Closest Point*) de la bibliothèque PCL (*Point Cloud Library*), pour coregistrer les nuages de points. L'algorithme ICP cherche itérativement les transformations de translation et rotation qui minimisent la distance entre les deux nuages de points. La combinaison de géoréférencement par les points GCP et le coregistrement par l'algorithme de ICP (*Iterative Closest Point*) augmentent la précision de géoréférencement de l'ensemble des nuages de points <double registration process > [82] [83] [84] [85] [86]. Après le filtrage des nuages de points 3D, l'algorithme ICP est tourné sur une partie des nuages de points relativement stables avec une densité de points ponctuelle uniforme pendant les missions multi-dates (zones de contrôles). Cela évite de fausser les calculs des transformations (translation/rotation) causées par les mouvements géomorphologiques. Selon la précision et la densité des points nous avons utilisé les levés de la première mission comme référence, puis nous avons appliqué les matrices de transformations rigides (translation / rotation) sur l'ensemble des nuages de points originaux [77].

La décimation et l'interpolation des nuages de points

La génération d'un modèle numérique de terrain à partir de nuages de points denses issus directement des algorithmes MVS exige souvent de grandes ressources de calcul. L'interpolation des points pour ce genre de traitement engendre l'épuisement des machines en termes de mémoire, d'où l'intérêt pour la décimation des nuages de points denses qui a le potentiel de réduire le nombre des points tout en conservant la complexité topographique de la surface du sol. Persistant dans le nuage de points, nous avons utilisé la boîte à outils géospatiale *ToPCAT* (*Topographic Point Cloud Analysis Toolkit*) *ToPCAT* est un algorithme intelligent d'analyse et de décimation qui décompose le nuage de points très dense en un ensemble de mailles non chevauchées, adaptées à la détection des changements morphologique. Il calcule ensuite l'élévation minimale (Z_{min}) de chaque maille. Le Z_{min} est considéré comme l'élévation des points sol nu [87] [88] [89] [90]. L'élévation Z_{min} obtenue a été convertie en TIN (*Triangular Irregular Networks*) afin de générer le modèle numérique de terrain sous le logiciel SAGA GIS.

3.2.2 Chaîne de traitement des données LiDAR PNOA

Le terme LiDAR est l'abréviation de *Light Detection And Ranging*, désignant une méthode de détection et télémétrie par onde lumineuse.

Les principes de fonctionnement du LiDAR sont simples, la durée aller-retour de l'impulsion laser de très haute fréquence entre l'émetteur (avion, ULM...) et la cible (sol, feuilles...) indique la distance de cette dernière. Il s'agit en fait d'une technique de télédétection par l'envoi d'un fuseau laser, avec l'enregistrement ultérieur de son rebond. Ceci permet d'acquérir un nombre de points denses et précis ayant des coordonnées X, Y et Z, constituant un nuage de points permettant de reconstituer une surface topographique.

Pour cette étude, nous avons utilisé les données espagnoles du Plan National pour l'Orthophotographie Aérienne (PNOA). C'est en 2008 que débute ce plan dont l'objectif est de collecter des orthophotographies aériennes numériques de grandes précisions avec des mises à jour régulières de 2 à 3 ans selon la zone, grâce à plusieurs techniques différentes dont le LiDAR. Ainsi, le projet mené à l'aide des capteurs LiDAR aéroportés a pour but de couvrir l'ensemble du territoire espagnol de nuages de points de coordonnées X, Y, Z et d'attributs comme la classification ou la couleur (site PNOA). En effet, les fichiers LiDAR offrent une représentation à haute résolution de terrain sous forme d'un nuage de points 3D. Deux missions ont été effectuées, avec 2 densités de points différentes, soit 0,5 point/m² pour la première en 2009 et 1 point/m² pour la deuxième en 2016 (figure 3.3).

Afin de contrôler la trajectoire de l'avion, ils ont acquis des données GPS et un système inertiel IMU/INS durant le vol. Lors de l'enregistrement, il peut y avoir jusqu'à 4 retours pour chaque impulsion. La précision altimétrique obtenue est supérieure à 20 cm RMSE Z. Les nuages de points capturés subissent des contrôles de qualité, puis sont classés automatiquement en fonction des valeurs infrarouges. Lors de cette classification, un identificateur de classe est attribué et le référentiel altimétrique est transformé de hauteur ellipsoïdale en hauteurs orthométriques. Enfin, pour faciliter la visualisation des nuages, ces derniers sont colorés en RVB selon des orthophotographies provenant du projet PNOA et ayant une taille entre 25 et 50 cm. Une génération de métadonnées conformes à la norme internationale ISO 19115 :2003 assure l'interopérabilité des données générées.

Par la suite, les données sont diffusées en open-source par l'intermédiaire du Centre de téléchargement du CNIG (Centre National d'Information Géographique espagnol) dans des fichiers numériques de 2x2 km, compressés au format <.LAZ >.

Pour la péninsule, les îles Baléares, Ceuta ainsi que Melilla, le système de référence géodésique est ETRS89. Pour les îles Canaries, c'est REGCAN95 (les deux systèmes étant compatibles avec WGS84). Dans la broche correspondant à chaque fichier, il y a une projection UTM. Les coordonnées Z sont des altitudes orthométriques (le modèle du géodésique EGM08-REDNAP).

Ces données sont utiles pour des domaines nombreux et différents, dont voici quelques exemples :

- Obtention de Modèles Numériques de Terrain.
- Obtention de modèles de surface : bâtiments, végétation, lignes électriques ou lignes de communication.
- Études des zones inondables.
- Modèles hydrographiques.
- etc

Pour l'étude qui nous concerne, dans la région de Murcie, deux missions LiDAR aéroportés ALS ont été réalisées, le 24/11/2009 et entre les 20 et 25/08/2016. Lors de la première mission, les données ont été collectées à l'aide d'un capteur Leica ALS50-II, et, pour la deuxième mission un capteur Leica ALS60-II a été utilisé. Les fichiers LAZ (format de compression de fichier binaire LAS version 1.1) que nous avons exploités proviennent du système de référence géodésique ETRS89 UTM Zone 30 pour les coordonnées X, Y et le Z en système EGM08-REDNAP.

Avant la classification du nuage de points LiDAR, nous avons préparé les données brutes LiDAR sous le logiciel libre *LASTools*. Tout d'abord, nous avons converti les fichiers LAZ en fichiers LAS à l'aide de l'algorithme **las2las**, ensuite nous avons appliqué un alignement vertical et horizontal entre les lignes de vol avec l'algorithme **lasoverlap**, et enfin nous avons transformé les nuages de points en coordonnées orthométriques EGM08-REDNAP grâce au fichier ascii <EGM08-REDNAP.asc > et à l'algorithme **lasheight**.

Par la suite, nous avons supprimé les valeurs aberrantes et le bruit en utilisant le filtre SOR du logiciel *CloudCompare*. Après le prétraitement du nuage de point, nous avons choisi l'application MCC-LiDAR v2.15 (*Multiscale Curvature Classification*), un outil de ligne de commande open source permettant le traitement des données LiDAR. Il classe les points de données en tant que sol nu ou non, à l'aide de l'algorithme MCC, pour obtenir un modèle numérique de terrain nu. En raison de la faible densité de nuages de points LiDAR PNOA qui varie entre 0,5 à 1 point/m², nous n'avons pas appliqué de maillage sur le nuage.

Enfin les points du sol nu ont été triangulés puis interpolés avec l'algorithme de l'interpolation linéaire sous le logiciel *SAGA GIS*, dans le but d'obtenir deux MNT de sol de 1m de résolution pour 2009 et 2016.

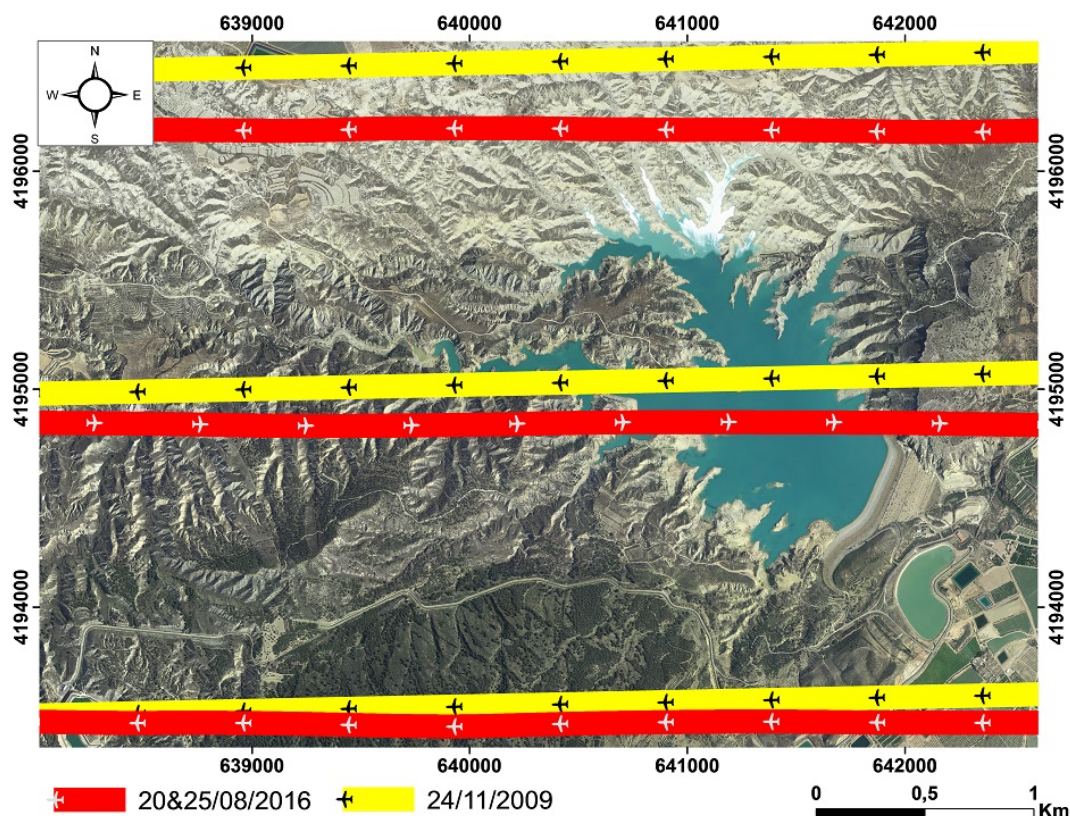


FIGURE 3.3 – La trajectoire du vol des deux missions LiDAR-PNOA, (R. Hout, 2019)

3.2.3 La modélisation des erreurs des données SfM-MVS

Pour quantifier l'incertitude des données SfM-MVS avec précision, il est nécessaire de valider les données SfM-MVS par une comparaison avec des données SfM-MVS antérieures ou avec une vérité de terrain de très haute précision (DGPS, station totale). La méthode de validation est souvent dictée par l'étendue, l'échelle, la méthode d'enquête sur le terrain, le format des données et les caractéristiques morphologiques du site d'étude. Nous pouvons citer trois méthodes de validation à savoir (figure 3.4) :

- Raster To Point : modèle le plus utilisé pour la validation des données SfM-MVS sur les terrains ravinés. Ce modèle estime essentiellement la différence de position entre les valeurs ponctuelles mesurées par une station totale ou un DGPS et les valeurs moyennes ou minimales du centre de quelques pixels des données matricielles SfM-MVS. De ce fait, la fiabilité de validation est déterminée surtout par la taille de pixel. Plus la taille est petite plus la précision est élevée.
- Raster To Raster : Parmi les techniques de validation permettant d'obtenir des informations sur la précision des données SfM-MVS nous trouvons la comparaison entre deux modèles numériques de surface, la première est obtenue par les nuages de points denses SfM-MVS (3D), et la deuxième à partir des données LiDAR ou une station totale interpolée et maillée avec la même résolution spatiale des données SfM-MVS. Les deux rasters doivent être superposables (les mêmes résolutions, nombre de pixels et orientation) et la comparaison se fait par une simple soustraction des nœuds (2.5 D).
- Point To Point : La validation par comparaison entre deux nuages de points est la méthode la moins utilisée, en principe cette méthode représente la stratégie la plus optimale et performante pour obtenir le moins d'erreur possible lors de la validation des données SfM-MVS. L'inconvénient de cette méthode est que les nuages de points multi-dates sont incomparables sur quelques zones en raison des effets géomorphologiques. L'approche utilisée par *CloudCompare* consiste à évaluer pour un tronçon stable de nuages de points (exemple : routes ou bâtiments) la distance au plus proche voisin avec le nuage de référence.

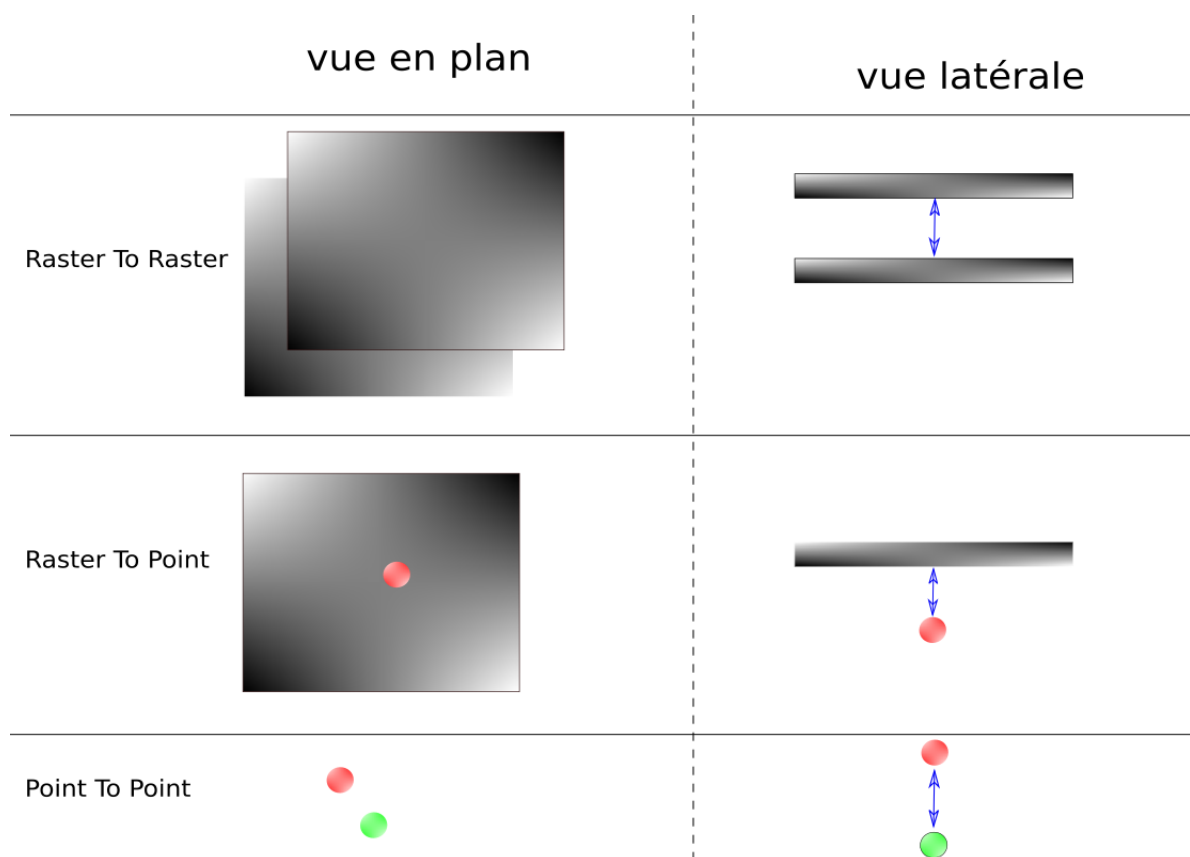


FIGURE 3.4 – Les différentes techniques de validation des données

Il existe de nombreux indicateurs statistiques permettant de mesurer l'incertitude des données. Ici nous recenserons les indicateurs les plus utilisés dans les travaux de géomorphologie. Parmi ceux-ci, nous citons :

- L'écart-type,
- L'erreur moyenne quadratique,
- L'erreur moyenne absolue,
- L'écart moyen.

Il est essentiel de valider les données SfM-MVS pour mettre en place un modèle de propagation spatiale des erreurs. Afin d'évaluer les incertitudes de MNT sur les berges lacustres ravinées, il a fallu dans un premier temps effectuer une comparaison entre les différentes données SfM MVS en 2,5D ou en 3D de chaque mission. Cette comparaison doit prendre en considération les incertitudes de chaque MNT. Ensuite un seuil statistique appelé intervalle de confiance est déterminé, afin de vérifier la fiabilité des changements géomorphologiques [89] [91] [92][93].

Dans le cadre de cette étude nous avons utilisé trois approches pour valider les données SfM-MVS-4D.

C2C (Cloud To Cloud)

Les erreurs de recalage des nuages de points ont été calculées directement avec l'algorithme C2C (Cloud-to-Cloud) du logiciel *CloudCompare*. Cette technique simple et rapide nous a permis de calculer directement la distance absolue entre deux sous-ensembles homologues de nuages de points (figure 3.5).

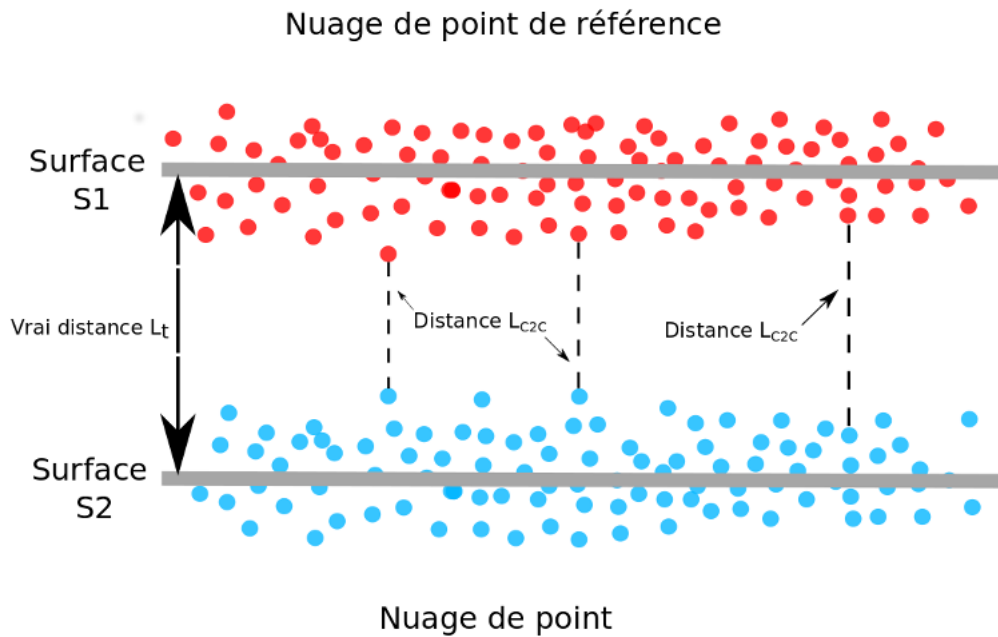


FIGURE 3.5 – Le principe de base de la technique C2C

Validation croisée

Il est probable que les estimations d'incertitudes fondées sur la rugosité soient erronées. A ce titre, la validation croisée de données SfM-MVS constitue la technique la plus fiable pour mesurer l'incertitude sur des ensembles de données suffisamment grands tels que les nuages de points denses. Cette technique statistique de rééchantillonnage sans remise consiste à diviser le nuage de points décimés en données de validation et d'entraînement. Les nuages sont divisés d'une manière répétitive avec l'algorithme *k*-pils (*k-fold cross validation*) avec un $k = 5$ (5 sous-ensembles de nuage de points de validation).

Les points d'entraînements sont interpolés pour construire un MNT, qui sera comparé avec les points de validation afin de quantifier l'incertitude de MNTSfM.

Nous avons choisi le langage de programmation *Python1* pour appliquer le *K-fold cross validation* sur le nuage de points décimés par l'algorithme *ToPCAT*. 90% des points Z_{min} ont été choisis au hasard pour générer un MNT de 5 cm de résolution. Ensuite, nous avons utilisé les 10% restants de Z_{min} pour les comparer avec le MNT. La moyenne de la différence absolue est considérée comme un indicateur de l'incertitude altimétrique des données. Le test de validation croisée a été répété cinq fois pour vérifier la cohérence des résultats (figure 3.6). Nous avons calculé d'autres indices statistiques tels que le minimum, le maximum et l'écart-type de la différence absolue.

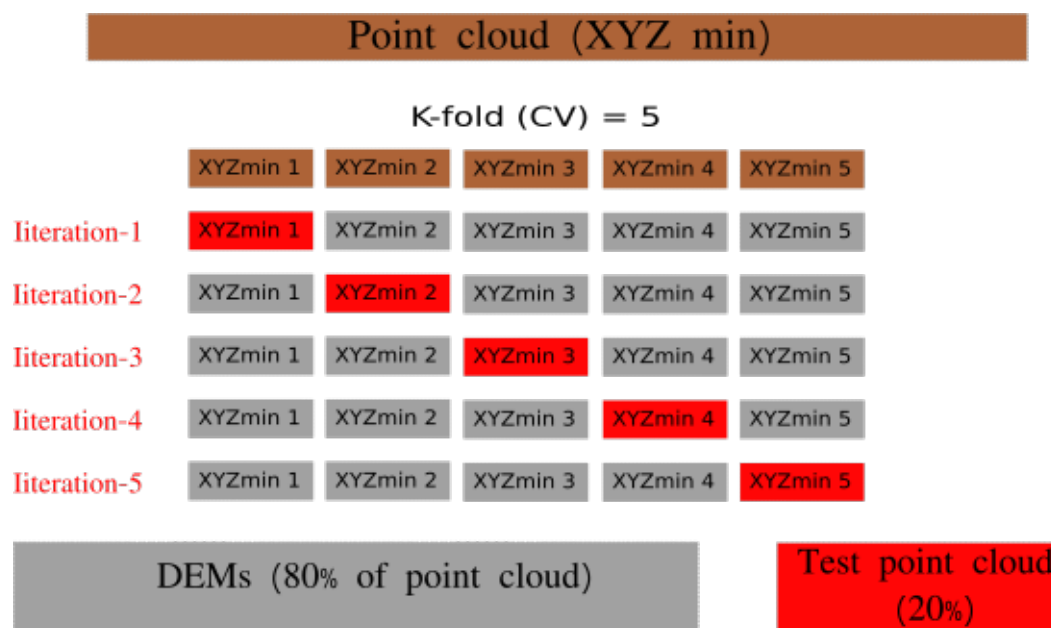


FIGURE 3.6 – La technique de validation croisée appliquée sur les nuages de points décimés

Le système d'inférence floue <FIS (Fuzzy Inference System) >

Dans le cadre des données SfM-MVS les sources d'erreurs varient selon le type et la nature du terrain étudié. Dans le cas des ravines de berges, les principales sources d'erreurs sont la rugosité, la pente du terrain, la géométrie de la caméra, l'erreur d'interpolation ainsi que la densité des nuages de points. Dans ce cas nous nous sommes intéressés à une modélisation plus complète des erreurs qui prend en considération les différentes sources d'incertitude. Pour répondre aux exigences de modélisation nous avons adopté un modèle d'erreur FIS (*Fuzzy Inference System*) spatialement variable, qui est plus fiable pour modéliser les erreurs des données SfM-MVS-4D.

Le système d'inférence floue est basé sur la théorie de la logique floue. Le FIS est basé sur la détermination de plusieurs règles fondées sur les variables (rugosité, pente...) puis l'agrégation des règles afin d'obtenir un résultat unique en sortie (erreurs). Donc le FIS s'intéresse à la combinaison de multiples modèles d'erreur pour créer un modèle d'erreur unique plus puissant. Pour établir un modèle FIS nous avons utilisé 4 étapes [89] [94].

L'importation des données FIS

Nous avons défini quatre variables comme les sources d'erreurs des données SfM-MVS pour les modéliser avec le FIS à savoir la pente, la densité des points, l'erreur d'interpolation, et l'erreur de nuages des points en 3D.

La pente est le paramètre le plus représentatif de la complexité topographique des terrains, et c'est le paramètre le plus facile à dériver à partir du MNT ou bien des nuages de points. La pente (degrés) a été générée directement à partir des nuages de points décimés ' Z_{min} ' avec une résolution de 5 cm.

La modélisation de la rugosité de sol nu depuis la valeur de l'écart-type les nuages de points denses décimée σ_{Zmin} est envisageable afin de prendre en considération la principale source d'erreur des données SfM-MVS-4D. La rugosité de terrain affecte la capacité de l'algorithme SfM-MVS à reconstruire le nuage de points dense, étant donné que l'erreur liée à la rugosité dépend de la position du balayage qui n'est jamais identique pour

TABLEAU 3.3 – Les règles du modèle FIS

Règles	Entrées			Sorties	
	Pente (%)	Densité des points (Pts/m ²)	Qualité des points en 3D	Erreur d'interpolation (m)	delta z (m)
1	Faible	Faible	NA	NA	Élevé
2	Faible	Moyen	NA	NA	Moyen
3	Faible	Élevé	NA	NA	Faible
4	Moyen	Faible	NA	NA	Élevé
5	Moyen	Moyen	NA	NA	Moyen
6	Moyen	Élevé	NA	NA	Faible
7	Élevé	Faible	NA	NA	Élevé
8	Élevé	Moyen	NA	NA	Élevé
9	Élevé	Élevé	NA	NA	Moyen
10	Extrême	NA	NA	NA	Extrême
11	NA	NA	Élevé	Élevé	Extrême

les missions multi-dates ainsi que la nature et l'occupation de sol. Nous rappelons que la végétation est absente sur nos ravines d'études. Ceci nous facilite le calcul de rugosité.

Ensuite nous avons également généré l'erreur d'interpolation à partir d'une simple différence absolue entre l'altitude des nœuds de TIN et les MNT-SfM $Z_{MNT} - Z_{NoeudsTIN}$.

Enfin, pour la variable de l'erreur des nuages de points en 3D nous avons utilisé les résultats de validation croisée.

Les données matricielles des différentes variables ont été reclassées selon quatre classes ('faible', 'moyen', 'élevé' et 'extrême').

Règles du modèle FIS

Après l'identification des variables d'entrée du modèle FIS, il reste à définir les règles d'activation afin d'obtenir un seul modèle d'erreur. Les règles ont été effectuées selon un jugement d'experts (tableau 3.3) avec deux expressions <and >et <or >.

L'exécution du modèle FIS

Après le choix des données et des règles d'entrée pour le modèle d'erreur, il faut passer à l'exécution du modèle FIS (*.fis) sous la bibliothèque C++. Le format du modèle FIS est cohérent avec le format des fichiers de boîte à outils Fuzzy Logic de Matlab qui nous permet de personnaliser les règles utilisées par le modèle FIS. Nous avons utilisé les modèles d'erreur référentiels disponibles sur la plate-forme [Bitbucket](#)

3.2.4 La détection de changements géomorphologiques

Un modèle d'erreur permet d'associer les mesures de contrôles faites sur le terrain à une estimation de précision (exemple écart-type en X, Y et Z). Lors de l'application de la méthode SfM-MVS pour créer un modèle numérique de terrain, les erreurs générées sont liées à plusieurs facteurs tels que la position et la précision des points de contrôles, les distorsions de la caméra, la résolution et le nombre de photos, le logiciel de traitement, la complexité topographique, les méthodes d'interpolation, l'humidité de la surface, la végétation, etc [92] [95] [96]. Plusieurs sources d'erreur affectent également la qualité des MNT en ce qui concerne les données LiDAR. Ces sources d'erreurs sont notamment la complexité de terrain, la végétation, les conditions météorologiques, la variation de densité des points, le processus de filtrage des données et la technique d'interpolation [60].

Différence des modèles numériques de terrain <DEM of difference (DoD) >

Cette approche mesure la distance verticale entre deux MNT, par une simple soustraction entre les pixels de ces deux MNT selon l'équation 3.1. Mais avant de calculer la différence entre les MNT il faut fixer une valeur pour le seuil minLoD (équation 3.1) [93] [97]. Ce seuil signifie que les valeurs de soustraction inférieures à minLoD sont révélées comme étant des incertitudes des deux modèles numériques. Nous pouvons ainsi accorder la valeur minLoD avec des intervalles de confiance que nous pouvons fixer. L'utilisateur doit définir ce seuil (statistique) selon la probabilité qu'il souhaite avoir afin que la détection des changements puisse être réelle (équation 3.1) [98]. Cette méthode rapide permet de déterminer les incertitudes liées à la rugosité de terrain, la qualité des nuages de points et l'acquisition des nuages de points. Cependant une grande incertitude dans la quantification de bilans sédimentaires se produit lorsque les MNT ne sont pas précis (vu que le seuil minLoD sera plus élevé).

$$minLoD = \sqrt{\varepsilon_{2i}^2 + \varepsilon_{1i}^2} \text{ ou bien } minLoD = t \sqrt{\varepsilon_{2i}^2 + \varepsilon_{1i}^2}; \quad (3.1)$$

Avec :

- $t = \frac{Z_{2i} - Z_{1i}}{\sqrt{\varepsilon_{2i}^2 + \varepsilon_{1i}^2}}$
- ε_1 = L'erreur individuel de pixel i de premier MNT
- ε_2 = L'erreur individuel de pixel i de deuxième MNT
- t= Le score de t Student, cette valeur dépend de l'intervalle de confiance (par exemple pour un IC de 68% → t=1, un IC de 80% → t=1,28 et pour un IC de 95% → t= 1,96)

La technique DoD fonctionne parfaitement sur les zones en 2.5 D telles que les MNT issus des nuages de points LiDAR aéroporté. A l'inverse, pour les MNT issus du drone, la technique DoD sous-estime l'incertitude des MNT. Ceci est lié à l'effet de l'utilisation du produit MNT à la place des points 3D. Nous avons choisi cette technique pour quantifier les incertitudes des MNT LiDAR, pour deux raisons. DoD a démontré sa performance pour quantifier l'incertitude des MNT en 2,5 D, mais également en raison de la mauvaise modélisation des zones en surplomb observées sur les nuages de points LiDAR.

Multi-scale Model to Model Cloud Comparison-Precision Maps (M3C2-PM)

M3C2-PM (*Multi-scale Model to Model Cloud Comparison Precision Maps*) est une approche intégrée dans le logiciel *CloudCompare*. Elle est employée pour comparer directement en 3D les nuages de points denses au lieu de comparer les MNT ou les Mesh. La

technique calcule la distance selon la meilleure direction perpendiculaire à la surface, avec un intervalle de confiance fixé généralement à 95% (afin d'évaluer la signification statistique des petits changements topographiques) et une précision des mesures estimée à partir de la rugosité des nuages de points, ce qui nous permet de détecter les véritables changements topographiques sur les plans altimétrique et planimétrique entre deux surfaces dégradées par le ravinement (érosion ou sédimentation). La combinaison de trois avantages permet alors de préférer cette méthode pour déterminer l'incertitude de nos modèles numérique de terrain : Elle peut fonctionner parfaitement même avec le changement de densité des points et même dans le cas où des données seraient manquantes. Elle calcule la distance entre les nuages de points selon la direction normale de la surface (le calcul de l'incertitude sur les zones quasi-verticales).

Elle estime une incertitude spatialement variable pour chaque nuage de points et en fonction de la rugosité de terrain et l'erreur de coregistration.

La technique M3C2-PM est développée par Mike James et al en 2017 [99], elle est basée sur l'algorithme M3C2 créé par Nicolas Brodu et Dimitri Laguee qui ont décrit en détail ses étapes de fonctionnement [85].

M3C2 calcule la distance en 3D entre deux surfaces S1 et S2 de nuages de points, avec une rugosité de sigma 1 et sigma 2 selon deux étapes (figure 3.7) :

- 1^{ere} Étape : L'algorithme M3C2 va déterminer les voisins de chaque points i <core> dans une sphère de rayon $D/2$, ensuite un plan ajusté selon les points voisins est déterminé. Le vecteur de la normale (N) à ce plan est calculé. L'écart-type de la distance entre le plan ajusté et les points voisins est considéré comme une mesure de rugosité du nuage de points (Étape 1, Figure 3.7),
- 2^{eme} Étape : Une fois le vecteur (N) calculé, M3C2 définit les positions (i_1) et (i_2) des surfaces locale à partir de la position moyenne des nuages qui se trouvent à l'intérieur d'un cylindre de diamètre (d) et orienté le long de vecteur normal (N). La position entre les deux surfaces est séparée par une distance ($L_{M3C2}(i)$) (Étape 2, 3.7).

Pour affiner les mesures de distance, M3C2 utilise la rugosité locale le long du vecteur N comme l'incertitude de leur position moyenne (Étape 2), ce qui nous permet de définir un intervalle de confiance LoD (équation 3.2) spatialement variable associé à chaque mesure de distance et qui est fixé dans le cadre de notre étude à 95% ($LoD_{95\%}$).

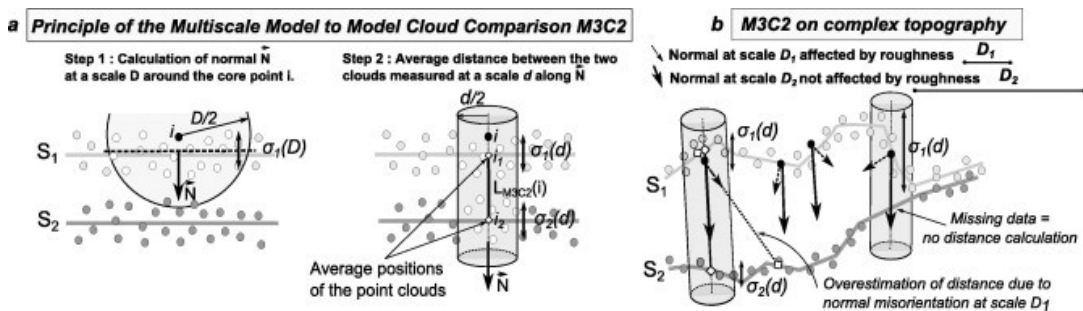


FIGURE 3.7 – Les étapes de l'algorithme M3C2, (source : [85])

$$LoD_{95\%}(d) = \pm 1,96 \left(\sqrt{\frac{\sigma_1(d)^2}{\eta_1} + \frac{\sigma_2(d)^2}{\eta_2}} \right) + reg \quad (3.2)$$

Avec :

$\sigma_1(d)$ et $\sigma_2(d)$: La rugosité des nuages de points mesurée dans la direction de vecteur N dans un cylindre de diamètre (d)

η_1 et η_2 : Les tailles choisis pour définir les positions moyennes i_1 et i_2

Reg : L'erreur de coregistration entre deux levées. Cette erreur est supposée uniforme.

Pour appliquer la méthode M3C2 on doit définir deux paramètres :

1. $\langle D \rangle$: l'échelle et l'orientation de la normale sont utilisées pour calculer la surface normale de chaque point qui dépend de la rugosité et la géométrie des nuages de points. Dans le cas des ravines de berges nous avons tout d'abord appliqué un modèle local de forme $\langle \text{Quadric} \rangle$ selon l'axe préférentiel pour orienter le nuage de point de référence vers le nuage de points de comparaison. Ensuite nous avons choisi la valeur de $D/2 = 10$ cm pour chercher des points voisins dans le nuage de référence en prenant en considération la rugosité de terrain.
2. $\langle d \rangle$: l'échelle de projection, ou le diamètre du cylindre dans lequel la distance moyenne de chaque surface du nuage de points est calculé. Dans cette étude nous avons utilisé une valeur de $d = 20$ cm.

3.3 Résultats et discussion : des pluies efficaces aidées par la dégradation des sols issue des activités anthropiques parfois anciennes provoquent une sédimentation importante dans le lac

3.3.1 Analyse des précipitations

À l'échelle mondiale le processus de ravinement se déclenche après que les précipitations aient dépassé un seuil critique. Il convient donc de caractériser les précipitations dynamisant ce processus, dans un contexte climatique semi-aride forcé par les aléas du changement climatique.

Les données de pluviométrie vont nous permettre de mieux comprendre et justifier l'apparition des systèmes ravinaires sur les berges lacustres. Sur le lac, la tendance dominante de pluviométrie est centrée sur la saison humide. Les fortes intensités pluvieuses provoquent le ruissellement qui peut déclencher le phénomène de ravinement et favoriser le développement des réseaux de ravines (réseaux de drainage) très denses.

Série des précipitations entre 2003 et 2018

L'analyse de la série climatique des précipitations entre 2003 et 2018 de la station de Rambla de Algeciras (Figure 3.8), montre un découpage de l'année en deux grandes saisons : la saison sèche se situe entre Juin et Septembre et une saison humide entre Octobre et Mai. Pendant la saison sèche les berges lacustres reçoivent une quantité de pluie moyenne de moins de 14 mm. En revanche les précipitations les plus importantes sont enregistrées pendant la saison humide avec des valeurs moyennes qui dépassent les 22 mm.

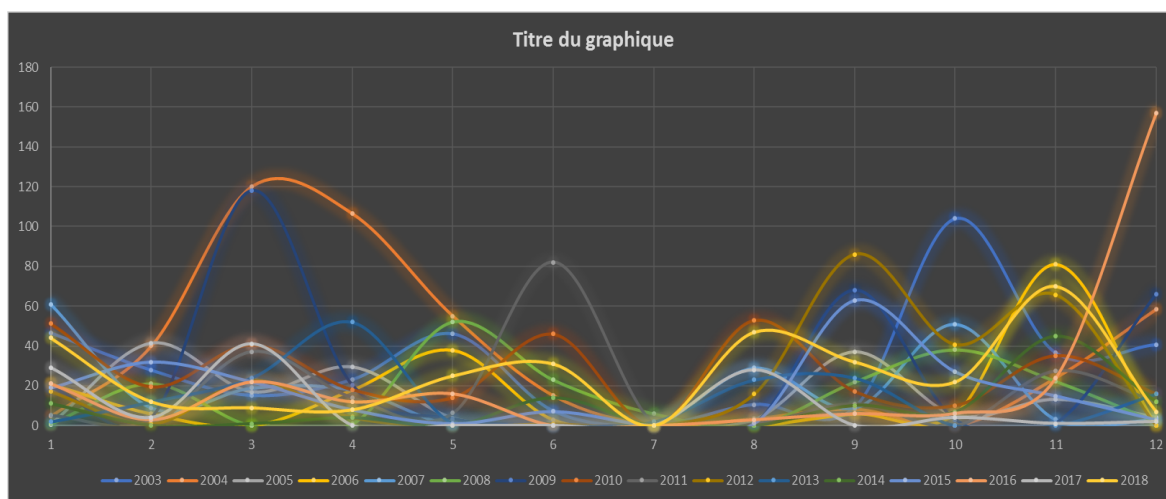


FIGURE 3.8 – Le graphe des précipitations mensuelles entre 2003 et 2018

Événements pluvieux entre 2009 et 2016

Le 24/11/2009 une première mission aérienne de prise de mesures LiDAR a été réalisée dans le cadre du projet PNOA sur le lac. Sept ans plus tard une deuxième mission a été effectuée les 20 et 25 Août 2016 dans le cadre du même projet. Durant cette période la

station météorologique a enregistré quelques événements extrêmes (figure 3.9) avec une légère diminution en pluviométrie moyenne annuelle.

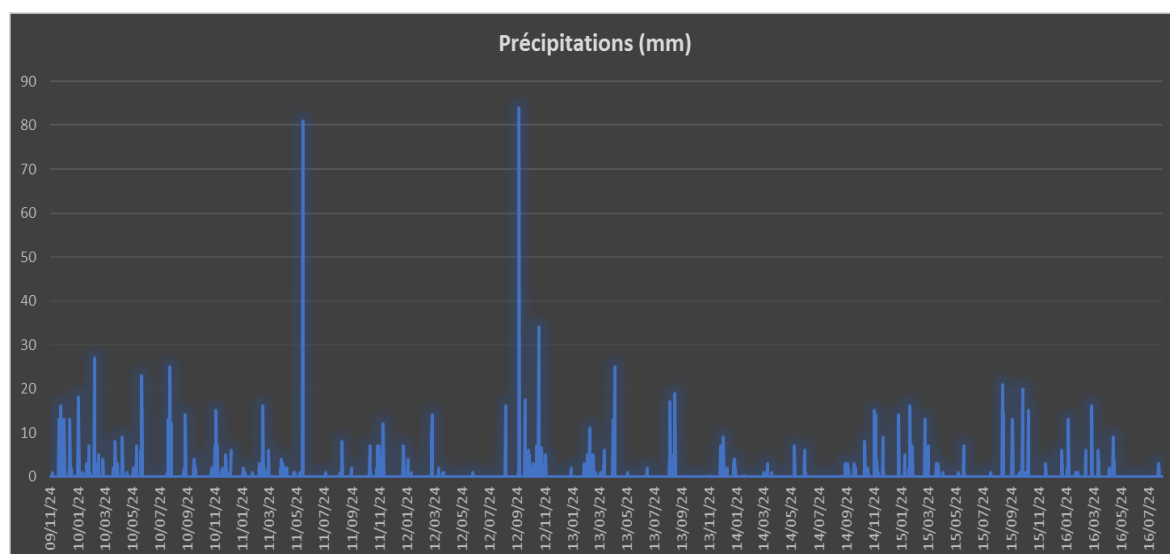


FIGURE 3.9 – Le graphe des précipitations journalières entre 24/11/2009 et 24/08/2016

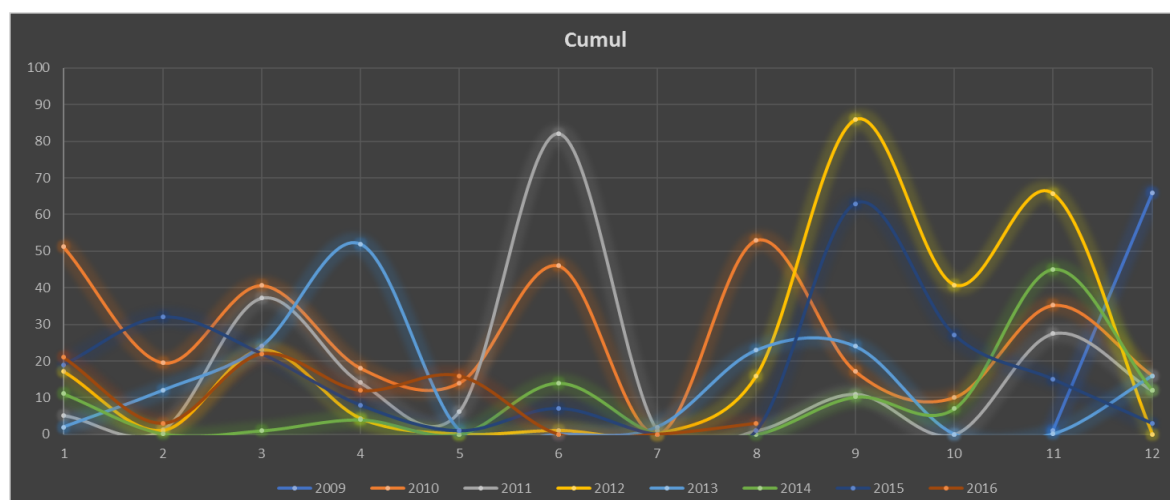


FIGURE 3.10 – Le graphe des précipitations mensuelles entre 24/11/2009 et 24/08/2016

La figure 3.10 permet d'avoir une idée des rythmes et des moyennes des précipitations moyennes mensuelles sur plusieurs années. Les précipitations moyennes mensuelles les plus intenses révélées en Mars, Juin et Octobre ont participé au modelage des ravines de berges étudiées à partir de 2018.

Événements pluvieux en 2018

L'année 2018 présente une année humide avec des précipitations annuelles de l'ordre de 25,6 mm. Les précipitations mensuelles dépassent 27,5 mm en saison sèche. Pendant cette saison le pic des pluies a atteint 34 mm (Figure 3.11). Cependant durant la saison humide les précipitations mensuelles sont de l'ordre de 24,6 mm, cette saison est caractérisée par un pic de 44 mm au mois d'août.

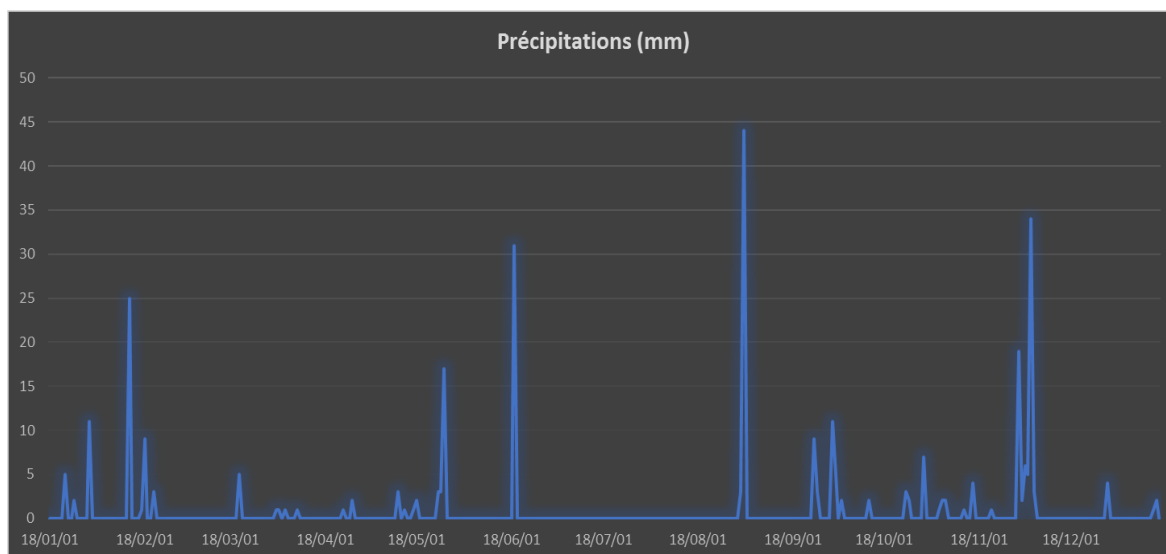


FIGURE 3.11 – Le graphe des précipitations journalières en 2018

Événements extrêmes

Les indices des événements météorologiques extrêmes peuvent être définis comme des événements rares dans leurs distributions de référence statistique, à un endroit particulier [1]. Les indices des événements extrêmes des précipitations sont utilisés pour la détection du changement climatique. Ils permettent aussi de comprendre l'impact du changement climatique sur l'accélération du processus de ravinement.

Les événements extrêmes rares et très rares ont été identifiés à l'aide de l'indice **prec90p** de projet STARDEX (*Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions*).

L'indice prec90p permet de déterminer les événements de fortes pluies et les pluies intenses lorsque les valeurs des précipitations journalières cumulées sont respectivement supérieures ou égales à 90^{eme} et 95^{eme} percentile.

Entre 2009 et 2016 il y a eu deux fortes averses : le 07 juin 2011 avec des précipitations cumulées de 81 mm en 2 h et une forte intensité des précipitations qui dépasse les 40 mm/h; ensuite le 28 septembre 2012 les précipitations cumulées étaient de 84 mm sur 4 h et une intensité de 21 mm/h.

Ces deux épisodes pluvieux sont considérés comme deux événements extrêmes qui, automatiquement, ont un rôle important d'érosion.

La modification du régime des précipitations avec la diminution de la quantité des précipitations et des jours pluvieux ainsi que la fréquence plus importante des événements rares et très rares durant les huit ans des levés topographiques, peut s'expliquer par l'effet des changements climatiques dans la zone méditerranéenne.

Nombre de jours pluvieux

Le nombre de jours pluvieux pour une station météorologique est un paramètre climatique permettant d'illustrer la distribution temporelle de la pluviométrie annuelle et de donner ainsi des indications sur les jours à risque pour les processus érosifs. Entre le 24/11/2009 et le 25/08/2016, 295 jours ont été enregistrés ce qui correspond à 0,125 jours/an; sur la période 2003- 2018, le nombre a diminué à 0,123 jours/an; par contre, en 2018 le nombre de jours pluvieux a atteint 0,13 jours/an, ceci témoigne que l'année 2018 est une année humide (Tableau 3.4).

TABLEAU 3.4 – Le nombre de jours pluviaux durant la période 2003-2018

Périodes d'observation	Nb de jours de pluie
2003 - 2018	719
2009 - 2016	295
2018	48

3.3.2 L'agressivité climatique

Le facteur-R a été estimé selon l'équation 3.3 (zone-2) proposée par ICONA sur la région de Murcie. L'analyse mensuelle du facteur R trace l'évolution de l'agressivité des pluies sur les ravines entre la période d'étude 2009 et 2016 ainsi que pour l'année 2018. Entre 2009 et 2016 l'activité dévastatrice des pluies est concentrée annuellement aux mois de mars et septembre. Cette activité est liée à l'augmentation des épisodes pluvieux intenses durant cette période. Sur toute la période 2009 - 2016, les pics de facteur-R sont enregistrés en Juin 2011 et Septembre 2012, ce qui coïncide avec une anomalie dans l'énergie cinétique expliquée par l'enregistrement de deux phénomènes extrêmes.

L'année 2018 est relativement humide impliquant donc une augmentation naturelle du facteur R. À partir du figure 3.12 nous pouvons constater que la valeur moyenne de R, calculée pour la saison humide, est assez faible en comparaison de celle de la saison sèche. Pendant la saison humide les valeurs de R sont modérées avec une moyenne de 8 MJ.cm.ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹, par rapport à la saison qui a enregistré une moyenne de 17 MJ.cm.ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹. Les valeurs les plus basses sont enregistrées entre les mois de février et avril. Inversement, lors de la saison sèche, la valeur cumulée de R la plus élevée est de 102 MJ.cm.ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹, et elle est associée à des précipitations très intenses aux mois d'août et de novembre.

$$R = e^{-1,235} * PMEX^{1,297} * MR^{-0,511} * MV^{0,366} * F_{24}^{0,414}; \quad (3.3)$$

R : L'agressivité climatique (MJ.cm.ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹)

PMEX : La valeur mensuelle maximale (mm)

MR : Les précipitations cumulées entre Octobre-Mai (mm)

MV : Les précipitations cumulées entre Juin-Septembre (mm)

F₂₄ : L'indice de Fournier (mm) avec $F_{24} = \frac{(P_{24h,annuel})^2}{\sum_{i=1}^{12} P_{24h,i}}$

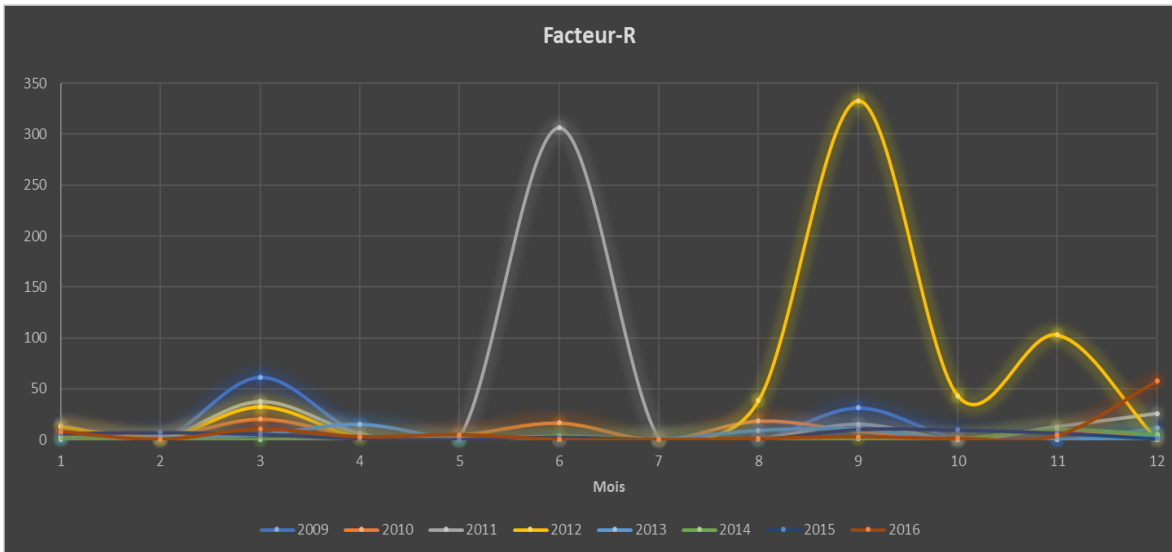


FIGURE 3.12 – Le graphe de facteur-R entre 2009 et 2016

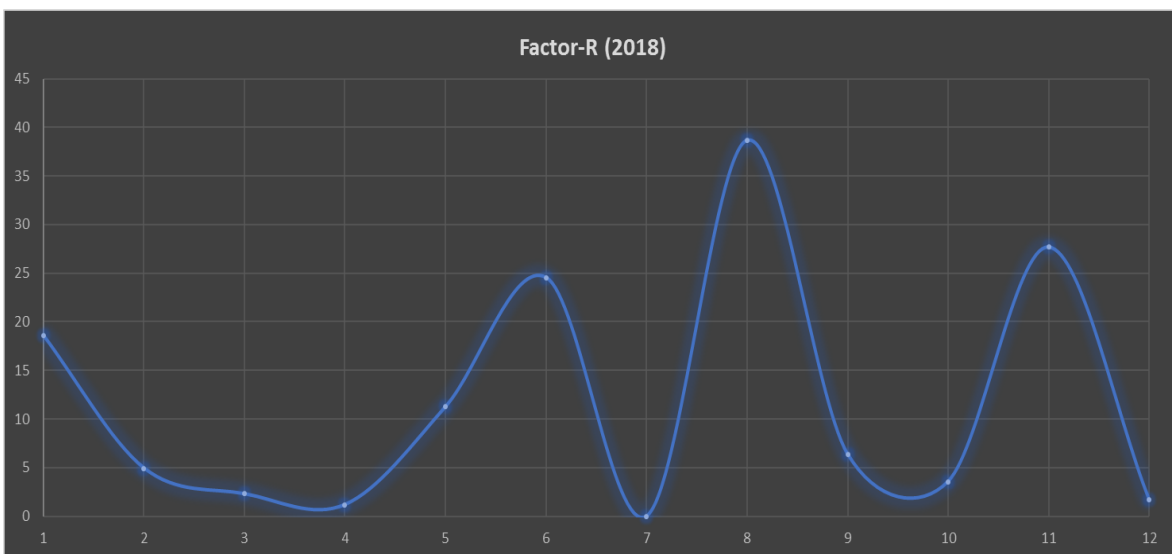


FIGURE 3.13 – Le graphe de facteur-R en 2018

Le ravinement est étroitement lié à l'intensité des précipitations. Lors des épisodes pluvieux extrêmes, le ruissellement est plus accentué, engendrant une désagrégation des particules du sol qui seront emportées puis déposées en aval. Dans le cas des ravines des berges lacustres, la variabilité des épisodes pluvieux extrêmes conduira à augmenter la vitesse de comblement du réservoir.

3.3.3 Traitement des photos prise par le drone

La collecte des données

Altitude du vol

Les acquisitions des données SfM-MVS-4D par drone ont répondu à nos besoins en termes de précision, et fréquence de suivi des ravines de berges lacustres.

Lors de la prise de vue, l'altitude du vol est restée quasi-constante sur chaque site et pendant les trois missions, ce qui nous permet de garder la même résolution pixellaire pour chaque ravine. Le drone a survolé les ravines à une altitude variant entre 28 et 37 m ce qui nous permet de garantir la résolution adéquate pour le suivi des changements topographiques des ravines. Nous notons également que le choix de ces altitudes nous permet d'assurer un petit rapport B/h de l'ordre de 0,6, afin de minimiser au maximum la surface des zones cachées.

Acquisition oblique

Les résultats des nuages de points denses obtenus par une prise de vue verticale apportent beaucoup d'informations sur la topographie des ravines (B.G- 1&2) par rapport à la ravine (B.G-3). Cependant, notons que les photos prises sur la ravine (B.G-3) avec une caméra verticale ne couvrent pas la totalité de la zone étudiée. En effet, le surplomb, ayant une géométrie verticale, n'a pu être pris en considération. Par ailleurs, les photos réalisées à l'aide d'une caméra oblique ont été très utiles pour relier la base et le sommet des versants en surplomb de ravin.

Sur les ravines (B.G-1 et B.G-2) les photos aériennes sont prises au nadir. L'application de l'approche intégrée des deux configurations de vol, à savoir l'acquisition nadir (90°) et oblique (30°), permet de renforcer la géométrie du réseau des photos sur la ravine (B.G-3). Cette technique de prise de photos obliques augmente le taux de recouvrement entre les photos permettant d'une part de densifier la densité des nuages de points et d'autre part de combler le vide créé par la complexité topographique des ravines (surplomb). Ceci réduit donc les erreurs de géoréférencement liées principalement à la faible précision des points GCPs. Nous constatons que l'approche intégrée a considérablement diminué le RMSE en XYZ des points GCP sur la ravine (B.G-3) avec une moyenne qui ne dépasse pas 1,4 cm en X, 1,2 cm en Y et 1,3 cm en Z pendant les trois missions en sachant que les points GCP sont passés de 16 points à 12 points lors de la dernière mission. Pour les ravines (B.G-1 ; 2) c'est le contraire, puisque les erreurs RMSE sont élevées et varient entre 2 et 5 cm.

Traitement des photos aériennes

Les photos verticales et obliques sont assez contrastées étant donné que l'angle entre les deux modes de prises de vues fluctue très fortement le long de la même fauchée. L'alignement dans le logiciel *PhotoScan* des photos provenant de deux angles a échoué. Les résultats de l'alignement des deux modes de prises de vues contiennent seulement le nuage de points clairsemés des photos prises au nadir. Pour régler ce problème nous avons alors réaligner toutes les photos à l'aide des points GCP communs sur les deux photos ainsi qu'avec les données de géolocalisations des photos avant d'appliquer le modèle d'ajustement de faisceau.

Ensuite nous avons inclus les paramètres suivants, de la caméra : Fit f, cx, cy, k1, k2, k3, p1, p2 (tableau 3.5) qui ont amélioré le modèle de caméra et réduit les erreurs RMSE des

photos ainsi que les écarts aux réseaux de points GCP. Les paramètres ont été choisis selon l'analyse de corrélation où les paramètres de forte corrélation ont été éliminés afin d'éviter le sur-paramétrage du modèle de caméra.

TABLEAU 3.5 – La corrélation entre les paramètres de la caméra

	cx	cy	Fit f	k1	k2	k3	p1	p2
cx	1							
cy	-0,04	1						
Fit f	-0.61	-0.22	1					
k1	-0.05	0.01	-0.07	1				
k2	0.12	0.02	0.06	-0.80	1			
k3	-0.06	-0.02	-0.08	0.90	-0.89	1		
p1	0.33	0.17	0.51	-0.03	0.02	0.01	1	
p2	-0.03	0.76	0.22	0.02	0.00	0.01	0.17	1

Sur le terrain, le temps de prise des photos par drone est rapide, mais le tri des photos, le géoréférencement, la génération de nuages de points ainsi que le post-traitement des nuages de points prennent plus d'un mois pour chaque mission. Les temps de traitements et de calculs sont des facteurs très importants qui doivent être pris en considération dans la chaîne de traitement des données SfM.

Les résultats de qualité, de précision et de surface modélisés par les nuages de points issus des calculs du logiciels *PhotoScan* nous ont permis d'être confiants face aux paramétrages utilisés par cette boîte noire.

Décimation et interpolation des nuages de points

Après le nettoyage et la double coregistration des nuages de points denses brutes, nous avons utilisé l'outil *ToPCAT* pour décimer les nuages de points denses à des dimensions d'échantillonnages variant entre 0,05 à 5 m en X et Y, avec un minimum de quatre points par maille, afin obtenir plusieurs résolutions pour chaque modèle numérique de terrain. La taille des mailles de décimation est choisie de façon à ce que la complexité topographique puisse être représentable dans le modèle numérique de terrain (un écart-type élevé). À cet effet, nous avons examiné la variation de la complexité topographique en fonction des différentes résolutions spatiales de chaque modèle numérique de terrain. L'évaluation de la variation de complexité topographique est estimée dans le cas des ravines de berges à l'aide de deux principaux indicateurs géospatiaux, à savoir, la rugosité de la surface et la pente locale.

Les statistiques descriptives sur les deux indicateurs géospatiaux montrent une forte corrélation entre la taille de maille de décimation et la complexité topographique. Les graphes 8, 9 et 10 déterminent la relation entre la moyenne et l'écart-type de la rugosité et la taille de la maille. Les résultats statistiques révèlent une perte de rugosité de 5% pour le site 1 et 3 et de 7% pour le site 2, associée à une augmentation de la taille de maille oscillant entre 0,1 et 2 m. De même l'indicateur de pente montre que le terrain s'aplatit avec une augmentation de la taille de maille. Les graphes 8,9 et 10 indiquent une perte de rugosité de terrain en passant de 5 cm à 10 cm pour les trois sites d'étude.

Suite à l'examen des variations de complexité topographique, la taille des pixels des modèles numériques de terrain va permettre de définir la résolution de 0,05 m comme une

résolution adéquate pour la décimation et pour la résolution des pixels des modèles numériques de terrain, afin de conserver au maximum la complexité topographique des ravines.

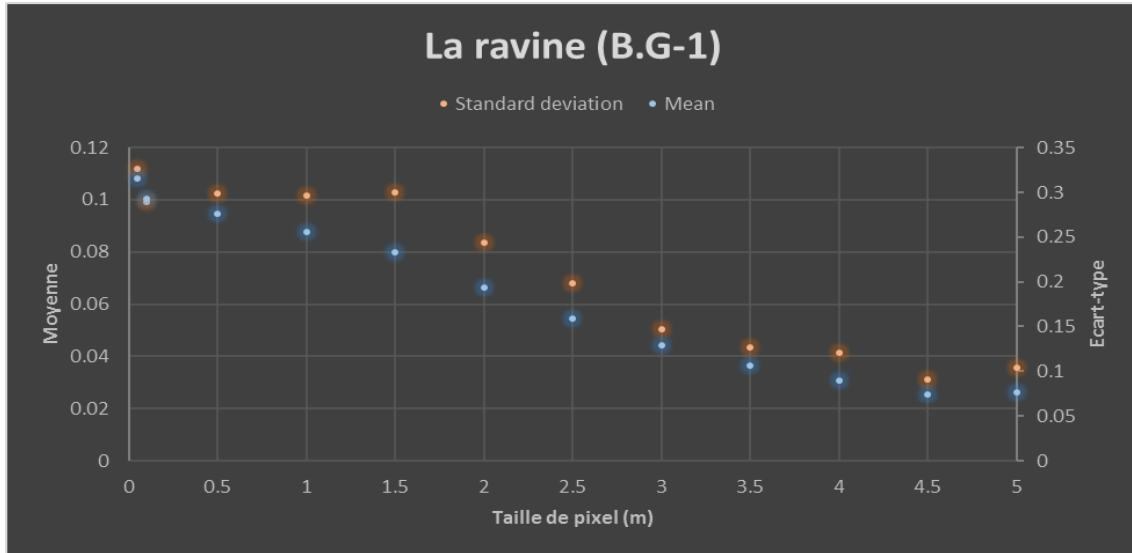


FIGURE 3.14 – Le graphe de variation de la moyenne et l'écart-type du rugosité en fonction de la résolution spatiale pour le site 1

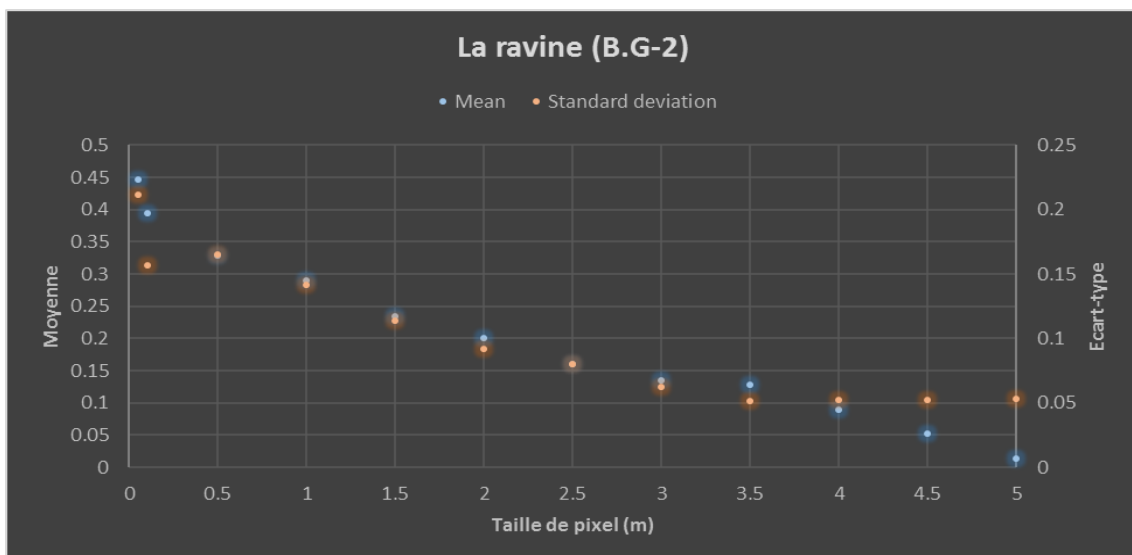


FIGURE 3.15 – Le graphe de variation de la moyenne et l'écart-type du rugosité en fonction de la résolution spatiale pour le site 2

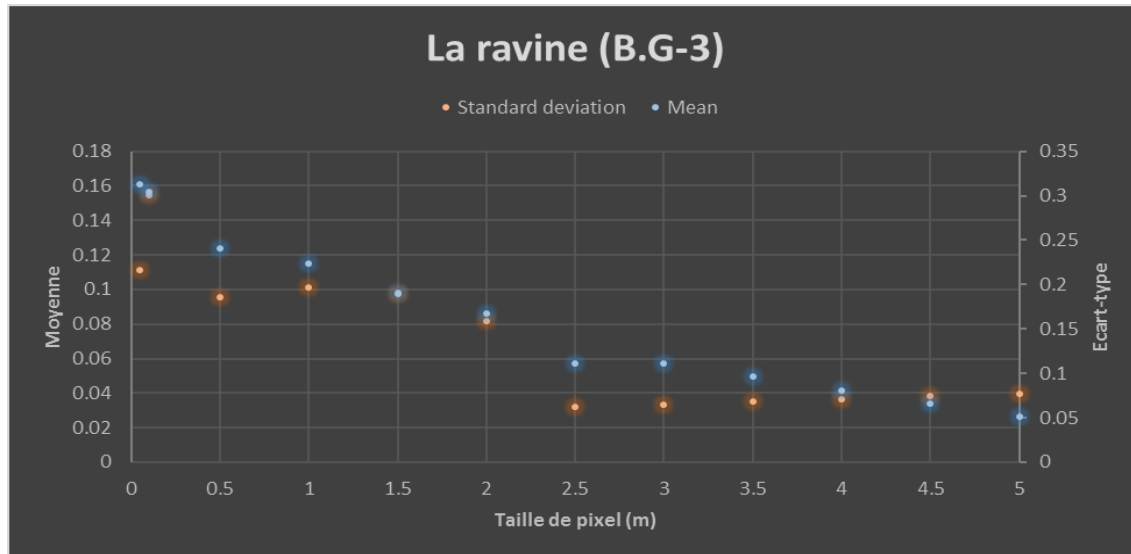


FIGURE 3.16 – Le graphe de variation de la moyenne et l'écart-type du rugosité en fonction de la résolution spatiale pour le site 3

3.3.4 Modélisation des erreurs

Dans cette partie nous nous intéresserons principalement à l'application et la comparaison des différentes techniques de quantification des erreurs liée à la collecte et aux traitements des données SfM-MVS-4D. Travaillant sur des ravines de topographie complexe, la quantification des erreurs liées aux données SfM-MVS le long de trois types de ravine de berge, permet d'une part d'analyser la fiabilité de la méthodologie adoptée pour la collecte des données, et d'autre part de quantifier avec une grande précision le bilan sédimentaire sur une année relativement humide.

Erreurs de géoréférencement

Les valeurs moyennes d'incertitudes des points GCP en XYZ étaient 1,5 cm (X), 2,4 cm (Y) et 5 cm (Z) (tableau 3.6). Ces résultats de traitement des données DGPS ont mis en évidence un défaut dans la méthodologie de collecte de réseau des points GCP. Les points installés au fond des ravines ont une faible précision par rapport aux autres. Elle n'excède pas 4 cm, dans le meilleur des cas. Ceci s'explique par la mauvaise réception du signal GPS au fond des ravines. La faible précision de certains points a réduit la précision générale de réseau des points GCP, mais cette incertitude des points GCP ne remet pas en cause la précision des résultats puisque les trois sites d'études ont été couverts par un réseau de photos de forte géométrie qui témoigne, par l'absence totale d'erreurs systématiques, de la forme des surfaces telle que l'apparition des dômes.

Dans notre cas d'étude, pour géoréférencer un réseau de photos avec un fort recouvrement, nous avons utilisé un réseau de points GCP bien répartis spatialement mais de faible précision. Ceci a amélioré considérablement le géoréférencement des nuages de points, où la valeur de l'erreur moyenne RMES XY vertical est inférieure à 2 cm pour le 1 et le 2 site et elle ne dépasse pas 1,3 cm pour la troisième ravine (Tableau 3.6).

Le renforcement de la géométrie des réseaux des photos aériennes, utilisant un taux élevé de recouvrement, ou bien avec la combinaison de deux modes d'acquisitions oblique et nadir, nous a permis d'obtenir des mesures internes très précises mais faiblement géoréférencées dans le système de coordonnées externe. Comme les points GCP placés au fonds

des ravines ont causé une dégradation de la qualité de leur réseau de points, il faut s'assurer que l'erreur des résultats SfM-MVS-4D soit acceptable.

TABLEAU 3.6 – Les erreurs RMES en X, Y et Z des trois ravines pendant les trois missions

Sites	Ravine (G, B-1)			Ravine (G, B-2)			Ravine (G, B-3)		
Missions	M-I	M-II	M-III	M-I	M- II	M-III	M-I	M-II	M-III
X (cm)	1,93	2,96	2,17	3,26	4,94	4,47	1,46	1,01	1,18
Y (cm)	2.19	3.13	2.37	3.36	4.53	4.46	1.27	1.60	1.82
Z (cm)	5.32	5.13	4.87	5.3	5.79	5.67	1.36	1.44	1.98

L'analyse de l'incertitude des points de contrôle a montré une forte dégradation de précision des points de contrôle en fonction des profondeurs des ravines. Ceci est due à la mauvaise réception du signal GPS au fond des ravines, ce qui nous a conduit à ne pas utiliser les points GCPs pour la validation des nuages de points. Dans cette étude nous avons choisi d'évaluer la qualité des données par trois méthodes.

L'incertitude de la double coregistration

Nous avons présenté dans la méthodologie la procédure employée pour la coregistration des nuages de points denses à l'aide de l'algorithme ICP qui permet d'augmenter considérablement la précision de géoréférencement des données SfM-MVS-4D dans un système de géoréférencement externe.

L'incertitude de coregistration est l'une des principales sources d'erreurs dans la détection des changements entre deux nuages de points. Même avec de faibles incertitudes de coregistration entre chaque paire de nuages de points denses, le risque d'amplification d'incertitude augmente avec la résolution temporelle de collecte des nuages de points. Pour amoindrir le risque nous avons procédé par la coregistration par paires de nuages de points.

Nous cherchons ici à évaluer la qualité des nuages de points denses issus d'une double coregistration (GCP et ICP). L'incertitude des données est modélisée à l'aide de trois modèles spatialement variables : L'algorithme C2C, la validation croisée et la méthode FIS.

C2C (Cloud to Cloud)

Les résultats de cette technique montrent que la distance moyenne absolue entre deux nuages de points calibrés avec la technique de double coregistration varie entre 2 mm et 5 mm pour la ravine (B.G 1;2) et il ne dépasse pas les 1,6 mm pour le 3ème site (Tableau 3.7). Ainsi, l'utilisation des points GCP avec la technique ICP est satisfaisante en termes de précision. Par conséquent même la fréquence de collecte des données est une source d'incertitude (Tableau 3.7)

TABLEAU 3.7 – Les valeurs des distances absolues calculées par l'algorithme C2C

Sites	Ravine (G, B-1)		Ravine (G, B-2)		Ravine (G, B-3)	
Missions	M-I et M-II	M-I et M-III	M-I et M-II	M-I et M-III	M-I et M-II	M-I et M-III
L _{M3C2}	0,00273	0,00279	0,00592	0,00982	0,00143	0,00154
Écart type	0,0152	0,0158	0,0242	0,0489	0,0089	0,0092

Validation croisée

Les données d'entraînement et de validations sont construites en rééchantillonnage sans remise, ce qui nous permet de calculer l'incertitude sur les différents points des nuages. Cette méthode est plus robuste, plus stable et plus approfondie que le Bootstrapping (rééchantillonnage avec remise). A notre connaissance cette méthode n'a jamais été utilisée pour quantifier l'incertitude des nuages de points. La quantification de l'incertitude des nuages de points avec les outils de validation croisée s'est déroulée avec succès pour les trois ravines. L'analyse des résultats d'incertitudes obtenue par la méthode de validation croisée montre que la différence absolue peut aller jusqu'à 0,5 m, mais la distribution fréquentielle montre une dissymétrie avec une moyenne absolue pour les trois ravines ne dépassant pas 0,08 m et un écart-type de 0,09. Ces résultats sont proches des résultats issus de la technique C2C.

L'analyse répétitive de l'incertitude sur les trois ravines met en lumière les aspects de la structure spatiale de l'incertitude. L'interprétation visuelle des résultats (Figure 3.17,3.18,3.19) suggère que les fortes valeurs d'incertitudes ont tendance à être concentrées dans les talwegs (principaux et secondaires), et sur quelques parties des versants. En revanche les faibles valeurs se trouvent globalement sur les zones planes et aux sommets des ravines. Les valeurs d'incertitudes sont tracées en fonction de la pente et de la rugosité. Sur la carte, il apparaît que toutes les fortes valeurs d'incertitudes sont fortement corrélées avec les pentes raides et les zones de forte rugosité ce qui met en relation la répartition spatiale des incertitudes avec la complexité topographique et la rugosité de terrain. Il faut conclure que la rugosité et la pente sont les principales sources d'erreurs.

Dans plusieurs des études menées, afin de déterminer la précision des données SfM-MVS, les levées GPS des points GCP sont comparées avec le produit final (MNTSfM-MVS). Cette confusion est entretenue à dessein, comme si l'incertitude des données SfM-MVS était liée seulement à la qualité des levées GPS, et que la géométrie des prises de photos ne pouvait pas améliorer la précision des données. Dans notre cas des ravines de berges, la possibilité d'utiliser un nombre de photos élevé, de fort recouvrement, d'inclure des photos obliques ainsi que la double coregistration des nuages de points avec l'algorithme ICP nous a permis de compenser et d'améliorer les faiblesses de géoréférencement par les points GCP.

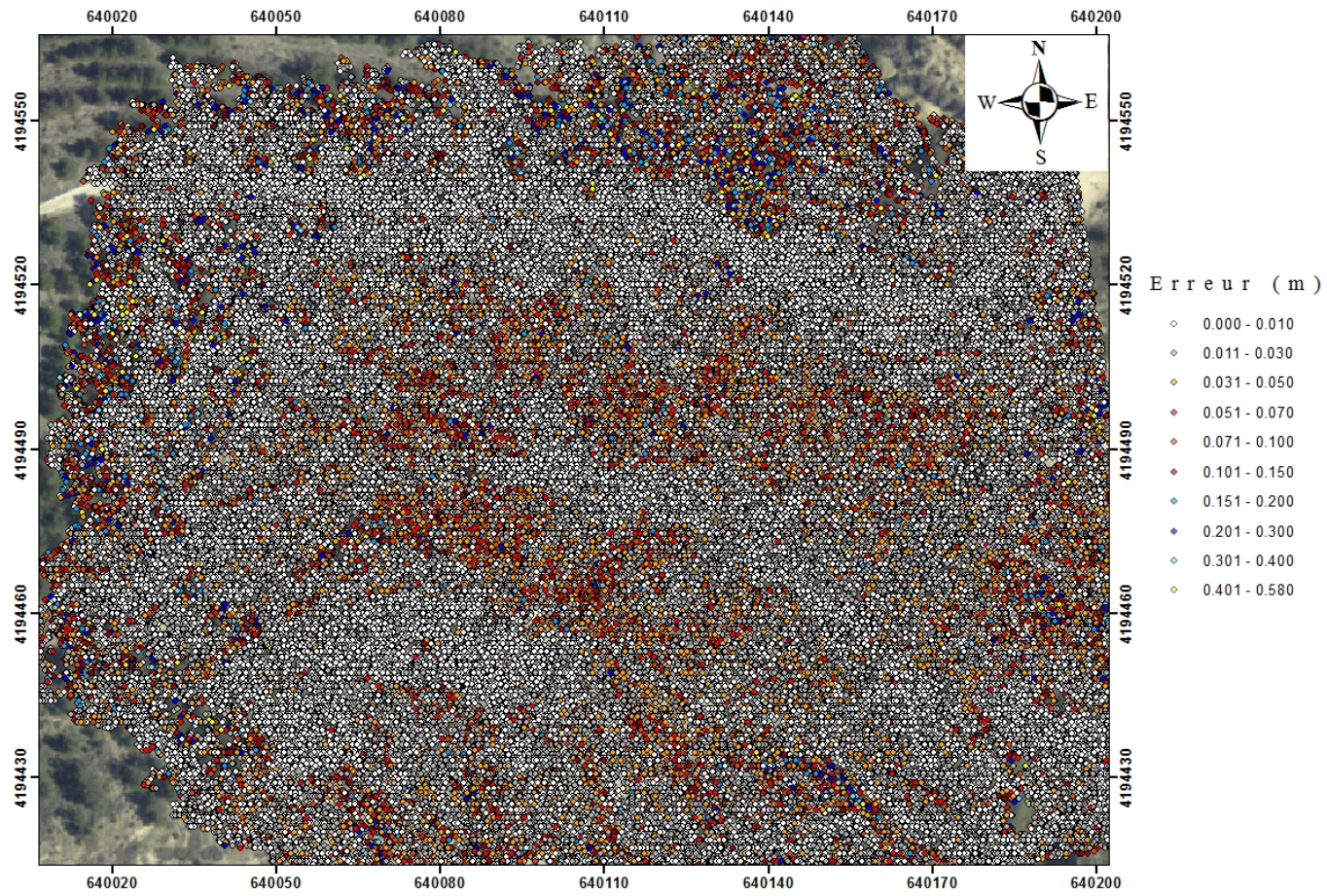


FIGURE 3.17 – L'incertitude des nuages de points estimée par la validation croisée sur la ravine (G, B-1) (Hout 2019)

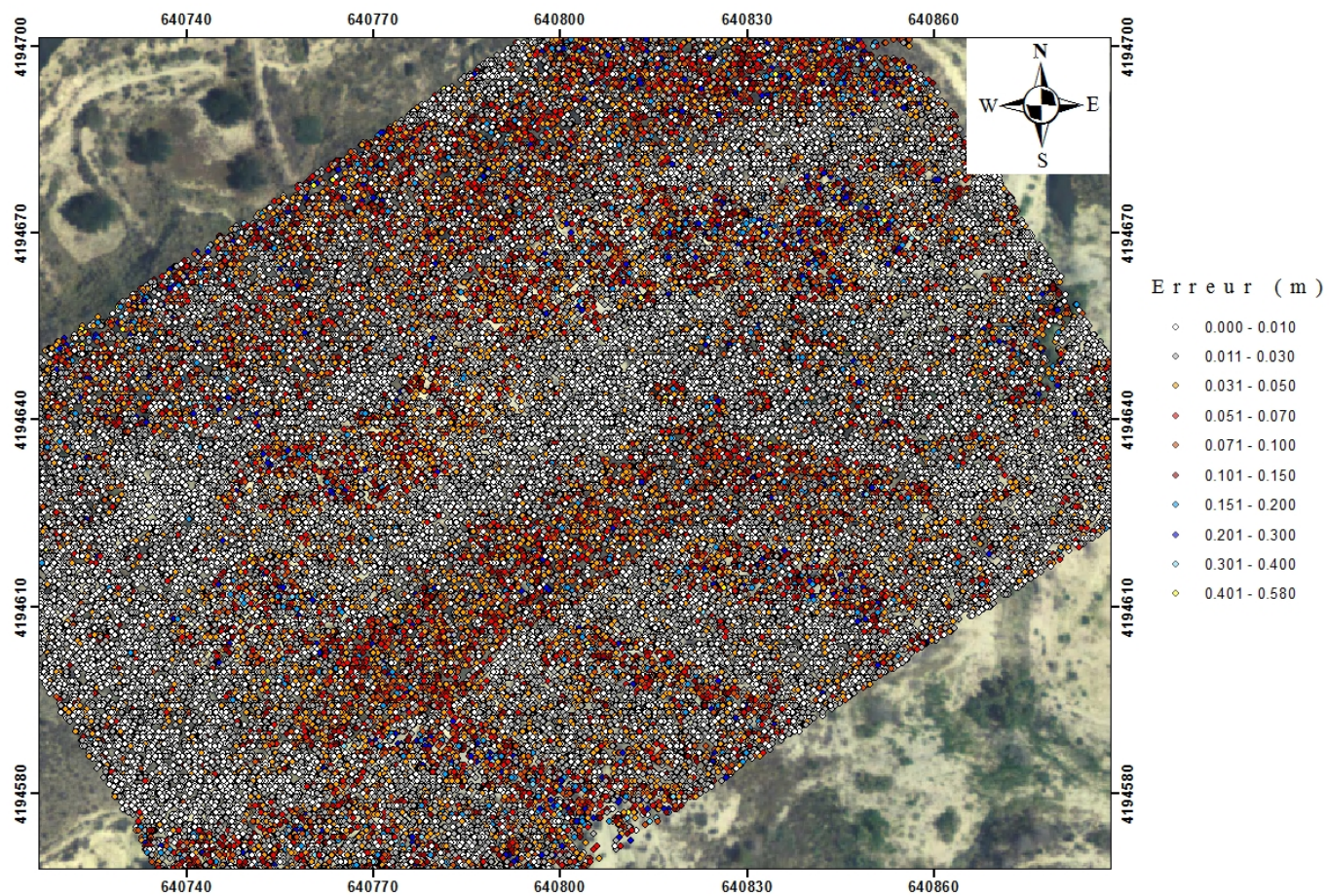


FIGURE 3.18 – L'incertitude des nuages de points estimée par la validation croisée sur la ravine (G, B-2) (Hout 2019)

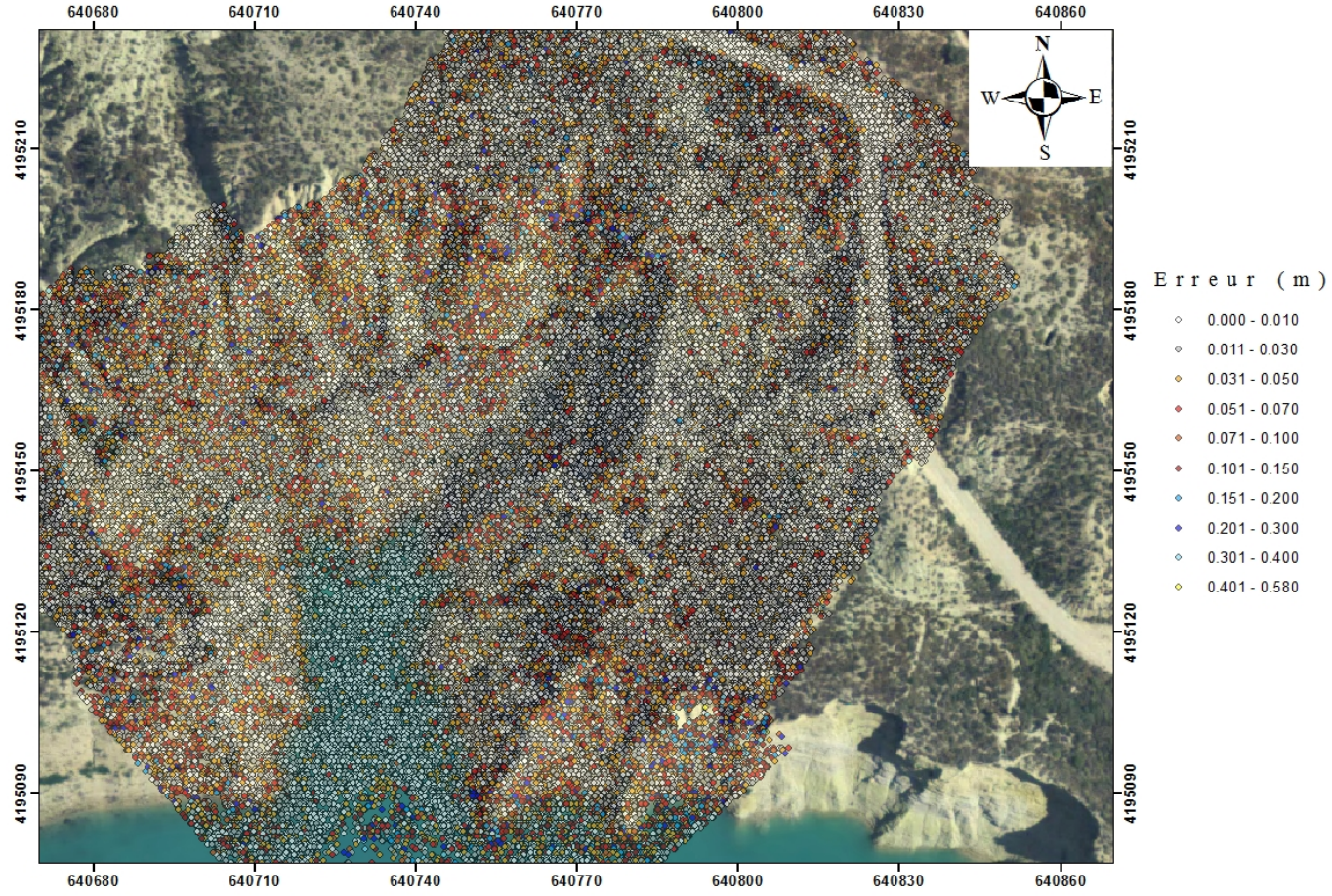


FIGURE 3.19 – L’incertitude des nuages de points estimée par la validation croisée sur la ravine (G, B-3) (Hout 2019)

Le système d'inférence floue <FIS >

Les résultats de la détection des changements géomorphologiques par la technique DoD sont influencés par le type de modèle d'erreur utilisé (spatialement uniforme ou variable). Les modèles spatialement uniformes, peuvent entraîner des surestimations ou des sous-estimations des changements topographiques.

Le modèle FIS quant à lui, permet de témoigner des changements grâce à sa meilleure résolution qui induit une meilleure interprétation des résultats. Ceci est due à sa capacité d'exclure le bruit qui est plus importante que pour les autres modèles. De plus il laisse une signature morphologique. Enfin, les résultats sont transcrits sous la forme d'un histogramme souvent bimodale. Cet outil facilite la quantification des changements réels des modèles topographiques.

Pour l'étude qui nous concerne, sur les trois ravines de berges, nous avons détecté les changements géomorphologiques des ravines avec des modèles FIS spatialement variables. Comme la résolution des données influe sur la détection des changements, nous avons choisi, d'utiliser ce modèle avec une résolution de 5 cm. Cette technique nous a permis de déceler pour nos modèles numériques de terrain, tous les changements possibles, même les plus petits.

3.3.5 Détection des changements géomorphologiques par drone

Toutes les mesures de détection de changement durant une période de temps représentent le résultat de l'agrégation de tous les processus géomorphologiques. Les valeurs positives sont attribuées à l'ensemble des processus de sédimentation, par ailleurs les valeurs négatives sont appropriées à tous les processus d'érosion. Selon la carte des changements établis par la technique DoD et l'erreur propagée FIS, au niveau des deux versants de la ravine B.G-1, il se produit de l'érosion avec une différence significative entre les deux. Cette différence est due essentiellement à l'exposition des deux versants.

Les résultats des deux techniques de détection des changements sont semblables mais diffèrent légèrement quant à la quantification des bilans sédimentaires. Cette petite différence correspond au modèle d'erreur utilisé par chaque technique. Les deux détections des changements sont mises en place par des modèles d'erreur spatialement variables. M3C2 utilise la rugosité et l'erreur de coregistration comme des variables de modèle d'erreur. Le FIS, lui, rassemble toutes les sources potentielles d'erreurs (pente, densité des points, l'erreur d'interpolation, l'erreur de MNT-SfM-MVS) pour obtenir un seul modèle d'erreur unique. Cela dit, il est possible que la technique M3C2 sous-estime le modèle d'erreur SfM-MVS.

DoD sur le site 1

De manière générale, le suivi du bilan sédimentaire sur la ravine de berge (B.G-1) permet de remarquer les changements importants pendant l'année 2018. La ravine de berge (B.G-1) se situe à 250 m du réservoir avec une forme en V.

En amont (tête) la ravine B.G-1 est recouverte par des strates arborées formant une couche protectrice. Dans cette zone de la ravine, les changements ne sont pas significatifs, mais la photo-interprétation des orthophotographies PNOA montre une forte dégradation du couvert végétal par le creusement de la tête de la ravine (Figure 3.20). Les orthophotographies générées par les données SfM-MVS ont permis de constater l'immobilisation importante des planches de bois sur le lit de la ravine (Figure 3.20). Sur le versant exposé au sud sud-ouest, la vitesse annuelle d'érosion entre la 1ère et la 3ème mission varie entre 30

et 60 cm/an avec une érosion verticale. A l'inverse, une faible vitesse d'érosion qui ne dépasse pas 10 cm/an a été enregistrée sur le versant exposé au nord nord-est. Cependant, la vitesse d'érosion n'est pas constante sur le même versant. Cela dit, la vitesse d'érosion ou de sédimentation varie selon la rugosité, la pente et l'exposition de chaque versant (Figure 3.20).

Il convient de remarquer que le bilan sédimentaire dressé sur la ravine (B.G-1) pendant la saison humide montre une domination de l'activité d'érosion sur l'ensemble de la ravine. Le versant sud sud-ouest présente les taux d'érosion les plus élevés de la ravine. En revanche, il y a des variations spatiales du taux d'érosion à l'intérieur du même versant, qui mettent en relief le contraste d'existence d'une variation d'occupation du sol en amont de la ravine.

Sur le lit de la ravine cette dynamique est inversée. Le transfert des sédiments vers le lit a généré un engraissement de celui-ci. Entre la première et la troisième mission, le taux de sédimentation calculé est de l'ordre de $442,31 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$ ce qui correspond à $353,85 \text{ T}/\text{ha}/\text{an}$ (Figure 3.20, D) qui n'arrive pas au retenue.

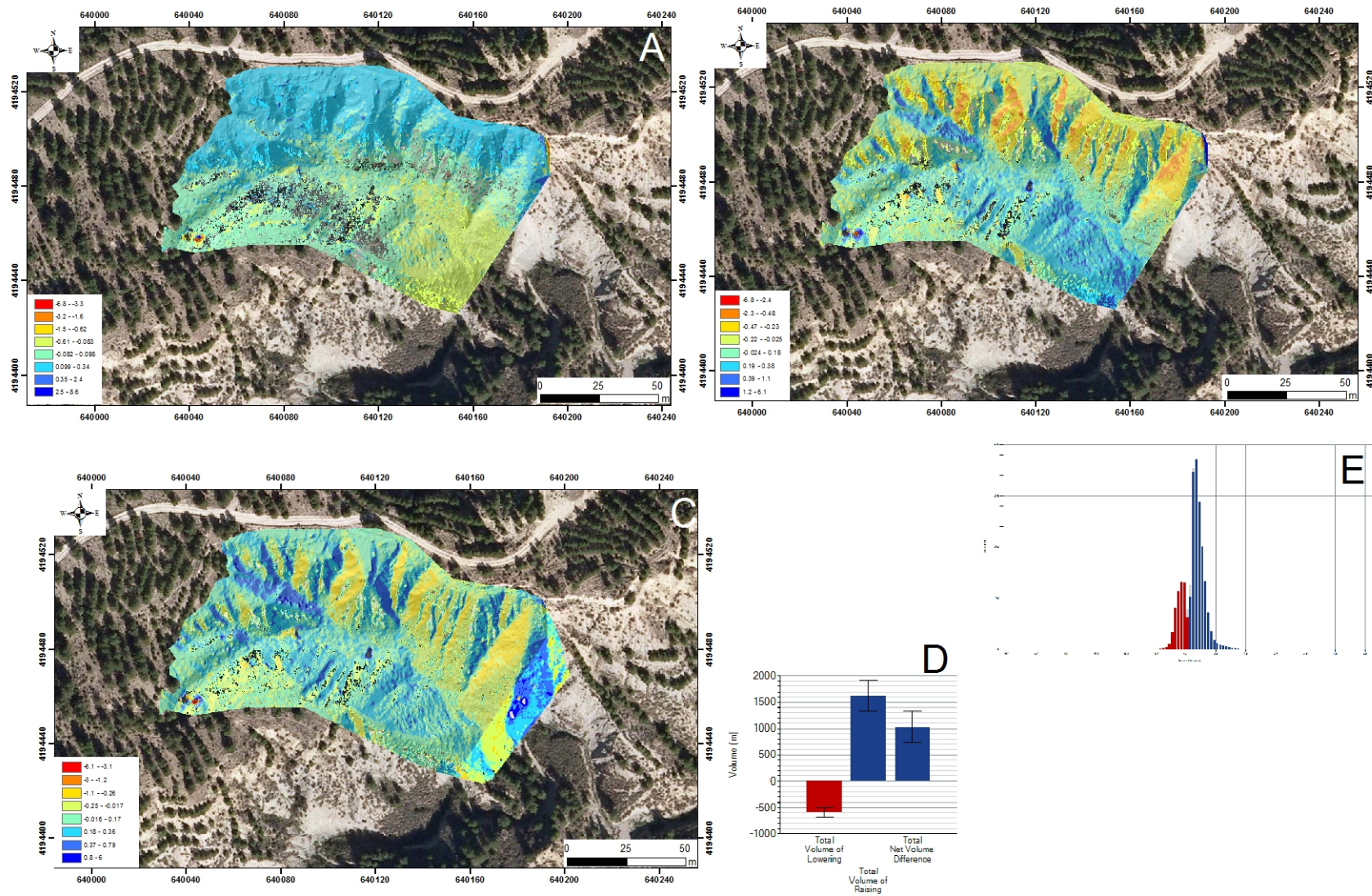


FIGURE 3.20 – La technique DoD entre la mission I et II; B : La technique DoD entre la mission II et III; C : La technique DoD entre la mission I et III; D : Le bilan sédimentaire; E : L’histogramme de répartition de volume, sur la ravine B.G-1 (Hout 2019)

DoD sur le site 2

La ravine B.G-2 en forme de U, localisée à proximité du réservoir, est fortement exposée à l'érosion. Les résultats mesurés par la méthode DoD ont encore mis en évidence la variation du taux d'érosion entre les deux versants de la ravine. Les résultats montrent une forte activité de la vitesse de sédimentation annuelle sur le versant exposé vers le nord contrairement au versant exposé sud dont la vitesse d'érosion annuelle dépasse 90 cm de creusement, De même, ainsi nous observons sur la carte des forts changements significatifs au niveau de tête de la ravine. Ces changements sont traduits par une vitesse d'érosion qui peut atteindre 2 m/an (Figure 3.21).

Sur le lit de la ravine nous observons le même phénomène de sédimentation que la ravine B.G-1 puisque ce secteur représente un bassin sédimentaire des éléments érodés par les berges et la tête de la ravine. Les résultats de la méthode DoD montrent que le taux de sédimentation annuelle au fond de la ravine est de l'ordre de $5330,1 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$ équivalent de $4264,1 \text{ T}/\text{ha}/\text{an}$ (Figure 3.21, D). Lors de remplissage maximale du lac le fond de la ravine correspond-il au fond du lac.

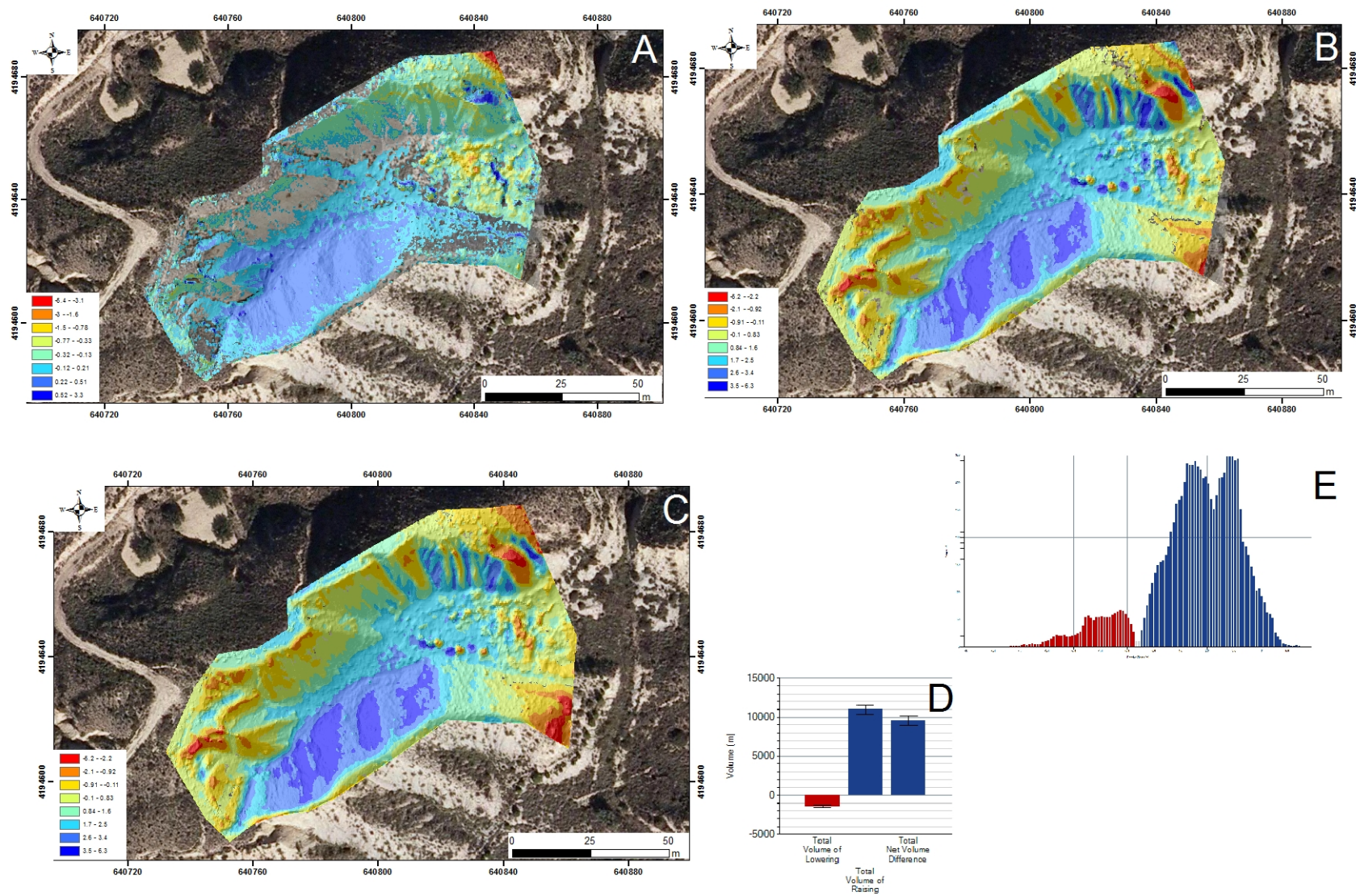


FIGURE 3.21 – La technique DoD entre la mission I et II; B : La technique DoD entre la mission II et III; C : La technique DoD entre la mission I et III; D : Le bilan sédimentaire; E : L'histogramme de répartition de volume, sur la ravine B.G-2 (Hout 2019)

DoD sur le site 3

Pour la ravine (B.G-3), le résultat du bilan sédimentaire révèle que le taux d'érosion est légèrement inférieur au taux d'accumulation pendant la saison humide. Ceci est due au fait que le niveau d'eau ait diminué de 1 m entre la première et la deuxième mission de terrain ce qui limite la capacité de transport des sédiments par la dérive littorale et les vagues (Figure 3.22), mais aussi que, dans son lit, la ravine a connu une forte activité de sédimentation après le brassage des eaux lacustres (dépôts de régression). Ainsi, durant cette saison, les berges lacustres ont été moins arrosées. Sur l'ensemble des versants, le taux de sédimentation est le plus important. Le volume des sédiments diminue de l'amont vers l'aval du lit de la ravine. Le profil de la variation longitudinale de la rugosité entre l'amont et l'aval du lit témoigne d'une diminution de la rugosité, expliquant la présence d'un granoclassement. A l'aval, la taille des sédiments est plus fine qu'en amont. Ces mesures ont permis de déterminer l'énergie de transport des sédiments par les eaux de ruissellement et la dérive.

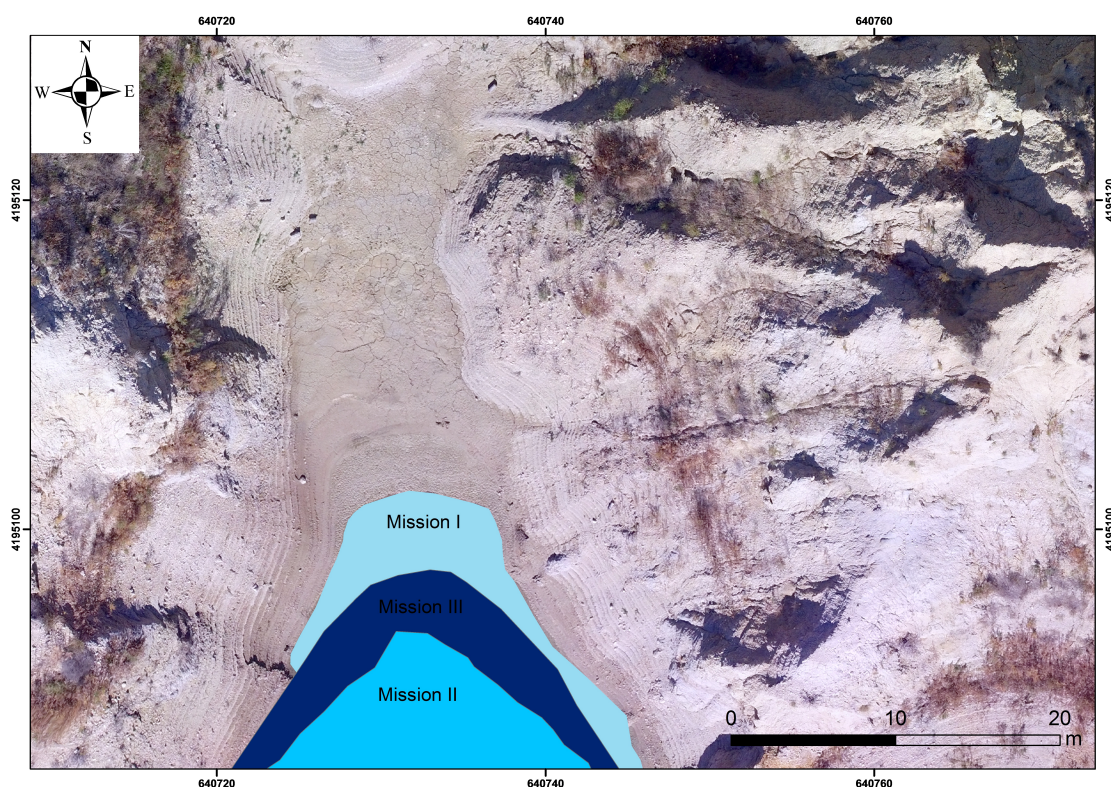


FIGURE 3.22 – Le changement du niveau du lac (R. Hout, 2019)

Pendant la saison sèche, les berges ont été plus arrosées, ce qui engendre par conséquent, un potentiel érosif élevé (Figure 3.23) et un taux d'érosion des versants plus important, estimé à 1772 m^3 . Ainsi, la saison sèche de l'année 2018 a favorisé le déclenchement du processus de ravinement après des épisodes de pluies de fortes intensités orageuses. Les particules érodées sur les versants sont transportées par l'eau vers le lit de la ravine et vers le lac. Le taux de sédiments accumulés dans le lit de la ravine est de 1993 m^3 . Le profil de la rugosité a mis en évidence l'homogénéité des tailles des particules érodées ce qui indique la forte activité hydrodynamique de la ravine, le taux de sédimentation de la ravine (G.B-3) est estimé à $172,7 \text{ m}^3 / \text{ha} / \text{an}$ qui égal à $138,3 \text{ T} / \text{ha} / \text{an}$ (Figure 3.23, D).

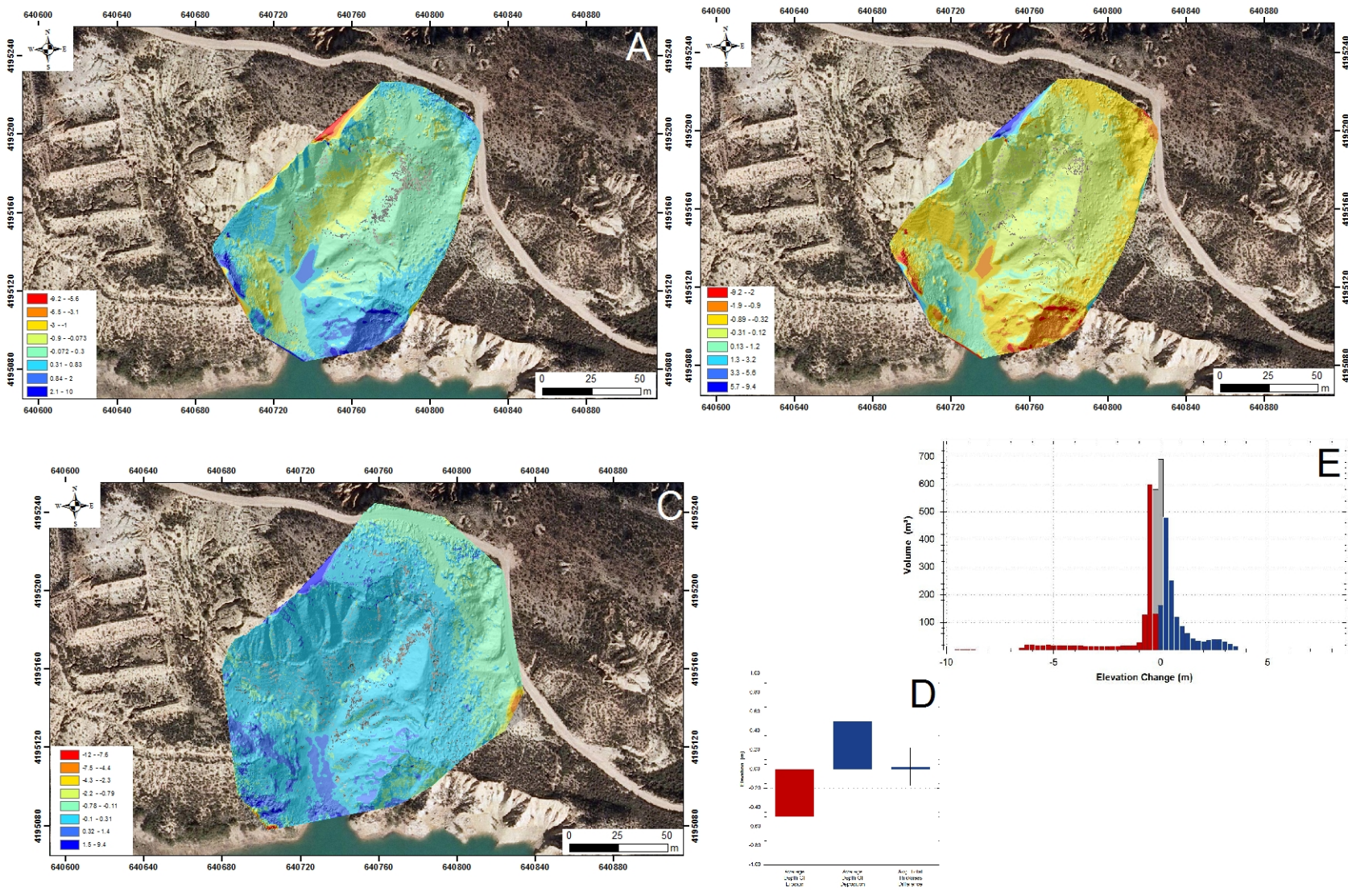


FIGURE 3.23 – La technique DoD entre la mission I et II; B : La technique DoD entre la mission II et III; C : La technique DoD entre la mission I et III; D : Le bilan sédimentaire; E : L’histogramme de répartition de volume, sur la ravine B.G-3 (Hout 2019)

M3C2-PS sur le site 3

La ravine G.B-3 est formée par des versants en surplombs. Pour quantifier le taux de sédimentation de cette morphologie particulière nous avons eu recours à une comparaison en 3D des nuages de points à l'aide de l'algorithme M3C2, afin de prendre en compte la part des sédiments provenant des zones en surplombs. Cette méthode nous semble plus complète que la méthode DoD qui nous a permis de mettre en évidence la différence entre les modèles numériques de terrain en 2,5 D. Cette ravine est typique des formations pédologiques hétérogènes riches en argile. Elle est développée sur la rive concave de Rambla de Algeciras où le réservoir constitue un cuvette sédimentaire des produits issus des versants érodés de la ravine. La ravine (G.B-3) résulte d'une érosion combinée des versants et des tunnels. Cette forme complexe est représentative des ravines de berges géomorphologiques fragiles. Les tunnels formés sur la ravine B.G-3 sont liés aux teneurs élevées des argiles dans l'horizon supérieur du sol (dépôts fluviaux). Dans cette partie de la ravine les eaux emportent les argiles et forment des tunnels qui se développent jusqu'à l'effondrement du sol. Nous pouvons en déduire plusieurs résultats sur la vitesse d'érosion illustrée en particulier par les mesures de distances. Concernant les zones de tunnels, les changements sont quasi-nuls. Il apparaît qu'ils restent stables, mais ces secteurs sont très dangereux car leur évolution est imprévisible. Au fond de la ravine le taux de sédimentation est très important, il dépasse les 250 m³ sur une superficie de 2,28 ha. Nous remarquons que la vitesse d'érosion sur les deux versants est semblable, ce qui paraît logique pour un secteur constitué de fortes pentes sans couvert végétal. Il est nettement apparu sur les mesures de distance, que la vitesse de sédimentation au niveau du lit de la ravine B.G-3 est plus importante que pour les autres ravines.

Conclusion

A l'échelle mondiale le volume érodé par les ravines varie entre 0,002 et 47 430 m³ /an avec une moyenne de 358,6 m³/an. Dans la région de Murcia au sud-est de l'Espagne, les travaux réalisés jusqu'à présent sur le ravinement sont limités. Par conséquent, il existe très peu de données sur le bilan d'érosion ravinatoire et quasiment aucun sur les ravines des berges lacustres. En effet, dans la littérature, nous trouvons deux références sur le bilan sédimentaire des ravines et des ravines de berges sur le bassin versant de Guadalentin en aval du bassin versant de Rambla de Algeciras, à savoir le travail de L. Vandekerckhove et al. (2003) et Marzloff et al. (2011). Avant de comparer les résultats de cette étude avec celle de Vandekerckhove et Marzloff, il faut signaler que la morphologie très complexe, la pédologie très friable et la forte activité anthropique sur le bassin versant de Rambla de Algeciras nous ont permis de considérer que le bassin de Guadalentin est moins vulnérable à l'érosion ravinatoire que le bassin de Rambla de Algeciras. Malgré cette constatation, les volumes calculés dans ces travaux sont proches des résultats estimés dans cette étude. Le volume annuel calculé par Vandekerckhove sur une période varie entre 40 et 43 ans à partir des photos aériennes et les mesures sur le terrain varient entre 3467 et 13 m³/an. De même le travail de Marzloff en 2011 à l'aide de photos aériennes prises par le drone a montré que le taux varie entre 0,5 et 100 m³/an.

3.3.6 Détection des changements géomorphologiques par LiDAR

Nous avons profité des données Lidar PNOA récoltées entre 2009 et 2016 pour poursuivre l'analyse de la dynamique morpho sédimentaires des trois ravines. De même, le travail a été enrichi en tenant compte de la variabilité spatio-temporelle de la dynamique de l'ensemble des ravines de berges en fonction de l'influence topographique et de l'action climatique.

Nous présentons et analysons ici les résultats de la méthode DoD brute obtenus à partir de la différence entre les deux MNT Lidar 2009 et 2016 du projet PNOA. L'erreur des deux missions Lidar PNOA 2009 et 2016 est considérée spatialement homogène et uniforme pour deux raisons principales :

1. La faible densité des nuages de points Lidar (entre 0,5 et 1/m²) : plus le nuage de points est dense, plus celui-ci est robuste pour déterminer avec précision les paramètres de terrain telles que la pente ou la rugosité.
2. L'absence des points GCP : les erreurs de géoréférencement des points GCP sont essentielles pour estimer un modèle d'erreur des données Lidar PNOA.

La Figure 3.27 montre un DoD brut sur l'ensemble des berges lacustres entre 2009 et 2016. La valeur (minLOD = 0,28 m) a été déterminée selon l'équation (équation 3.1). Selon le DoD brut, environ 45 % de la surface des berges lacustres a subi une érosion par ravinement et le reste de la surface a connu une sédimentation. L'historgramme (figure 3.24) de la répartition des changements d'altitude reflète le biais positif des zones érodées.

Les interprétations de la signature des changements topographiques peuvent être justifiées en tenant toutefois compte du volume et de la surface des zones qui ont changé. L'historgramme 3.24 montre que la surface totale des ravines subit des changements d'altitude due à l'érosion. Sur l'historgramme, nous pouvons visualiser un déséquilibre entre le taux de sédimentation et d'érosion sur les berges lacustres du lac. Ce bilan sédimentaire déséquilibré est représenté par la distribution dissymétrique des valeurs d'altitude autour de la valeur 0 avec un biais d'érosion. La visualisation de l'historgramme 3.25 de la distribution des volumes érodés ou sédimentés sur les berges lacustres fournie une vue plus approfondie sur la quantité des sédiments déposés dans le lac : entre 2009 et 2016, 177641 m³ équivalent de 39 T/ha/an des sédiments ont été déposés (Figure 3.25).

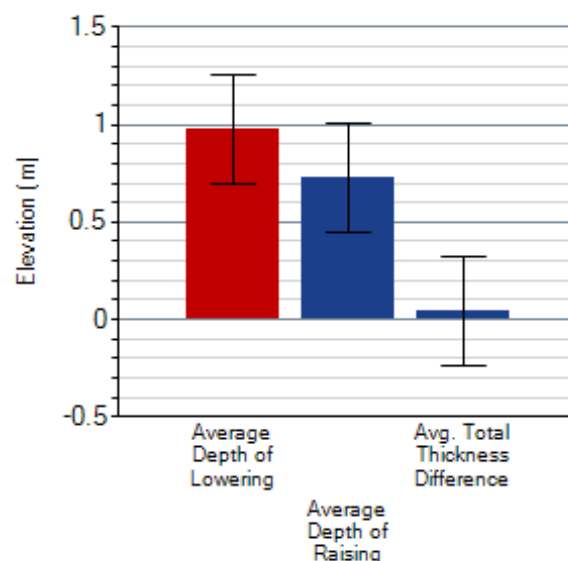


FIGURE 3.24 – L'élévation des changements géomorphologiques (R. Hout, 2019)

À partir de l'histogramme (Figure 3.26), il ressort que les changements morphologiques les plus élevés se situent dans la partie érodée avec des concentrations modérées mais une forte amplitude atteignant les -0,98 m sur une surface de 900000 m². Le pic des changements n'est pas tout à fait situé dans la même zone. Ce pic correspond à une dominance des processus d'accumulation de faible amplitude de 0,7 m sur une surface de 1300000 m².

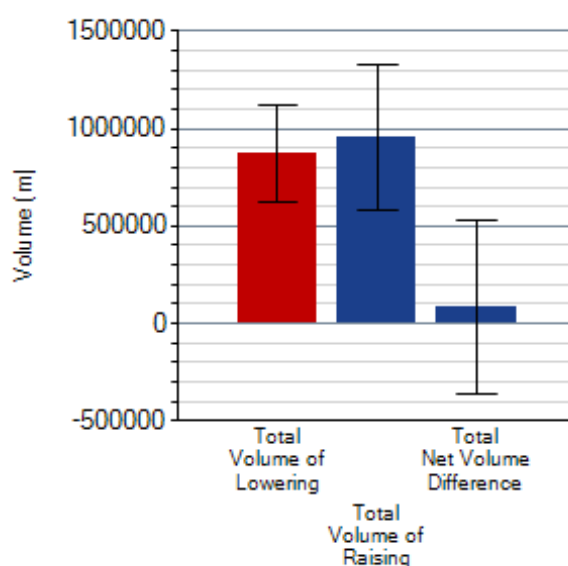


FIGURE 3.25 – Le bilan sédimentaire établi à partir des données LiDAR PNOA (R. Hout, 2019)

A partir de la distribution multimodale de l'histogramme (Figure 3.26), il est facile de tirer la conclusion de la complexité des événements morphodynamiques des ravines de berge, d'autant plus que la variabilité temporelle importante du facteur-R est en accord sur ce point.

Avec les données LiDAR PNOA deux bilans sédimentaires ont été établis. Le premier bilan calculé est véritablement le résultat de l'erreur moyenne RMSEZ de 0,2 m. Le second est inhérent au cubage réel du bilan avec des seuils statistiques qui varient peu. Les résultats de ces deux bilans varient légèrement à l'échelle des ravines, mais sur l'ensemble des berges lacustres la différence entre les résultats de ces deux bilans est importante.

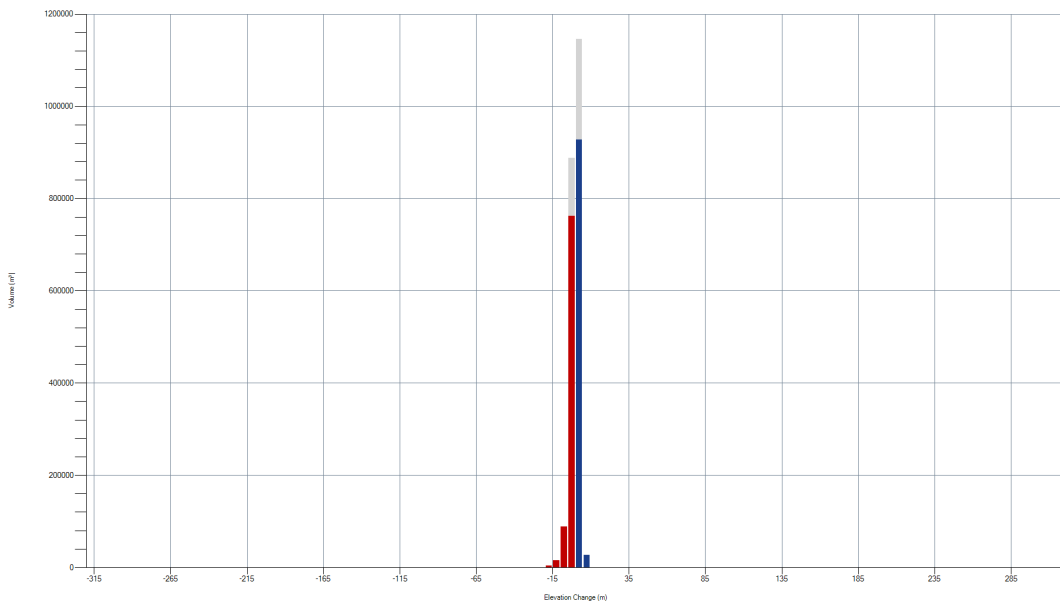


FIGURE 3.26 – L’histogramme de répartition de volume, sur les ravines des berges lacustres(R. Hout, 2019)

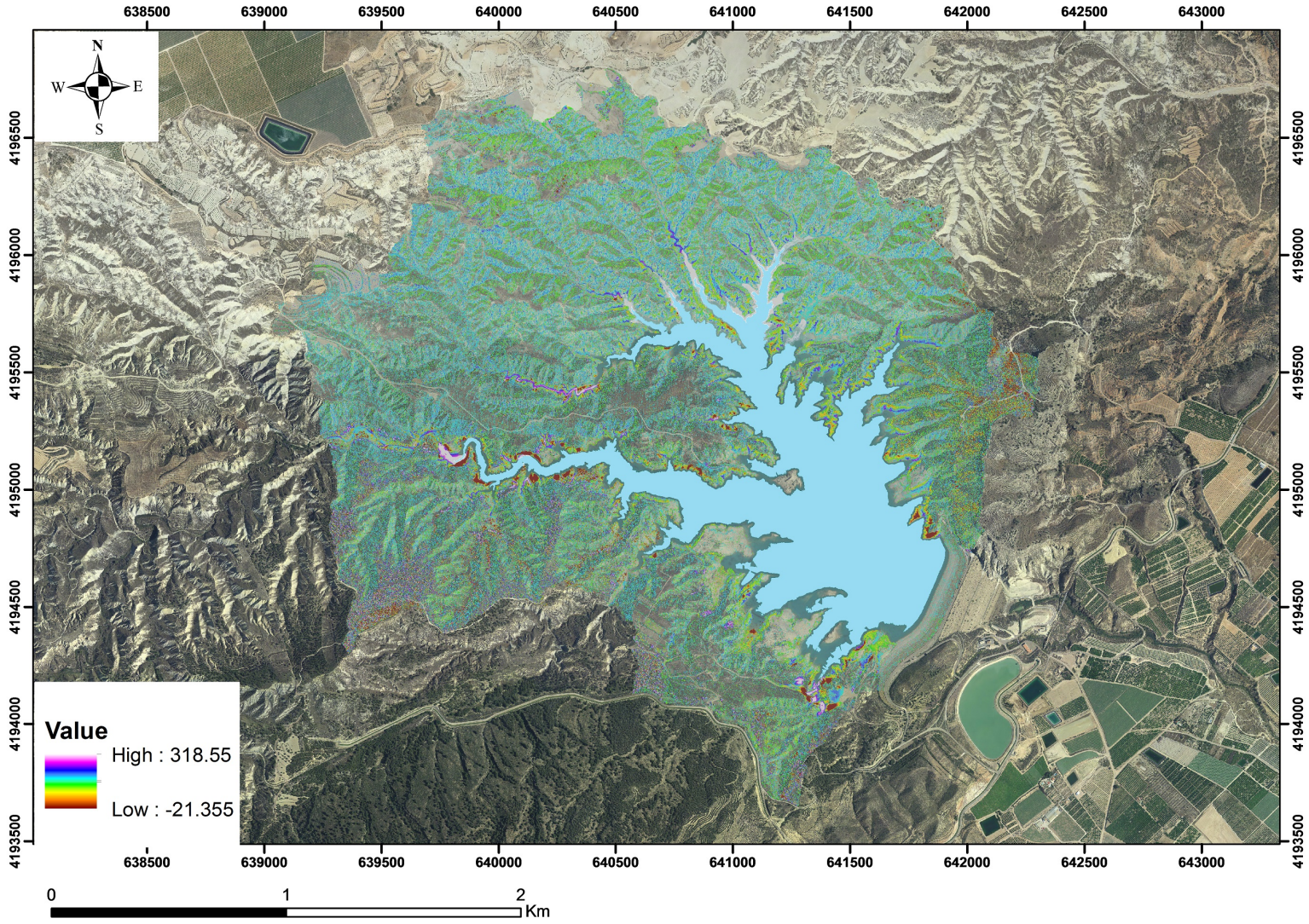


FIGURE 3.27 – Le bilan sédimentaire établi à partir des données LiDAR PNOA (Hout 2019)

3.3.7 Fluctuation du niveau lacustre

La hausse de niveau du lac est reliée à la tendance haute des apports de la pluviométrie entre 2010 et 2015 (3.28). Il faut évoquer aussi que le niveau du lac a diminué de 260 m en 2014 à 240 m en 2018. Ceci est lié à la baisse des apports pluviométriques entre 2015 et 2017. Cette fluctuation du niveau de l'eau a provoqué un déséquilibre de la morphodynamique des berges. Lorsque le niveau du lac a atteint les rigoles et les petites ravines, le mouvement vertical des eaux lacustres les a estompées et leur a fait perdre leurs compétences d'érosion (Figure 3.29). Ceci a permis la disparition temporelle de ces petites formes d'érosion. Elles ont ensuite été remplacées par l'activité sédimentaire des vagues chargées de matières en suspensions (processus lié à la dérive littorale).

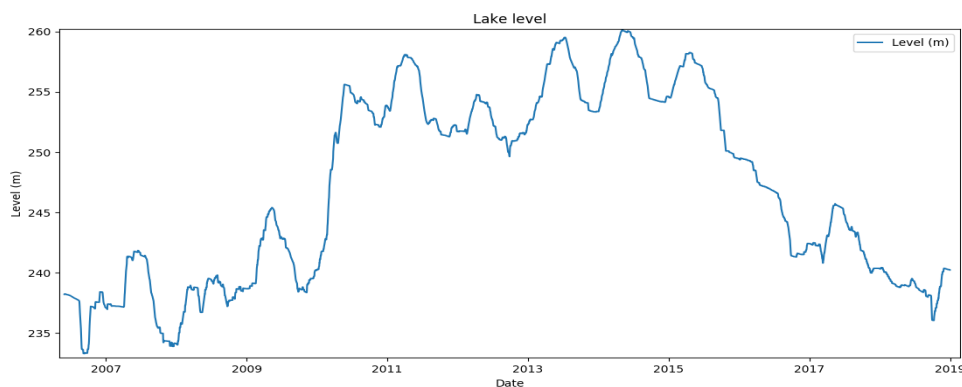


FIGURE 3.28 – Le graphe de la fluctuation du niveau lacustre entre 2009 et 2016

L'analyse des résultats des données DoD témoigne de la décantation des dépôts de régression. Après la période de remplissage maximale du lac à 260,12 m (04/05/2014), les berges ont connu une sédimentation de type vase des zones planes et des lits des ravines. Ces sédiments ont quatre origines :

- Sapements des berges lacustres par les vagues entre 2010 et 2014 (Figure 3.29)
- Ravinement (Figure, 3.29 estompage)
- Biogène (activité biologique)
- Détritique (apports torrentiels de Rambla)

Il est regrettable que nous n'ayons pas pu installer pour une question essentiellement de temps et d'argent des sédimentomètres dans le lac afin de collecter et analyser la nature et le pourcentage des sédiments détritiques et biogènes. Le sapement des berges lacustres, constaté grâce à la photo-interprétation des orthophotographies aériennes PNOA entre 2009 et 2016, est un phénomène déclenché lors du remplissage maximal du lac. Les anciennes zones en surplomb sont déstabilisées sous l'effet de l'humidité et le poids. Ce phénomène est localisé notamment sur les méandres et les rives concaves de la Rambla (figure 3.30).

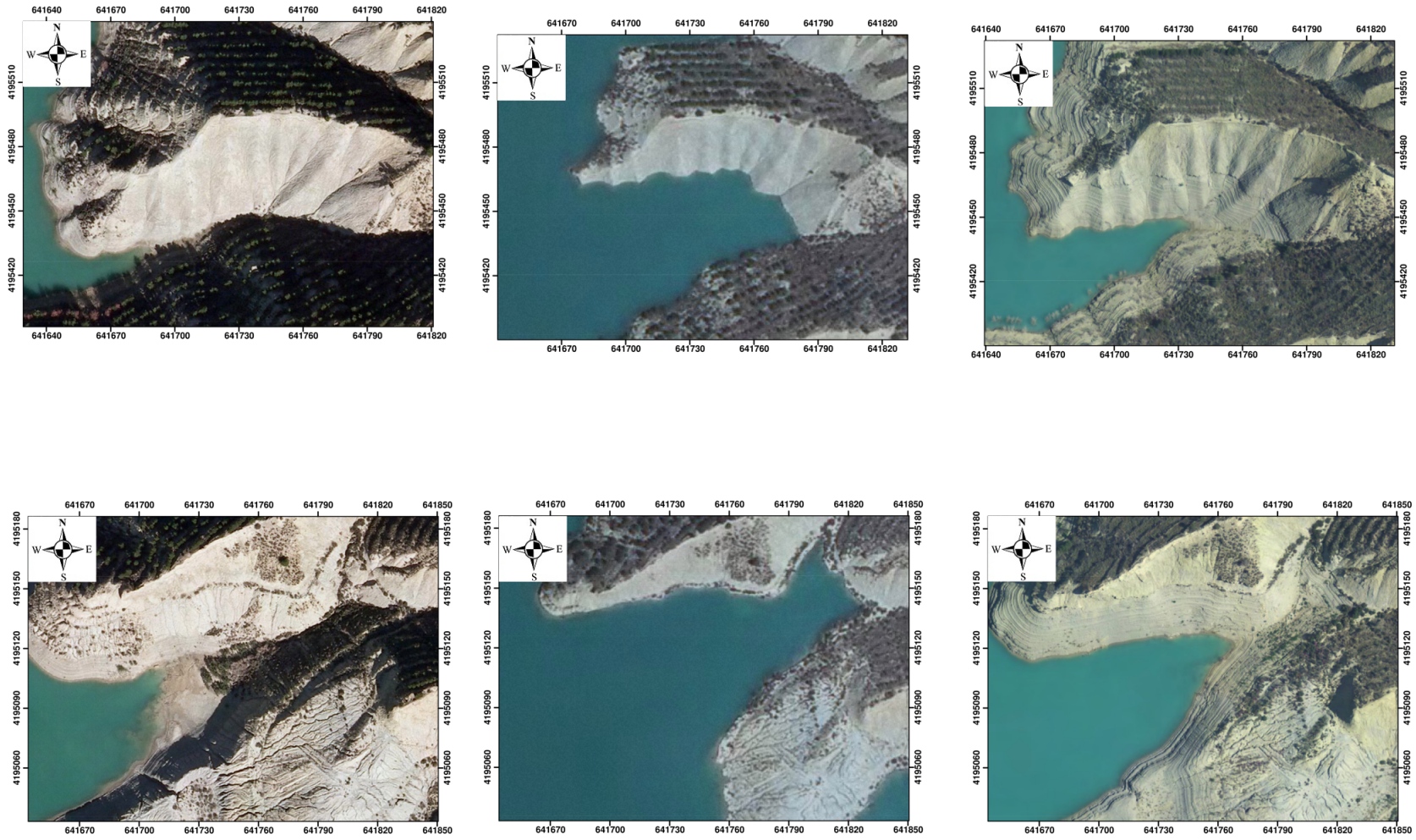


FIGURE 3.29 – Le sapement des berges entre 2009 et 2016 (R. Hout, 2019)

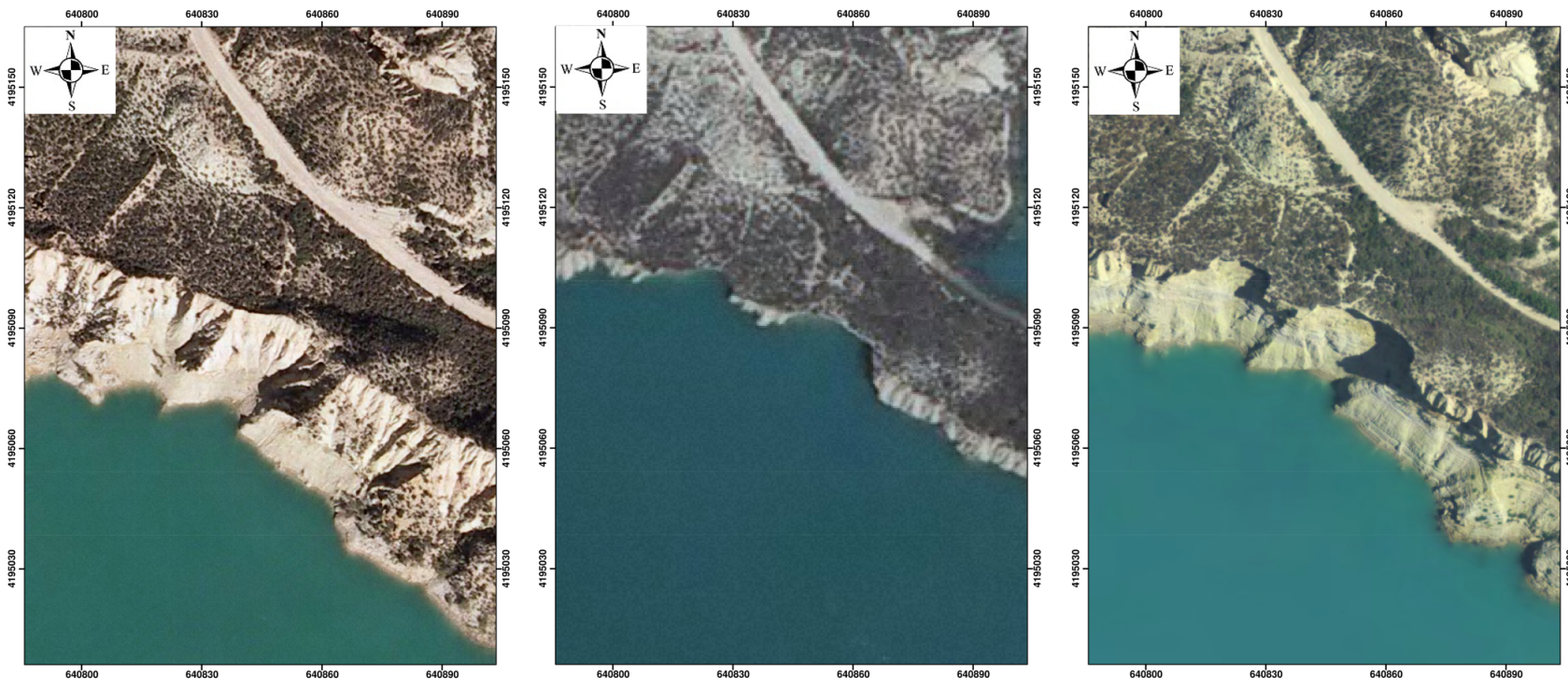


FIGURE 3.30 – Le sapement des berges entre 2009 et 2016 (R. Hout, 2019)

3.3.8 Occupation du Sol et activité anthropique

La combinaison entre l'activité anthropique, le changement d'occupation du sol et le changement climatique accélère le processus de ravinement des berges lacustres de Rambla de Algeciras. De façon générale l'activité humaine engendre une consommation des ressources naturelles vitales tels que le sol, l'eau, le couvert végétal, provoquant ainsi une détérioration des écosystèmes naturels. Au XIX siècle Madoz a écrit ... *las montañas de*

Lorca, Ricote, Caravaca, Cehegín y Moratalla se hallaban pobladas de altos y corpulentos pinos, encinas y carrascas, pero estos grandes bosques han sufrido talas en la mayor parte de sus mejores árboles, estando reducidos en el día a la clase de nacientes [...] los montes ocupaban a mediados de siglo anterior dos terceras partes del territorio que posteriormente se ha ido roturando y convirtiéndose en tierras de labor, por consiguiente se ha destruido el arbolado escaseando la madera. <...les montagnes de Lorca, Ricote, Caravaca, Cehegín

et Moratalla étaient peuplées de grands et corpulents pins, chênes verts et chênes kermès, mais ces grandes forêts ont été en majeure partie abattues de ses meilleurs arbres, étant réduit dans la journée à l'état naissant [...] Au milieu du siècle précédent, les montagnes occupaient les deux tiers du territoire qui a ensuite été démantelé et transformé en terres agricoles, en conséquence, les arbres ont été détruits et la forêt est en pénurie >. Dans cette déclaration Madoz témoigne d'une activité de déboisement de nombreuses fo-

rêts pendant XVIII et XIX siècles, et de leur transformation en des terrains agricoles. Cette pression anthropique sur les ressources naturelles au cours des deux derniers siècles a entraîné une altération des écosystèmes et une accélération du phénomène de ravinement. Nous pensons que l'assemblage de la dégradation des forêts, des conditions climatiques

anciennes et de la topographie accidentée de notre terrain d'étude a favorisé l'initiation des premières ravines. L'activité anthropique et le changement climatique favorise en revanche fortement l'extension et le développement de ce phénomène. L'étude de l'effet

de l'occupation du sol sur le phénomène de ravinement (Figure 3.31) montre que la principale source de sédiments provient des terrains occupés par le matorral (sur 89% des berges). Ils livrent 90% de sédiments alors que 5% proviennent de domaines viticoles (présents sur 2% des berges). Après la photo-interprétation des orthophotographies PNOA,

les sols viticoles des berges lacustres de Rambla de Algeciras, nous pouvons affirmer que ces dernières sont soumises à une sévère érosion pour deux raisons. Premièrement, la localisation des vignobles sur des terrasses instables a facilité l'expansion des têtes de ravines après des épisodes pluvieux intenses. Deuxièmement, les vignobles offrent moins de protection au sol. La viticulture est caractérisée par un sol nu sur toute la période du mois de Novembre au mois d'Avril. Pendant cette longue période la plante ne possède pas de feuilles. Elle arrive au stade de maturité en saison estivale mais toujours avec peu de feuilles pour protéger le sol. Ces résultats montrent que les vignobles représentent le mode d'occupation du sol la plus érosive dans les zones semi-arides et humide de la région méditerranéenne.

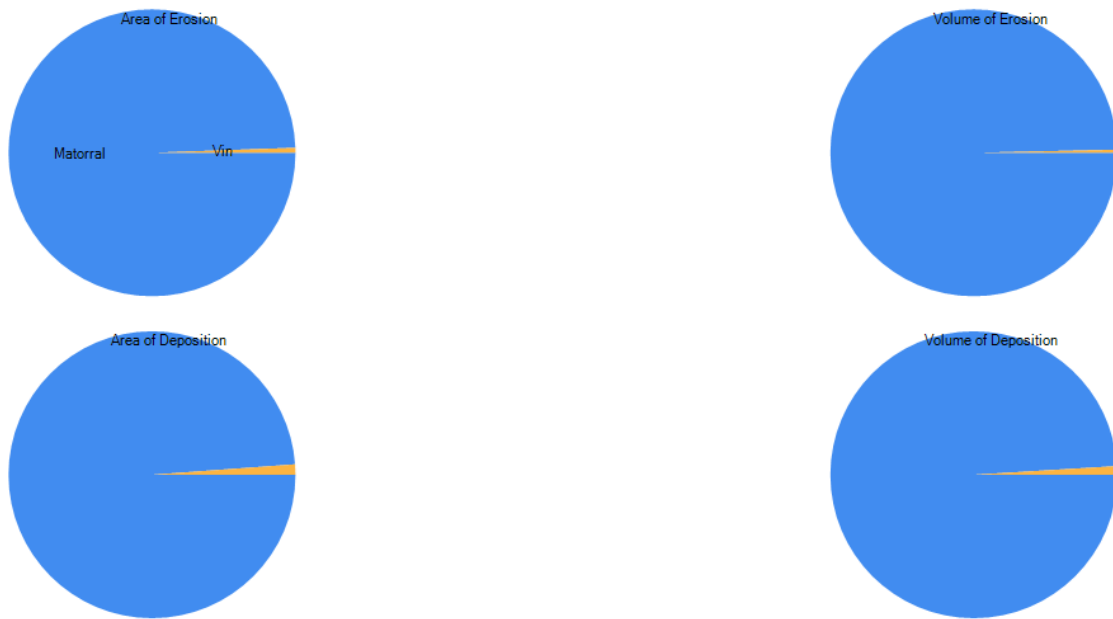


FIGURE 3.31 – Le volume et la surface érodées par le ravinement selon l’occupation du sol (R. Hout, 2019)

Toujours à l’aide des orthophotographies prises entre 1956 et 2016 sur les berges lacustres, nous remarquons que plusieurs terrains agricoles ont été abandonnés au cours de ces soixante dernières années. Généralement l’abandon des terrains agricoles freine le processus d’érosion. Dans le cas de notre terrain d’étude la rareté et l’irrégularité des précipitations compliquent le développement du couvert végétal ce qui favorise la dégradation de la structure du sol et la dominance du matorral. On ajoute à cela la présence d’une culture industrielle (Arbres fruitiers tels que les limoniers et citronniers, ...) sur des sols marneux qui provoque une augmentation du taux de sodium dans le sol et par conséquent la détérioration des agrégats. Il faut noter aussi que Rambla de Algeciras est un lac dont les berges sont à vocation touristique (randonnée, vélo, etc). Cette activité économique de plein d’air a abouti à la construction de routes et de sentiers non carrossables au milieu des ravines. Ceci menace la stabilité morphologique des ravines et accentue l’érosion en raison de l’augmentation de la densité des ravines.

3.4 Conclusion

La nature friable du sol, la fluctuation du niveau du lac, l'activité anthropique et les changements climatiques marqués par des épisodes pluviométriques de plus en plus rares et très rares mais très violents ont permis de tailler plusieurs formes de ravines sur les berges lacustres de Rambla de Algeciras. Le but principal de cette partie de thèse est de démontrer si le modèle SfM-MVS-4D généré à partir des photos prises par un drone et les données LiDAR PNOA, sont capables de quantifier avec précision le bilan sédimentaire sur les ravines des berges lacustres. Nos résultats permettent de valider cette hypothèse. En effet, pour la surveillance de ravinement sur les berges lacustres, nous avons détecté les changements géomorphologiques sur trois typologies de ravines de berges. Les modèles de détection des changements géomorphologiques ont été construits avec les modèles numériques de terrain multi-temporels couplés avec des modèles d'incertitude spatialement variables. Le taux des changements géomorphologique détecté sur les trois ravines en 2018 est liée essentiellement aux caractéristiques environnementales. Les photos aériennes prises par le drone sont capables de générer des modèles SfM-MVS-4D de très haute résolution spatiale et temporelle ce qui permet de mettre en exergue le déplacement des sédiments le long des versants des ravines. L'utilisation de la configuration nadir et oblique pour la prise des photos a permis d'améliorer la précision des modèles SfM-MVS pris sur versants en pente très raide ou bien avec des surplombs. Cette précision a été mesurée à l'aide de plusieurs techniques à savoir l'estimation des erreurs de géoréférencement, la technique C2C ainsi que l'approche statistique de validation croisée et enfin la technique FIS. Ceci a été utile pour détecter les changements géomorphologiques sur les ravines de berges lacustres. La précision des données SfM-MVS varie entre 1 et 5 cm.

Les données du projet PNOA (orthophotographies et LiDAR) ont constituées des données fiables et précises pour étudier les effets de fluctuation du niveau lacustre, le changement climatique et le changement d'occupation du sol sur le déclenchement du ravinement des berges. La technique DOD appliquée sur les données LiDAR PNOA a permis d'estimer un taux des sédimentation annuelle de l'ordre de 39 T/ha/an provenant des ravines des berges lacustres de Rambla de Algeciras

Chapitre 4

La télédétection RADAR SAR

« Citation »

Auteur

Sommaire

4.1 Introduction	74
4.2 État de l'art	75
4.3 Méthodologie	80
4.3.1 Le principe de modèle de recouvrement sur les ravines	80
4.3.2 Les données SAR	81
4.3.3 Détection des changements cohérents	85
4.3.4 Interférométrie radar SAR PSI <Persistent Scatterer Interferometry>	86
4.4 Résultats et discussion : La fiabilité des données SAR utilisées pour mesurer l'évolution morphologique des ravines	95
4.4.1 La détection des changements	95
4.4.2 L'interférométrie radar SAR multi-temporal	101
4.5 Conclusion	113

4.1 Introduction

L'imagerie SAR est une technique de télédétection active qui permet l'acquisition des images de très haute résolution spatiale et temporelle, de jour comme de nuit et dans des conditions météorologiques extrêmes. Dans le cadre de ce travail de thèse, nous allons nous intéresser au capteur SAR (*Synthetic Aperture Radar*) soit Radar à synthèse d'ouverture mono-statique, un mode particulier de radar possédant une antenne, pour envoyer des impulsions dans le domaine des micro-ondes et récupérer le signal rétrodiffusé complexe (équation 4.1).

$$C(x) = A(x) e^{i\varphi(x)} \quad (4.1)$$

Avec :

$A(x)$: Amplitude de signal SAR (partie réelle)

$\varphi(x)$: Phase de signal SAR (partie imaginaire)

Cette partie vise à présenter la géométrie d'acquisition des données SAR, l'interaction entre les ondes hyperfréquences et la surface du sol, ainsi que les changements des caractéristiques des images SAR, liés aux propriétés physiques du sol.

Nous avons décidé de restreindre cette partie de recherche à deux objectifs précis : l'analyse de l'effet du ravinement sur la variation de signal rétrodiffusé grâce à la détection des changements cohérent (CCD) et la détermination de la vitesse de ravinement, avant de la comparée avec les résultats des données SfM-MVS prises par le drone.

L'hypothèse que nous souhaitons acquérir est que la technique interférométrie PS peut estimer avec une précision millimétrique le déplacement du sol le long des versants des ravines.

4.2 État de l'art

Caractéristiques des images radar SAR

La Géométrie des images Radar SAR

Les capteurs SAR possèdent des antennes qui émettent des ondes électromagnétiques dans le domaine d'hyperfréquence. L'axe orthogonal de déplacement du capteur SAR est nommé la direction distale, et l'axe de déplacement du capteur SAR est appelé la direction azimutale. Les capteurs SAR ont une visée latérale. Cette caractéristique entraîne, inévitablement, d'importantes conséquences sur l'acquisition des images en zones de relief, pour des raisons de changement de l'angle d'incidence lié à la topographie complexe, cela produira une distorsion géométrique des pixels.

La figure 4.1 montre les différents types de distorsions :

- Les zones d'ombrages (A)
- Les zones de recouvrements (B)
- Les zones de raccourcissements (C)
- Les zones de dilatations (D)

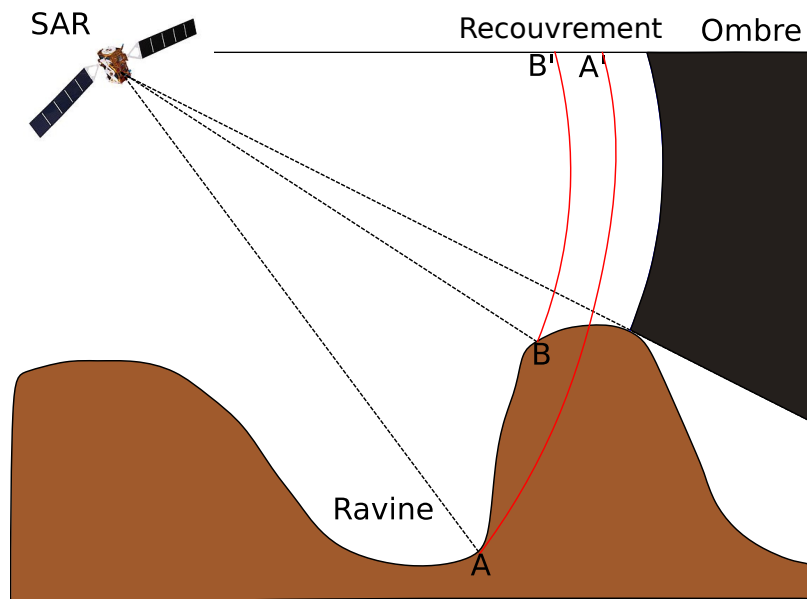


FIGURE 4.1 – La Géométrie des images Radar SAR (Radouane Hout, 2019)

Sur la figure 4.1 nous avons simplifié les deux cas de distorsion rencontrés le plus fréquemment dans les zones ravinées, à savoir l'effet de recouvrement et l'effet d'ombrage.

Phénomène d'ombrage (Shadow)

Dans le cas où la pente est opposée à l'angle de visée du satellite, le signal émis par le radar n'atteint pas les points au sol. Ceci entraîne la formation de zones noires sur l'image SAR et que l'on appelle les zones d'ombres.

Phénomène de recouvrement (*layover*)

Dans le cas où la valeur des pentes des berges est supérieure ou égale à la valeur de l'angle d'incidence du radar SAR, nous observons un phénomène de parallaxe appelé le recouvrement *<layover>* : les échos provenant des différentes cibles éloignées sont superposés [100], et nous constatons une inversion des positions (le sommet de berge est disposé dans l'ordre inverse par rapport à la base).

L'acquisition oblique des imageries SAR rend difficile la cartographie et la surveillance du ravinement des berges avec les données SAR en raison de :

- La valeur de la pente : si la pente des berges ravinées est supérieure ou égale à l'angle d'incidence du radar SAR, le phénomène de recouvrement apparaît sur les berges. Mais dans le cas où la pente est opposée à l'angle d'incidence, le signal radar n'atteint jamais les berges ravinées.
- L'orientation de la pente : lors des passages ascendants et descendants du satellite SAR, l'orientation des berges par rapport à l'axe de visée du radar change sur l'image SAR, entraînant un effet d'ombre sur le passage ascendant et un effet de recouvrement sur le passage descendant.

Dans ce contexte la génération d'une carte de vitesse de déplacement des berges des ravines représente un défi.

Interaction des ondes hyperfréquences avec la surface terrestre

Les principes de fonctionnement du radar imageur sont simples car ils reposent sur l'émission d'une onde électromagnétique d'hyperfréquence par un vecteur (satellite, ou avion), réfléchi par les différentes cibles au sol (sol, forêts, bâtiments...). La durée aller-retour de l'onde détermine la distance entre le vecteur et la cible. Dans le cas où la cible se déplace, le changement de la fréquence du signal rétrodiffusé ou bien l'effet de Doppler permettent de calculer sa vitesse relative.

Après l'interaction entre le signal radar et la surface terrestre, une partie d'onde émise sera diffusée vers le capteur selon le critère de Rayleigh. Cette partie d'onde est nommée onde rétrodiffusée et correspond au coefficient de rétrodiffusion pour une surface naturelle.

La technologie SAR utilise le temps de propagation de l'impulsion pour déterminer la distance entre le capteur et la surface terrestre, et l'intensité de l'onde rétrodiffusée, pour déduire les caractéristiques physiques de la surface. Cependant, il existe plusieurs modèles empiriques et semi-empiriques permettant de relier le coefficient de rétrodiffusion avec les propriétés physiques du sol (humidité et rugosité) et les paramètres du capteur SAR (la longueur d'onde, la polarisation, l'angle d'incidence...), en utilisant une procédure de calibration. Parmi ces modèles, on note le modèle de Oh, Dubois, IEM, AIEM...

Dans le cas des berges ravinées le coefficient de rétrodiffusion est lié à la pente, la constante diélectrique et la rugosité du sol nu.

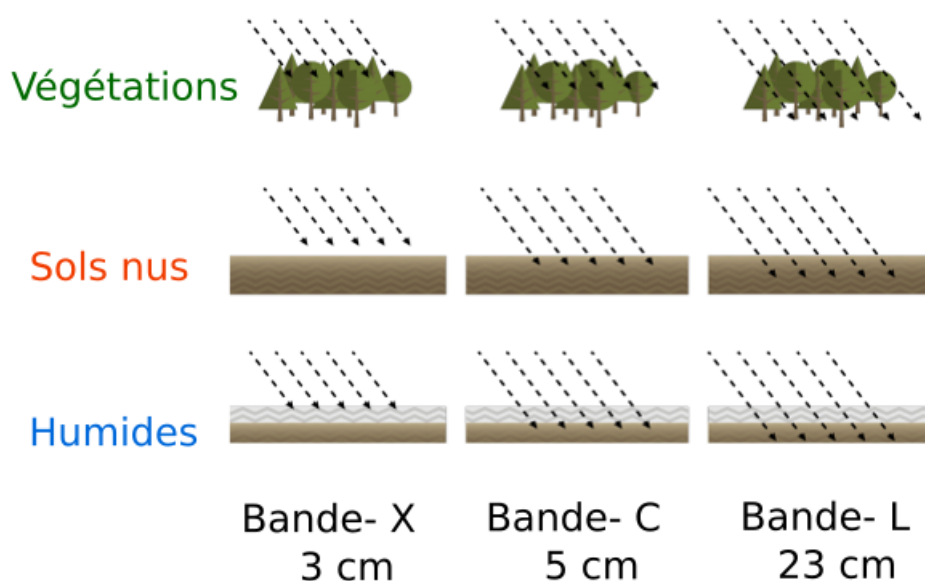


FIGURE 4.2 – L’interaction entre la surface terrestre et les ondes hyperfréquence (source ESA modifiée par Radouane Hout, 2019)

Rugosité du sol

On rappelle que les coefficients de rétrodiffusion prennent en compte l’effet de rugosité de la surface terrestre. En fonction des propriétés de l’impulsion radar et de l’angle d’incidence, ces coefficients déterminent le degré de rugosité de la surface.

Pour les sols nus, la rugosité est un paramètre géométrique et physique. Elle exprime l’hétérogénéité locale de la surface du sol. Le changement des valeurs de la rugosité dépend des pratiques agricoles et des précipitations. Dans la littérature, nous notons deux paramètres qui permettent de caractériser la rugosité de surface du sol [101] [102] à savoir l’écart type des hauteurs (*Hrms Height root mean square*) qui mesure l’importance des variations verticales du sol, et la longueur de corrélation (*L*) qui décrit l’état de rugosité d’un sol [103].

Il convient de noter que la photo-interprétation des modèles numériques de terrain de très haute résolution spatiale permet de faire apparaître les formes d’érosion ravinares désignées par des valeurs élevées de rugosité [104] [105] [106] [107] [108].

Le coefficient de rétrodiffusion réagit à la moindre modification de la rugosité du sol, mais les estimations de la rugosité à partir des données SAR ne sont pas considérées comme des mesures fiables [109]. Par exemple, plusieurs études sur les sols nus, (M Aubert, 2012 [103], A Le Morvan, 2008 [110] N. Baghdadi, 2002 [111]) ont montré que la rétrodiffusion du signal radar augmente avec la rugosité selon une loi exponentielle ou logarithmique jusqu’à un seuil de saturation, quelle que soit la configuration instrumentale du capteur SAR [103]. On note également l’approche de Fung et al (1992) qui a utilisé l’équation d’intégrale pour modéliser le signal rétrodiffusé des surfaces rugueuses. De plus, selon le modèle de Kirchhoff standard, lorsque la rugosité et la pente sont importantes, le terme de diffusion multiple est significatif.

Humidité du sol

L'humidité du sol mesure le volume d'eau contenu dans un sol. Ce paramètre contrôle les phénomènes d'infiltration et de ruissellement.

Les images SAR présentent beaucoup d'avantages pour le suivi et la mesure de l'humidité des sols, essentiellement grâce à la sensibilité de coefficient de rétrodiffusion aux dynamiques spatio-temporelles de l'humidité du sol. Cependant, de nombreuses études et travaux de recherche ont signalé que les changements de l'humidité du sol entre deux acquisitions SAR peuvent influencer sur la magnitude de la cohérence, et sur la phase observée sur l'interférométrie différentielle. Cela peut produire un biais d'estimation des déformations (Figure 4.3).

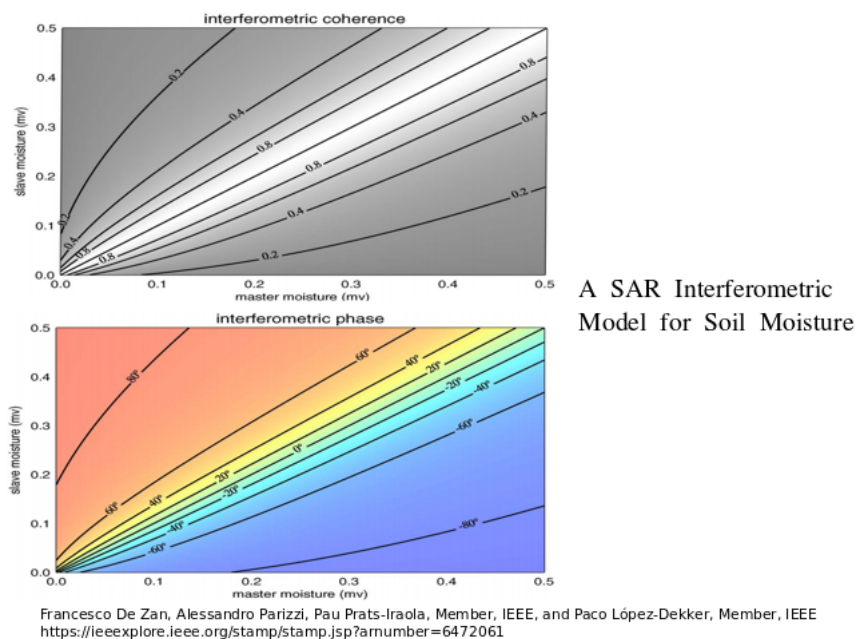


FIGURE 4.3 – L'effet de l'humidité du sol sur l'interférométrie SAR (source :[112])

Interférométrie Radar SAR sur les zones en recouvrement

L'interférométrie SAR est une technique géodésique qui sert à analyser la vitesse de déformation de la surface terrestre sur des zones vastes. L'inconvénient de cette technique est qu'elle est limitée par la décorrélation temporelle du signal radar, le retard atmosphérique et les erreurs de traitement des données.

Le point central de cette thèse est l'évaluation du bilan sédimentaire des berges lacustres ravinées. Parmi les méthodes de mesures existantes, les capteurs de télédétection passifs embarqués sur des drones, avions et satellites ont le potentiel d'offrir des évaluations du volume érodé à grande échelle et avec une très haute résolution spatiale contrairement aux méthodes de terrain classiques. Cependant, à notre connaissance aucun travail antérieur n'a souligné la possibilité, pour les capteurs radar SAR, d'estimer le bilan sédimentaire. Or, quelques travaux récents ont montré que la phase et l'amplitude de signal SAR sur les zones de recouvrements peuvent être exploitées.

Mais la plupart des travaux avec les images SAR masquent les zones de recouvrements en raison de la décorrélation volumique de phase sur ces zones. Récemment, un certain nombre de travaux s'est penché sur la modélisation des zones de recouvrement pour la cartographie en 3D, 4D et 5D des milieux urbains ([113][114] [115] [116] [117] [118]) et

aussi pour la surveillance et la détection des petits glissements de terrain [119]. Ces travaux constituent de bons arguments pour confirmer notre méthodologie sur l'application de la technique InSAR sur les zones de ravinement. Ils sont divisés en deux branches. La première branche propose l'utilisation de la technique des réflecteurs persistants PS (*Persistent Scatterer*) qui repose principalement sur l'utilisation d'une pile d'images SAR (SLC), pour reconstituer et localiser l'emplacement exact des réflecteurs dominants de forte stabilité (une forte cohérence). Cette technique est basée sur l'hypothèse de présence d'un seul réflecteur dominant par pixel, mais cette hypothèse n'est pas valable dans le cas des zones de recouvrement où plusieurs diffuseurs sont regroupés dans le même pixel. La technique PS interprète alors la localisation de plusieurs diffuseurs sur la zone de recouvrement comme l'emplacement d'un seul diffuseur. De ce fait une perte d'information sur les diffuseurs non dominants est associée à l'utilisation de la technique PS dans les zones de recouvrements.

Dans la deuxième branche se trouve l'approche Tomographique SAR (TomoSAR) inspirée des algorithmes d'inversion tomographique tels que *Beamforming* [120], *Capon* [121], *SVD* [122], *MUSIC* [123], afin de séparer les diffuseurs interférant dans le même pixel. La TomoSAR est considérée comme une extension de la technique InSAR. TomoSAR combine un ensemble d'interférogrammes dans une configuration de multibaseline avant de synthétiser les ouvertures le long de l'axe de l'altitude. Cela permet de créer une résolution selon l'altitude pour concevoir le profil complet de réflectivité de l'image en élévation le long des trois axes : altitude, azimuth, distance. Ceci facilite la modélisation en 3D de chacun des diffuseurs multiples.

Les mesures tomographiques offrent une image en 3D des structures volumiques (forêts, les zones urbaines . . .), grâce à la combinaison des différentes ondes pénétrantes. La technique de la tomographie est très utilisée dans plusieurs domaines : la géophysique, la médecine et l'archéologie. . . La tomographie SAR permet une cartographie en 4D des cibles. La TomoSAR est souvent appliquée pour la modélisation de la structure des forêts et l'estimation de la hauteur de bâtiments et des glaces par le biais des données Multi-Baseline (MB) Radars aéroportées et spatioportées. Gini et al [123] ont employé les algorithmes d'inversion tomographique afin d'estimer la phase interférométrique des zones de recouvrements. De même plusieurs auteurs (M A Siddique [124], A Budillon [125]) ont utilisé les mêmes algorithmes pour améliorer l'échantillonnage des pixels stables PS localisés dans les zones recouvrements.

4.3 Méthodologie

4.3.1 Le principe de modèle de recouvrement sur les ravines

Il est connu que les capteurs radar SAR permettent de générer des modèles en 3D de la surface du globe terrestre en exploitant l'interférence de phase entre deux images SAR légèrement séparées par une ligne de base dans le traitement d'interférométrie SAR (*SAR Interferometry* <InSAR>). Cette technique devient une tâche difficile sur les zones à forte pente à cause de la distorsion géométrique de l'image SAR (l'effet de recouvrement et d'ombrage).

Sur les zones de recouvrements la phase interférométrique est caractérisée par deux discontinuités (au début et à la fin de la zone de recouvrement). Entre les deux discontinuités, la phase interférométrique est dépendante de la façon dont les diffuseurs de la zone de recouvrement sont mélangés.

Sur le barrage de Rambla de Algeciras, la géométrie d'acquisition oblique des images radar SAR a produit le phénomène de recouvrement au niveau des versants des ravines des berges lacustres exposées au capteur Sentinel-1. Avec l'effet de recouvrement, les trois composantes de chaque versant de ravines ("A" : le sommet de versants, "B" : le versants et "C" : le lit de ravine) de différentes hauteurs ' H_A ', ' H_B ' et ' H_C ' pourraient se situer à la même distance oblique du capteur (Figure 4.4). Par conséquent, le pixel produit sur les versants sera caractérisé par un chevauchement des échos des diffuseurs positionnés à différentes distances du capteur SAR.

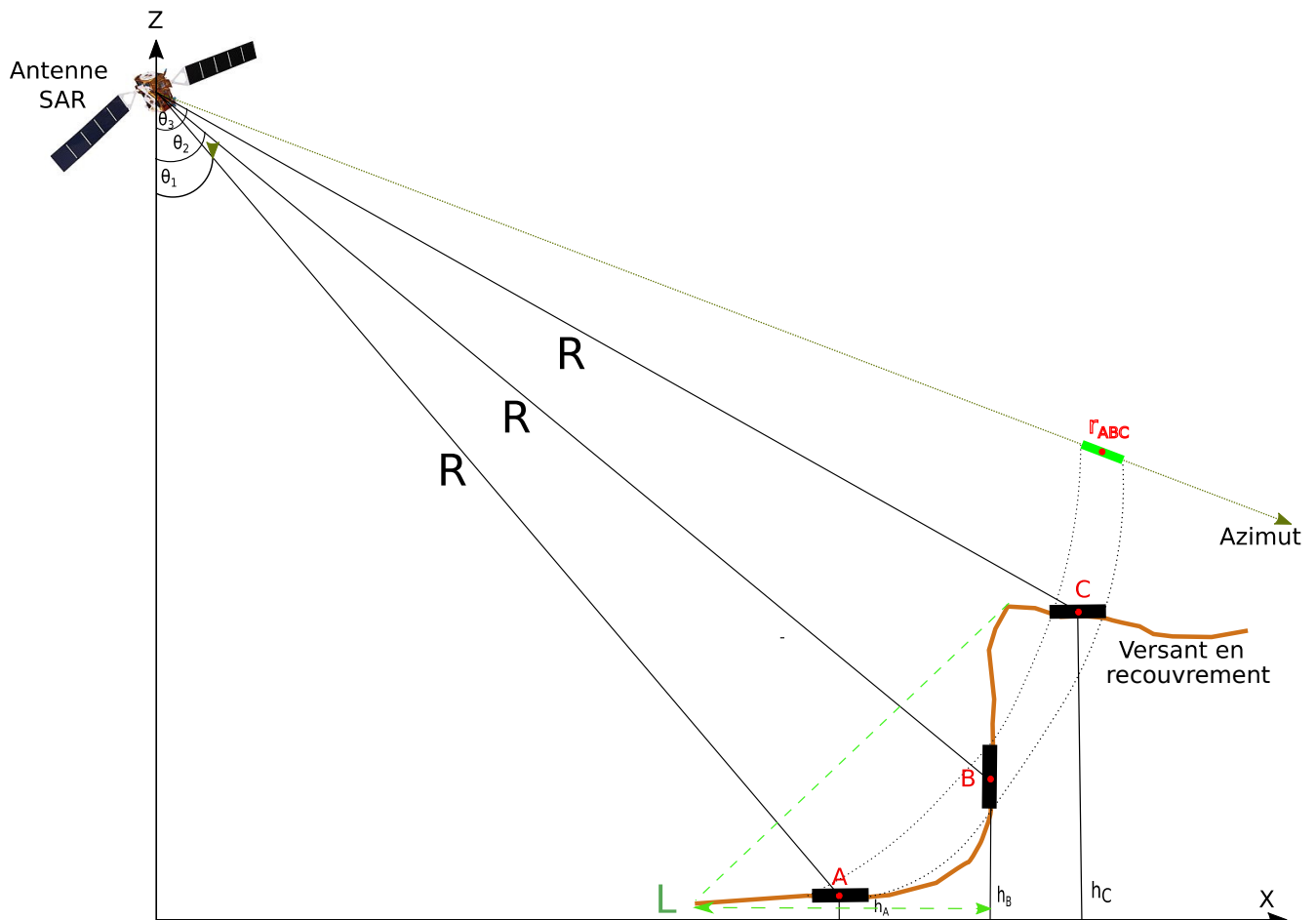


FIGURE 4.4 – Le phénomène de recouvrement sur les ravines des berges (R. Hout 2019).

Le signal radar SAR correspondant aux versants exposés vers le capteur dépend de la phase (distance sol-capteur, et les effets de bruit multiplicatif) et de l'amplitude (la rugosité des berges, l'angle de vision). L'image complexe $I_m(t, \tau)$ issu de la rétrodiffusion des trois composantes de versant en recouvrements sera définie par (équation 4.2) :

$$I_m(t, \tau) = \sum_{n=1}^3 S_n(t, \tau) \exp\{-j\varphi_{n,M,\theta}\} \quad (4.2)$$

Avec

$$M \in \{0, 1, \dots, m-1\} \text{ et } n = A, B, C$$

$$\varphi_{n,M,\theta} = \left\langle \frac{4\pi b_{\perp}}{\lambda R \sin(\theta)} h_n \right\rangle_{2\pi},$$

$S_n(t, \tau)$: Le signal complexe pour chaque pixel 'n'

$\varphi_{n,M,\theta}$: La phase interférométrique pour chaque pixel 'n' dans l'interférogramme 'M' avec M : interférogramme et m : images SLC.

On suppose que les signaux complexes de chaque composantes des versants en recouvrement (n_1, n_2, \dots, n_m) suivent un modèle circulaire gaussien avec une variance $2\sigma_n^2$ et une moyenne nulle. Ceci indique que les parties réelles et imaginaires sont décorré- lées. Il est donc intéressant de noter la cohérence sur les versants en recouvrements sous la forme (équation 4.3) :

$$\gamma = \frac{\gamma_A 2\sigma_A^2 e^{-i\varphi_A} + \gamma_B 2\sigma_B^2 e^{-i\varphi_B} + \gamma_C 2\sigma_C^2 e^{-i\varphi_C}}{2(\sigma_A^2 + \sigma_B^2 + \sigma_C^2)} \left(1 - \frac{b_{\perp}}{b_{\perp c}}\right) \quad (4.3)$$

Avec

$b_{\perp c}$ La ligne de base critique

$2\sigma_n^2$ La variance au niveau de chaque pixel en recouvrement

γ_n La cohérence au niveau de chaque pixel en recouvrement.

b_{\perp} La ligne de base

Il est ainsi possible à l'aide de l'angle d'incidence et de la hauteur du versant, de dé- terminer la largeur des versants en recouvrement selon la formule suivante (équation 4.4) (Figure 4.4) :

$$L = hc \cdot ctg(\theta) \quad (4.4)$$

4.3.2 Les données SAR

Les caractéristiques des données SAR sur sol nu sont liées aux propriétés physiques du sol et à la pente locale. Elles permettent alors l'extraction de certaines propriétés du sol tels que la rugosité et le déplacement du sol sur les berges. Dans le domaine de l'hy- perfréquence des satellites SAR actuels, la caractérisation des propriétés physiques du sol n'est cependant pas facile. De nombreuses méthodes empiriques et semi-empiriques ont été testées, mais peu de techniques récentes s'intéressent aux zones de recouvrements, pour ce qui concerne l'extraction de la phase du signal radar ainsi que les propriétés du sol nu.

Avant de pouvoir générer des interférogrammes sur les zones de ravinement, il convient au préalable de mettre en place différentes méthodes devant se compléter. Elles se basent sur des séries des images radar SAR, mais également sur des données SfM-MVS-4D acquises sur le terrain.

L'innovation dans cette étude a été d'effectuer des mesures millimétriques des mouvements des berges lacustres ravinées à l'échelle du lac, et sur des zones inaccessibles avec des données libres qui ont une très haute résolution temporelle. Notre méthode améliore également l'analyse des données InSAR sur les zones de recouvrements.

Le choix de la fréquence

La sensibilité du signal rétrodiffusé de radar aux propriétés physiques du sol vient du fait que l'onde radar ne peut pénétrer la surface du sol très profondément, la sensibilité du signal varie surtout en fonction de la polarisation et de la longueur d'onde radar utilisée.

La bande C avec une longueur d'onde de 5,3 cm a été choisie dans le cadre de cette thèse. Ce choix a été fait en fonction des propriétés physiques de la bande C qui se résument par la faible pénétration de la bande dans la surface du sol, et par sa forte sensibilité au changement de rugosité et d'humidité du sol, en particulier en polarisation VV (émission verticale, réception verticale) [109] [126] [127] [128] [129]. Nous notons aussi que cette sensibilité augmente avec l'angle d'incidence du radar [109] [111]. La disponibilité et l'accès libre aux séries temporelles des données Sentinel-1 A&B ont également favorisé ce choix puisque ceci nous permet d'explorer la capacité des données SAR à détecter les faibles changements liés au phénomène de ravinement.

Les satellites Sentinel-1

Dans le cadre du programme de l'Union Européenne d'observation de la terre Copernicus, l'agence spatiale européenne (ESA) a lancé la mission Sentinel-1 (Figure Figure 4.5). Cette mission est formée par une constellation de deux satellites SAR identiques mais opposés (intervalle de 180°), Sentinel-1 A&B, les deux satellites sont placés à une altitude de 693 km dans une orbite héliosynchrone avec un angle d'inclinaison de $98,18^\circ$. Sentinel-1A et Sentinel-1B ont été respectivement lancés à partir de la station Kourou le 3 décembre 2014 et le 25 avril 2016.

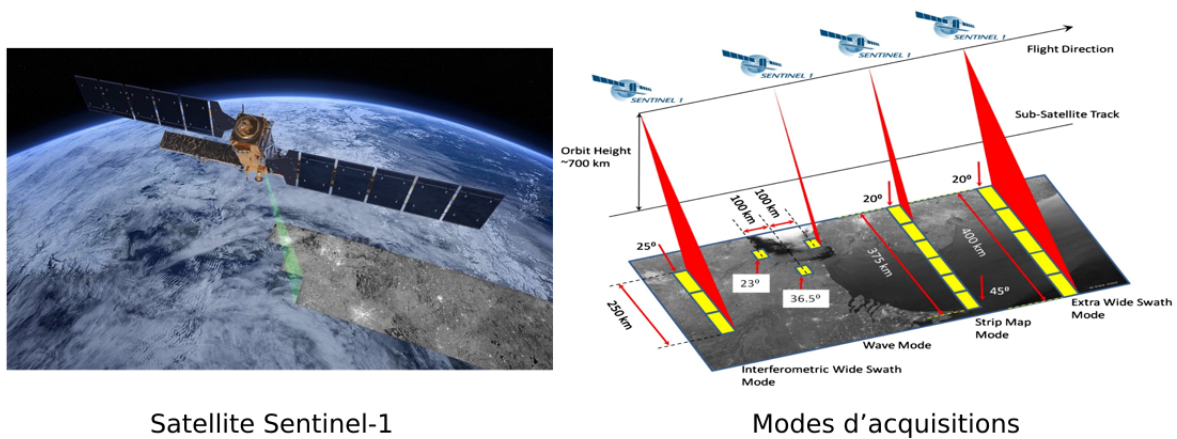


FIGURE 4.5 – Le satellite Sentinel-1 et ces modes d'acquisitions (source :ESA)

Les données Sentinel-1 A&B sont diffusées gratuitement sous format (SAFE) (Standard Archive Format for Europe) via la plate-forme scientifique Copernicus scientific data hub1, ou via la plate-forme Alaska Satellite Facility (ASF)2. Sentinel-1 est un capteur RADAR SAR (Synthetic Aperture Radar) qui acquiert des images polarimétriques en band C avec une fréquence centrale de 5,405 GHz ($\lambda \sim 5,6$ cm), avec quatre modes d'acquisition (tableau 4.1), et une haute fréquence temporelle de 6 jours.

Les caractéristiques des différents modes d'acquisitions.

- Le mode Stripmap (SM) constitue le mode d'acquisition classique de synthèse, avec une résolution de 5 m x 5 m pour 6 empreintes réduites de 80 Km, avec un angle d'incidence qui varie entre $18,3^\circ$ et $46,8^\circ$.
- Le mode Interferometric Wide swath (IW) présente le mode utilisé durant ce travail de thèse. Il utilise la technologie (TOPSAR) pour obtenir une qualité d'image plus

homogène via trois sous-empreintes (IW1, IW2 et IW3) avec une résolution de 5 m x 20 m, et une large fauchée de 250 Km.

- Le mode Extra Wide swath (EW) est basé aussi sur la technique TOPSAR pour obtenir des images sur des larges zones de 410 Km dans les zones polaires et maritimes avec une résolution de 20 m x 40 m.
- Le mode Wave (WV) permet de surveiller la direction et la hauteur des vagues dans des surfaces de 20 Km² après chaque 100 Km avec une résolution de 5 m x 5 m.

TABLEAU 4.1 – Les caractéristiques des différentes modes d’acquisition (S1)

Mode d’acquisition	Résolution (m x m)	Couverture (Km)	L’angle d’incidence (°)	Polarisation
SM	5 x 5	80	18,3 - 46,8	<ul style="list-style-type: none"> • Double (HH+HV,VV+VH) • Simple (HH, VV)
IW	5 x 20	250	29,1 - 46,0	<ul style="list-style-type: none"> • Double (HH+HV,VV+VH) • Simple (HH, VV)
EW	20 x 40	410	18,9 - 47,0	<ul style="list-style-type: none"> • Double (HH+HV,VV+VH) • Simple (HH, VV)
WV	5 x 5	20	21,6 - 38,0	<p>-</p> <ul style="list-style-type: none"> • HH et VV

Pour ces travaux de thèse, seules les séries temporelles de produit SLC (*Single Look Complex*) acquises en mode IW (*Interferometric Wide swath*) sont utilisées. Le barrage de Rambla de Algeciras en Espagne est entièrement balayé par la Sentinel-1 A et B en orbite ascendant et descendant. Le passage ascendant de satellite a été choisi afin de couvrir au maximum les berges du lac.

Le choix des images SAR

Le choix des données SAR est fait selon les impératifs des applications suivantes :

- Les données SAR sont acquises entre les différentes missions de prise de photos par drone.
- Les données SAR sont acquises dans les jours secs pour éviter l’effet de l’humidité du sol qui peut biaiser le signal rétrodiffusé des zones ravinées.
- Les données SAR mensuelles ont été traitées pour dépasser le problème de perte de cohérence lié aux baselines temporelles et spatiales.

4.3.3 Détection des changements cohérents

Après le choix des données SAR, nous avons appliqué les algorithmes de détection de changement de cohérence CCD (*Coherent change detection*) sur une pile d'images radar SAR (S1) multi-temporelles prétraitées. Cela permet de détecter les changements de magnitude, de cohérence et de phase causés par le ravinement des berges sur les versants lacustres du lac de Rambla de Algeciras. Le comportement de l'amplitude des ravines varie légèrement en fonction de nombreux paramètres telles que la rugosité, l'humidité du sol et l'exposition de la pente des berges.

Parmi les méthodes de détection des changements appliquées sur des images SAR, on cite la technique de détection de changement cohérent (*Coherent Change Detection <CCD>*). Cette technique CCD est basée sur l'analyse des changements de la cohérence interférométrique entre deux images SAR. La CCD permet d'analyser la cohérence interférométrique indépendamment de la calibration radiométrique des images SAR. Cette analyse apporte des informations plus fiables sur l'état de la surface que les autres techniques de détection de changement basées sur l'amplitude. Toutefois, la qualité des résultats de la CCD est liée fortement à la méthode de coregistration des images. La technique CCD (*coherent change detection*) est relativement récente et a donné d'excellents résultats dans la détection des changements multi-temporels sur les données SAR. Les algorithmes de CCD sont utilisés pour évaluer les dommages dans les zones urbaines causés par les opérations militaires ou les catastrophes naturelles [130] [131] [132] [133]. La technique est aussi appliquée pour la détection des cendres volcaniques, le suivi saisonnier des zones humides ou encore les changements morphodynamiques fluviaux et éoliens des paléochenaux [134] [135].

Le signal radar SAR rétrodiffusé par les zones de recouvrement est assez compliqué et la résolution de Sentinel-1 est moyenne (14 x 4 m), ainsi pour simplifier on suppose que le signal SAR des versants est le résultat de la combinaison de trois zones (A,B,C) (Figure,4.4). La technique de CCD est principalement appliquée dans le cadre de cette thèse pour expliquer le lien entre le changement de la cohérence et du phénomène de ravinement sur les berges lacustres.

A notre connaissance, il n'y a pas dans la littérature de travaux similaires qui tentent d'estimer l'érosion du sol des versants des ravines à l'aide des données radar SAR.

Pour caractériser la stabilité de la cohérence sur les versants des ravines lacustres du barrage Rambla de Algeciras, nous allons nous focaliser sur les versants non végétalisés des ravines qui sont majoritaires sur les berges lacustres et qui sont exposés généralement vers l'Est.

Des images des satellites Sentinel-1 A&B acquises entre Janvier et Décembre 2018 avec une polarisation VV dans l'orbite ascendant sont utilisées. Les deux satellites utilisent le même angle d'incidence, ce qui facilite le traitement de la série des images SAR. Ces images présentent la configuration idéale pour étudier la variation de la cohérence et la vitesse d'érosion sur les versants des ravines.

Nous avons calculé tout d'abord des produits de cohérences sur les versants des ravines avant et après le ravinement. Ensuite nous avons converti ces résultats de cohérence en un résultat de classification binaire entre <faible cohérence >et <forte cohérence >. Pour ce faire nous effectuons un simple seuillage de cohérence, en ne gardant que les valeurs supérieures à 0,6, afin de détecter la stabilité du signal rétrodiffusé sur les versants des ravines.

4.3.4 Interférométrie radar SAR PSI <Persistent Scatterer Interferometry >

La technique PSI exploite les empilements des séries d'images SAR acquises sur des multibaselines. Cette technique permet de séparer les variations de la phase résiduelle induite par la topographie afin de mesurer avec une précision centimétrique voir millimétrique les déformations topographiques des pixels caractérisés par une rétrodiffusion et une cohérence temporelle stable. Ces pixels sont appelés des diffuseurs permanents (PS) <Persistent Scatterer >.

Dans la littérature deux grandes méthodes sont proposées pour sélectionner les pixels PS :

1. Les méthodes basées sur la stabilité temporelle de la rétrodiffusion
2. Les méthodes basées sur la corrélation spectrale.

Sur une scène SAR, les surfaces naturelles qui subissent de forts changements temporels tels que les surfaces agricoles, les arbres, les lacs, les rivières, sont marquées par une cohérence trop faible. A l'inverse, sur les affleurements des roches et les pentes exposées à l'antenne SAR la rétrodiffusion étant plus importante permet de sélectionner des pixels PS sur une série d'images SAR. Concernant les milieux urbains, les pixels PS sont plus nombreux en raison de la rétrodiffusion stable et forte des infrastructures tels que les routes, les ponts, les digues des barrages, les bâtiments, les voies ferrées, etc.

La phase φ_n interférométrique de pixels PS est un nombre variant entre $(-II$ et $+II)$. Dans chaque interférogramme (M) la phase de chaque PS correspond à l'addition de plusieurs phases (équation 4.5

$$\varphi_M = \varphi_{défo} + \varphi_{atmo} + \varphi_{erreur} + \varphi_{Topo} + 2\pi\rho \quad (4.5)$$

Avec $\varphi_{défo}$ la phase de déplacement des pixels PS, φ_{atmo} la phase de retard atmosphérique, φ_{erreur} le bruit de la phase, φ_{Topo} le résiduel topographique, le terme $2\pi\rho$ correspond au déroulement de la phase.

Sur les zones de recouvrement la phase interférométrique des pixels collectés sur les multibaselines est définie par (équation 4.6) :

$$\varphi_M = \frac{-4\pi}{\lambda} \frac{b_M s}{R} + \varphi_{défo} + \varphi_{atmo} + \varphi_{erreur} + \varphi_{Topo} \quad (4.6)$$

Avec

b_M : la ligne de base pour

n : image

s : l'altitude de pixel PS

R : la distance avec le satellite et le diffuseur.

Il est connu que les capteurs radar SAR permettent de générer des modèles en 3D de la surface du globe terrestre en exploitant la différence de phase entre deux images SAR légèrement séparées par une ligne de base dans le traitement d'interférométrie SAR (SAR Interferometry <InSAR >). Cette technique devient une tâche difficile sur les zones à forte pente à cause de la distorsion géométrique de l'image SAR (l'effet de recouvrement et d'ombrage).

Sur les zones de recouvrements la phase interférométrique est caractérisée par deux discontinuités (au début et à la fin de la zone de recouvrement). Entre les deux discontinuités, la phase interférométrique est dépendante de la façon dont laquelle les diffuseurs de la zone de recouvrement sont mélangés.

La technique de déroulement de la phase pour une ligne de base unique <Phase unwrapping for Single-Baseline (PU-SB)> nécessite l'hypothèse de continuité de la phase nommée aussi <Itoh condition> [136]. Cette condition exige que la différence de phase entre deux pixels voisins soit inférieure à π , par conséquent la méthode PU-SB déroule parfaitement la phase sur les terrains plats. Il est par contre inutile de dérouler la phase par la méthode classique PU-SB sur les zones de recouvrement et les milieux urbains où la phase est discontinue.

Or, la technique de déroulement de phase sur des lignes de base multiple (PU-MB) présente de nombreux atouts sur les terrains de forts changements complexes. La PU-MB repose sur la combinaison de plusieurs interférogrammes issus des lignes de base multiples afin d'augmenter l'intervalle d'ambiguïté des phases absolues ce qui permet d'ignorer l'hypothèse de <Itoh condition>. Ceci justifie l'utilisation de PU-MB pour le déroulement de la phase sur les zones. Dans notre cas d'étude, pour résoudre le problème de discontinuités de la phase sur les versants des ravines nous avons déroulé à partir des interférogrammes pris sur des lignes de bases multiples (multibaseline).

Dans cette partie, nous avons appliqué la technique PSI pour déterminer la vitesse de déplacement des versants en recouvrement des ravines des berges lacustres du barrage de Rambla de Algeciras, à l'aide de 19 images Sentinel-1 acquises en passage ascendant de satellite (Tableau 4.2). Les produits SLC de Sentinel-1 ont été utilisés dans le cadre de cette étude, en gardant à l'esprit que la cohérence sur les versants en recouvrement reste toujours élevée. Une sélection et une analyse de la vitesse de déplacement des pixels PS situés sur les versants en recouvrement sont effectuées à l'aide du logiciel *StaMPS*. La vitesse de déplacement estimée par la technique PS a ensuite été comparée avec les mesures de détection de changement réalisées par les MNT diachroniques établis sur la ravine (G.B-3).

TABLEAU 4.2 – Les caractéristiques des images SAR (Sentinel-1)

Paramètres	Description
Orientation de l'orbite	Ascendante
Type de données	SLC -IW
Angle d'incidence centrale (degré)	38,3
Résolution spatiale (range × azimuth)	Entre 2,7 à 3,5×22 m
Emprise au sol des images	250x250 km
Taille du pixel	2,3×14,1 m
Polarisation	VV
Nombre des images	19
Heure d'acquisition (UTC)	06 : 09
Date d'acquisition	Entre 18/01/2018 - 20/12/2018

La figure 4.6 présente les étapes de la méthodologie utilisée dans cette partie. Après avoir choisi l'orbite, la polarisation et la date d'acquisition des images, des traitements sont effectués pour générer les interférogrammes qui serviront à l'identification des pixels PS.

Ces traitements commencent par :

1. La coregistration
2. La cohérence
3. L'interférogramme.

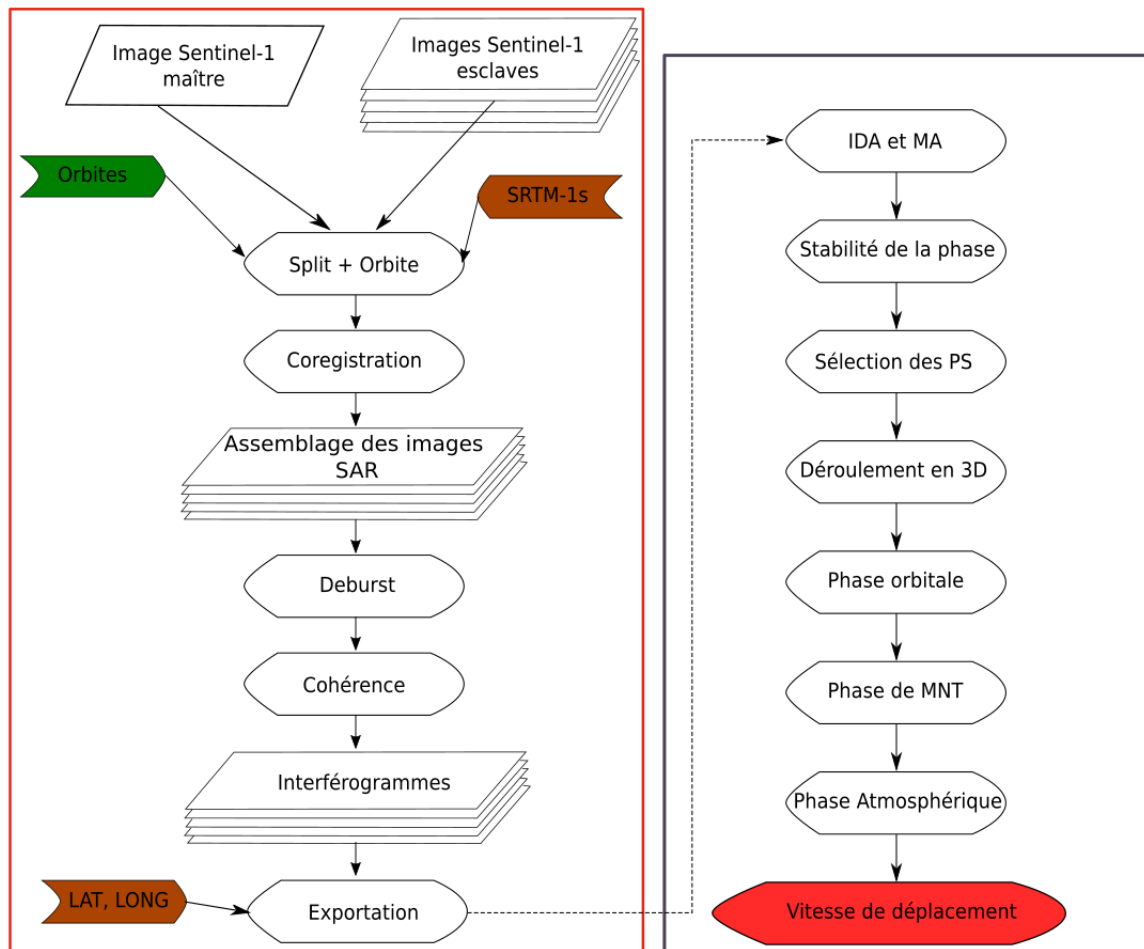


FIGURE 4.6 – Les traitements appliqués sur les images Sentinel-1 pour générer les pixels PS sur les versants en recouvrements des ravines

Image de référence

A partir de la série des images Sentinel-1, une image de référence <maître >a été choisie afin de minimiser les décorrélatons spatio-temporelles. L'image acquise le 11/06/2018 est située au milieu de la série temporelle avec une ligne de base perpendiculaire maximale de 100 m (Figure 4.7).

Coregistration

La coregistration des images radar SAR est une étape clé pour générer les interférogrammes. Cette étape consiste à aligner parfaitement une pile d'images Radar SAR à partir d'une image de référence en prenant en compte l'altitude et l'orbite du satellite SAR. Généralement, le processus de coregistration est basé sur la corrélation croisée. Cependant, cette technique est très lente sur des fenêtres de grandes tailles. Alors, pour optimiser la coregistration SNAP, il faut diviser ce processus en deux étapes : la coregistration fine et la grossière.

Dans un premier temps, SNAP applique la coregistration grossière, basée sur le fichier de métadonnées de Sentinel-1 POD <Precise Orbit Ephemerides >qui définit la position du satellite lors de l'acquisition des données SAR. Ensuite, les résultats de cette étape sont utilisés pour affiner l'alignement des images dans l'étape de coregistration fine. Lors de cette étape, SNAP réalise un alignement à l'échelle de sub-pixel grâce à la corrélation croi-

sée entre les deux images. Il est difficile de trouver des points corrélés sur les terrains de topographie complexe. Il est donc suggéré d'utiliser un modèle numérique de terrain afin de repérer facilement les points de corrélation. Durant cette étude nous avons utilisé le modèle numérique de terrain SRTM-1s (*Shuttle Radar Topography Mission*) avec une résolution de 30 m.

La dernière étape de coregistration repose sur le rééchantillonnage des valeurs complexes de l'image. Nous avons choisi la méthode d'interpolation bilinéaire afin d'obtenir une image complexe à deux termes : intensité et phase.

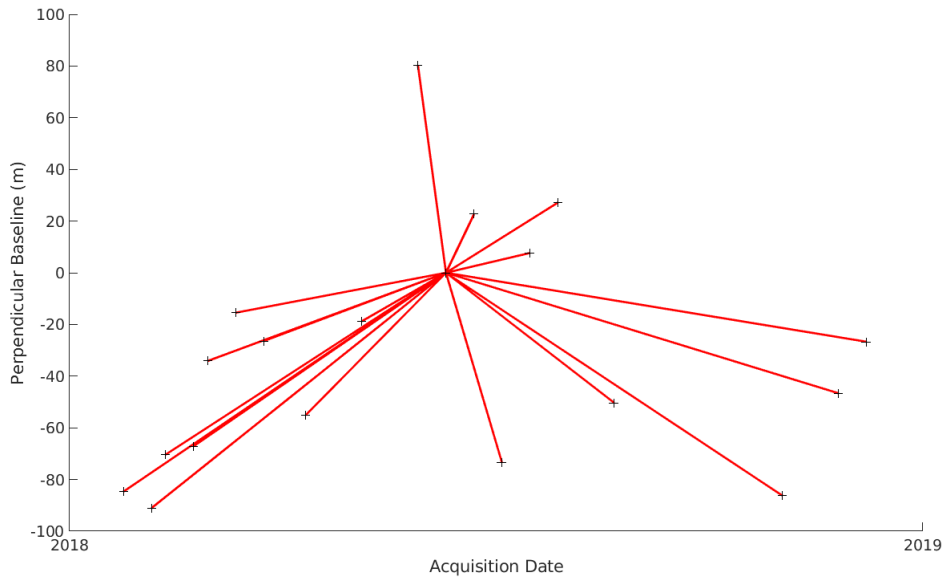


FIGURE 4.7 – La ligne de base spatiale et temporelle des images utilisées (R. Hout 2019)

Cohérence

La cohérence est le produit de corrélation croisée entre deux images SLC (équation 4.7) (Lu et Freymueller, 1998; Zebker et Villasenor, 1992). Théoriquement, la cohérence du produit de corrélation doit être comprise entre 0 et 1 où 0 = absence de corrélation et 1 = corrélation parfaite. Cette mesure standard de la similarité statistique permet d'expliquer la stabilité de la phase après le deuxième passage du capteur SAR [137]. La corrélation de 0,5 indique un rapport signal/bruit $\langle \text{signal-to-noise ratio} \rangle$ (SNR) de 1. Lorsque la corrélation est supérieure à 0,20, l'information sur la phase peut être récupérée et s'améliore lorsque la corrélation augmente. Quand la corrélation est comprise entre 0,15 et 0,20, l'information sur la phase devient difficile à retrouver. Et si la corrélation est inférieure à 0,15, aucune information de la phase ne peut être récupérée [138].

Globalement, dans les zones stables (un faible changement avec le temps), les valeurs de cohérence sont généralement supérieures à 0,5.

$$\gamma = \frac{\langle C_1 C_2^* \rangle}{\sqrt{\langle C_1 C_1^* \rangle \langle C_2 C_2^* \rangle}} \quad (4.7)$$

Lorsque les valeurs de cohérence sont proches de zéro ($\gamma \approx 0$), on peut définir plusieurs sources de décorrélation entre les deux images SAR à savoir [139] [140] (équation 4.8) :

$$\gamma = \gamma_{Thermal} \cdot \gamma_{Spatiale} \cdot \gamma_{Temporale} \cdot \gamma_{Volumique} \quad (4.8)$$

1. La décorrélation thermique : Cette décorrélation est due essentiellement au bruit blanc gaussien ajouté au signal transmis qui influence la phase. L'équation 4.9 met en relation le rapport signal-bruit (SNR) et la décorrélation thermique. Dans le cas des satellites SAR, le rapport SNR est suffisamment élevé pour négliger l'effet de décorrélation thermique [141].

$$\gamma_{thermal} = \frac{1}{1+SNR^{-1}} \quad (4.9)$$

2. La décorrélation volumique : La décorrélation volumique est liée à la pénétration de l'onde radar [31] et à la distribution verticale des réflecteurs. Pour les terrains plats et les milieux urbains, la décorrélation volumique n'est pas significative, mais pour les zones de recouvrement et les forêts, la décorrélation volumique est élevée.
3. La décorrélation spatiale : Elle résulte des variations des distances orbitales de satellite SAR entre deux acquisitions. Ces variations appelées *baseline spatiale* (équation 4.10) (figure 4.8), implique un changement de géométrie de collecte des images SAR. Cette décorrélation représente un grand obstacle pour la collecte des images temporelles cohérentes.

$$\rho_{spatial} = 1 - \frac{2 \cos \theta R_y b_{\perp}}{\lambda r} \quad (4.10)$$

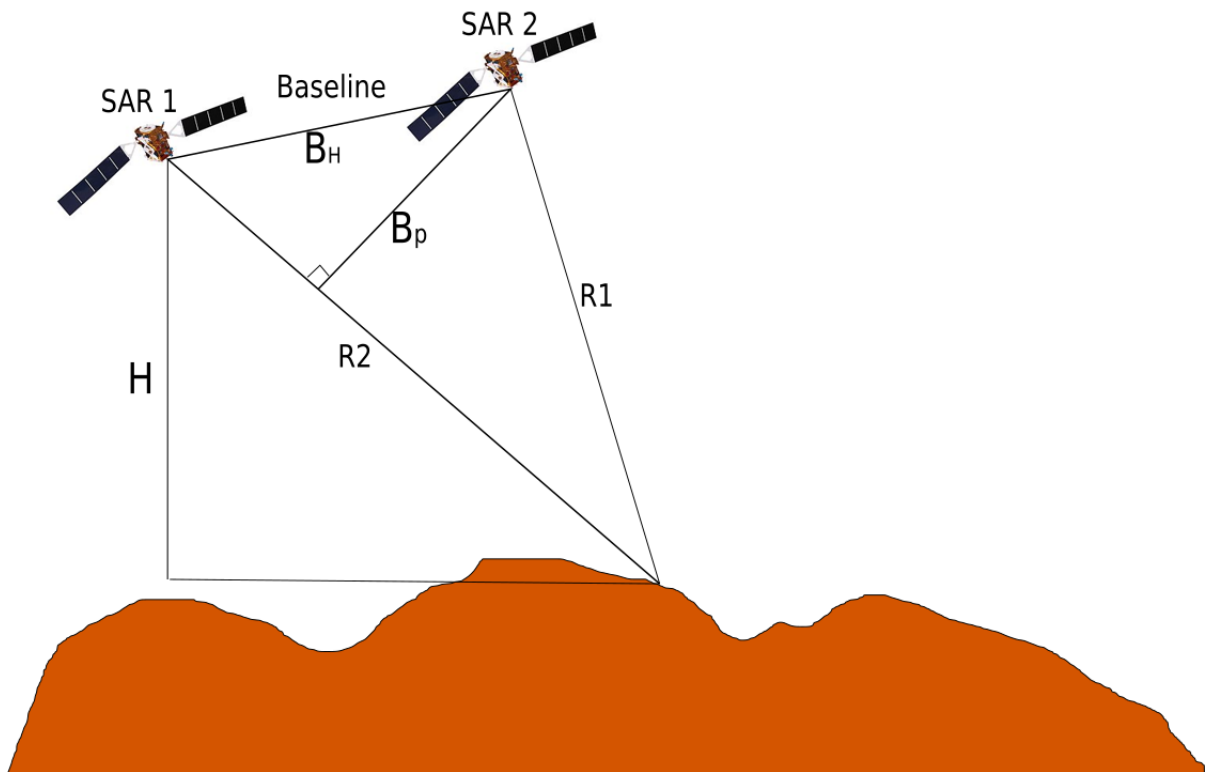


FIGURE 4.8 – Les lignes de base spatiale et temporelle (R. Hout 2019).

4. La décorrélation temporelle : Elle est causée par le changement des propriétés physiques de la surface du sol entre les deux passages du satellite (érosion, catastrophe naturelle, couvert végétal, etc) [28] [32].

Géolocalisation

Avant de sélectionner les pixels PS, nous avons d'abord géocodé tous les pixels des images afin de passer des coordonnées radar (azimut, distance) aux coordonnées géographiques (latitude, longitude) en utilisant les fichiers de l'altitude, la longitude et l'angle d'incidence correspondant à chaque pixel de la zone d'étude.

Identification des pixels PS

Généralement sur StaMPS nous avons besoin de 12 interférogrammes pour réaliser une étude InSAR multi-temporelle. Les interférogrammes sont générés à l'aide du logiciel SNAP avant de supprimer la phase topographique à l'aide de modèle numérique SRTM - 1s. A partir d'une série d'images SAR, le logiciel *StaMPS* définit les pixels stables et de forte cohérence temporelle comme des pixels PS. La sélection des pixels PS a été effectuée suite à une série d'itération pour éliminer les erreurs liées aux phases topographique, d'orbite, de bruit atmosphérique, de déformation et de bruit des diffuseurs.

StaMPS utilise le script Matlab pour identifier les pixels cohérents et extraire la déformation de la phase de ces pixels. StaMPS dispose aussi d'une gamme très large d'options et de paramètres pour identifier les pixels PS et filtrer le bruit avant de dérouler la phase des données.

La sélection des candidats PS (PSC)

Après la génération des interférogrammes sous SNAP, nous avons exporté les interférogrammes filtrés sous StaMPS.

Dans la pratique courante, une sélection préliminaire d'un sous-ensemble de candidats PS (PCS) a été effectuée selon l'indice de dispersion d'amplitude ADI : D_A (*Amplitude Dispersion Index*) **A. Ferretti**, qui est défini comme le rapport entre l'écart-type et la moyenne de l'amplitude (équation 4.11) :

$$D_A \simeq \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad (4.11)$$

Le seuil de ADI est fixé à 0,40 pour éliminer les pixels situés sur le lac et également les pixels décorrélés par le changement de couvert végétal. Cependant, les pixels des zones de recouvrement sont souvent éliminés par l'algorithme de StaMPS. Alors, pour améliorer la sélection des PSC nous avons modifié l'algorithme de StaMPS en mettant en place l'amplitude moyenne [142] comme un deuxième seuil de sélection que nous avons fixé à 1000 (μ_A), qui entraîne théoriquement une décorrélation.

Les deux indicateurs permettent alors d'identifier les pixels des zones de recouvrements comme des pixels de PSC.

La stabilité de la phase

Un des facteurs qui affecte l'identification des pixels PS est l'analyse de la phase. La phase enroulée $\Delta\varphi_{P,i}$ pour chaque pixel 'X' de l'interférogramme 'i' résulte de la somme de cinq phases enroulées (équation 4.12)[143].

$$W\{\Delta\varphi_{X,i}\} = W\{\Delta\varphi_{H,X,i} + \varphi_{LOS,X,i} + \varphi_{Atm,X,i} + \Delta\varphi_{Orb,X,i} + \varphi_{N,X,i}\} \quad (4.12)$$

- Avec : $\Delta\varphi_{H,P,i} = \frac{4\pi b_{\perp,i} \Delta h}{\lambda R \sin(\theta)}$: La phase topographique résiduelle.
 $\Delta\varphi_{Orb,X,i}$: La phase due à l'exactitude orbitale.
 $\varphi_{LOS,X,i}$: La phase due aux mouvements dans la direction de ligne de visée de satellite < LOS >.
 $\varphi_{Atm,X,i}$: La phase liée au retard atmosphérique.
 $\varphi_{N,X,i}$: La phase de bruit, afin que le signal de pixels PS ne sera pas masquer la phase de bruit doit être très strictement inférieur à π
 $W\{\cdot\}$: L'opération de déroulement de la phase.

L'analyse de la stabilité de la phase menée par l'algorithme de StaMPS est basée sur la corrélation spatiale. Les facteurs de pondérations normalisées des pixels voisins sont reliés au SNR associé à la luminosité des pixels.

Dans notre cas, les pixels superposés des zones en recouvrements couvrent les versants des ravines exposées vers le capteur. Ils ont des valeurs de SNR supérieur à 10, et ils ne possèdent généralement pas de diffuseurs puissants tels que les affleurements rocheux ou les objets métalliques. Par conséquent ces pixels ne seront pas rejetés avant le calcul de la cohérence basé sur la corrélation spatiale, ce qui assure une bonne qualité de la cohérence sur les versants des ravines.

La corrélation spatiale

StaMPS suppose que le diffuseur dominant du pixel PS apparaisse dans les autres pixels adjacents. Pour assurer le déroulement de la phase en 3D avec une grande précision, StaMPS élimine les pixels adjacents des pixels PS sélectionnés. Cette hypothèse a un impact important sur l'identification des pixels PS des zones en recouvrement dans les images SAR de haute résolution.

Les images Sentinel-1 ont une résolution moyenne. Quelques pixels couvrent les versants en recouvrement des ravines. Dans ce cas StaMPS peut identifier seulement une grille de pixels PS de faible densité sur les ravines, ce qui implique que StaMPS ne peut pas éliminer les pixels adjacents des pixels PS.

Après la détermination d'un sous-ensemble de candidats PS selon l'indice de dispersion d'amplitude, d'amplitude moyenne et de stabilité de la phase, nous avons calculé la cohérence temporelle γ_x (équation 4.13) itérativement à partir des résiduelles sur chaque pixel PSC.

$$\gamma_x = \frac{1}{M} \left| \sum_{i=1}^M \exp \left\{ \sqrt{-1} \left(\varphi_{x,i} - \tilde{\varphi}_{x,i} - \Delta\hat{\varphi}_{\varepsilon,x,i}^u \right) \right\} \right| \quad (4.13)$$

Avec :

$\varphi_{x,i}$: La différence de phase interférométrique enroulée pour chaque pixel x de l'interférogramme 'i'

$\tilde{\varphi}_{x,i}$: L'estimation de la corrélation spatiale de la différence de phase.

$\Delta\hat{\varphi}_{\varepsilon,x,i}^u$: L'estimation de la partie décorrélée de la phase.

En pratique après chaque itération, StaMPS calcule le changement de RMS (*Root Mean Square*) de la cohérence temporelle. Lorsque RMS ne baisse pas, la solution converge et l'algorithme de StaMPS arrête les itérations. Chaque pixel PS sélectionné de PSC tient en

considération l'indice de dispersion d'amplitude, l'amplitude moyenne et la cohérence temporelle.

Déroulement en 3D de la phase

Le déroulement de la phase consiste à convertir les déplacements en phase aux déplacements en mètres. Ce passage permet de dérouler la phase interférométrique enroulée et d'éliminer les sources d'erreurs spatialement corrélées et non corrélées.

Lors du déroulement en 3D de la phase, StaMPS utilise un algorithme avec deux dimensions spatiales et une dimension temporelle afin de mesurer le taux de déformation. Avant le déroulement de la phase, l'erreur de l'MNT est éliminée. Ensuite, l'algorithme de StaMPS calcule dans un premier temps le déphasage temporel pour chaque pixel PS puis pour chaque pas de temps. Après le déroulement de la phase, la partie spatialement corrélée des autres sources d'incertitude a supposé qu'elle est temporellement décorrélée. Pour estimer les erreurs spatialement corrélées, un filtre passe-haut est appliqué en dimension temporelle et un autre filtre passe-bas est employé sur les deux dimensions spatiales. Enfin, une itération de l'inversion par moindres carrés est appliquée afin de déterminer le déplacement sur chaque pixel PS le long de la direction de visée de satellite (LOS)

La Correction atmosphérique

Nous avons utilisé Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR (GACOS) [144] pour supprimer les effets atmosphériques des interférogrammes. GACOS intègre les données météorologiques depuis le High Resolution European Centre for Medium Resolution Weather Forecasts (HRES-ECMWF) et utilise ainsi le model Iterative Tropospheric Décomposition (ITD) pour corriger le retard atmosphérique des données InSAR.

4.4 Résultats et discussion : La fiabilité des données SAR utilisées pour mesurer l'évolution morphologique des ravines

4.4.1 La détection des changements

Cette partie nous fournit une analyse sur la cohérence que nous avons observée sur les versants érodés par le ravinement.

Pour cela nous avons travaillé en premier lieu sur les différentes sources de décorrélation de la cohérence des images. Puis nous avons évalué la performance de la méthode de coregistration sur la digue du barrage afin de connaître la performance de l'algorithme. Ensuite nous avons examiné l'évolution de la cohérence en fonction de l'occupation du sol selon l'orientation des versants. Enfin nous avons apprécié l'impact de l'érosion sur la variation de la cohérence. Ces analyses ont été effectuées sur différentes lignes de bases spatiale et temporelle.

Le choix des images Sentinel-1 influe sur le résultat de la cohérence. Ainsi, pour maîtriser les différentes sources de décorrélation de la cohérence des images nous avons déterminé certains critères lors de la sélection de ces images. En effet, si la ligne de base critique fixée à 5 km est dépassée pour les images Sentinel-1, il se produira une décorrélation d'origine spatiale. De la même façon, en raison de l'ampleur de l'activité de l'érosion, nous aurions des difficultés à conserver une cohérence importante si l'intervalle de temps dépassait une année. Pour éviter ces phénomènes, nous avons opté pour une ligne de base spatiale qui ne dépasse pas 100 m et nous avons exigé que la ligne de base temporelle ne dépasse 300 jours. De plus, lors du calcul de cohérence, nous avons utilisé une petite fenêtre rectangulaire afin de réduire la décorrélation due au bruit de chatoiement. Avec cette configuration nous réduire les facteurs connus de décorrélation (spatiales, temporelles, du bruit, et thermique) afin d'avoir une corrélation stable et pouvoir identifier l'effet des autres facteurs sur la cohérence.

détection des changements sur la digue du barrage

Pour connaître la performance de l'algorithme nous avons travaillé sur l'évaluation de la performance de la méthode de coregistration sur la digue du barrage de Rambla de Algeciras. Pour illustrer cela, nous présentons en graphe un exemple de la détection des changements sur cette digue (Figure 4.9). Ce graphique a été réalisé à partir de la série d'images de cohérences calculées pendant l'année 2018. Nous observons sur celui-ci que la cohérence sur la digue ne passe jamais sous le seuil de 0,8.

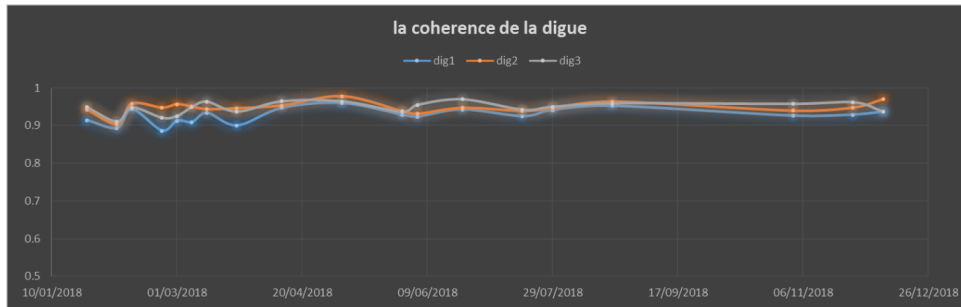


FIGURE 4.9 – Le graphe des changements de la cohérence sur la digue de barrage de Rambla de Algeciras(R. Hout, 2019)

La détection des changements sur les ravines des berges

Pour examiner l'évolution de la cohérence en fonction de l'occupation du sol selon l'orientation des versants, nous avons mené une simple analyse visuelle des images de cohérence avant et après l'érosion des versants des ravines. Nous avons remarqué, sur la première paire d'images acquises entre le 11 Juin 2018 et 23 Juin 2018 avec une ligne de base de 8 m, la dominance de fortes valeurs de cohérence avec une moyenne de 0,7. Ceci indique qu'aucun changement ne s'est produit sur les berges lacustres lors de l'acquisition des images. En outre l'intervalle de temps entre les 11 et 23 juin 2018 est de 12 jours. Cela implique que la décorrélation temporelle n'a pas d'effet. De plus, la distance qui sépare l'acquisition des deux images est de l'ordre de 8 m et n'a donc pas d'effet sur la décorrélation spatiale ($\gamma_{temporelle} \approx 1$ et $\gamma_{spatiale} \approx 1$) (Figure 4.11 et 4.12). Enfin, la station climatique a enregistré 0 mm de précipitation sur les berges. Ainsi, puisque ces facteurs sont restés stables, ils n'ont pu contribuer au changement de cohérence entre les deux images, ce qui vient confirmer la valeur de forte cohérence que nous avons évoqué plus haut.

Il faut noter que les zones d'ombre enregistrent les valeurs les plus faibles. Ceci est lié au fait que le signal envoyé par l'antenne n'atteint pas les versants situés à l'opposé de l'angle d'incidence du signal, dans le cas de notre terrain d'étude la configuration orbitale de Sentinel-1 fait que les versants exposés Nord-Sud ne sont pas visibles tels que les versants de la ravine G.B-2.

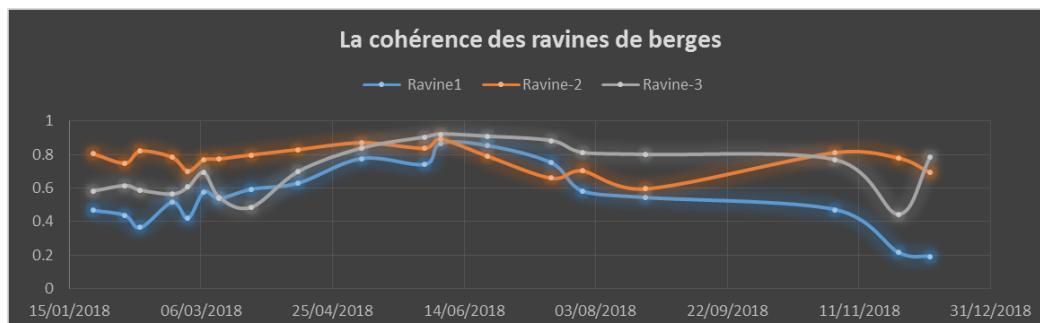


FIGURE 4.10 – Le graphe des changements de la cohérence sur les trois ravines étudiées(R. Hout, 2019)

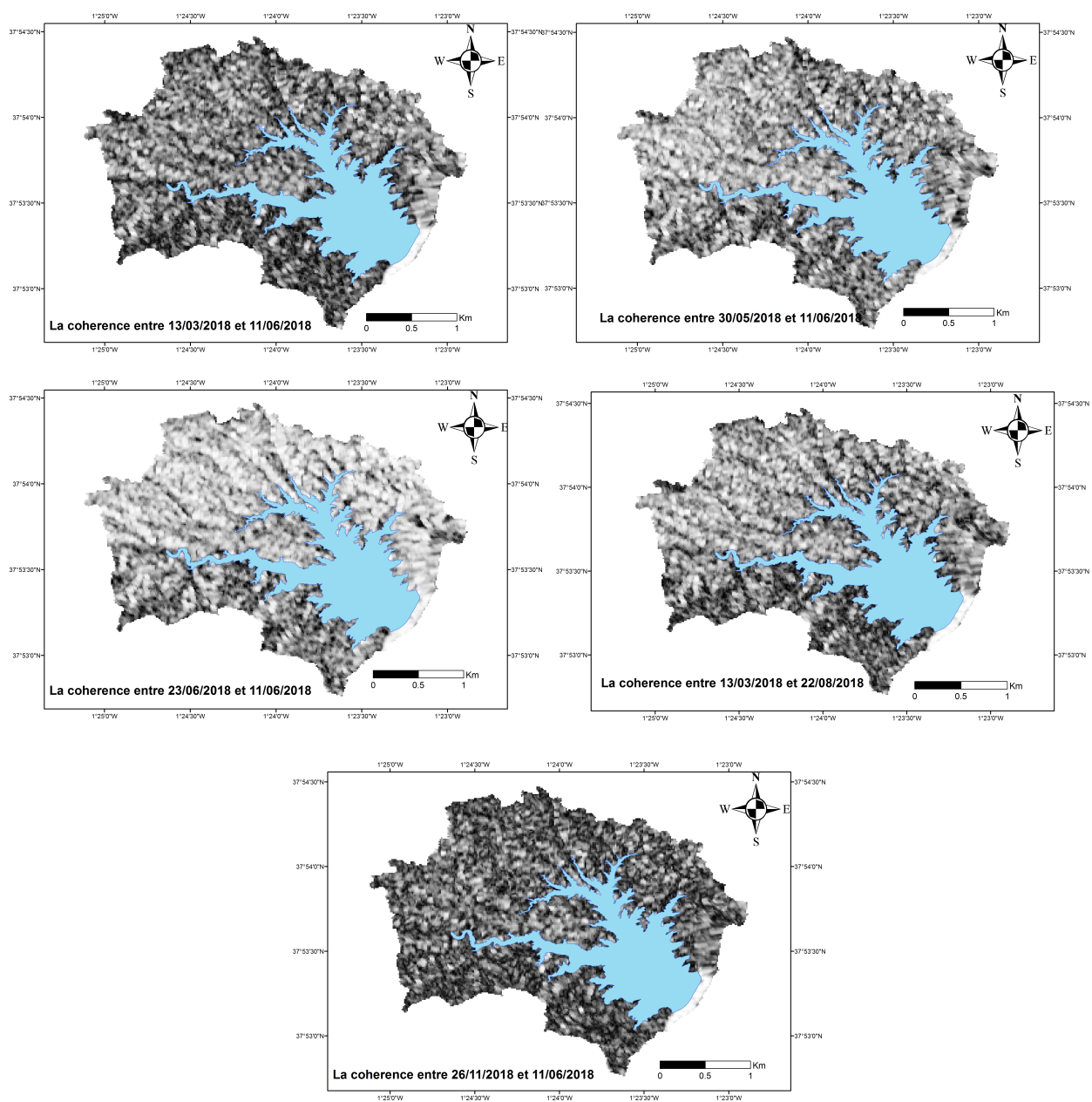


FIGURE 4.11 – Les cartes des variations temporelles de la cohérence sur les ravines des berges du lac Rambla de Algeciras (R. Hout, 2019)

Nous analysons maintenant l'effet de déclenchement du ravinement sur les changements de la cohérence selon deux intervalles de temps :

- Entre 11/Juin/2018 et 22/Août/2018 : Pendant cette période, les berges ont reçu 44 mm (le pic de facteur R) ayant causé le maximum d'érosion. L'interprétation visuelle de l'image de cohérence montre une baisse considérable de la cohérence. Cette variation est caractéristique des versants végétalisés et des zones plates, contrairement aux versants en recouvrement qui maintiennent de fortes valeurs de cohérence (>0.6) (Figure 4.12).
- Entre le 11/Juin/2018 et le 08/Décembre/2018 : Cette période correspond à la période humide, nous constatons que les comportements préalablement observés sur la période Juin à Août sont toujours valables ici avec une diminution plus importante de la cohérence sur les versants occupés par la végétation. Néanmoins sur les versants en recouvrements la cohérence reste toujours élevée, ce qui atteste une nouvelle fois que le signal reste cohérent après le ravinement (Figure 4.11 et 4.12).

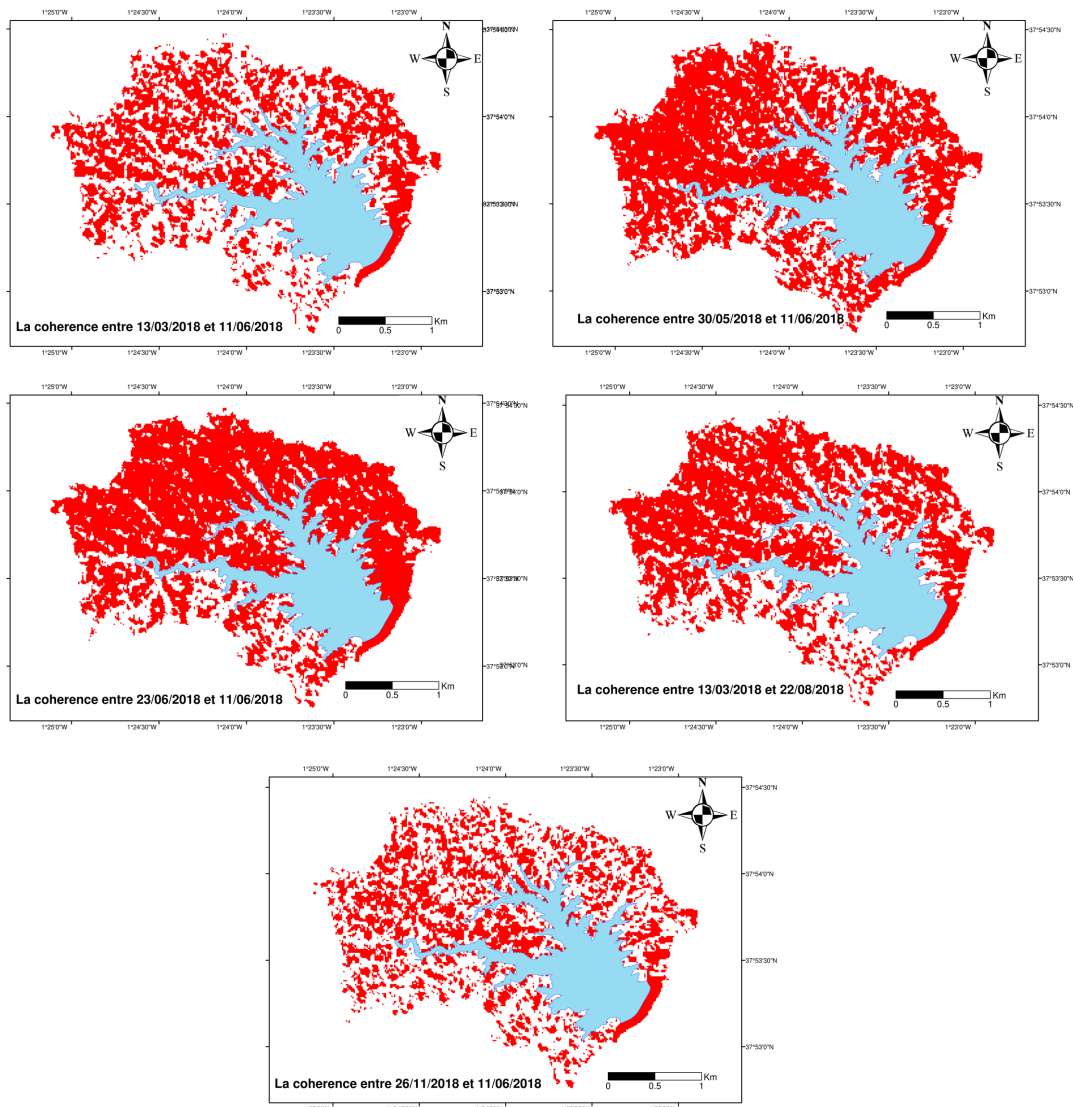
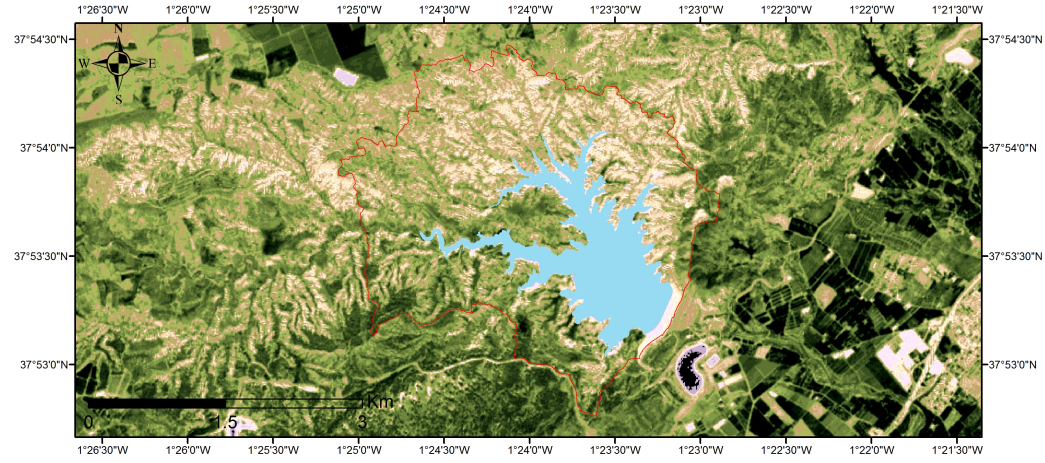


FIGURE 4.12 – Les cartes des variations de la cohérence temporelle avec un seuil de 0,6 (Hout, 2019)

Le changement d'occupation du sol à l'aide des images Sentinel-2

A partir des images de l'indice de végétation (NDVI) et la composition fausse couleur de Sentinel-2 (Figure 4.13), nous examinons l'occupation du sol selon l'orientation des versants. Nous constatons alors que le phénomène de répartition contrastée de la végétation entre les versants opposés est visible sur la majorité des ravins, où les versants exposés Ouest et Sud sont caractérisés par un sol nu. A l'inverse, les versants Est et Nord sont dominés par une végétation herbacée. Nous trouvons aussi des forêts de conifères (*Pinus halepensis*) au sud-ouest du lac. Nous pouvons constater sur le graphique de l'évolution temporelle de la cohérence que la plupart des versants occupés par la végétation sont distingués par des cohérences faibles, ce phénomène a été observé surtout sur la ravine (G.B-1).

Carte :A



Carte :B

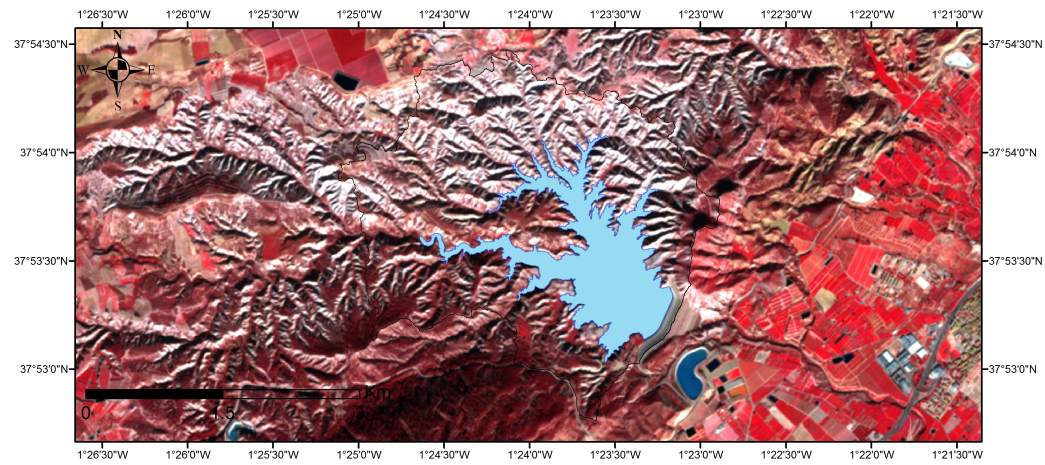


FIGURE 4.13 – Carte A : Image Sentinel-2 (NDVI) ; Carte B : Image Sentinel-2 (Composition fausse couleur 8,4,3) (R. Hout, 2019)

Nous allons maintenant expliquer l'impact de l'érosion sur la variation de la cohérence. Dans la littérature, cette rugosité élevée est la caractéristique morphométrique la plus fiable pour la détection des ravines. Ainsi nous l'avons mesurée à partir des MNT (LiDAR et drone) avant et après le ravinement. Les résultats témoignent que la rugosité reste toujours élevée dans les ravines. Ceci explique la forte rétrodiffusion de signal radar et la cohérence temporelle élevée et quasi-constante des versants en recouvrement.

Pour conclure, nous pouvons dire que le signal rétrodiffusé par les zones de recouvrement représente la somme des superpositions des signaux rétrodiffusés par l'ensemble des diffuseurs présents sur les berges. La dynamique du coefficient de rétrodiffusion radar de ces zones reste toujours élevée du fait de la combinaison entre l'effet de surface des sols très rugueux et la pente locale des berges. En effet, les versants des ravines en recouvrements sont souvent suffisamment cohérents afin de produire une phase InSAR théoriquement utilisable. Les valeurs de la cohérence ne sont pas corrélées avec le taux d'érosion (Figure 4.14) ($R=0,1$), ce qui explique que l'érosion n'a pas d'impact significatif sur le signal rétrodiffusé par les versants.

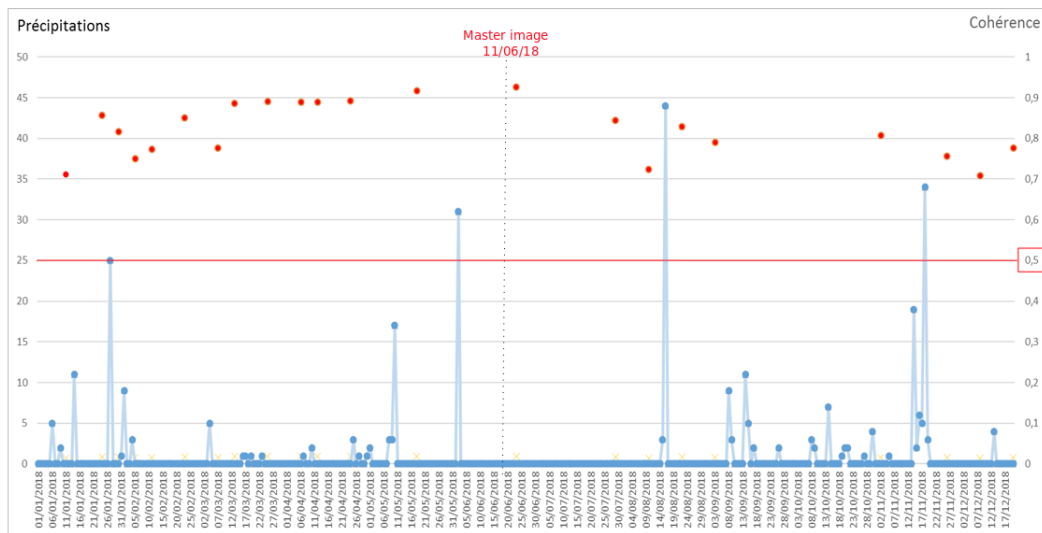


FIGURE 4.14 – Le graphe de la variation de la cohérence SAR en fonction des précipitations ($R=0,1$) (Hout, 2019)

4.4.2 L'interférométrie radar SAR multi-temporal

L'interprétation des valeurs de vitesse PS

Dans le cas de versants en recouvrement comme pour de nombreux milieux en recouvrement, la phase est la somme de plusieurs phases ainsi qu'elle est souvent très bruitée, et le signal rétrodiffusé par ces surfaces est très sensible d'une part aux changements de couvert végétal et d'autre part à l'angle de visée de l'antenne SAR. Ce sont donc de sérieuses contraintes à prendre en compte pour calculer les vitesses de déplacement sur les ravines.

Comme nous l'avons expliqué précédemment la phase des pixels PS située sur les ver-

sants en recouvrement est la somme des phases des pixels présentes sur une longueur 'L' à différentes distances par rapport à l'antenne SAR (Figure 4.4). Ceci fait que chaque vitesse de déplacement mesurée par un pixel PS représente la somme des vitesses d'érosion sur les versants et de sédimentation sur le lit de la ravine. Donc, théoriquement, la vitesse des pixels PS sur ces zones sera toujours nulle. Mais dans la nature, la morphologie des ravines et la présence des agents de transport comme l'eau ou bien la pente vont changer considérablement les valeurs de vitesse sur les pixels PS.

La présence de vitesses négatives est associée à une intense activité d'érosion le long de la longueur 'L' et à un transport de sédiments, sans activité de sédimentation. Ces valeurs sont localisées généralement sur les ravines des berges où les bas-fonds des ravines sont connectés avec les lacs ou les rivières, ce qui va donner un bilan négatif sur le versant en recouvrement (Figure 4.15).

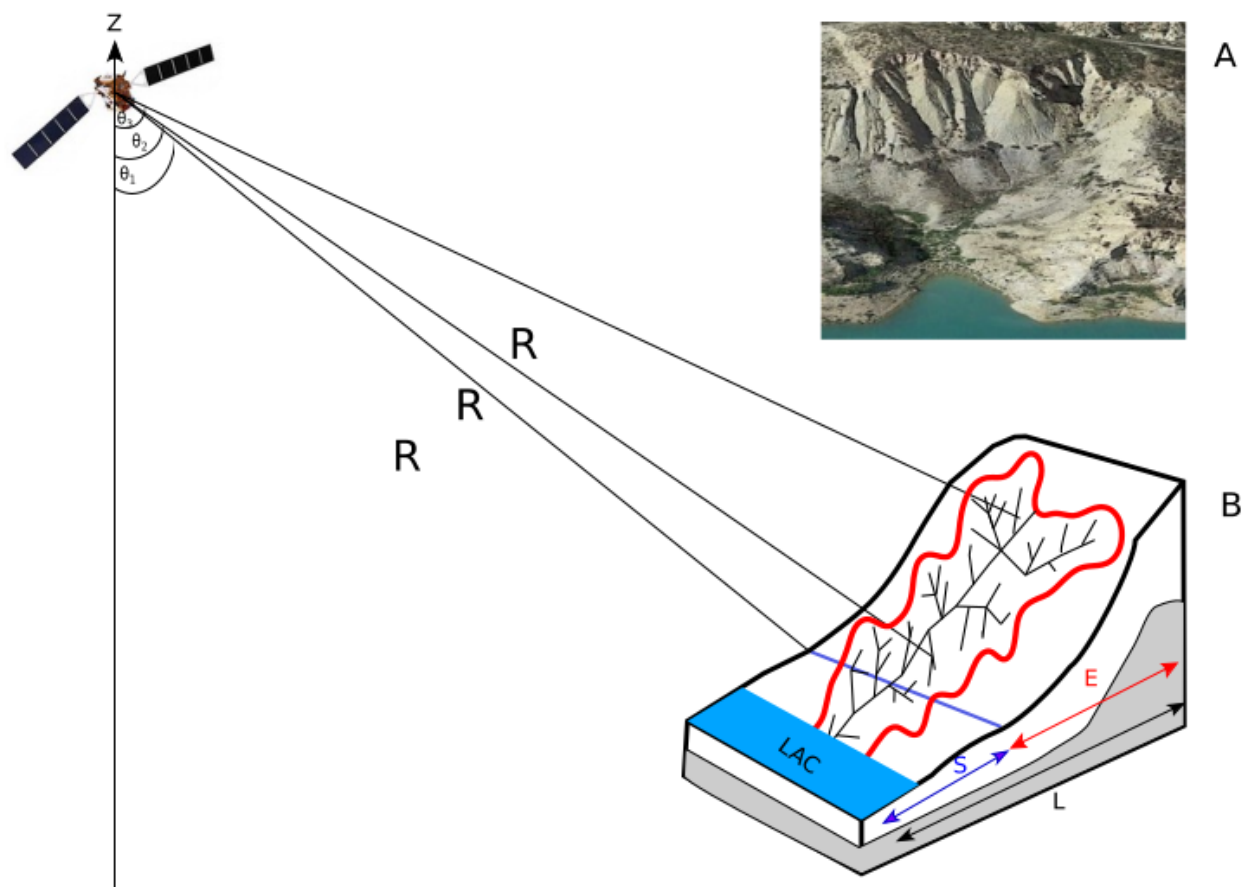


FIGURE 4.15 – Le schéma explicatif des valeurs de PSI négatives sur les versants en recouvrement des ravines des berges (R. Hout 2019)

Dans le cas de valeurs positives, les versants en recouvrements sont caractérisés par des pentes peu accentuées avec une activité importante de sédimentation sans que les sédiments ne soient transportés, et une faible activité d'érosion sur la longueur 'L'. Ces valeurs sont observées sur les ravines à la morphologie complexe et à la topographie peu accentuée. Ces ravines ne sont pas en contact avec le lac (Figure 4.16).

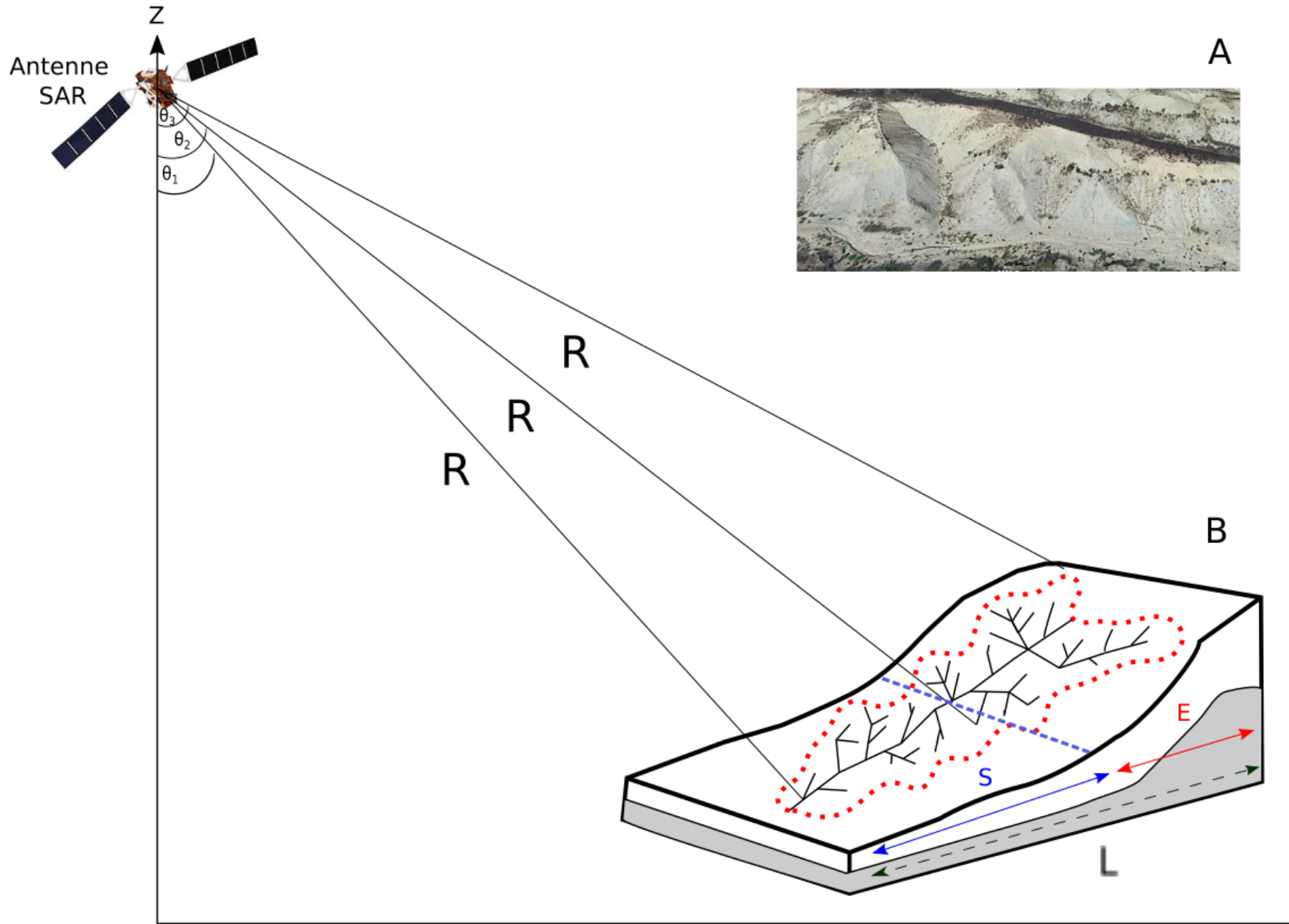


FIGURE 4.16 – Le schéma explicatif des valeurs de PSI positifs sur les versants en recouvrement des ravines des berges (R. Hout 2019)

On peut conclure que la surface mesurée par la technique PSI est déterminée par l'angle d'incidence du radar et par la morphologie des ravines.

Le mouvement des pixels PS

A partir des 19 images Sentinel-1 SLC, nous avons généré 18 interférogrammes (Figure 4.17), sur toute l'année 2018. La mise en œuvre de la méthode de sélection des pixels PS permet de détecter plusieurs pixels PS répartis sur les berges et la digue du barrage, avec des vitesses de déplacement variant entre - 27,6 mm/an et 21 mm/an. Sur les versants en recouvrement, ces valeurs ponctuelles permettent de surveiller avec une grande précision l'activité et la contribution des ravines de berges dans le comblement du barrage.

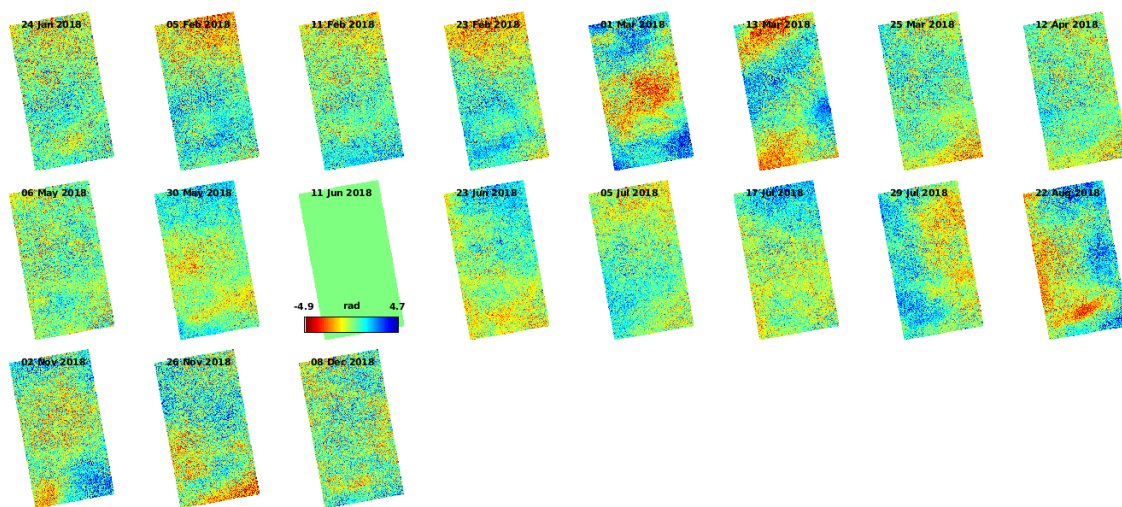


FIGURE 4.17 – Les 18 interférogrammes utilisées pour identifier les pixels PS(R. Hout 2019)

Sur la Figure 4.17, les points PS sont concentrés sur la partie Sud Est du lac où nous avons une faible densité de points PS en raison de la présence d'un couvert végétal. Dans cette zone forestière, StaMPS a fait plusieurs itérations pour enlever les candidats PS couverts par la végétation. Ainsi, les points PS restants sont des pixels des versants en recouvrement avec un sol nu. Sur cette zone on voit une dominance de vitesses négatives (érosion) de points PS. Cela atteste que la technique PSI a détecté une forte érosion au niveau de cette zone de forte densité des ravines (figure 4.20). Ces vitesses négatives montrent également une dominance de l'activité d'érosion et du transport des sédiments vers le lac. Il faut aussi mentionner que nous observons ces vitesses négatives sur toutes les zones proches du lac où les sédiments sont transportés facilement vers le lac soit par le ruissellement soit par la dérive littorale.

Sur la zone Nord du lac, nous observons au fond des ravines une dominance de points PS ayant une vitesse de déplacement positive. Enfin, nous relevons que les points PS ont détecté de faibles mouvements de la digue du barrage, de l'ordre de 3 mm/an.

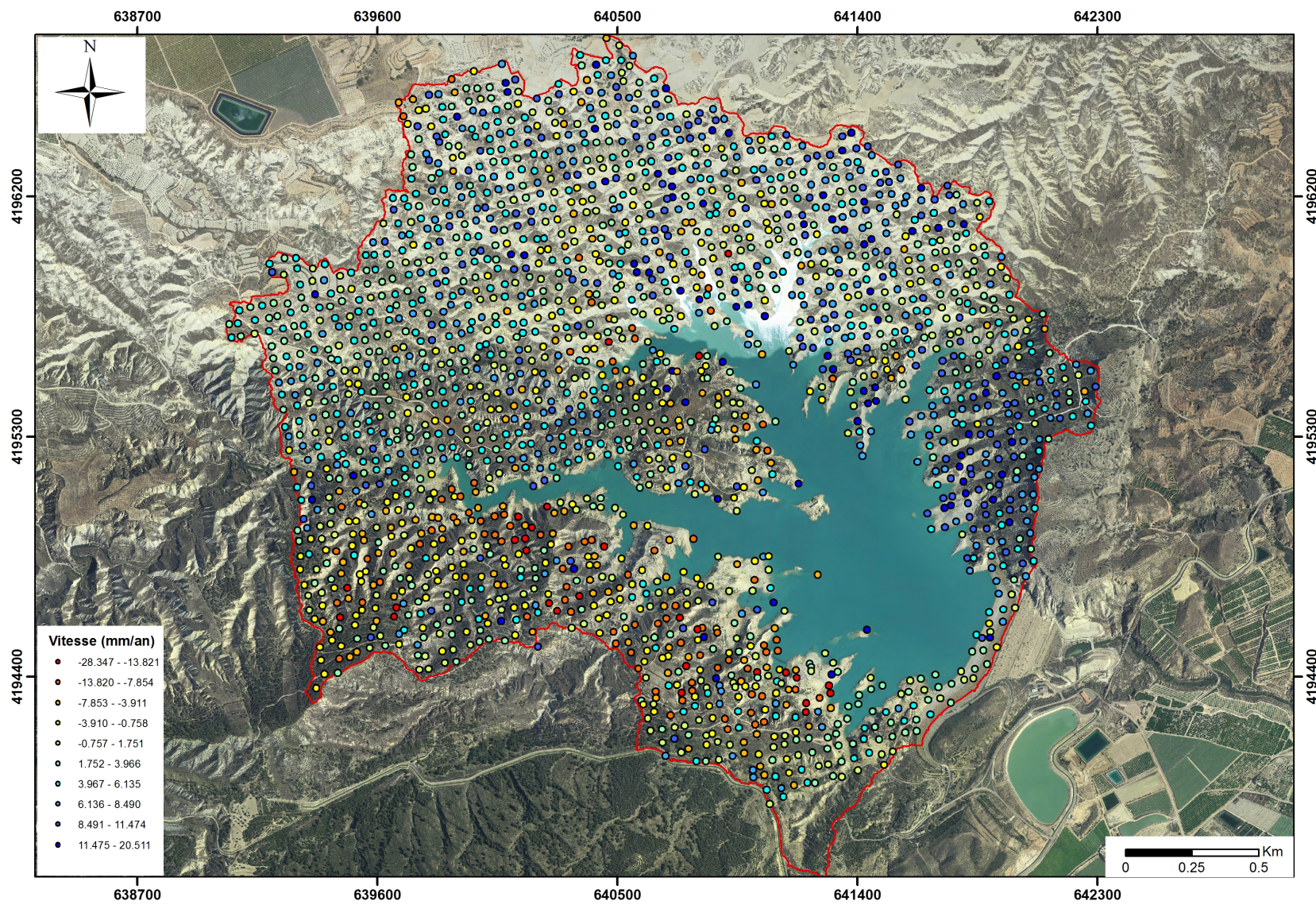


FIGURE 4.18 – La vitesse moyenne de déplacements des PS en 2018 sur les berges lacustres (R. Hout, 2019)

L'incertitude des pixels PS

Le premier problème à étudier est la précision des pixels PS. Cette information est considérée comme une mesure de fiabilité de la technique PSI. Dans la littérature, il existe deux techniques pour résoudre ce problème. La première méthode proposée par les chercheurs de polytechnique de Milan <Politecnico di Milano> 1 consiste à calculer le bruit du signal à l'aide de SNR. La deuxième méthode est suggérée par les chercheurs de l'université de Delft2, et est basée sur la propagation d'erreur des différentes composantes de la phase.

L'incertitude de la vitesse de déformation des pixels PS est défini selon l'écart-type de la phase (équation, 4.14).

$$\sigma_v^2 \approx \frac{\sigma_w^2}{\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot \sum_{i=1}^M (T_i - \hat{T})^2} \quad (4.14)$$

Avec :

σ_w : L'écart-type de la phase.

T_i : La date d'acquisition de l'image 'i'.

\hat{T} : La valeur moyenne de l'image T_i .

Sur les versants en recouvrement, l'écart-type de la vitesse de déplacement des points PS le long de la direction LOS varie entre 4 et 3, cette précision est plus élevée que celle autres pixels PS où la précision ne dépasse pas 2. Ceci est dû principalement à deux facteurs qui sont le déroulement en 3D de la phase et l'utilisation d'un modèle numérique avec une précision altimétrique de 10 m.

La sélection des pixels PS

Nous pouvons constater que plusieurs points PS ont été localisés sur les versants des ravines en recouvrement (figure 4.18). Ceci est lié d'une part à l'absence des cibles artificielles sur les versants et, d'autre part, à la résolution de l'image sentinel-1. On note aussi que la taille des versants et la résolution spatiale des images sentinel-1 font que les versants en recouvrements sont couverts par un nombre limité de pixels (entre 2 et 5 pixels). Cette caractéristique de la zone d'étude et des images Sentinel-1 permet d'obtenir peu de pixels adjacents. Ainsi, lors de déroulement en 3D de la phase, l'algorithme de StaMPS ne peut pas éliminer plusieurs pixels adjacents des PS.

La comparaison entre la précision Drone et PSI

La technique PS- InSAR permet d'observer la vitesse de déplacement qui varie entre -27,6 mm/an et 21 mm/an (figure 4.18). Pour déterminer la précision des données Radar, nous avons comparé celles-ci avec les données drone sur le troisième site. En raison de la faible densité de points radar, nous avons, à partir des points PS situés à l'intérieur de la zone d'étude et de quelques points situés aux extrémités de cette même zone, interpolé les données PS à l'aide de la méthode de krigeage pour générer un modèle de déplacement des points PS sur la ravine (figure 4.19). Cette technique d'interpolation a été utilisée pour résoudre le problème de la taille des pixels des versants en recouvrement, afin de comparer les valeurs moyennes entre le drone et PSI.

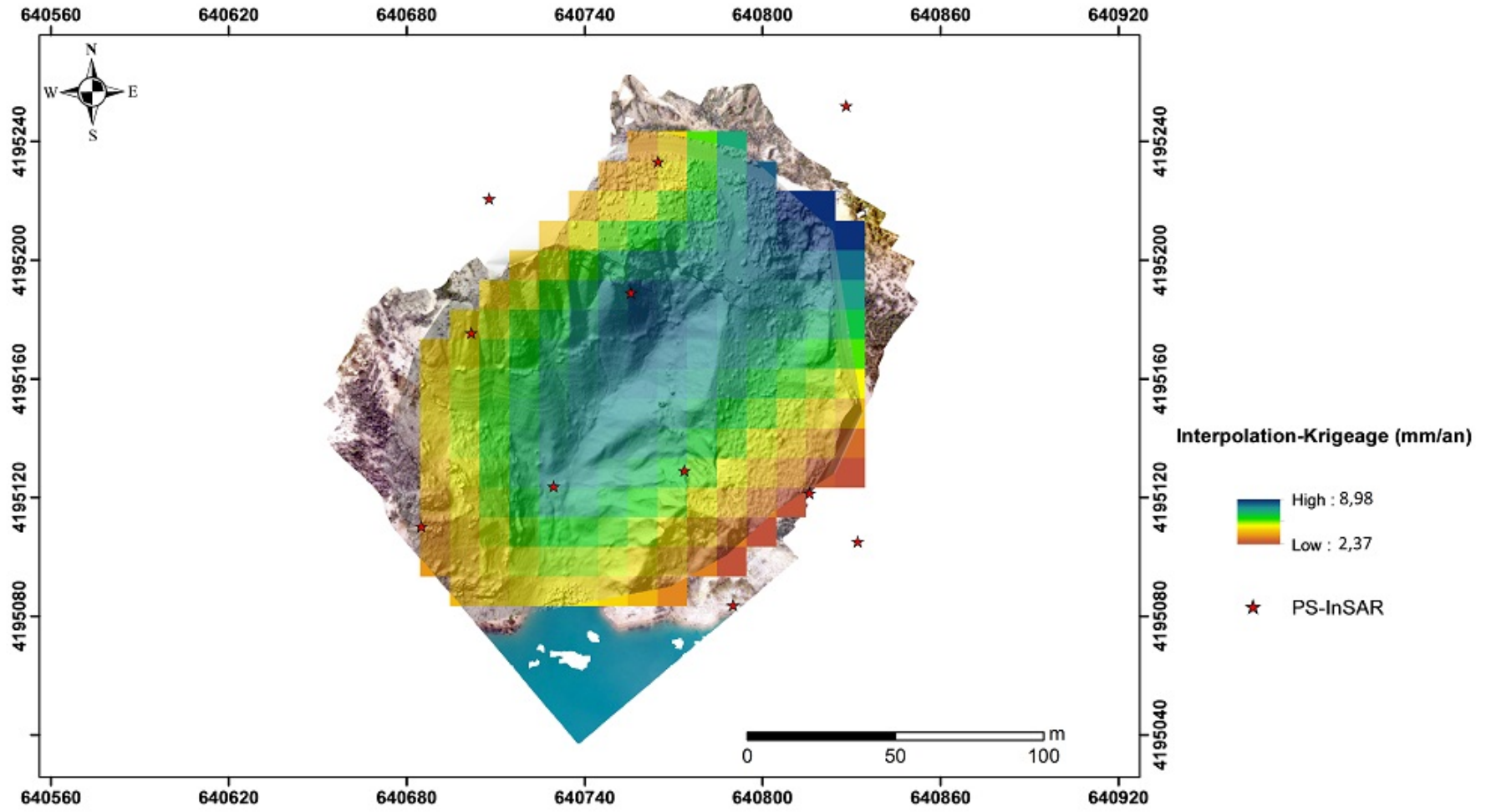
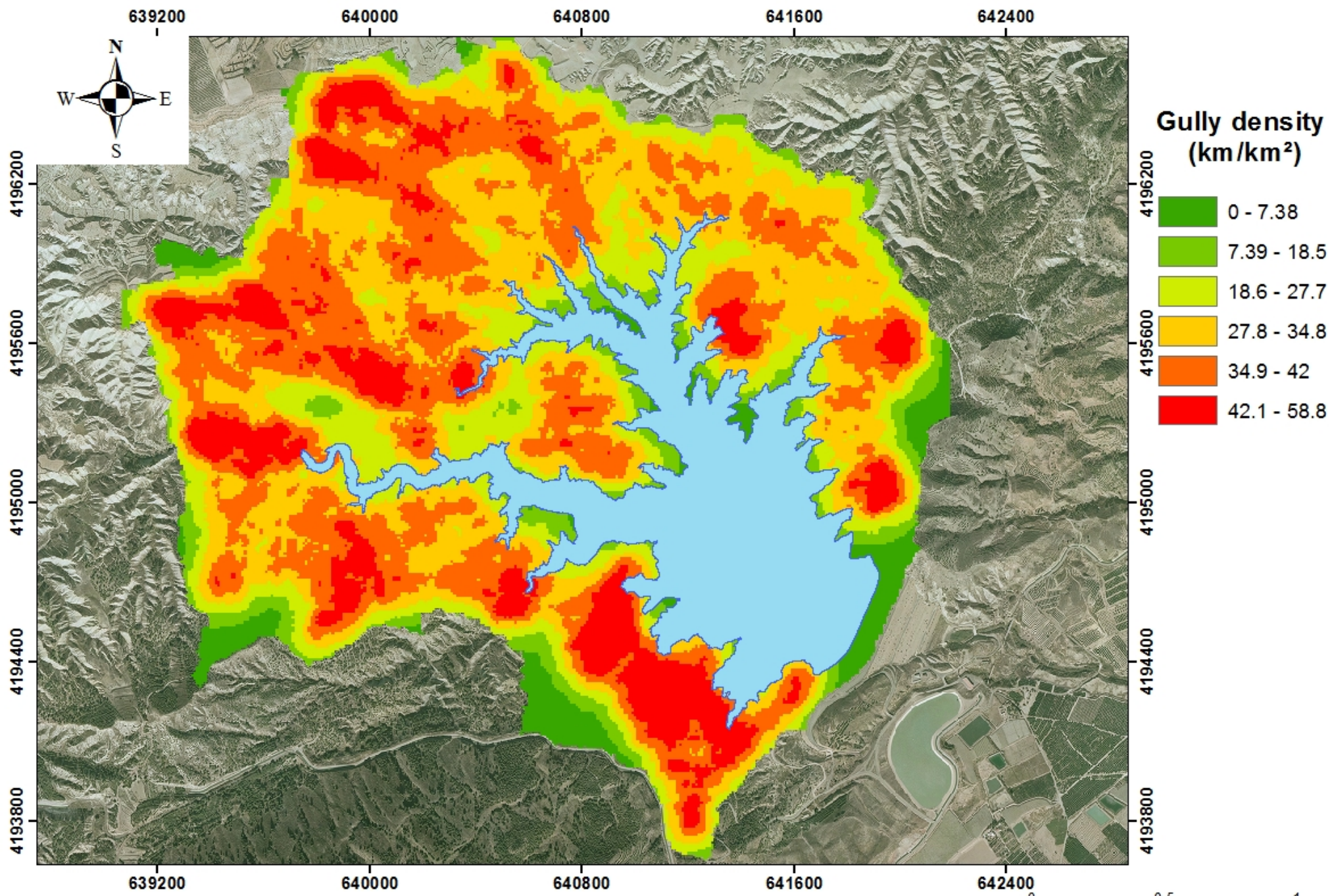


FIGURE 4.19 – L'interpolation par krigeage de la vitesse des pixels PS (R. Hout 2019)

L'estimation des changements à partir des MNT diachroniques de la zone 3 permet d'analyser la valeur moyenne de l'ordre de + 6mm (entre la première et la troisième mission). De même on trouve que la valeur moyenne estimée par le PS interpolé est de + 3,5mm. Ces deux valeurs sont proches, ce qui explique la fiabilité des données PS pour l'estimation de l'érosion sur les ravines. Sur les ravines 1 et 2, nous avons un manque de données des points pour plusieurs raisons. Premièrement, la ravine 1 est caractérisée par la présence d'un couvert végétal en amont et sur le versant Est. Deuxièmement, la ravine 2 subit un effet d'ombrage, et l'exposition Nord – Sud empêche le signal radar de l'atteindre lors des passages ascendant et descendant. Dans le cadre de cette thèse, il est impossible d'estimer la précision des points PS à partir des données LiDAR PNOA pour deux raisons. Tout d'abord, les données LiDAR-PNOA ne sont pas assez précises (20 cm en Z) par rapport aux points PS qui ont une précision millimétrique. Ensuite, les données LiDAR PNOA n'ont pas été prises pendant la même période. En effet, le lidar calcule le déplacement métrique, impossible à détecter à l'aide de l'interférométrie SAR et des données Sentinel-1 (la longueur d'onde égale à 5,3 cm). Dès lors, l'interférométrie radar ne peut pas estimer de grands déplacements métriques. De plus l'année 2018 étant une année très humide, l'agressivité climatique n'est pas la même entre 2009 et 2016 et en 2018, ce qui faussera l'interpolation des résultats des données lidar sur l'année 2018.

Densité des ravines

Nous pouvons conclure que la technique PS-InSAR représente une technique fiable pour la détection de vitesse de déplacement des versants en recouvrement touchés par le ravinement sur de courte durée. Cette technique a démontré que la zone sud-ouest du lac, protégée par la forêt, produit la majorité des sédiments érodés par les berges et transportés vers le lac. En revanche, l'apport sédimentaire des ravines localisées au nord-est n'est pas totalement entraîné vers le lac (Figure 4.20).



4.5 Conclusion

Comme évoqué précédemment, la technique TomoSAR est complémentaire à la technique InSAR dans les zones en recouvrement. Plusieurs études ont montré la fiabilité des méthodes TomoSAR avec les images Sentinel-1, liée à la configuration étroite du tube orbitale du Sentinel-1 A&B. Ceci fait que la ligne de base perpendiculaire de Sentinel-1 est faible et par conséquent la résolution de Rayleigh en élévation est faible de l'ordre 40 m. (équation, 4.15).

$$\rho_s = \frac{\lambda r}{2b} \quad (4.15)$$

Nous avons décidé dans ce chapitre de réaliser de bout en bout la méthode PSI sur les versants en recouvrements des ravines afin de déterminer leurs vitesses d'érosion et de sédimentation à partir des images Sentinel-1. Avant de déterminer la vitesse, nous avons procédé à une analyse de changement de cohérence avant et après le déclenchement de l'érosion. Cette analyse de cohérence a confirmé la stabilité de la cohérence sur les versants érodés tout au long de l'année 2018. En revanche, aucune corrélation n'a été révélée entre le ravinement et la dégradation de la cohérence. Nos investigations ont été poursuivies avec la technique PS-InSAR afin de déterminer la vitesse de l'érosion à partir des images Sentinel-1. L'application de la technique PSI sur les versants en recouvrement a été confrontée à un problème de sélection des pixels PS lors de traitement sous StaMPS. Celui-ci a été résolu par l'utilisation de l'indice de dispersion d'amplitude, l'amplitude moyenne et la cohérence temporelle afin de garder le plus de pixels PS sur les ravines. La valeur de vitesse des pixels PS localisés sur les ravines varie entre 27,6 mm/an et 21 mm/an avec une précision moyenne de 4,3. Sur la digue du barrage, la vitesse est de l'ordre de 3 mm/an avec une précision qui ne dépasse pas 2. La vitesse des PS sur les ravines est associée à l'étendue de la zone de recouvrement, la présence ou l'absence d'un agent de transport (rivières ou lacs) et la morphologie des ravines. Une comparaison entre les résultats des techniques PS-InSAR et SfM-MVS-4D permet de résumer les performances de notre méthode PSI sur les versants en recouvrements des ravines.

Enfin, les résultats de la technique PSI sur les ravines des berges sont encourageants. Nous suggérons comme amélioration de cette technique l'utilisation des données SAR de haute résolution en bande C (RADARSAT-2) et le déroulement de phase avec les techniques MB-PU (TSPA <Two-Stage Programming Approach >) ainsi que l'utilisation des modèles numériques de terrain pour améliorer le déroulement de la phase en 3D (moins d'incertitude).

Chapitre 5

Conclusion

L'eau est un besoin physiologique pour l'Homme comme pour tous les êtres vivants de notre planète Terre. Ainsi elle constitue une ressource essentielle à la survie des êtres humains. Malheureusement aujourd'hui, en raison des changements climatiques et des activités humaines, des régions du monde sont touchées par des pénuries d'eau plus ou moins importantes. Des populations sont pour cette raison contraintes de quitter leurs lieux de vie pour emménager dans une région où ils pourront accéder plus facilement à cette ressource vitale. C'est le cas de certaines personnes vivant dans les régions arabes qui s'étendent du nord de l'Afrique jusqu'en Asie occidentale. Cette région du monde est en effet l'une des plus touchées par l'intensification de la pénurie d'eau. Sur le nombre de personnes dans le monde ayant été obligées en raison du manque d'eau de quitter leur lieu de vie, 41% vivaient dans la région arabe. Cela est d'autant plus significatif lorsque nous faisons une comparaison avec le reste du monde de la moyenne de la ressource en eau par an et par habitant. Celle-ci est de 7453 m³ au niveau mondial contre 736 m³ pour la région arabe soit plus de 10 fois moins. Au sein même de cette région les disparités sont très fortes. C'est le constat qui est fait notamment pour le Maroc. Là-bas, 96% de la population urbaine a accès aux services élémentaires d'approvisionnement hydrique contre seulement 65% de la population rurale. Toutefois, il est important de signaler que le Maroc est le pays de la région arabe dont les ressources en eau sont gérées de façon sûre pour plus de 80% du réseau urbain et un peu moins de 40% du réseau rural. Concernant le continent européen, celui qui a été notre préoccupation dans cette thèse, les chiffres sont meilleurs avec 94% de la population ayant accès à un réseau d'eau potable. Des différences subsistent néanmoins ici aussi entre les zones urbaines et les zones rurales qui restent moins bien desservies. Un protocole a ainsi été mis en place afin que les populations aient toutes le même accès à l'eau. Néanmoins, une problématique vient s'ajouter à celle du changement climatique. C'est la demande croissante en eau dans le monde pour les années à venir qui devrait en effet augmenter de 20% à 30% selon les estimations, jusqu'en 2050. La préservation des réserves actuelles est donc un enjeu mondial. Le travail de cette thèse au-delà de l'aspect technique a bien été de trouver des outils d'évaluation qu'il serait possible d'utiliser pour quantifier les changements morphologiques des ravines et ainsi dans le cas des ravines de berges des barrages, pouvoir endiguer le problème de sédimentation qui diminue la capacité des retenues d'eaux. Plus précisément, elle avait pour but de quantifier la contribution des berges ravinées à la sédimentation du barrage de Rambla de Algeciras. Plusieurs travaux ont traité de l'érosion des berges de lacs mais peu de travaux étudient le ravinement des berges lacustres. Ainsi notre thèse permet de quantifier l'érosion des berges lacustres grâce à la technique du drone qui a l'avantage d'être d'une grande précision.

La comparaison des données drone et des données LiDAR sur le barrage Espagnol Rambla de Algeciras, permet au géomorphologue d'utiliser cette méthode pour quantifier le ravinement sur des territoires vastes.

Enfin nous avons voulu démontrer à partir de la technique CCD que le signal radar reste cohérent même après l'érosion sur les versants des ravines. Pour cela nous avons exploité la phase des images SAR pour calculer le déplacement sur les ravines qui ont une forte cohérence. Les résultats ont pu être comparés avec les données SfM-MVS-4D. Cette comparaison nous permet de confirmer notre hypothèse et donc nous pouvons affirmer que le signal sur les ravines de berges reste cohérent même après l'érosion. Ceci autorise l'utilisation des données Radar SAR téléchargeables gratuitement dans le but de quantifier et surveiller l'érosion.

Nous avons lors de notre travail rencontré des obstacles d'ordre technique. Il n'a en effet pas été possible de calculer le déplacement du sol sur les versants végétalisés et les

versants ombragés. De plus, la comparaison des données drones et des données radar n'a pu être effectuée sur les ravines 1 et 2 en raison de cet ombrage, présent au moment des deux passages d'orbite ascendant et descendant du radar.

Pour l'avenir, nous espérons que les états africains, notamment le Maroc, vont commencer à utiliser la technique du drone pour l'évaluation de l'érosion et du remplissage des cuvettes lacustres, en raison de la présence de ravines. En effet, cette étude, qui au départ devait se faire sur le barrage Sidi Mohammed Ben Abdellah, peut être adaptée aux sites présentant les mêmes caractéristiques environnementales. C'est ainsi que le lac de Murcia, qui enregistre des valeurs d'évolution importantes des ravines littorales (chiffres), peut servir d'étude référente, dont l'objectif final est de faciliter la gestion des retenues d'eau, d'autant que celles-ci sont destinées à alimenter les populations en eau potable dans un contexte climatique de plus en plus contraint, comme c'est le cas pour le lac marocain SMBA.

Enfin, à partir de cet essai, il faudrait que d'autres études quantifient l'érosion avec les données Radar de haute résolution (TerraSAR-X, RADARSAT) pour améliorer la précision et comparer les résultats.

Chapitre 6

Annexes

Article

UAV and LiDAR data in the service of bank gully erosion measurement in Rambla de Algeciras lakeshore

Radouane HOUT ¹ , Véronique Maleval ¹, Gil Mahe ², Eric Rouvellac ¹, Rémi Crouzevialle ¹, Fabien Cerbelaud ¹

¹ Department of Geography, Limoges University, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, 39E rue Camille Guérin, 87036, Limoges cedex, France;

³ IRD, UMR HSM IRD/Univ Montpellier, 34090 France;

* Correspondence: radouane.hout@unilim.fr; Tel.: (+33 7 69 21 47 85)

Version September 29, 2020 submitted to Journal Not Specified

Abstract: The Rambla de Algeciras lake in Murcia is a reservoir for drinking water and contributes to the reduction of flooding. With a semi-arid climate and a very friable nature of the geological formations at the lakeshore level, the emergence and development of bank gullies is favored and poses a problem of silting of the dam. A study was conducted on these lakeshores to estimate the sediment input from the bank gullies. In 2018, three gullies of different types were the subject of three UAV photography missions to model in high resolution their low topographic change, using the SfM-MVS photogrammetry method. The combination of two configurations of nadir and oblique photography allowed us to obtain a complete high-resolution modeling of complex bank gullies with overhangs, as it was the case in site 3. To study annual lakeshore variability and sediment dynamics we used LiDAR data from the PNOA project taken in 2009 and 2016. For a better error analysis of UAV photogrammetry data we compared spatially variable and uniform uncertainty models, while taking into account the different sources of error. For LiDAR data, on the other hand, we used a spatially uniform error model. Depending on the geomorphology of the gullies and the configuration of the data capture, we chose the most appropriate method to detect geomorphological changes on the surfaces of the bank gullies. At site 3 the gully topography is complex, so we performed a 3D distance calculation between point clouds using the M3C2 algorithm to estimate the sediment budget. On sites 1 and 2 we used the DoD technique to estimate the sediment budget as it was the case for the LiDAR data. The results of the LiDAR and UAV data reveal significant lakeshore erosion activity by bank gullies since the annual inflow from the banks is estimated at 39 T/ha/year.

Keywords: Rambla de Algeciras, Semi-arid, Lake, Lakeshores, Silting, Bank gullies, UAV, LiDAR, DoD, M3C2

Bibliographie

- [1] P VIVIER, "Les principes de la limnologie," *Bulletin Français de Pisciculture*, n° 68, p. 212-223, 1934.
- [2] F. A. FOREL, *Le Léman : monographie limnologique*. F. Rouge, 1892, t. 1.
- [3] J.-J. DUFAURE, "Une histoire de la géographie physique en France," *Ann. Géo*, n° 683, p. 101-104, 2012.
- [4] L. TOUCHART, P. BARTOUT et R. NEDJAÏ, "La géographie limnologique en France : conjugaison de l'espace et du temps pour la compréhension des relations homme-milieu," *BISGLg*, 2014.
- [5] L. TOUCHAIT, "La température de l'eau en Limousin," *Norois*, t. 183, n° 3, p. 441-451, 1999.
- [6] R. J. CHORLEY et al., "Water, earth, and man. A synthesis of hydrology, geomorphology, and socio-economic geography," *Water, earth, and man. A synthesis of hydrology, geomorphology, and socio-economic geography*, 1969.
- [7] A. YOUNG, *Land degradation in South Asia : its severity, causes and effects upon the people*. FAO, 1994.
- [8] R. J. PATIL, "Spatial Techniques for Soil Erosion Estimation," in *Spatial Techniques for Soil Erosion Estimation*, Springer, 2018, p. 35-49.
- [9] A. HENTATI, A. KAWAMURA, H. AMAGUCHI et N. NAKAGAWA, "Erosion assessment at small hillside river basins in semiarid region of Tunisia," *Annual Journal of Hydraulics Engineering, JSCE (accepted under publication)*, 2010.
- [10] L DE FRANCHIS et F IBANEZ, "Les menaces sur les sols dans les pays méditerranéens," *Blue Plan papers, Nice Sophia-Antipolis*, t. 2, p. 80, 2003.
- [11] N. INOUBLI, "Ruissellement et érosion hydrique en milieu méditerranéen vertique : approche expérimentale et modélisation," thèse de doct., Montpellier, SupAgro, 2016.
- [12] J. M. GARCÍA-RUIZ, S. BEGUERÍA, N. LANA-RENAULT, E. NADAL-ROMERO et A. CERDÀ, "Ongoing and emerging questions in water erosion studies," *Land Degradation & Development*, t. 28, n° 1, p. 5-21, 2017.
- [13] K. JAYARATHNE, N. DAYAWANSA et R. DE SILVA, "GIS based analysis of biophysical and socio-economic factors for land degradation in Kandaketiya DS division," *Tropical Agricultural Research*, 2010.
- [14] G. FOSTER, "Understanding ephemeral gully erosion," *Soil Conservation*, t. 2, p. 90-125, 1986.
- [15] B. BARTHES, A. ALBRECHT, J. ASSELINE, G. DE NONI, E. ROOSE et M. VIENNOT, "Pratiques culturelles et érodibilité du sol dans les Rougiers de Camarès (Aveyron)," *Étude et gestion des sols*, t. 5, p. 157-170, 1998.

- [16] F. PAPY et C. DOUYER, "Influence des états de surface du territoire agricole sur le déclenchement des inondations catastrophiques," 1991.
- [17] J. POESEN, "Soil erosion in the Anthropocene : Research needs," *Earth Surface Processes and Landforms*, t. 43, n° 1, p. 64-84, 2018.
- [18] R. P. C. MORGAN, *Soil erosion and conservation*. John Wiley & Sons, 2009.
- [19] G. RICHTER et J. F. NEGENDANK, "Soil erosion processes and their measurement in the German area of the Moselle river," *Earth Surface Processes*, t. 2, n° 2-3, p. 261-278, 1977.
- [20] R. EVANS, "Mechanics of water erosion and their spatial and temporal controls : an empirical viewpoint," *Soil erosion*, 1980.
- [21] C. CASTILLO et J. GÓMEZ, "A century of gully erosion research : Urgency, complexity and study approaches," *Earth-Science Reviews*, t. 160, p. 300-319, 2016.
- [22] A. YOUSSEF, "Les aménagements de conservation des eaux et des sols en banquettes Analyse, fonctionnement et essai de modélisation," thèse de doct., UNIVERSITE MONTPELLIER II, 2007.
- [23] E. ROOSE, *Lutte antiérosive : Réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles*. IRD Éditions, 2018.
- [24] P. SANDERCOCK et J. HOOKE, "Vegetation effects on sediment connectivity and processes in an ephemeral channel in SE Spain," *Journal of Arid Environments*, t. 75, n° 3, p. 239-254, 2011.
- [25] C. VALENTIN, J. POESEN et Y. LI, "Gully erosion : impacts, factors and control," *Catena*, t. 63, n° 2-3, p. 132-153, 2005.
- [26] A. MOLINA, V. VANACKER, V. BALTHAZAR, D. MORA et G. GOVERS, "Complex land cover change, water and sediment yield in a degraded Andean environment," *Journal of Hydrology*, t. 472, p. 25-35, 2012.
- [27] J.-L. JANEAU, J.-P. BRICQUET, O. PLANCHON et C. VALENTIN, "Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand," *European Journal of Soil Science*, t. 54, n° 3, p. 543-554, 2003.
- [28] E. PAYET, P. DUMAS et G. PENNOBER, "Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana," *[Vertigo] La revue électronique en sciences de l'environnement*, t. 11, n° 3, 2012.
- [29] W. H. WISCHMEIER, D. D. SMITH et al., "A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning.," *Transactions 7th int. Congr. Soil Sci.*, t. 1, p. 418-425, 1960.
- [30] P. FARRES, "Some observations on the stability of soil aggregates to raindrop impact," *Catena*, t. 7, n° 1, p. 223-231, 1980.
- [31] E. ROOSE, R. CHEBBANI et L. BOUROUGAA, "Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation," *Science et changements planétaires/Sécheresse*, t. 11, n° 4, p. 317-26, 2001.
- [32] K. KHOMSI, G. MAHÉ, M. SINAN, M. SNOUSSI, R. CHERIFI et Z. NAIT SAID, "Évolution des événements chauds rares et très rares dans les bassins versants de Tensift et Bouregreg (Maroc) et identification des types des temps synoptiques associés," 2012.

- [33] J. POESEN, J. NACHTERGAELE, G. VERSTRAETEN et C. VALENTIN, "Gully erosion and environmental change : importance and research needs," *Catena*, t. 50, n° 2-4, p. 91-133, 2003.
- [34] K. VAN OOST, T. QUINE, G. GOVERS, S. DE GRYZE, J. SIX, J. HARDEN, J. RITCHIE, G. MCCARTY, G. HECKRATH, C. KOSMAS et al., "The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle," *Science*, t. 318, n° 5850, p. 626-629, 2007.
- [35] T. SVORAY et H. MARKOVITCH, "Catchment scale analysis of the effect of topography, tillage direction and unpaved roads on ephemeral gully incision," *Earth Surface Processes and Landforms : The Journal of the British Geomorphological Research Group*, t. 34, n° 14, p. 1970-1984, 2009.
- [36] L. J. BULL et M. J. KIRKBY, *Dryland rivers : hydrology and geomorphology of semi-arid channels*. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2002.
- [37] M. VANMAERCKE, J. POESEN, B. VAN MELE, M. DEMUZERE, A. BRUYNSEELS, V. GOLOSOV, J. F. R. BEZERRA, S. BOLYSOV, A. DVINSKI, A. FRANKL et al., "How fast do gully headcuts retreat?" *Earth-Science Reviews*, t. 154, p. 336-355, 2016.
- [38] A. NAZARI SAMANI, F. TAVAKOLI RAD, M. AZARAKHSHI, M. REZA RAHDARI et J. RODRIGO-COMINO, "Assessment of the sustainability of the territories affected by gully head advancements through aerial photography and modeling estimations : A case study on Samal Watershed, Iran," *Sustainability*, t. 10, n° 8, p. 2909, 2018.
- [39] C. VALENTIN, *Les sols au coeur de la zone critique 5 : Dégradation et réhabilitation*. ISTE Group, 2018, t. 5.
- [40] S. S. G. T. COMMITTEE et S. S. S. of AMERICA, *Glossary of soil science terms 2008*. ASA-CSSA-SSSA, 2008.
- [41] L. VANDEKERCKHOVE, J. POESEN, D. O. WIJDENES, G. GYSSELS, L. BEUSELINCK et E. DE LUNA, "Characteristics and controlling factors of bank gullies in two semi-arid Mediterranean environments," *Geomorphology*, t. 33, n° 1-2, p. 37-58, 2000.
- [42] L. VANDEKERCKHOVE, J. POESEN, D. O. WIJDENES et G. GYSSELS, "Short-term bank gully retreat rates in Mediterranean environments," *Catena*, t. 44, n° 2, p. 133-161, 2001.
- [43] V. CHAPLOT, J. BROWN, P. DLAMINI, T. EUSTICE, J.-L. JANEAU, G. JEWITT, S. LORENTZ, L. MARTIN, C. NONTOKOZO-MCHUNU, E. OAKES et al., "Rainfall simulation to identify the storm-scale mechanisms of gully bank retreat," *Agricultural water management*, t. 98, n° 11, p. 1704-1710, 2011.
- [44] I. MARZOLFF, J. B. RIES et J. POESEN, "Short-term versus medium-term monitoring for detecting gully-erosion variability in a Mediterranean environment," *Earth Surface Processes and Landforms*, t. 36, n° 12, p. 1604-1623, 2011.
- [45] Y. WU et H. CHENG, "Monitoring of gully erosion on the Loess Plateau of China using a global positioning system," *Catena*, t. 63, n° 2-3, p. 154-166, 2005.
- [46] V. MOCKUS, *National engineering handbook*. U.S. Soil Conservation Service, 1964, t. 4.
- [47] J. R. THOMPSON, "Quantitative effect of watershed variables on rate of gully-head advancement," *Transactions of the ASAE*, t. 7, n° 1, p. 54-0055, 1964.
- [48] I. SEGNER, "Gully development and sediment yield," *Journal of Hydrology*, t. 4, p. 236-253, 1966.

- [49] Y. YUAN, R. BINGNER et R. REBICH, "Evaluation of AnnAGNPS on Mississippi delta MSEA watersheds," *Transactions of the ASAE*, t. 44, n° 5, p. 1183, 2001.
- [50] J. NACHTERGAELE, J. POESEN, L. VANDEKERCKHOVE, D OOSTWOUD WIJDENES et M ROXO, "Testing the ephemeral gully erosion model (EGEM) for two Mediterranean environments," *Earth Surface Processes and Landforms : The Journal of the British Geomorphological Research Group*, t. 26, n° 1, p. 17-30, 2001.
- [51] A SIDORCHUK, "Dynamic and static models of gully erosion," *Catena*, t. 37, n° 3-4, p. 401-414, 1999.
- [52] G. TUCKER, S. LANCASTER, N. GASPARINI et R. BRAS, "The channel-hillslope integrated landscape development model (CHILD)," in *Landscape erosion and evolution modeling*, Springer, 2001, p. 349-388.
- [53] T. F. STOCKER, D. QIN, G.-K. PLATTNER, M. TIGNOR, S. K. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. BEX, P. M. MIDGLEY et al., "Climate change 2013 : The physical science basis," *Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, t. 1535, 2013.
- [54] C. CONESA GARCÍA et P. PÉREZ CUTILLAS, "Alteraciones geomorfológicas recientes en los sistemas fluviales mediterráneos de la Península Ibérica : Síntomas y problemas de incisión en los cauces," *Revista de Geografía Norte Grande*, n° 59, p. 25-44, 2014.
- [55] F. L. BERMÚDEZ et J. D. G. ESCUDERO, "Estimación de la erosión y aterramientos de embalses en la cuenca hidrográfica del río Segura," *Cuadernos de investigación geográfica/Geographical Research Letters*, n° 8, p. 3-18, 1982.
- [56] R. de MURCIA, "Inventario nacional de erosión de suelos 2002-2012," *EGRAF SA, Murcia, Spain*, 2002.
- [57] M. J. WESTOBY, J. BRASINGTON, N. F. GLASSER, M. J. HAMBREY et J. M. REYNOLDS, "'Structure-from-Motion' photogrammetry : A low-cost, effective tool for geoscience applications," *Geomorphology*, t. 179, p. 300-314, 2012.
- [58] B. MARTEAU, D. VERICAT, C. GIBBINS, R. J. BATALLA et D. R. GREEN, "Application of Structure-from-Motion photogrammetry to river restoration," *Earth Surface Processes and Landforms*, t. 42, n° 3, p. 503-515, 2017.
- [59] F. CLAPUYT, V. VANACKER et K. VAN OOST, "Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms," *Geomorphology*, t. 260, p. 4-15, 2016.
- [60] A. VICTORIANO, J. BRASINGTON, M. GUINAU, G. FURDADA, M. CABRÉ et M. MOYSSET, "Geomorphic impact and assessment of flexible barriers using multi-temporal LiDAR data : The Portainé mountain catchment (Pyrenees)," *Engineering geology*, t. 237, p. 168-180, 2018.
- [61] S. CUCCHIARO, M. CAVALLI, D. VERICAT, S. CREMA, M. LLENA, A. BEINAT, L. MARCHI et F. CAZORZI, "Monitoring topographic changes through 4D-structure-from-motion photogrammetry : application to a debris-flow channel," *Environmental Earth Sciences*, t. 77, n° 18, p. 632, 2018.
- [62] R. L. PERROY, B. BOOKHAGEN, G. P. ASNER et O. A. CHADWICK, "Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island, California," *Geomorphology*, t. 118, n° 3-4, p. 288-300, 2010.

- [63] B. HÖFLE, L. GRIESBAUM et M. FORBRIGER, "GIS-Based detection of gullies in terrestrial LiDAR data of the Cerro Llamoca Peatland (Peru)," *Remote Sensing*, t. 5, n° 11, p. 5851-5870, 2013.
- [64] Á. GÓMEZ-GUTIÉRREZ, S. SCHNABEL, F. BERENGUER-SEMPERE, F. LAVADO-CONTADOR et J. RUBIO-DELGADO, "Using 3D photo-reconstruction methods to estimate gully headcut erosion," *Catena*, t. 120, p. 91-101, 2014.
- [65] S. d'Oleire OLTMANN, I. MARZOLFF, K. D. PETER et J. B. RIES, "Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco," *Remote Sensing*, t. 4, n° 11, p. 3390-3416, 2012.
- [66] C. CASTILLO, M. JAMES, M. REDEL-MACÍAS, R. PÉREZ et J. GÓMEZ, "SF3M software : 3-D photo-reconstruction for non-expert users and its application to a gully network," *Soil*, t. 1, n° 2, p. 583, 2015.
- [67] R. WANG, S. ZHANG, L. PU, J. YANG, C. YANG, J. CHEN, C. GUAN, Q. WANG, D. CHEN, B. FU et al., "Gully erosion mapping and monitoring at multiple scales based on multi-source remote sensing data of the Sancha River Catchment, Northeast China," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, t. 5, n° 11, p. 200, 2016.
- [68] C. DI STEFANO, V. FERRO, V. PALMERI, V. PAMPALONE et F. AGNELLO, "Testing the use of an image-based technique to measure gully erosion at Sparacia experimental area," *Hydrological processes*, t. 31, n° 3, p. 573-585, 2017.
- [69] A. FRANKL, C. STAL, A. ABRAHA, J. NYSSSEN, D. RIEKE-ZAPP, A. DE WULF et J. POESEN, "Detailed recording of gully morphology in 3D through image-based modelling," *Catena*, t. 127, p. 92-101, 2015.
- [70] P. CHRISTIAN et J. DAVIS, "Hillslope gully photogeomorphology using structure-from-motion," *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues*, t. 60, n° 3, p. 59-78, 2016.
- [71] J. KOCI, B. JARIHANI, J. X. LEON, R. C. SIDLE, S. N. WILKINSON et R. BARTLEY, "Assessment of UAV and ground-based structure from motion with multi-view stereo photogrammetry in a gullied savanna catchment," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, t. 6, n° 11, p. 328, 2017.
- [72] S. P. BEMIS, S. MICKLETHWAITE, D. TURNER, M. R. JAMES, S. AKCIZ, S. T. THIELE et H. A. BANGASH, "Ground-based and UAV-based photogrammetry : A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology," *Journal of Structural Geology*, t. 69, p. 163-178, 2014.
- [73] M. SMITH, J. CARRIVICK et D. QUINCEY, "Structure from motion photogrammetry in physical geography," *Progress in Physical Geography*, t. 40, n° 2, p. 247-275, 2016.
- [74] F. AGÜERA-VEGA, F. CARVAJAL-RAMÍREZ et P. MARTÍNEZ-CARRICONDO, "Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle," *Measurement*, t. 98, p. 221-227, 2017.
- [75] P. MARTÍNEZ-CARRICONDO, F. AGÜERA-VEGA, F. CARVAJAL-RAMÍREZ, F.-J. MESAS-CARRASCOSA, A. GARCÍA-FERRER et F.-J. PÉREZ-PORRAS, "Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points," *International journal of applied earth observation and geoinformation*, t. 72, p. 1-10, 2018.
- [76] S. CUCCHIARO, M. CAVALLI, D. VERICAT, S. CREMA, M. LLENA, A. BEINAT, L. MARCHI et F. CAZORZI, "Geomorphic effectiveness of check dams in a debris-flow catchment using multi-temporal topographic surveys," *Catena*, t. 174, p. 73-83, 2019.

- [77] M. R. JAMES et S. ROBSON, "Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera : Accuracy and geoscience application," *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, t. 117, n° F3, 2012.
- [78] A. STUMPF, J.-P. MALET, P. ALLEMAND, M. PIERROT-DESEILLIGNY et G. SKUPINSKI, "Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion," *Geomorphology*, t. 231, p. 130-145, 2015.
- [79] M. R. JAMES et S. ROBSON, "Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks," *Earth Surface Processes and Landforms*, t. 39, n° 10, p. 1413-1420, 2014.
- [80] L. PIERMATTEI, L. CARTURAN et A. GUARNIERI, "Use of terrestrial photogrammetry based on structure-from-motion for mass balance estimation of a small glacier in the Italian alps," *Earth Surface Processes and Landforms*, t. 40, n° 13, p. 1791-1802, 2015.
- [81] L. AGISOFT, *Agisoft PhotoScan user manual : professional edition*, 2014.
- [82] Z. ZHANG, "Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces," *International journal of computer vision*, t. 13, n° 2, p. 119-152, 1994.
- [83] C. STÖCKER, A. ELTNER et P. KARRASCH, "Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry—A case study from Andalusia, Spain," *Catena*, t. 132, p. 1-11, 2015.
- [84] N. MICHELETTI, J. H. CHANDLER et S. N. LANE, "Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone," *Earth Surface Processes and Landforms*, t. 40, n° 4, p. 473-486, 2015.
- [85] D. LAGUE, N. BRODU et J. LEROUX, "Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner : Application to the Rangitikei canyon (NZ)," *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, t. 82, p. 10-26, 2013.
- [86] A. R. MOSBRUCKER, J. J. MAJOR, K. R. SPICER et J. PITLICK, "Camera system considerations for geomorphic applications of SfM photogrammetry," *Earth Surface Processes and Landforms*, t. 42, n° 6, p. 969-986, 2017.
- [87] S CUCCHIARO, E MASET, A FUSIELLO et F CAZORZI, "4D-SfM photogrammetry for monitoring sediment dynamics in a debris-flow catchment : Software testing and results comparison," in *2018 ISPRS TC II Mid-term Symposium "Towards Photogrammetry 2020"*, International Society for Photogrammetry et Remote Sensing, t. 42, 2018, p. 281-288.
- [88] D VERICAT, M. SMITH et J BRASINGTON, "Patterns of topographic change in sub-humid badlands determined by high resolution multi-temporal topographic surveys," *Catena*, t. 120, p. 164-176, 2014.
- [89] J. M. WHEATON, J. BRASINGTON, S. E. DARBY et D. A. SEAR, "Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys : improved sediment budgets," *Earth surface processes and landforms : the journal of the British Geomorphological Research Group*, t. 35, n° 2, p. 136-156, 2010.
- [90] J BRASINGTON, D VERICAT et I RYCHKOV, "Modeling river bed morphology, roughness, and surface sedimentology using high resolution terrestrial laser scanning," *Water Resources Research*, t. 48, n° 11, 2012. DOI : <https://doi.org/10.1029/2012WR012223>.

- [91] M. CAVALLI, B. GOLDIN, F. COMITI, F. BRARDINONI et L. MARCHI, "Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models," *Geomorphology*, t. 291, p. 4-16, 2017.
- [92] S. N. LANE et J. H. CHANDLER, "The generation of high quality topographic data for hydrology and geomorphology : new data sources, new applications and new problems," *Earth Surface Processes and Landforms : The Journal of the British Geomorphological Research Group*, t. 28, n° 3, p. 229-230, 2003.
- [93] J BRASINGTON, B. RUMSBY et R. MCVEY, "Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey," *Earth Surface Processes and Landforms : The Journal of the British Geomorphological Research Group*, t. 25, n° 9, p. 973-990, 2000.
- [94] S. BANGEN, J. HENSLEIGH, P. MCHUGH et J. WHEATON, "Error modeling of DEMs from topographic surveys of rivers using fuzzy inference systems," *Water Resources Research*, t. 52, n° 2, p. 1176-1193, 2016.
- [95] D. J. MILAN, G. L. HERITAGE, A. R. LARGE et I. C. FULLER, "Filtering spatial error from DEMs : Implications for morphological change estimation," *Geomorphology*, t. 125, n° 1, p. 160-171, 2011.
- [96] P. PASSALACQUA, P. BELMONT, D. M. STALEY, J. D. SIMLEY, J. R. ARROWSMITH, C. A. BODE, C. CROSBY, S. B. DELONG, N. F. GLENN, S. A. KELLY et al., "Analyzing high resolution topography for advancing the understanding of mass and energy transfer through landscapes : A review," *Earth-Science Reviews*, t. 148, p. 174-193, 2015.
- [97] J. BRASINGTON, J. LANGHAM et B. RUMSBY, "Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport," *Geomorphology*, t. 53, n° 3-4, p. 299-316, 2003.
- [98] S. N. LANE, R. M. WESTAWAY et D MURRAY HICKS, "Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing," *Earth Surface Processes and Landforms : The Journal of the British Geomorphological Research Group*, t. 28, n° 3, p. 249-271, 2003.
- [99] M. R. JAMES, S. ROBSON et M. W. SMITH, "3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry : precision maps for ground control and directly georeferenced surveys," *Earth Surface Processes and Landforms*, t. 42, n° 12, p. 1769-1788, 2017.
- [100] L. POLIDORI, *Cartographie radar*. Taylor & Francis, 1997, t. 1.
- [101] J. A. OGILVY et H. M. MERKLINGER, *Theory of wave scattering from random rough surfaces*, 1991.
- [102] F. T. ULABY, "Microwave remote sensing active and passive," *Rader remote sensing and surface scattering and emission theory*, p. 848-902, 1982.
- [103] M. AUBERT, "Caractérisation de l'état de surface des sols nus agricoles par imagerie radar TerraSAR-X," thèse de doct., 2012.
- [104] K. KORZENIOWSKA et O. KORUP, "Mapping gullies using terrain surface roughness," in *Proceedings of the 19th AGILE International Conference on Geographic Information Science (AGILE 2016), Helsinki, Finland*, 2016, p. 14-17.
- [105] M CAVALLI et L MARCHI, "Characterisation of the surface morphology of an alpine alluvial fan using airborne LiDAR," 2008.

- [106] L. W. ZEVENBERGEN et C. R. THORNE, "Quantitative analysis of land surface topography," *Earth surface processes and landforms*, t. 12, n° 1, p. 47-56, 1987.
- [107] M. CAVALLI, P. TAROLLI, L. MARCHI et G. DALLA FONTANA, "The effectiveness of airborne LiDAR data in the recognition of channel-bed morphology," *Catena*, t. 73, n° 3, p. 249-260, 2008.
- [108] Q. WANG, J. LIU, L. WU, Z. XU, S. FAN et A. QIAN, "Analysis of gully erosion hazard using high resolution terrestrial LiDAR," in *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, IEEE, 2016, p. 7469-7472.
- [109] N. BAGHDADI, M. EL HAJJ, M. CHOKER, M. ZRIBI, H. BAZZI, E. VAUDOUR, J.-M. GILLIOT et D. M. EBENGO, "Potential of Sentinel-1 images for estimating the soil roughness over bare agricultural soils," *Water*, t. 10, n° 2, p. 131, 2018.
- [110] A. LE MORVAN, M. ZRIBI, N. BAGHDADI et A. CHANZY, "Soil moisture profile effect on radar signal measurement," *Sensors*, t. 8, n° 1, p. 256-270, 2008.
- [111] N. BAGHDADI, S. GAULTIER et C. KING, "Retrieving surface roughness and soil moisture from synthetic aperture radar (SAR) data using neural networks," *Canadian Journal of Remote Sensing*, t. 28, n° 5, p. 701-711, 2002.
- [112] F. DE ZAN, A. PARIZZI, P. PRATS-IRAOLA et P. LÓPEZ-DEKKER, "A SAR interferometric model for soil moisture," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 52, n° 1, p. 418-425, 2013.
- [113] R. GUO, F. WANG, B. ZANG, G. JING et M. XING, "High-Rise Building 3D Reconstruction with the Wrapped Interferometric Phase," *Sensors*, t. 19, n° 6, p. 1439, 2019.
- [114] A. BUDILLON, M. CROSETTO, A. C. JOHNSY, O. MONSERRAT, V. KRISHNAKUMAR et G. SCHIRINZI, "Comparison of Persistent Scatterer Interferometry and SAR Tomography Using Sentinel-1 in Urban Environment," *Remote Sensing*, t. 10, n° 12, p. 1986, 2018.
- [115] S. AUER, C. GISINGER et J. TAO, "Characterization of facade regularities in high-resolution SAR images," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 53, n° 5, p. 2727-2737, 2014.
- [116] S. CHEN, H. WANG, F. XU et Y.-Q. JIN, "Automatic recognition of isolated buildings on single-aspect SAR image using range detector," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, t. 12, n° 2, p. 219-223, 2014.
- [117] J. UEMOTO, A. NADAI, S. KOJIMA, T. KOBAYASHI, T. UMEHARA, T. MATSUOKA, S. URATSUKA et M. SATAKE, "Extraction and height estimation of artificial vertical structures based on the wrapped interferometric phase difference within their layovers," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, t. 139, p. 14-29, 2018.
- [118] S. NAVNEET, J.-W. KIM et Z. LU, "A new InSAR persistent scatterer selection technique using top eigenvalue of coherence matrix," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 56, n° 4, p. 1969-1978, 2017.
- [119] E. HOSSEINI, M. PICHIERRI, J. EPPLER et B. RABUS, "Staring Spotlight TerraSAR-X SAR Interferometry for Identification and Monitoring of Small-Scale Landslide Deformation," *Remote Sensing*, t. 10, n° 6, p. 844, 2018.
- [120] A. REIGBER et A. MOREIRA, "First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 38, n° 5, p. 2142-2152, 2000.

- [121] F. LOMBARDINI, "Differential tomography : A new framework for SAR interferometry," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 43, n^o 1, p. 37-44, 2005.
- [122] G. FORNARO, D. REALE et F. SERAFINO, "Four-dimensional SAR imaging for height estimation and monitoring of single and double scatterers," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 47, n^o 1, p. 224-237, 2008.
- [123] F. GINI, F. LOMBARDINI et M. MONTANARI, "Layover solution in multibaseline SAR interferometry," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, t. 38, n^o 4, p. 1344-1356, 2002.
- [124] M. A. SIDDIQUE, T. STROZZI, I. HAJNSEK et O. FREY, "SAR tomography for spatio-temporal inversion of coherent scatterers in villages of alpine regions," in *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, 2018, p. 6099-6102.
- [125] A. BUDILLON, A. C. JOHNSY et G. SCHIRINZI, "Urban Tomographic Imaging Using Polarimetric SAR Data," *Remote Sensing*, t. 11, n^o 2, p. 132, 2019.
- [126] N. BAGHDADI, M. EL HAJJ, M. ZRIBI et S. BOUSBIH, "Calibration of the water cloud model at C-band for winter crop fields and grasslands," *Remote Sensing*, t. 9, n^o 9, p. 969, 2017.
- [127] M. ZRIBI et M. DECHAMBRE, "A new empirical model to retrieve soil moisture and roughness from C-band radar data," *Remote Sensing of Environment*, t. 84, n^o 1, p. 42-52, 2003.
- [128] J. STAMENKOVIC, L. GUERRIERO, P. FERRAZZOLI, C. NOTARNICOLA, F. GREIFENEDER et J.-P. THIRAN, "Soil moisture estimation by SAR in Alpine fields using Gaussian process regressor trained by model simulations," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 55, n^o 9, p. 4899-4912, 2017.
- [129] S. GUO, X. BAI, Y. CHEN, S. ZHANG, H. HOU, Q. ZHU et P. DU, "An Improved Approach for Soil Moisture Estimation in Gully Fields of the Loess Plateau Using Sentinel-1A Radar Images," *Remote Sensing*, t. 11, n^o 3, p. 349, 2019.
- [130] P. WASHAYA, T. BALZ et B. MOHAMADI, "Coherence change-detection with sentinel-1 for natural and anthropogenic disaster monitoring in urban areas," *Remote Sensing*, t. 10, n^o 7, p. 1026, 2018.
- [131] J. JUNG, D.-j. KIM, M. LAVALLE et S.-H. YUN, "Coherent change detection using InSAR temporal decorrelation model : A case study for volcanic ash detection," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 54, n^o 10, p. 5765-5775, 2016.
- [132] S. KARIMZADEH, M. MATSUOKA, M. MIYAJIMA, B. ADRIANO, A. FALLAHI et J. KARASHI, "Sequential SAR coherence method for the monitoring of buildings in Sarpole-Zahab, Iran," *Remote Sensing*, t. 10, n^o 8, p. 1255, 2018.
- [133] J. JUNG, S.-H. YUN, D.-j. KIM et M. LAVALLE, "Damage-Mapping Algorithm Based on Coherence Model Using Multitemporal Polarimetric-Interferometric SAR Data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 56, n^o 3, p. 1520-1532, 2017.
- [134] A. GABER, M. ABDELKAREEM, I. S. ABDELSADEK, M. KOCH et F. EL-BAZ, "Using InSAR coherence for investigating the interplay of fluvial and aeolian features in arid lands : Implications for groundwater potential in Egypt," *Remote Sensing*, t. 10, n^o 6, p. 832, 2018.

- [135] B. BRISCO, F. AHERN, K. MURNAGHAN, L. WHITE, F. CANISUS et P. LANCASTER, "Seasonal change in wetland coherence as an aid to wetland monitoring," *Remote Sensing*, t. 9, n° 2, p. 158, 2017.
- [136] K. ITOH, "Analysis of the phase unwrapping algorithm," *Applied optics*, t. 21, n° 14, p. 2470-2470, 1982.
- [137] R. F. HANSEN, *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*. Springer Science & Business Media, 2001, t. 2.
- [138] E. S. MALINVERNI, D. T. SANDWELL, A. N. TASSETTI et L. CAPPELLETTI, "InSAR decorrelation to assess and prevent volcanic risk," *European Journal of Remote Sensing*, t. 47, n° 1, p. 537-556, 2014.
- [139] H. A. ZEBKER, J. VILLASENOR et al., "Decorrelation in interferometric radar echoes," *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, t. 30, n° 5, p. 950-959, 1992.
- [140] S. HENSLEY, K. WHEELER, G. SADOWY, T. MILLER, S. SHAFFER, R. MUELLERSCHOEN, C. JONES, H. ZEBKER, S. MADSEN et P. ROSEN, "Status of a UAVSAR designed for repeat pass interferometry for deformation measurements," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005.*, IEEE, 2005, 4-pp.
- [141] M. WEI et D. T. SANDWELL, "Decorrelation of L-band and C-band interferometry over vegetated areas in California," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 48, n° 7, p. 2942-2952, 2010.
- [142] B. YANG, H. XU, W. LIU, J. GE, C. LI et J. LI, "An Improved Stanford Method for Persistent Scatterers Applied to 3D Building Reconstruction and Monitoring," *Remote Sensing*, t. 11, n° 15, p. 1807, 2019.
- [143] A. HOOPER, D. BEKAERT, K. SPAANS et M. ARIKAN, "Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation," *Tectonophysics*, t. 514, p. 1-13, 2012.
- [144] C. YU, Z. LI, N. T. PENNA et P. CRIPPA, "Generic atmospheric correction model for Interferometric Synthetic Aperture Radar observations," *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, t. 123, n° 10, p. 9202-9222, 2018.