



UNIVERSITÉ DU HAVRE



INSTITUT INTERNATIONAL D'INGÉNIERIE
DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT

.....
ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES PHYSIQUES,
MATHÉMATIQUES ET DE L'INFORMATION
POUR L'INGÉNIEUR (SPMII)

.....
ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET
TECHNOLOGIE DE L'EAU, L'ÉNERGIE
ET L'ENVIRONNEMENT

THÈSE

en cotutelle pour obtenir le grade de

Docteur

de l'Université du Havre et de la Fondation 2iE

Discipline : Mécanique

Discipline : Matériaux

Spécialité : Génie Civil

Spécialité : Génie Civil

Présentée par

Abdou LAWANE GANA

Caractérisation des matériaux latéritiques indurés pour une meilleure utilisation dans l'habitat en Afrique

Thèse co-dirigée par Anne PANTET et Jean-Hugues THOMASSIN

préparée au LOMC (ULH) et au LEMC (2iE)

soutenue le 14 juillet 2014

Jury :

Président :	Professeur José CAMAPUM DE CARVALHO	- UnB (University of Brasilia)
Rapporteurs :	Professeur Muzahim AL-MUKHTAR	- CRMD (Université d'Orléans)
	Professeur Meissa FALL	- UT (Université de Thiès)
Directrice :	Professeur Anne PANTET	- LOMC (Université du Havre)
Codirecteur :	Professeur Jean-Hugues THOMASSIN	- LEMC (2iE - Ouagadougou)
Examineurs :	Docteur David TOGUYENI	- LPCE (Université de Ouagadougou)
	Docteur Raffaele VINAI	- SPACE (Queen's University Belfast)
	Docteur Ismaïla GUEYE	- LEMC (2iE - Ouagadougou)

Dédicace

A la mémoire de ma mère

Remerciements

*Chers professeurs, "la goutte d'eau que vous m'avez donnée va me nourrir toute ma vie..."
adage chinois.*

Ce travail que nous présentons ici a été cofinancé par l'UEMOA et le 2iE, financement qui a permis d'assurer nos mobilités au Havre, de réaliser certains essais aux laboratoires CRISMAT de L'ENSICAEN Caen et LGCgE de l'Université d'Artois, et de participer à des conférences. Nous présentons à ces institutions nos sincères remerciements.

Ce travail a été réalisé en cotutelle au Laboratoire Ecomatériaux de Construction(LEMC) de 2iE et au Laboratoire Onde et Milieux Complexes (LOMC) sous la Codirection du Professeur Anne PANTET et du Professeur Jean-Hugues THOMASSIN. Nous voudrions les remercier très chaleureusement pour avoir accepté de diriger cette thèse.

Le Professeur Jean-Hugues THOMASSIN nous a donné le goût de la recherche en nous accueillant, avant le début de ce travail, dans le Laboratoire Génie Civil de l'ENSIP à Poitiers, laboratoire qu'il dirigeait. Ensuite, le Professeur Anne Pantet a pris la relève pour parachever cette initiation. Leurs enseignements et les conseils précieux qu'ils nous ont prodigués tout au long de ces années ont été fort utiles pour la conduite de ce travail à son terme. Enfin, nous voudrions les remercier pour leur compréhension et leur tolérance face aux erreurs de jeunesse que nous avons pu commettre.

Le Docteur Raffaella VINAI qui a mis en place le LEMC et le projet Latérite, n'a ménagé aucun effort pour l'aboutissement de cette thèse à travers ses enseignements, son assistance dans la conduite des activités de terrain et le montage des essais au Laboratoire et les publications en anglais. Nous lui exprimons nos sincères remerciements.

Nous tenons également à remercier le Docteur Ismaila GUEYE, qui a participé activement à la définition des axes de recherche du laboratoire LEMC qui ont par la suite donné naissance à ce projet de thèse.

Nous nous devons également de remercier le Professeur Innocent MUTABAZI, directeur du laboratoire LOMC, qui a permis de réaliser cette thèse en cotutelle entre 2iE et l'Université du Havre et ainsi, faciliter notre mobilité pour effectuer les essais au sein du LOMC.

Nous exprimons notre plus vive reconnaissance au Professeur Said TAIBI, au Docteur Akli HIBOUCHE et Madame Anne VANVILLE de l'Université du Havre, au Professeur Emmanuel ANTCZAK de l'Université d'Artois, au Docteur Nicolas BARRIER de l'Université de Caen, au Docteur David TOGUYENI de l'Université de Ouagadougou sans leur soutien la réalisation des expérimentations n'aurait pu être possible. Leur aide nous a été précieuse. Nous avons énormément appris auprès d'eux. Les heures que nous avons passées ensemble au LPCE, au LOMC, au CRISMAT et au LGCgE resteront parmi nos meilleurs souvenirs.

Ce travail s'est réalisé en partie sur le terrain. Plusieurs personnes ont contribué à la réussite de

nos activités de terrain. Toute notre gratitude aux artisan-tailleurs de Dano, Barkoin, Koubri et Tigaldégué. Nous tenons également à remercier M Rayaisse SOTER CAIUS, Directeur de l'entreprise Pierres Naturelles puis de MANTRAL; M Rémy SOURDOIS et Mme Blandine ZERBO de l'Association ACANTHE et ses collègues pour nous avoir facilité le choix des carrières d'étude et le contact avec les artisans de BLT.

Nous tenons également à remercier nos collègues doctorants du LOMC, l'ensemble du personnel du LOMC ainsi que toutes les personnes physiques et morales ayant contribué de façon directe ou indirecte à la réalisation de cette thèse.

Au sein du LEMC et à 2iE, bon nombre de nos collègues et doctorants ont contribué à l'amélioration de ce document. Il nous est très difficile de les citer tous sans oublier certains. Merci pour les analyses scientifiques, les corrections et les soutiens apportés à notre famille pendant les périodes de mobilité en France. Sans que ce soit limitatif, nous tenons à remercier particulièrement nos collègues Koffi KOKOLE, Adamah MESSAN, Jacques Remy MINANE, Salif KABORE, Bassirou BOUBE et Saydou NAMANEGUE pour le soutien constant pendant les travaux expérimentaux et la rédaction de cette thèse.

Toute notre reconnaissance à nos amis Ousmane OUABA, Seydou DJIKA, Moussa CHAIBOU, Salifou BOUKARI, Boukar K. ABBA, à mon épouse Fadouma LAWANE et les parents de Ouagadougou pour leur soutien multiple durant les trois années de la thèse. Que Dieu vous bénisse. Merci également à mes enfants Maina BouKar et Hadiza pour leur patience pendant mes multiples absences.

Enfin, nous tenons à remercier les différents membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail, en particulier le Président de Jury, le Professeur José CAMPAPUM DE CARVALHO et les deux rapporteurs, le Professeur Meissa FALL et le Professeur Muzahim AL-MUKHTAR, pour l'intérêt qu'ils ont témoigné à l'égard de notre travail. Merci également pour avoir effectué le déplacement de Ouagadougou pour prendre part à la soutenance car certains d'entre vous viennent de très loin.

Table des matières

Introduction générale	1
0.1 Contexte général	1
0.2 Objectif de la thèse	3
0.3 Structuration du mémoire	3
1 Les matériaux latéritiques	5
1.1 Introduction	5
1.2 Définitions des latérites et historique	6
1.3 Répartition des latérites	11
1.3.1 Répartition à travers le monde	11
1.3.2 Répartition au Burkina Faso	13
1.4 Le processus de latéritisation	15
1.5 Similitude avec d'autres roches	16
1.6 Composition et classification des latérites	18
1.7 Utilité des latérites	22
1.7.1 Latérite comme ressource minérale	22
1.7.2 Latérite comme matériau de construction	23
1.8 Conclusion	26
2 Sites et matériaux étudiés	29
2.1 Introduction	29
2.2 Aperçu sur la géologie du Burkina Faso	30
2.2.1 Histoire des formations géologiques du Burkina Faso	30
2.2.2 Des nouvelles connaissances de la géologie du Burkina Faso	34
2.2.3 Les formations cuirassées du Burkina Faso	37
2.3 Présentation des sites d'étude	38
2.3.1 Situation géographique	38
2.3.2 Géologie des sites d'étude	39
2.4 Profils géologiques des carrières	45
2.4.1 Méthodologie	45
2.4.2 Carrières de Ouagadougou et de Koubri	45
2.4.3 Carrière de Dano	47
2.5 Chimie et minéralogie des échantillons	49
2.5.1 Les différentes techniques d'analyses chimiques et minéralogiques	49
2.5.2 Prélèvement et préparation des échantillons	51
2.5.3 Matériels et méthodes d'analyse	52
2.5.4 Résultats et discussions	53
2.6 Conclusion	62

3	Étude expérimentale des blocs de latérite taillés	65
3.1	Introduction	65
3.2	Définition des paramètres expérimentaux et techniques de mesure	67
3.2.1	Les propriétés physiques et hydriques	67
3.2.2	Les propriétés mécaniques	74
3.2.3	Les propriétés thermiques	89
3.3	Protocoles d'étude expérimentale	97
3.3.1	Les essais physiques et hydriques	97
3.3.2	Les essais mécaniques	100
3.3.3	Les essais thermiques	105
3.4	Résultats et discussions	111
3.4.1	Les propriétés physiques et hydriques	111
3.4.2	Les caractéristiques mécaniques	114
3.4.3	Les propriétés thermiques	133
3.5	Conclusion	138
4	Maçonnerie en BLT, modèle mécanique et suivi hygrothermique	143
4.1	Introduction	143
4.2	Généralités autour de la maçonnerie	145
4.2.1	Typologie des maçonneries	146
4.2.2	Dégradations des maçonneries en pierre de taille	149
4.2.3	Dimensionnement des ouvrages en maçonnerie	154
4.3	Étude de cas de la maçonnerie en BLT de Dano	160
4.3.1	Présentation de la ville de Dano et des carrières d'extraction du BLT	160
4.3.2	Description de la méthodologie	160
4.3.3	Les types d'habitation de la zone enquêtée	162
4.3.4	Description des maçonneries utilisant le BLT	164
4.4	Modélisation mécanique d'un bâtiment en BLT selon l'Eurocode 6	172
4.4.1	Méthodologie	172
4.4.2	Caractéristiques des éléments de maçonnerie	175
4.4.3	Hypothèses de calcul	177
4.4.4	Résultats des modèles et discussions	180
4.5	Suivi hygro-thermique d'un bâtiment en BLT	188
4.6	Conclusion	197
	Conclusions générales	199
	Liste des Abréviations	207
	Annexes	211
A	Images MEB - Profils d'observation	213
B	Fiches d'essais de compression uniaxiale	215
B.1	Courbes contrainte-déformation en compression simple	215
B.2	Courbes contrainte-déformation en compression avec charge-décharge	216

C	Données suivi hydro-thermique	217
C.1	Plan du bâtiment et position des thermopuces	217
C.2	Données enregistrées par les thermopuces	217
D	Vérification d'un mur avec la méthode simplifiée :	221
D.1	Vérification de la résistance à la compression de la structure en latérite à l'ELU .	221
D.2	Les autres vérifications	223
D.3	Les liaisons entre murs, planchers et toitures :	223
D.4	Etude par élément fini - milieu continu équivalent	223
D.5	Etude du VER : Pour représenter ce système hétérogène,	224
	Bibliographie	225

Liste des figures

1.1	Relations entre le profil cuirassé, la dégradation des cuirasses et la nature de la roche-mère (Leprun, 1979)	10
1.2	Distribution des latérites à travers le monde	12
	(a) Latérites actuelles et préhistoriques (Persons, 1970)	12
	(b) Latérites actuelles (Nahon, 2003)	12
1.3	Zones et pôles d'utilisation des matériaux latéritiques, observations sur le terrain (Wyss, 2005)	14
1.4	Carte de situation des carrières de latérites, (BUMIGEB, 2004)	14
1.5	Profils schématiques comparés de l'altération des roches aluminosilicatées en climat tropical, et l'altération des minéralisations sulfurées (Blot, 2004)	17
1.6	Construction en latérite en Inde et au Burkina	24
	(a) Monument national en latérite, Angadipuram, Inde, (Kasthurba, 2006).	24
	(b) Cathédrale de Koudougou, parement en BLT, 1939, (Wyss et Sauret, 2007).	24
2.1	Grands traits géologiques de l'Afrique occidentale, (Rocci, 1965)	31
2.2	Carte géologique du Burkina Faso (Hottin et Ouedraogo, 1975)	32
2.3	Carte géologique du Burkina Faso (Castaing et Chevremont, 2003)	36
2.4	Localisation des sites d'étude	38
2.5	Extrait de la carte géologique de Houndé aux alentours de Dano (Ladmirant <i>et al.</i> , 1977)	40
2.6	Observations de formations géologiques sur le site de Dano	41
2.7	Schéma géologique coupe Nord-Sud (colline nord Dano- Barrage Dano)	42
2.8	Extrait de carte géologique de Ouagadougou, (Castaing et Chevremont, 2003)	43
2.9	Cuirasse latéritique aluminoferrugineuse sur l'axe Ouagadougou-Koubri	44
2.10	Affleurement des roches mères sur l'axe Ouagadougou - Koubri	44
	(a) Affleurement granitique	44
	(b) Affleurement de granodiorite	44
	(c) Contact latérite-roche mère sapolite	44
2.11	Profil carrière de Balkouin (axe Ouagadougou-Koubri)	46
2.12	Profil observé sur une tranchée routière	47
2.13	Profils des carrières industrielles et artisanales de Dano	48
2.14	Profils de la carrière de Balkouin et points de prélèvement des échantillons, d'après (Giorgis <i>et al.</i> , 2014)	51
2.15	Image MEB des échantillons prélevés	54
	(a) Image échantillon Koubri	54
	(b) Image échantillon Tigaldégué	54
	(c) Image échantillon Dano	54
	(d) Légende	54
2.16	Spectre de quatre échantillons acquis à 20 KV	55
	(a) Spectre Koubri	55
	(b) Spectre Tigaldégué	55

(c) Spectre Dano	55
(d) Spectre Balkouin	55
2.17 Composition chimique des carrières (0.8-1m)	56
(a) Echantillon Koubri	56
(b) Echantillon Tigaldégué	56
(c) Echantillon Dano	56
(d) Echantillon Balkouin	56
2.18 Compostion chimique en fonction de la profondeur - Carrière de Balkouin	57
2.19 Diffractogrammes de quelques échantillons	58
(a) Diffractogramme Koubri	58
(b) Diffractogramme Tigaldégué	58
(c) Diffractogramme Dano	58
2.20 Composition minéralogique des carrières (0.8-1m)	59
2.21 Minéralogie en fonction de la profondeur de prélèvement- Balkouin	62
3.1 Diagramme de phases d'un milieu poreux	68
3.2 Schéma explicatif de l'effet "bouteille d'encre" d'après (Bousquié, 1979)	71
3.3 Courbe contrainte-déformation des roches (Jaeger et Cook, 1969)	75
3.4 Exemple de courbe contrainte-déformation en compression simple	76
3.5 Essais de traction	79
3.6 Essais de flexion	80
(a) Essai de flexion 3 points	80
(b) Essai de flexion 4 points	80
3.7 Mesure des déformations axiale, transversale et volumique (Panet <i>et al.</i> , 1976)	81
3.8 Illustration et évaluation des différents modules élastiques	82
3.9 Variations des résistances en compression d'une roche calcaire en fonction des dimensions des éprouvettes	88
3.10 Variations des résistances en compression d'un béton en fonction de la forme et des dimensions des éprouvettes	88
3.11 Schéma du montage de la méthode du plan chaud.	94
3.12 Illustration du principe de la méthode fluxmétrique.	95
3.13 Résultat expérimental sur la variation de la température du thermocouple dans le temps	97
3.14 Dispositif de mesure de volume par la méthode de la paraffine	98
3.15 Dispositif de mesure de la masse volumique absolue	99
3.16 Essais de compression monoaxiale et de flexion 3 points	102
3.17 Presse de type Bishop et Wesley du LOMC	103
3.18 Dispositif d'essai d'humidification-séchage	104
3.19 Dispositif utilisé pour la mesure de vitesse de l'onde P (PUNDIT)	105
3.20 Dispositif de montage de la méthode du plan chaud du LPCE.	106
3.21 Photographie des échantillons utilisés.	107
3.22 Photographie des échantillons utilisés pour les essais au fluxmètre	109
3.23 Dispositif de mesure KD2 Pro	109
3.24 Distribution porale des latérites obtenue par porosimétrie au mercure	112
3.25 Évolution de l'absorption d'eau des blocs en fonction du temps	114

3.26	Résistance à la compression des blocs en fonction de l'état hydrique	117
3.27	Valeurs moyennes de résistance à la compression par cycle d'humidification-séchage	118
3.28	Rc moyenne en fonction du volume des blocs, carrière de Dano PN	120
3.29	Rc en fonction de la profondeur d'extraction - Carrière de Balkouin	120
3.30	Rc et minéralogie en fonction de la profondeur - Carrière de Balkouin	121
3.31	Exemple de courbe contrainte - déformation des blocs	122
3.32	Observation des éprouvettes en phase d'écrasement	122
3.33	Courbe contrainte - déformation des échantillons cylindriques en compression uni- axiale simple	123
3.34	Courbe contrainte - déformation avec cycle de chargement-déchargement	125
3.35	Variation de la déformation irréversible en fonction du cycle de chargement	126
3.36	Illustration des différents modules calculés	128
	(a) Modules E_t , E_s et E_{av} en compression simple	128
	(b) Module E_s en compression cyclique	128
3.37	Variation du module sécant en fonction de la contrainte du cycle de charge-décharge	129
3.38	Variation de la vitesse des ondes P en fonction de la masse volumique sec et de la porosité	132
	(a) Variation de V_p avec de la masse volumique	132
	(b) Variation de V_p avec la porosité	132
3.39	Variation de la vitesse des ondes P avec la résistance à la compression	133
3.40	Conductivité thermique en fonction de la densité et de la porosité	137
	(a) Conductivité en fonction de la densité	137
	(b) Conductivité en fonction de la porosité	137
3.41	Conductivité en fonction de la teneur en eau	139
4.1	Les types d'agencement de la maçonnerie (DDMT, 2007)	147
4.2	Les Types de mur en maçonnerie DTU 20.1 (1985)	148
4.3	Vue aérienne des secteurs enquêtés	161
4.4	Répartition des modes de construction par secteur	163
4.5	Réalisations récentes en BLT à Dano	164
	(a) Mairie de Dano	164
	(b) Monastère Notre Dame de Bafor	164
	(c) Chantier Siège de la Fondation Drayer	164
	(d) Chantier Ecole maternelle de Dano	164
4.6	Maçonnerie en BLT traditionnelle : Type 1	165
	(a) Modèle Type 1	165
	(b) Exemple Type 1	165
	(c) Joint en mortier de latérite apparent	165
	(d) Joint en latérite protégé avec du ciment	165
4.7	Maçonnerie en BLT avec structure en béton Type 2 et Type 3	167
	(a) Modèle Type 2	167
	(b) Modèle Type 3	167
	(c) Exemple Type 2	167
	(d) Exemple Type 3	167
4.8	Maçonnerie en double mur de parpaing et de BLT : Type 4.	168

(a)	Chantier Siège de la fondation Drayer	168
(b)	Chantier Ecole maternelle de Dano	168
4.9	L'ancienne cathédrale de Dano	169
4.10	Architecture reconstituée de l'ancienne école de Dano	170
4.11	Etat actuel de l'ancienne école de Dano	171
(a)	Façade Nord (mur supérieur en BLT-inferieur en brique de banco))	171
(b)	Façade Sud (poteaux et arcs de BLT)	171
(c)	Façade Est (entièrement en BLT)	171
(d)	Façade ouest (BLT + joint en mortier ciment)	171
(e)	Toiture partie centrale (charpente métallique + tôle ondulée)	171
(f)	Toiture partie rajoutée (charpente en bois)	171
4.12	Plan du modèle de bâtiment simulé	173
4.13	Exemple du modèle simulé en RDC et R+1	174
(a)	Bâtiment plein -pied	174
(b)	Bâtiment R+1	174
4.14	Eprouvettes 4 x 4 x 16 cm de mortier de latérite-ciment et essais de compression-traction par flexion	176
(a)	Eprouvettes immergées dans l'eau	176
(b)	Eprouvettes séchées à l'air	176
(c)	Essai de compression	176
(d)	Essai de traction par flexion	176
4.15	Exemple de Modélisation avec prise en compte de la charge du vent	180
(a)	RDC	180
(b)	R+1	180
4.16	Diagrammes de répartition des déplacements totaux dans la direction de Z	182
(a)	Déformée structure en RDC	182
(b)	Déformée structure en R+1	182
(c)	Déplacements suivant Z	182
(d)	Déplacements suivant Z	182
(e)	Déplacements totaux	182
(f)	Déplacements totaux	182
4.17	Diagramme de répartition des contraintes dans la direction de Z	183
(a)	RDC-contraintes suivant XZ	183
(b)	RDC-contraintes suivant YZ	183
(c)	RDC-contraintes suivant XY	183
(d)	R+1-contraintes suivant XZ	183
(e)	R+1-contraintes suivant YZ	183
(f)	R+1-contraintes suivant XY	183
(g)	R+2-contraintes suivant XZ	183
(h)	R+2-contraintes suivant YZ	183
(i)	R+2-contraintes suivant XY	183
4.18	Diagramme de répartition des déplacement totaux	185
(a)	RDC à joint mince	185
(b)	RDC à joint épais	185
(c)	R+1 à joint mince	185

(d)	R+1 à joint épais	185
(e)	R+2 à joint mince	185
(f)	R+2 à joint épais	185
4.19	Répartition des contraintes pour les RDC et R+1 dans la direction de Z	186
(a)	RDC à joint épais-contraintes suivant XZ	186
(b)	RDC à joint épais-contraintes suivant YZ	186
(c)	RDC à joint épais-contraintes suivant XY	186
(d)	R+1 à joint mince - contraintes suivant XZ	186
(e)	R+1 à joint mince-contraintes suivant YZ	186
(f)	R+1 à joint mince-contraintes suivant XY	186
4.20	Déformées des structures simulées sous l'effet de charges dues au vent, au poids propre et à l'exploitation	187
(a)	RDC à joint mince	187
(b)	RDC à joint épais	187
(c)	R+1 à joint mince	187
(d)	R+1 à joint épais	187
(e)	R+2 à joint mince	187
(f)	R+2 à joint épais	187
4.21	Plan du bâtiment-pilote	188
A.1	: Morphologie observée au MEB - Carrières de Dano, Koubri, Tigaldégué	213
(a)	Couche cuirassée - Profil P1-a	213
(b)	Couche sous-jacente Profil P1-b	213
(c)	Couche sous-jacente Profil P1-c	213
(d)	Couche cuirassée Profil K1-a	213
(e)	Couche sous-jacente Profil K1-b	213
(f)	Couche sous-jacente Profil K1-c	213
(g)	Couche cuirassée Profil T1-a	213
(h)	Couche cuirassée Profil T1-b	213
(i)	Couche cuirassée Profil T1-c	213
B.1	: Compression simple sur bloc parallélépipédique - Presse LEMC	215
(a)	Bloc-B1	215
(b)	Bloc-B2	215
(c)	Bloc-B3	215
(d)	Bloc-B4	215
B.2	: Compression simple sur cylindre - Presse LOMC	216
(a)	Eprouvette A1	216
(b)	Eprouvette A2	216
(c)	Eprouvette A3	216
(d)	Eprouvette B1	216
(e)	Eprouvette B5	216
(f)	Eprouvette D4	216
B.3	: Compression avec charge-décharge sur cylindre	216
(a)	Eprouvette A5	216

(b) Eprouvette A6	216
(c) Eprouvette D5	216
C.1 Plan du bâtiment- répartition des thermopuces	217
(a) Plan du bâtiment-pilote	217
(b) Répartition des thermopuces	217
C.2 Variation de température et d'humidité durant la période de suivi	219
(a) Variation de l'humidité	219
(b) Variation des températures intérieure et extérieure	219

Liste des tableaux

1.1	Valeur $\frac{S}{R}$ en fonction de la tranche granulométrique des latérites	21
1.2	Les critères pouvant faire l'objet d'une première normalisation	26
2.1	Coordonnées géographiques des carrières	38
2.2	Coordonnées géographiques des profils d'observation	45
2.3	Minéralogie en fonction des couches du profil de la figure 2.14	61
3.1	Qualification de la résistance d'une roche en fonction de la valeur de σ_c (USRM)	77
3.2	Valeurs des vitesses V_p des principales roches sédimentaires (Guéguen et Palciauskas, 1997)	84
3.3	Résultats des essais de compression uniaxiale sur le Tuffeau et la pierre de Sébastopol (Beck et Al-Mukhtar, 2004)	86
3.4	Caractéristiques mécaniques des roches (Bieniawski et Balkema, 1984)	87
3.5	Caractéristiques physiques et mécaniques des latérites indiennes (Kasthurba, 2006)	87
3.6	Taille et forme des échantillons testés	101
3.7	Spécifications de l'appareil K2D Pro	110
3.8	Valeurs moyennes des propriétés physiques des carrières \pm Ecart-type	111
3.9	Résultats de la porosimétrie à mercure pour les échantillons de Dano, Koubri et Tigaldégué	112
3.10	Valeurs moyennes de l'absorption par carrière	113
3.11	Résistance à la compression sur blocs 20x20x15 cm par carrière - Presse LEMC	115
3.12	Carrière de Dano PN- Rc en fonction de la taille des blocs	119
3.13	Module d'élasticité tangent des blocs 20 x20 x 15 cm (Presse CONTROLAB)	126
3.14	Modules de Young sécant, moyen et tangent en compression simple - Presse Bishop	127
3.15	Modules de Young sécants à cycle de chargement-déchargement - Presse Bishop	129
3.16	Résultats des essais de résistance à la flexion 3 points (σ_t) par carrière	130
3.17	Module de Young dynamique et statique	133
3.18	Résultats des mesures par la méthode de de plan chaud	134
3.19	Résultats des mesures par la méthode de fluxmètre	134
3.20	Résultats des mesures avec KD2-Pro	136
3.21	Valeurs de conductivité thermique des matériaux	136
3.22	Coefficients A, B, A', B' selon le modèle de Kersten <i>et al.</i> (1966)	138
3.23	Définition des classes de la résistance à la compression normalisée f_b des BLT	140
4.1	Types de dégradations sur les maçonneries en latérite	153
4.2	Les principes de vérification de dimensionnement des murs selon l'Eurocode 6	156
4.3	Caractéristiques du BLT utilisé dans la modélisation	175
4.4	Résultats moyens des essais de compression sur les mortiers	176
4.5	Résultats moyens des essais de traction par flexion 3 points sur les mortiers	177
4.6	Paramètres mécaniques utilisés pour la définition de deux modèles de maçonnerie	178
4.7	Déplacements et contraintes maximaux sous poids propre et charges d'exploitation	181

4.8 Déplacements et contraintes maximaux sous l'effet du vent, du poids propre et des charges d'exploitation 184

Introduction générale

Sommaire

0.1	Contexte général	1
0.2	Objectif de la thèse	3
0.3	Structuration du mémoire	3

0.1 Contexte général

Les matériaux utilisés par l'homme dans la construction sont globalement produits ou extraits, transformés, transportés, assemblés, puis recyclés en fin de vie des ouvrages. Toutes ces étapes du cycle de vie nécessitent plus ou moins d'énergie, et peuvent générer des nuisances et des pollutions diverses : de la simple poussière à des émanations dangereuses. Les centres de production du ciment et de l'acier sont par exemple des gros consommateurs d'énergie et producteurs de CO_2 et de produits nuisibles.

Le secteur du bâtiment au sens large contribue à lui seul, selon certaines estimations, à plus de moitié des émissions de CO_2 (Mazria, 2007). Parmi les facteurs responsables de cette émission, la production des matériaux et l'exploitation des bâtiments semblent les deux plus importants. Aussi, l'augmentation sans cesse des prix de l'énergie a rendu inaccessible ces « matériaux industriels » de construction à grand nombre des populations du monde, notamment celles de l'Afrique qui vivent en dessous du seuil de la pauvreté.

Ce fort impact environnemental combiné à la raréfaction des sources d'énergie, a amené les chercheurs à reconsidérer le problème de l'habitat. De plus en plus, la recherche s'oriente vers le développement d'éco bâtiments qui, de par leur conception et le matériau utilisé, va minimiser l'impact environnemental de leur construction, de leur exploitation et de leur déconstruction, tout en assurant un haut niveau de confort et de salubrité aux usagers. Le retour aux matériaux locaux et le développement des matériaux appropriés ou écologiques sont les solutions envisagées de par le monde.

En Afrique, malgré le développement des nouveaux matériaux (ciment, acier, ...) ces dernières années, les constructions en terre représentent encore 30% à 50% du patrimoine bâti du continent. Malgré tout, le mode de construction en maçonnerie est le plus utilisé de par le monde. Ces constructions en terre ont résisté depuis des décennies aux contraintes et intempéries de la nature comme en témoigne l'existence d'un patrimoine ancien dans tous les pays d'Afrique. On peut citer à titre d'exemple, la ville historique de Tombouctou au Mali, construite en banco

ou encore la forteresse de Loropeni au Burkina Faso, datant du XI^e siècle, avec des murs de six mètres de hauteur construits en moellons de latérite. Ces deux sites sont classés aujourd'hui comme des patrimoines mondiaux par l'UNESCO.

Plusieurs travaux ont démontré que ces constructions en terre offrent aussi un niveau acceptable de confort thermique sans recourir à la climatisation. On peut citer les travaux de [Wyss et Sauret \(2007\)](#) sur les maisons en adobe avec une toiture en voute nubienne dans la région du Sahel, l'étude expérimentale en Algérie sur des bâtisses en blocs de terre comprimée ([Bernouali et al., 2011](#)) qui a également montré le caractère confortable de ces maisons en terre. En France également, les travaux sur les constructions en bauge mécanisée, ou la mise au point d'un nouveau matériau à base d'argile par CEMATERRE ([Hibouche, 2013](#)), ont confirmé la bonne inertie thermique des parois en terre ainsi qu'une stabilisation de la température interne ([Marmoret, 2004](#)).

Les tentatives de valorisation des matériaux locaux dans leur globalité ont été initiées un peu partout en Afrique. L'Association pour le Développement naturel d'une Architecture et d'un Urbanisme Africain (ADAUA) en avait fait son credo dans les années 70. Beaucoup de constructions, notamment en Afrique subsaharienne témoignent encore de cette volonté. Dans son sillage, des institutions de formation et de recherche ont accompagné cette dynamique pour améliorer l'état des connaissances tant sur le plan des technologies de mise en œuvre que sur la caractérisation des différents matériaux de construction. Les deux écoles EIER et l'ETSHER qui forment aujourd'hui le 2iE au Burkina, ont participé à cette recherche/développement et ont largement contribué à une meilleure connaissance scientifique et technique dans ce domaine en Afrique. La communauté scientifique mondiale lui est notamment redevable du développement de l'adobéton, une technique de construction avec des briques de terre crue dans les années 90. LOCOMAT, au Burkina Faso, est aussi un bel exemple de structure d'accompagnement dans la promotion des logements en matériaux locaux.

De petites et moyennes entreprises locales de construction ont aussi mis en œuvre des matériaux de couverture, de revêtement et d'isolation thermique selon des procédés faisant appel à des produits naturels locaux. Celles du Burkina ont toujours eu à se rapprocher de 2iE pour leurs besoins en recherche sur les performances de ces matériaux innovants, en vue d'une meilleure identification de leurs caractéristiques.

Le bloc de latérite taillée (BLT) est l'un de ces matériaux en terre les plus utilisés parmi tant d'autres dans les constructions traditionnelles de l'Afrique tropicale où la roche latéritique est en abondance. Malgré cette disponibilité, son utilisation reste insuffisante. La demande grandissante du public et des acteurs locaux concernant ces matériaux de construction va actuellement vers un habitat traditionnel à rénover ou contemporain à concevoir pour demain.

Toutefois, malgré les efforts consentis, un des problèmes majeurs de l'utilisation du matériau "la-

térite rocheuse" semble être le manque de critères standardisés pour en évaluer les performances. Cette situation, non seulement exerce une influence négative sur les propriétaires potentiels, les décideurs et les concepteurs des projets de logement, freine également les institutions de financement pour investir dans des constructions pour lesquelles ils n'ont pas la garantie technique d'une durée d'existence de plus de la moitié de la période de prêt.

Ce sentiment de « vide normatif » était compréhensible il y a quelques années encore, mais ne se justifie plus aujourd'hui. Un certain nombre de pays d'Asie et d'Amérique a élaboré des normes pour valider l'emploi du matériau (Kasthurba et Santhanam, 2005), mais pour les latérites africaines, malgré les multiples tentatives, cette normalisation n'existe toujours pas. Cependant, il existe dans les laboratoires africains de nombreux rapports d'étude ou des mémoires d'étudiants qui traitent de ce matériaux qui peuvent servir de base pour cette normalisation. Malheureusement ces documents restent inaccessibles au grand public.

Il est donc essentiel de reprendre ce travail inachevé de caractérisation des latérites pour rendre accessibles au plus grand nombre les nouvelles techniques associées à leur mise en œuvre.

0.2 Objectif de la thèse

Ce projet de thèse s'inscrit dans une dynamique générale de valorisation d'un matériau traditionnel, universel, économique et à fort potentiel constructif, très présent en Afrique sahélienne, recyclable, qu'est le BLT. Par ailleurs, les blocs de mauvaise qualité, considéré aujourd'hui comme un déchet de carrière pourront être valorisés dans la production des BTC. La valorisation de ce matériau, accessible à tous, contribue donc à la réduction de la pauvreté et à la préservation de l'environnement par la réduction de l'impact écologique des ouvrages du génie civil (limitation de l'utilisation des bois et des matériaux importés tels que le ciment, la chaux, . . .)

De façon spécifique, ce projet, cofinancé par le 2iE et l'UEMOA, entre dans le cadre d'un programme de valorisation de la latérite pour une meilleure utilisation dans l'habitat en Afrique. Ce premier travail se donne comme objectifs de déterminer les paramètres physiques, mécaniques, thermiques et hydriques qui sont utilisés dans la conception des bâtiments en BLT. Ensuite, il posera les jalons de l'utilisation des paramètres obtenus dans la conception des habitations dans les pays africains où la roche latéritique est abondante.

0.3 Structuration du mémoire

Le mémoire rend compte des étapes de la construction des bâtiments en BLT : l'extraction du matériau dans les carrières ; les essais de laboratoire pour évaluer les performances ; les calculs d'ouvrage en maçonnerie ; la mise en œuvre et le suivi du confort thermique. Il s'articule en quatre chapitres :

Le premier chapitre dresse un état de connaissances générales sur le matériau latérite et son utilisation dans la construction. L'histoire de la latérite, sa répartition dans le monde et au Burkina (cadre de l'étude), le processus de latéritisation, les roches comparables aux latérites sont les éléments abordés.

Le deuxième chapitre traite des matériaux étudiés. L'aperçu sur la géologie globale, particulièrement des formations latéritiques du Burkina Faso, la présentation des carrières de prélèvement des échantillons, les études sur les profils géologiques des carrières, les résultats d'essais chimiques et minéralogiques sur les matériaux étudiés sont présentés.

Le troisième chapitre aborde la caractérisation physique, mécanique et thermo-hydrrique du matériau. Il définit d'abord une base bibliographique sur les paramètres physiques et mécaniques dont la connaissance est nécessaire pour l'utilisation du matériau dans la maçonnerie. Par la suite, il présente le choix des paramètres à mesurer, puis, des protocoles expérimentaux sont définis pour la mesure au laboratoire de ces paramètres retenus. Les résultats de ces mesures sont également présentés et discutés.

Le quatrième et dernier chapitre présente un exemple d'application des résultats obtenus dans la modélisation de la stabilité et le suivi hygrothermique des bâtiments en BLT. Il s'agit, pour la partie stabilité, de justifier à l'aide d'une modélisation avec les hypothèses de calcul par la méthode des éléments finis, le degré de sécurité des constructions simples ou à niveaux avec ce matériau. Les résultats du suivi de confort thermique d'un bâtiment simple en BLT seront également présentés dans la deuxième partie de ce chapitre.

Chaque chapitre s'appuie sur une bibliographie spécifique à la thématique traitée.

Les matériaux latéritiques

Sommaire

1.1	Introduction	5
1.2	Définitions des latérites et historique	6
1.3	Répartition des latérites	11
1.3.1	Répartition à travers le monde	11
1.3.2	Répartition au Burkina Faso	13
1.4	Le processus de latéritisation	15
1.5	Similitude avec d'autres roches	16
1.6	Composition et classification des latérites	18
1.7	Utilité des latérites	22
1.7.1	Latérite comme ressource minérale	22
1.7.2	Latérite comme matériau de construction	23
1.8	Conclusion	26

1.1 Introduction

La bibliographie actuelle sur la construction en terre est vaste et un grand nombre d'ouvrages traitent particulièrement des problèmes relatifs à l'utilisation des latérites. Mais la plupart de ces ouvrages sont très difficilement, voire impossible à acquérir. La géologie des formations latéritiques, la composition chimique, les techniques architecturales, les techniques de mise en œuvre, les origines historiques des patrimoines en latérite sont les domaines les mieux traités. Cependant, les recherches sur l'identification et la caractérisation des latérites en vue d'une normalisation pour la construction restent limitées.

Il existe des laboratoires et des institutions spécialisés dans ce domaine de par le monde. Le laboratoire Cra-ENSAG est par exemple une source importante et incontournable d'informations nécessaires à ce travail de recherche. C'est un espace regroupant architectes, chercheurs, étudiants et professionnels, qui centralise notamment les connaissances internationales sur les différentes techniques traditionnelles et contemporaines de construction en terre crue. Les séminaires, qui y sont régulièrement organisés, permettent des rencontres favorisant l'échange

des connaissances et les partenariats de recherche. Les chantiers actuels en France comme en Afrique sont connus et suivis afin d'en confronter les études et les résultats, et de garder une traçabilité des différentes expériences professionnelles. Par ailleurs, la création de l'association CRATerre qui propose de regrouper en France tous les professionnels autour de la construction en terre, permet annuellement, lors de ses assises nationales, de confronter les expériences de chantiers et de faire le bilan de l'avancement de la normalisation dans le monde. Il ressort cependant des travaux conduits par cet organisme que les études portent essentiellement sur la terre et ses dérivés (ajout de ciment, de chaux, . . .), mais le matériau latérite en tant que tel est peu étudié.

De nombreux travaux publiés concernent aussi la recherche sur les matériaux argileux qui sont bien connus et essentiels pour notre étude des latérites meubles. La composante argileuse du matériau latérite peut en effet induire des effets négatifs sur le comportement général de celui-ci. Dans ce domaine, il reste à explorer les effets des traitements traditionnels, très utilisés en Afrique, qui permettent de modifier certains comportements de la latérite.

Toutefois, les études sur la latérite rocheuse sont réduites ; ainsi nous nous sommes focalisés sur ce géomatériau abondant en Afrique saharienne mais aussi sur toute la ceinture tropicale du globe.

Ce chapitre, consacré à la revue bibliographique sur les latérites et leur utilité, est organisé en six parties. La première partie traite des définitions et de l'historique liées à la terminologie de la latérite. La deuxième partie aborde la répartition spatiale des formations latéritiques dans le monde en général, particulièrement en Afrique et au Burkina Faso. La troisième partie concerne le processus de latéritisation et l'évolution des formations latéritiques. La quatrième partie concerne la composition des latérites et de leur classification. La cinquième partie nous informera sur les roches qui présentent des similitudes avec les latérites. La dernière partie est consacrée à l'utilité du matériau latéritique et de la nécessité de sa valorisation dans un contexte de développement durable et des changements globaux et climatiques

1.2 Définitions des latérites et historique

Une bonne base de la revue historique peut être trouvée dans le "Compte rendu des recherches sur les latérites" rédigé en français puis en anglais par [Maignien \(1966b,a\)](#). C'est une synthèse des connaissances sur l'histoire, la géologie, la minéralogie, la chimie et la répartition des latérites à travers le monde. Cet ouvrage a été en grande partie une source importante pour la rédaction de cette partie.

Selon [Maignien \(1966a\)](#), « Le mot « Latérite » a été suggéré par [Buchanan \(1807\)](#) pour désigner un matériau servant à la construction, exploité dans les régions montagneuses de Malabar

(Inde). Ce matériau présente l'aspect d'un dépôt ferrugineux, à morphologie vésiculaire. Lorsqu'il est frais, il peut être facilement découpé en blocs réguliers à l'aide d'un instrument tranchant. Exposé à l'air ou au soleil, il durcit rapidement et résiste alors remarquablement aux agents météorologiques ». Il résulte de ces propriétés son emploi fréquent comme matériau de construction (emploi comparable à celui des briques). Latérite a pour racine « later » qui signifie brique en latin, ceci uniquement par référence à l'utilisation de ces blocs (Perscott et Pendleton, 1952).

Plusieurs travaux menés par différents chercheurs se sont succédés, mais la plupart de ces travaux tendent à préciser la définition des latérites sur des bases chimiques, parfois minéralogiques. Ils soulèvent cependant de nombreuses controverses, en particulier sur la nature et les proportions relatives d'oxydes caractéristiques qu'elles renferment. Pour Neustruev (cité par Lacroix (1914)), une latérite doit contenir plus de 86% de Fe_2O_3 . Fermor (1911) porte cette limite à 90% , bien qu'il signale que les constituants des latérites sont des oxydes de fer, aluminium, de titane et de manganèse. Mais la présence d'oxyde de fer reste obligatoire.

Entre les années 1889 et 1916, les travaux de Wather (1989) s'appuyaient sur une définition morphologique. Il précise que le terme latérite a été choisi par référence à la couleur rouge qui est comparable à celle des briques. Latérite signifie « qui ressemble aux briques », et il propose d'étendre la définition à toutes les alluvions et éluvions colorées en rouge, et en particulier, aux sols rouges tropicaux. Cette nouvelle définition a eu un grand succès, en particulier auprès des agronomes, d'où une source nouvelle de confusion.

Il a fallu attendre le début des années 1920 pour que l'étude des latérites soit abordée sous un angle pédologique. S'appuyant sur des définitions tantôt morphologiques, tantôt physiques, tantôt chimiques, les termes « latérite » et « latéritique » sont utilisés dans des acceptations variées.

A l'origine « latérite » se réfère à une certaine morphologie et à une particularité remarquable de la mécanique des roches. C'est à ce titre, et bien que très rapidement on ait reconnu qu'il s'agissait d'une formation argileuse ferrugineuse, que le mot latérite a eu du succès, d'abord en Inde, puis dans le monde, et ceci, bien avant les années 1990. Ainsi, il apparaît de plus en plus difficile de donner une définition purement morphologique, ou physique, ou chimique à ce terme.

Le mot latérite couvre des aspects très variés de la pédogenèse tropicale et représente une trop grande généralité. Pour Guerassimov (1962) le terme englobe l'ensemble des sols des régions intertropicales. Aussi de nombreux chercheurs tendent à en donner une définition génétique et, pour éliminer tout risque de confusion, cherchent à éliminer le terme. Scrivenor (1930), Vine (1949), Robinson (1950) remplacent « latéritisation » par le mot connotatif «ferrallitisation»,

et **da Costa (1949)** qui agrée dans ce sens, indique que ce terme est très utile car, il se rapporte à des caractérisations physiques et physicochimiques des sols qui permettent de l'employer à un niveau de généralisation élevé. L'école pédologique française suit cette voie.

Il apparaît que ce sont des difficultés qu'il y a à relier les objets « latérite » trop largement définis à des milieux ou des processus spécifiques, qui amènent à abandonner le terme de **Buchanan (1807)**. Actuellement cuirasses ou carapaces, plinthites, sols ferrallitiques, kaolisols, latosols, oxisols sont autant de vocabulaire qui remplace et couvre ce qui, dans un sens très large, peut être appelé latérite. Cependant, le terme « latérite » est encore très largement employé. Il est toujours attaché à des formations rouges, riches en sesquioxydes d'alumine, de fer ou de manganèse, à morphologie variée, mais toujours indurées.

Alexander et Cady (1962) donnent la définition suivante : « la latérite est un matériau fortement altéré, riche en oxydes secondaires de fer, d'alumine ou des deux ensembles. Elle est à peu près dépourvue de bases et de silicates primaires, mais peut contenir de grandes quantités de quartz et de kaolinite. Ce matériau peut être durci en place ou s'indurer seulement après humidification et dessèchement successifs ».

Le terme créé par Buchanan a vu sa signification se modifier profondément, être élargi par les uns, puis restreint par les autres. Il est maintenant entaché d'une ambiguïté fondamentale. Il peut être employé pour les matériaux ferrugineux ou alumineux, des roches ou, tout au moins des sols fossilisés, pour certains horizons pédologiques, pour des sols qui sont séparés en plusieurs ordres ou classes suivant le système de classification employé. Cependant, jusqu'à une époque récente, « latérite », « roches latéritiques », « sols latéritiques », sont d'un usage courant dans la littérature scientifique.

Dans la littérature récente, la latérite « rocheuse » ou « indurée » qui fait l'objet de notre étude, a été définie comme étant le produit d'une altération intense sub-aérienne dans laquelle les teneurs des composés de fer et d'aluminium sont supérieures à celles des composés siliceux. Elle est composée essentiellement d'un ensemble des minéraux tels que la goethite, l'hématite, les hydroxydes d'aluminium, la kaolinite et le quartz (**Schellmann, 1986**).

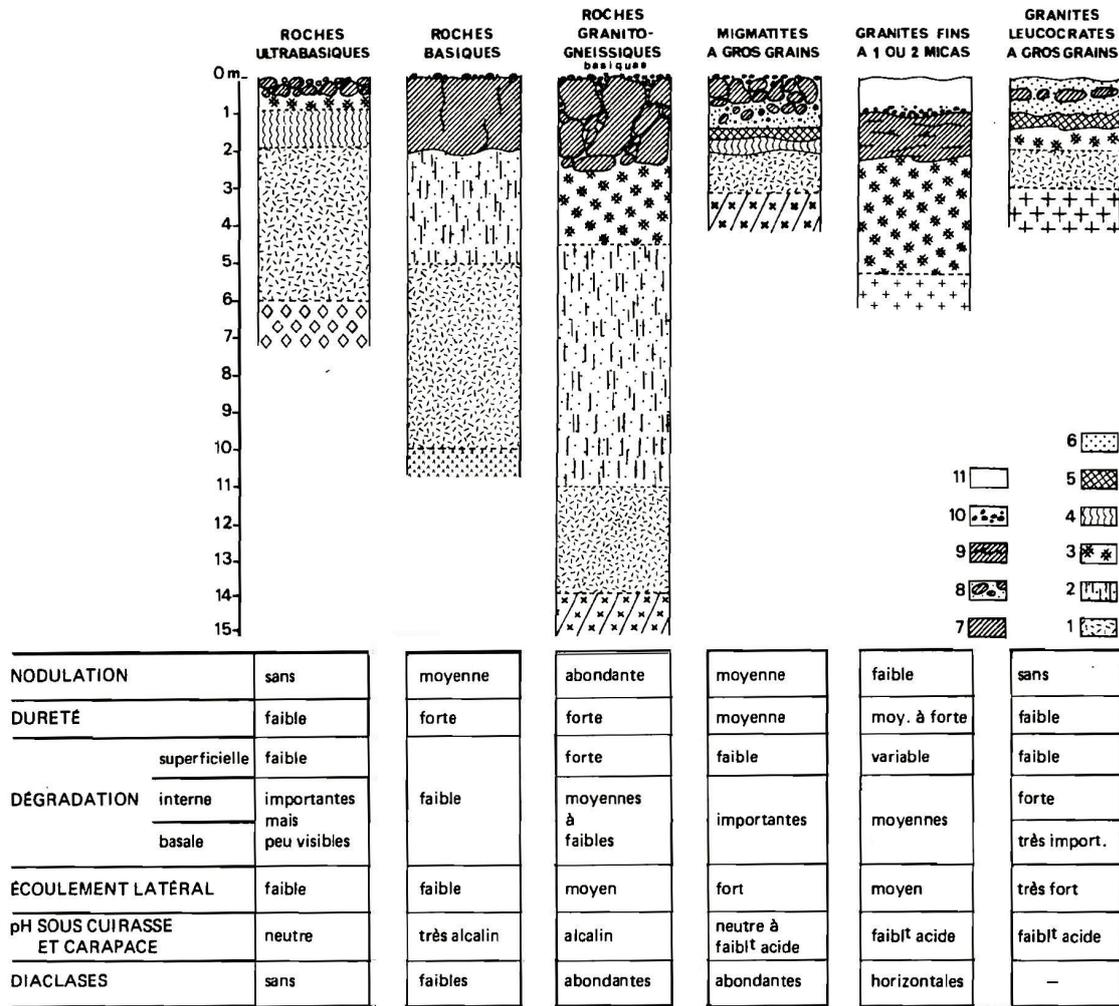
Schellmann (2003) a aussi défini la latérite comme une roche « rougeâtre » et « caractérisée par une structure à faciès vacuolaires », et a proposé une classification basée sur sa composition chimique à partir du diagramme ternaire de SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 . Mais les critères selon lesquels cette classification a été établie ne sont pas partagés par toute la communauté scientifique et de nombreux aspects sont encore en discussion. L'enrichissement en fer de la partie supérieure, par exemple, a été lié au processus d'enrichissement résiduel ou absolu (vers le haut ou vers le bas). Aussi, certains auteurs ont souligné que beaucoup de "matériaux" latéritiques dans les régions tropicales ont été formés par le transport latéral et non par l'altération des roches sous-jacentes.

C'est seulement à une date récente qu'on est arrivé à l'identification des différents horizons latéritiques liés à un ensemble de processus d'altération chimique comme il a été observé dans toutes les zones tropicales proches de l'équateur qui sont caractérisées par des températures élevées et des alternances saisonnières.

Les auteurs qui se sont intéressés à la géologie des zones tropicales ([Leprun, 1979](#); [Blot, 2004](#); [Maignien, 1966b](#)) décrivent un profil typique de latérite par des différents horizons qui sont représentés, de la surface jusqu'à la roche-mère par :

- une région riche en humus ;
- une couche abondante de latérite grossière sans aucune stratification et résistance ;
- une couche de latérite partiellement durcie avec une présence occasionnelle d'argile ;
- une couche de latérite avec une structure « vermiculaire » et avec une teneur plus élevée de kaolinite ;
- une couche de latérite tachetée ou bariolée à veines blanchâtres ou jaunes ;
- une zone riche en kaolinite (alors que les oxydes de fer sont plus abondants à la surface) ;
- un niveau altéré de la roche-mère, quelquefois fracturée ;
- la roche-mère saine.

[Leprun \(1979\)](#) propose dans son étude des cuirasses ferrugineuses des pays de l'Afrique occidentale sous climat sec le profil de la figure 1.1 pour décrire les relations en le profil cuirassé, la dégradation des cuirasses et la roche-mère.



1 - altération "pistache" 2 - argiles bariolées 3 - argiles tachetées 4- horizon vertique
 5 - horizon illuvial 6 - horizon éluvial 7 - cuirasse 8 - cuirasse démantelée
 9 - cuirasse fissurée horizontalement 10 noduels de surface 11 - sol d recouvrement

FIGURE 1.1 – Relations entre le profil cuirassé, la dégradation des cuirasses et la nature de la roche-mère (Leprun, 1979)

1.3 Répartition des latérites

1.3.1 Répartition à travers le monde

Dans la plupart des littératures, il est signalé que les latérites sont très répandues dans le monde ; elles représenteraient 33 % des continents (Persons, 1970). On les retrouve particulièrement dans les zones intertropicales : Afrique, Sud-est asiatique, Inde, Amérique du sud, Australie.

Maignien (1966a) signale que, « sous la forme indurée, les latérites débordent les climats tropicaux subhumides et on peut les observer jusque dans les régions désertiques (déserts africains et australiens)».

Les premières synthèses mondiales sur les latérites ont été proposées par Perscott et Pendleton (1952). Depuis cette étude, des nombreuses prospections ont été effectuées, particulièrement en Afrique et en Amérique du Sud.

Pour l'Afrique, une carte des sols du Service Pédologique Interafricain (CCTA) a été établie pour matérialiser l'ensemble des résultats obtenus par les pédologues à l'échelle d'un continent. Cette carte établie par D'Hoore et La Commission de Coopération technique en Afrique au sud du Sahara (1964) précise que :

- les cuirasses ferrugineuses se situent dans l'hémisphère nord sur une bande qui prend le continent d'Ouest en Est, latéritiques entre les isohyètes 750 et 1200 mm, et dans l'hémisphère sud, en Angola, au sud Congo et en Mozambique ;
- les sols ferrugineux ou sols latéritiques se situent entre ces deux bandes ; fréquemment cuirassés sous climat tropical et rarement sous climat équatorial.

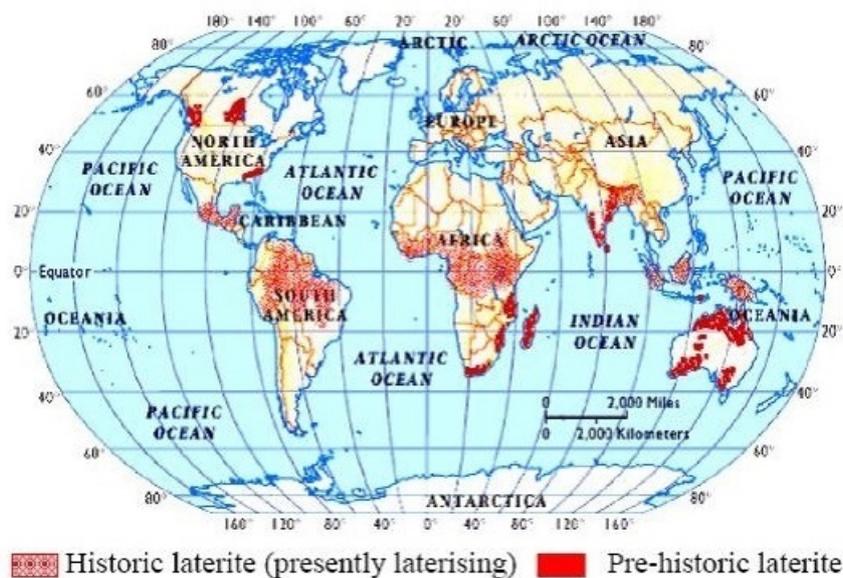
Pour l'Amérique du sud, l'Asie du Sud-ouest et l'Australie, des travaux semblables à ceux réalisés en Afrique existent (Stephens, 1953). Les grosses formations importantes des Red Yellow latosols, Red Yellow podzolic soils, Latosols concrétionnés et arénacés, Low humic latosols, Rubrozems, tous classées dans la famille des latérites, sont présents au Brésil, au Pérou, en Colombie, en Bolivie, au Paraguay, en Argentine, au Venezuela et en Australie. D'autres formations semblables sont également présentes dans le reste du continent sud-américain. En Amérique du Nord, la présence des « Red Yellow podzolic soils » est signalée dans le Nebraska aux U.S.A (Bramao et Petezval, 1960).

En Inde, zone des latérites par excellence, les plateaux des massifs montagneux de l'Inde centrale et occidentale sont constitués de sols latéritiques, de sols rouges graveleux, de sols latérites qui sont des classifications suggérées par Raychaudhuri (1962).

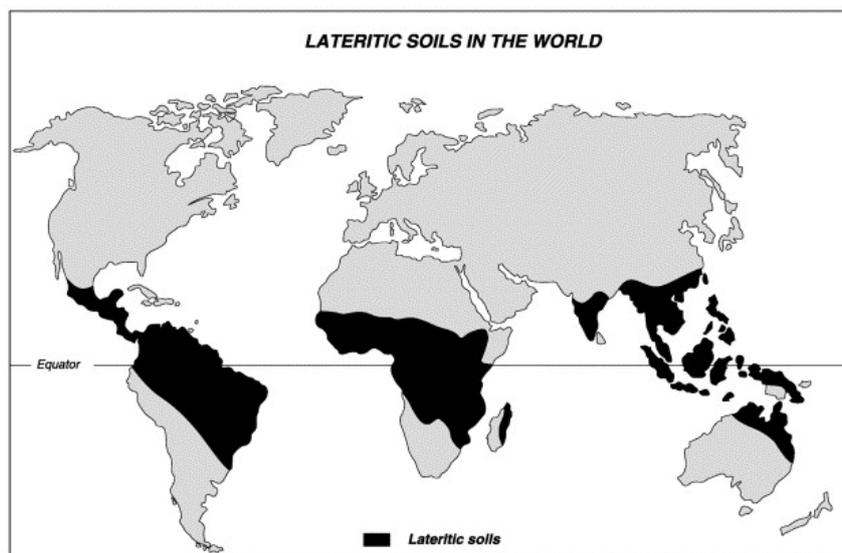
L'existence des latérites en Europe n'est signalée dans la littérature qu'en Allemagne et en Belgique. Les latosols de l'Allemagne méridionale et les sols enterrés sous les limons du Condroz

(Belgique) présentent cependant les caractéristiques des latérites (Mückenhausen, 1962).

La figure 1.2 (a) présente une distribution de la latérite actuelle et des sols préhistoriques qui pourraient être considérés dans le temps comme de la latérite. Nahon (2003) a établi une carte de répartition des couvertures latéritiques actuelles (figure 1.2(b)). Il estime que si on tient compte de leur épaisseur (une dizaine de mètres), les latérites représenteraient 85% de la couverture des sols (couverture pédologie) existant à travers le monde.



(a) Latérites actuelles et préhistoriques (Persons, 1970)



(b) Latérites actuelles (Nahon, 2003)

FIGURE 1.2 – Distribution des latérites à travers le monde

1.3.2 Répartition au Burkina Faso

Le Burkina Faso manque cruellement de données fiables et accessibles sur les matières premières en général. Le Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina Faso (BUMIGEB) est actif dans ce domaine depuis quelques années. Mais les moyens financiers et humains mis à la disposition de ce volet sont réduits et les recherches se concentrent essentiellement autour des grands centres urbains.

Il n'y a actuellement pas de documents disponibles et accessibles au grand public qui permettent d'apprécier les sites en latérite économiquement exploitables. La même remarque est valable pour d'autres ressources rocheuses, notamment le grès ou les différentes espèces de granite qui pourraient éventuellement être exportés sur le marché international. Cette absence d'information, qui ne signifie pas forcément ignorance, mais plutôt manque de diffusion, complique bien évidemment la valorisation des ressources naturelles par des investisseurs.

Cependant, dans une étude menée en 2005 par Wyss (2005), une carte des zones et pôles d'utilisation des matériaux latéritiques dans l'habitat a été dressée (Figure 1.3). Bien qu'elle ne présente pas le potentiel en latérite du Burkina, elle permet d'évaluer à plus de 2/3 du territoire les zones qui utilisent le matériau latérite. Comme l'utilisation d'un matériau est liée à la disponibilité à proximité, nous pouvons, sans trop se tromper, comparer l'importance de ressources disponibles à celles des zones qui l'utilisent.

Une autre étude, menée en 2004 par le BUMIGEB, a aussi tenté de répertorier sur une carte les potentialités en carrières de latérites exploitées et non-exploitées à proximité des grandes villes à l'échelle nationale (Figure 1.4). Cette carte montre qu'exceptée la partie Nord désertique et l'extrême Est du pays, les latérites sont répandues dans tout le reste du pays. Son utilisation comme matériaux de construction est bien connue dans les zones rurales et urbaines.

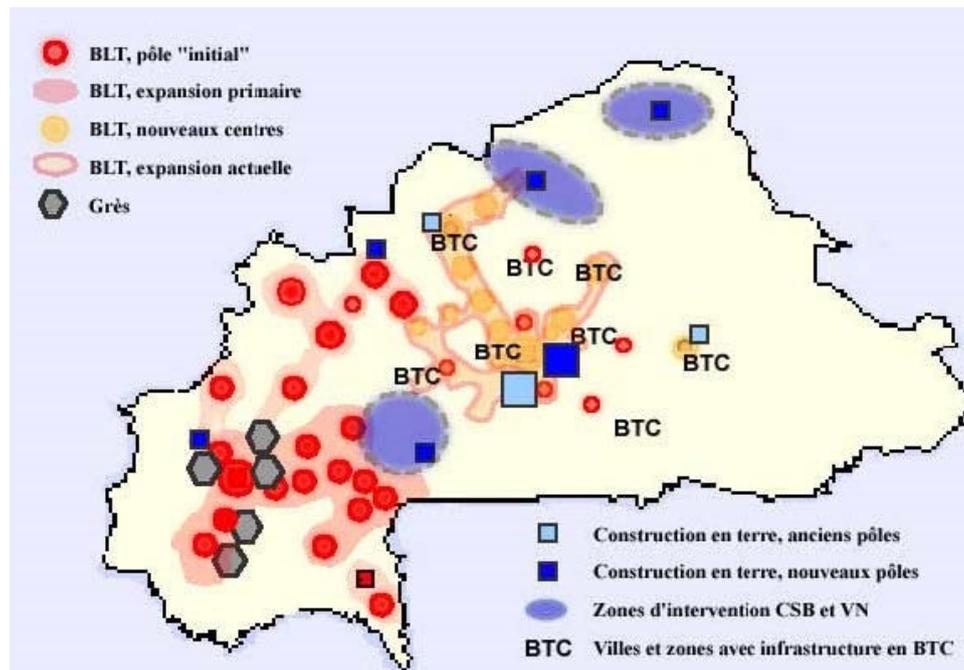


FIGURE 1.3 – Zones et pôles d'utilisation des matériaux latéritiques, observations sur le terrain (Wyss, 2005)

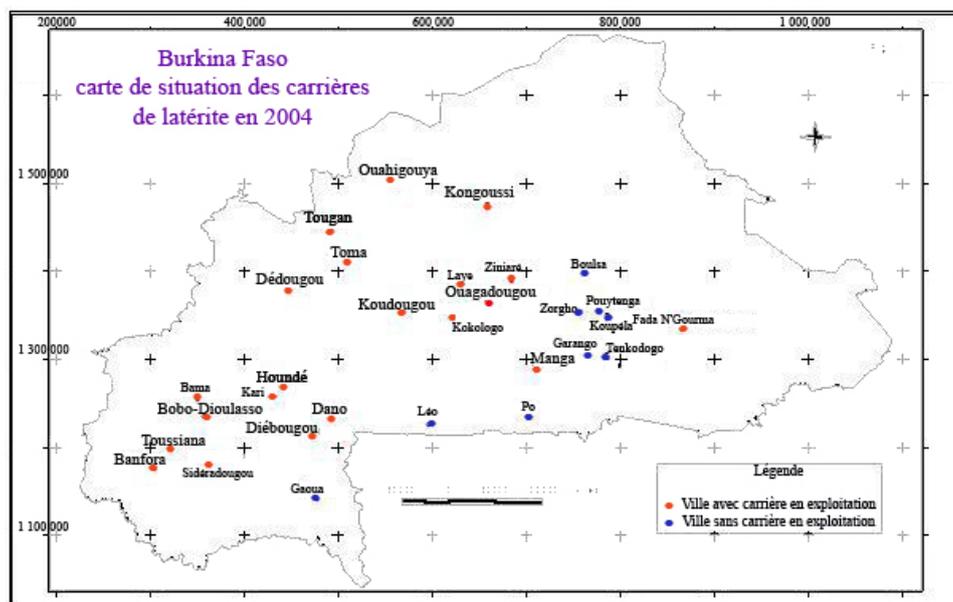


FIGURE 1.4 – Carte de situation des carrières de latérites, (BUMIGEB, 2004)

1.4 Le processus de latéritisation

Malgré un grand nombre d'études consacrées aux formations latéritiques, l'origine, les processus de développement et d'évolution de ces sols demeurent sujets à controverse. Les conclusions des recherches jusqu'à présent entreprises sont en effet souvent étroitement dépendantes de l'échelle d'observation. Deux théories se sont développées pour interpréter la genèse, la chronologie et l'évolution des formations latéritiques.

D'abord, les interprétations de type allochtoniste ont longtemps prévalu. Cette théorie est basée sur des observations et études menées à l'échelle des paysages. Pour ceux qui soutiennent cette théorie, les latérites peuvent dans de nombreux cas être interprétées comme résultant de la transformation de matériaux importés mécaniquement sur les roches du substratum. C'est la migration latérale du fer lessivé à l'amont et précipité à l'aval, dans des conditions oxydantes qui provoque la concentration de cet élément dans la partie supérieure des profils latéritiques. [Maignien \(1966a\)](#), [Millot \(1964\)](#) ont soutenu cette théorie. Pour [Michel \(1960, 1973\)](#), certains éléments chimiques cimentés par le fer dans les horizons cuirassés des latérites proviennent de phénomène de transport latéral, souvent sur des grandes distances.

Par la suite, des théories autochtonistes qui recherchent à établir une relation entre les latérites et les roches-mères ont connu un grand succès. En se basant sur des analyses menées à l'échelle minérale, les chercheurs qui soutiennent cette théorie, suggèrent que ce type de sol résulte d'un processus de formation géochimique *in situ*, c'est à dire par dissolution chimique des roches-mères. Malgré les variations latérales ou verticales des profils latéritiques par leur épaisseur, leur texture, leurs teneurs en fer, en quartz, en autres minéraux résistants ou en éléments traces, il existe une dépendance structurale, minéralogique ou chimique plus ou moins marquée avec un matériau parental situé à proximité immédiate. C'est ce qui est appelé la lithodépendance. [Nahon et Millot \(1977\)](#) soutiennent que c'est la descente verticale des fronts d'altération des roches et un enfoncement géochimique progressif qui donnent naissance aux formations latéritiques.

Pour [Boeglin et Mazaltarim \(1989\)](#), on ne peut parler de lithodépendance que quand des fortes teneurs en un ou plusieurs éléments spécifiques d'une roche-mère donnée se retrouvent dans le matériel altéré qui en dérive. Par exemple, [Pion \(1979\)](#) soutient que les concentrations en *Si*, *Al*, *Na*, *K* dans les cuirasses latéritiques sont indicateurs généralement d'une roche-mère granitique ; en *Fe*, *Mg*, *Mn*, *Ti*, des amphibolites, en *Fe*, *Ti*, *V*, *Cu* des roches basiques ou neutres. Les concentrations en *Mn*, *Cr*, *Ni*, *Co*, *Cu*, *Zn* sont des indicateurs d'une roche-mère ultrabasique ([Matheis, 1983](#)) tandis que les associations *Ni - Cu - Zn*, *La - Ce*, *K - Cr* sont assez caractéristiques d'un matériel originel de nature basique ([Ambrosi, 1984](#)).

Dans tous les cas, aujourd'hui, il est admis que les deux théories n'expliquent que partiellement le phénomène de formations des latérites. Il s'agit plutôt d'une altération de la roche-mère dont la caractéristique essentielle réside dans une mise en solution puis un départ de la silice, par le phénomène de lessivage, accompagnés d'un enrichissement en fer et en alumine sous forme de sesquioxides Fe_2O_3 et Al_2O_3 Maignien (1966a). Les facteurs influençant de façon prépondérante l'altération des roches et la formation des sols latéritiques qui en découlent sont : le climat (pluviométrie, température, bilan hydrique), la topographie (érosion et drainage), la végétation (matières organiques, bactéries, acides humiques), la nature de la roche-mère et le temps (Lyon Associates, 1971).

Dans une étude, une équipe internationale de géologues et de géochimistes a montré que la formation des sols latéritiques peut résulter de processus à la fois géochimiques et mécaniques (Braucher *et al.*, 1998). Pour ce faire, ces chercheurs ont mesuré, à l'aide du Tandétron (un accélérateur de particules), la teneur en beryllium 10 cosmogénique dans des quartz prélevés dans des latérites du Congo, du Gabon, du Burkina Faso et du Brésil. Cette nouvelle méthode d'analyse a permis de préciser l'origine de ces sols, à dater les événements et à quantifier la vitesse des processus mis en jeu.

1.5 Similitude avec d'autres roches

Les formations latéritiques présentent des compositions minéralogiques et chimiques assez variées et sont fréquemment coiffées par des cuirasses ferrugineuses plus ou moins épaisses, d'âges de mise en place variable (King, 1948; Maignien, 1966a; Michel, 1973; McFarlane, 1976; Nahon, 1976; Leprun, 1979). Ces cuirasses ferrugineuses ont été pendant longtemps considérées comme des obstacles à l'observation des autres roches riches en fer, par les géologues et prospecteurs. C'est notamment le cas de la bauxite et des roches sulfurées altérées, qui sont très fréquemment ferrifères. Ces roches subissent pratiquement le même processus de formation et d'évolution.

D'une manière générale, l'altération, sous climat tropical ou subtropical, de roches carbonatées, produit des latérites, qui sont des formations "lessivées" par les pluies et concentrées en alumine et en oxyde de fer. Quand l'alumine domine, la latérite prend le nom de bauxite. La bauxite, à la différence des roches latéritiques qui font l'objet de notre étude est constituée de la gibbsite ou hydrargillite ($Al(OH)_3$), de la boehmite ($AlO(OH)$) et de diaspore ($AlO_2(H)$). Les minéraux comme la goethite ou l'hématite, dominant dans la latérite sont rares. Les formations de bauxite ont un intérêt minier et ont été l'objet des nombreuses prospections. C'est le minerai par excellence pour la production de l'aluminium.

Les roches sulfurées altérées sont aussi très fréquemment ferrifères. En Afrique tropicale,

la cuirasse ferrugineuse et le chapeau de fer sont tous des roches ferrugineuses supergènes résiduelles où la roche parentale a parfois totalement disparu (Blot, 2004). Routhier (1963) estime qu'il est impossible de distinguer chapeaux de fer et cuirasses. C'est grâce aux travaux de Blot (2004) sur les altérations de la zone tropicale que cette ambiguïté a été levée. La figure 1.5 ci-dessous permet de différencier ces deux formations.

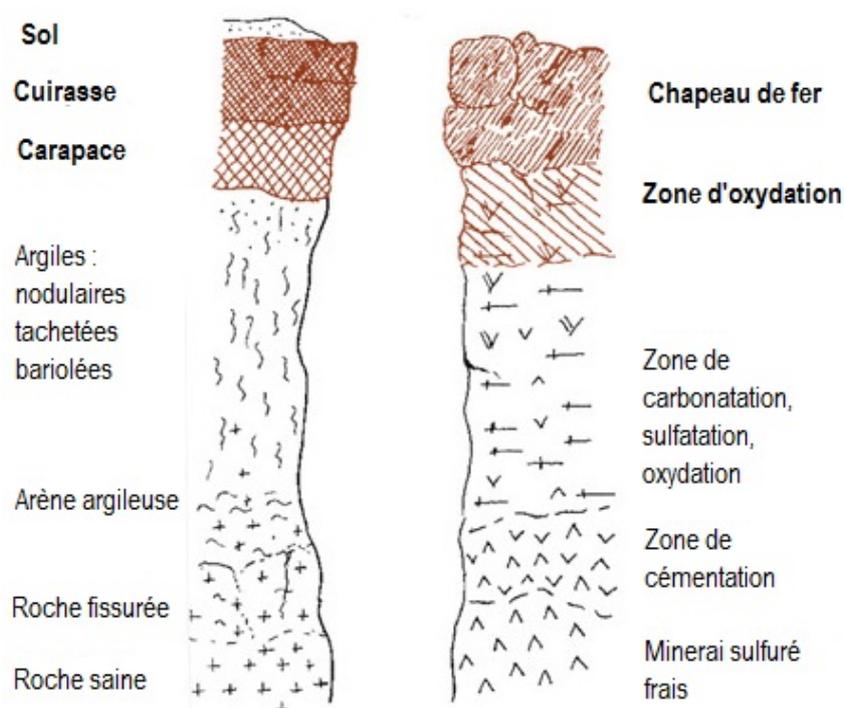


FIGURE 1.5 – Profils schématiques comparés de l'altération des roches aluminosilicatées en climat tropical, et l'altération des minéralisations sulfurées (Blot, 2004)

Il faut également distinguer les "Pedafers" et les "Pedacals" des latérites. Cette différenciation peut se faire par leur composition, leur couleur et le climat sous lequel ils se forment. Les Pedafers se trouvent généralement dans les zones tempérées qui reçoivent plus de 60 centimètres de pluie par an. Ils sont très fertiles, contenant beaucoup d'aluminium et de fer, et sont de couleur brun-noir. Ils sont présents dans la plupart des régions orientales des États-Unis. Les Pedacals se trouvent généralement dans les climats secs et chauds, comme ceux de l'ouest des États-Unis, qui reçoivent moins de 60 centimètres de pluie par an. Ils contiennent en abondance du carbonate de calcium et des minéraux sulfatés nombreux. Ils ont généralement une couleur gris-brun.

Par contre les latérites se développent uniquement dans les régions chaudes et tropicales qui reçoivent plus de 120 centimètres de pluie par an. Elles ont une couleur caractéristique de rouge foncé et contiennent beaucoup d'oxydes d'aluminium et de fer.

1.6 Composition et classification des latérites

Les tentatives de définition de la latérite basées sur les caractéristiques physiques et morphologiques, proposées par Buchanan et d'autres auteurs, se sont heurtées à des difficultés dès lors que certaines de ses propriétés physiques, telle que le durcissement à l'exposition de l'air, sont observables sur d'autres roches telles que la bauxite ou le calcaire. C'est ainsi qu'à partir du début du XIX^e siècle, plusieurs auteurs ont proposé d'autres définitions basées sur des études chimiques et minéralogiques. Se sont suivis aussi des classifications basées sur la composition. Les travaux de [Gidigasu \(2012\)](#) qui abordent les aspects physique, morphologique, minéralogique des latérites d'Afrique ont largement contribué au débat scientifique sur la définition de la latérite basée sur les propriétés physicochimie et minéralogique.

1.6.0.1 Composition chimique

Les études sur la composition chimique des latérites ont été marquées par des nombreuses controverses. La redéfinition des latérites à partir de leur composition chimique, les éléments chimiques que doivent contenir les latérites, la dominance de certains éléments par rapport à d'autres ont fait l'objet, des nombreuses publications souvent complémentaires, mais également souvent contradictoires.

Pour [Crook \(1909\)](#) puis [Evans \(1910\)](#), la dénomination de la latérite doit être réservée aux seuls produits d'altération contenant de l'alumine libre ; [Evans \(1910\)](#) écrit en particulier « bien que la composition chimique des latérites varient dans de larges limites, un fait demeure constant : les faibles quantités de silice combinée en regard de l'aluminium présent ».

Désormais les définitions basées sur la composition chimique se succèdent et certains auteurs soulignent plutôt l'importance des oxydes de fer dans les constituants des latérites et donnent même des précisions sur la quantité qu'elles doivent contenir. Pour Neustruev, cité par [Lacroix \(1914\)](#), une latérite doit contenir plus de 86% de Fe_2O_3 . [Fermor \(1911\)](#) porte cette valeur à 90% et soulignent que les autres constituants sont les oxydes d'aluminium, de titane et de manganèse avec une présence obligatoire de l'oxyde de fer.

Dans toutes les analyses chimiques effectuées sur les latérites, quelle que soit leur origine géographique, les éléments chimiques retrouvés sont dans l'ordre de prédominance :

- SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , H_2O (éléments dominants) ;
- Mn_3O_4 , CaO , Na_2O , P_2O_5 (éléments secondaires) ;
- Cr , Zr , $Ti(TiO_2)$, V (éléments accessoires).

Parmi ces éléments, trois jouent un rôle important dans le processus d'induration des latérites. Il s'agit :

- du fer qui se trouve sous forme d'hématite de formule chimique Fe_2O_3 qui confère aux latérites la couleur rouge mais aussi sous forme de goethite ($\alpha Fe_2O(OH)$);
- de l'aluminium, sous forme d'alumine dont la formule chimique est Al_2O_3 . Elle se présente sous plusieurs formes de gibbsite ($\delta Al(OH)_3$) et de boehmite ($\delta AlO(OH)$);
- de la silice de formule chimique SiO_2 qui est souvent sous forme combinée dans les latérites : kaolinites ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) ou les halloysites.

Ces trois éléments chimiques se retrouvent dans les latérites dans des proportions variables avec des prédominances soit du fer, soit de l'alumine. Les autres composés chimiques se retrouvent généralement en faibles proportions.

1.6.0.2 Composition minéralogique

Les analyses chimiques ont parfois un caractère brutal. Elles ne peuvent pas révéler toute la composition chimique, la nature et l'origine des latérites. En effet, des latérites présentant les mêmes propriétés physiques peuvent fortement différer quant à leur composition chimique, et, inversement, des latérites présentant une composition chimique comparable, peuvent posséder des propriétés physiques très différentes (Maignien, 1966a).

Avec le développement des nouvelles techniques d'analyses pétrologiques, des tentatives de détermination de la composition chimique par des études minéralogiques ont vu le jour. Les techniques utilisées sont les lames minces sur microscope polarisant, les méthodes d'analyses thermiques différentielles de thermobalance, la diffraction des rayons X (DRX).

Il a été admis par bon nombre de chercheurs qui ont fait ces essais que : du point de vue minéralogique, les latérites sont constituées d'un mélange intime de goethite, d'hématite, de kaolinite, de quartz et des minéraux résiduels (ilménites, rutil, anatase, zircons, chromites, gibbsite néoformée) (Blot, 2004). C'est donc une forme d'argile en association intime avec les oxydes et hydroxydes dont :

- les éléments principaux sont les oxydes et hydroxydes d'aluminium, de fer, parfois de manganèse et de titane, les silices et les argiles;
- Les éléments secondaires sont des éléments texturaux des sols en place, produits résiduels ou clastiques.

Les données recueillies ont donc permis de classer les produits constitutifs des latérites en éléments principaux qui ont un rôle essentiel dans la formation des horizons indurés et en éléments secondaires indifférents au processus lui-même.

1.6.0.3 Les compositions des latérites du Burkina

Quelques essais chimiques et minéralogiques ont été effectués sur les latérites du Burkina. Une étude sur la caractérisation des chapeaux de fer en milieu latéritique (Blot, 2004) réalisée sur les latérites de Gaoua (Sud-Ouest) et de Palga (Ouest du Burkina) a montré que les cuirasses

latéritiques contiennent plus de 95% de Al_2O_3 , de Fe_2O_3 et de H_2O . Les autres éléments sont le Mn_3O_4 , le CaO , le Na_2O et le P_2O_5 , le chrome, le zain, le titane et le vanadium. Cette étude précise que les goethites (minéral le plus dominant) de ces latérites sont riches en aluminium. Le même auteur a remarqué que dans le nord du Burkina, des essais effectués sur des échantillons prélevés dans la région Tin Akof, les latérites montrent principalement un faciès bréchiue avec une matrice goethite contenant des éléments siliceux (quartz, jaspe, chert, agate) et de reste des roches complètement argilisées. La goethite est l'élément minéral essentiel (60-90%). L'hématite est rare et la kaolinite est dans des poches résiduelles d'altération à coté du quartz ou du jaspe. Les analyses chimiques sur ces échantillons ont montré que les éléments essentiels sont le SiO_2 , le Fe_2O_3 et le H_2O . Les teneurs en aluminium et en titane sont très faibles dans la composition chimique.

D'autres études réalisées dans le Centre-sud du Burkina (Sapouy) sur les latérites meubles ont donné des résultats similaires (Millogo *et al.*, 2008). Les analyses chimiques ont donné une proportion élevée de SiO_2 (56,19%) suivi de Fe_2O_3 (16,09%) et de Al_2O_3 (10,10%) et une faible quantité de CaO (3,24%). Les analyses minéralogies par DRX ont trouvé une proportion élevée de kaolinite, de rankinite, et du quartz. L'hématite et la goethite sont en faible teneur. La composition chimique de la kaolinite est $(2SiO_2, Al_2O_3, 2H_2O)$, celle du quartz (SiO_2), de l'hématite (Fe_2O_3), de la goethite (Fe_2O_3, H_2O) et de la rankinite ($(2SiO_2, 3CaO)$).

1.6.0.4 Classification à base chimique, minéralogique et granulométrie

Plusieurs essais ont été tentés pour expliquer non seulement la nature et l'origine, mais surtout pour classer les latérites en fonction de leur composition chimique (Lacroix, 1914; Fermor, 1911). C'est ainsi que plusieurs auteurs ont tenté d'étudier la variation de la composition chimique des latérites en fonction des variations de texture, de couleur et de niveau d'altération.

La plupart des classifications proposées dans la littérature concerne la latérite meuble utilisée en construction routière ou en remblai. Elles se basent sur la granulométrie et la phase argileuse du matériau. La seule classification qui a été admise pendant longtemps est celle basée sur la composition chimique qui tente de séparer la latérite rocheuse de la latérite meuble (Lacroix, 1914; Harrassowitz, 1926; Martin et Dyne, 1927; Dreyfus, 1952). Cette classification utilise deux rapports $\frac{S}{R}$ et Ki pour répartir les latérites en trois classes avec :

$$(S_1) \left\{ \begin{array}{l} \frac{S}{R} = \frac{\frac{SiO_2}{60}}{\frac{Al_2O_3}{102} + \frac{Fe_2O_3}{160}} \\ Ki = \frac{\frac{SiO_2}{60}}{\frac{Al_2O_3}{102}} \end{array} \right.$$

En fonction du rapport $\frac{S}{R}$, on classe les latérites en trois familles :

- les latérites vraies pour $\frac{S}{R} < 1.33$;
- les roches latérites pour $1.33 < \frac{S}{R} < 2$;
- les matières premières non latéritiques pour $\frac{S}{R} > 2$.

Cette classification ne fait pas l'unanimité parmi les chercheurs. En effet, même si le rapport $\frac{S}{R}$ sépare les latérites des argiles telles que les kaolinites, il classe cependant parmi les latérites les minerais de fer, la bauxite et des nombreux grès ferrugineux (Lorentin et L'Hériteau, 1962; Lyon Associates, 1971; Autret, 1952). Fox (1936) a montré aussi l'insuffisance de telles classifications. Elles n'ont une utilité que pour les formations de valeurs minières. Elles ne permettent pas de séparer les formations indurées des formations plus meubles.

De plus, une étude faite sur une cinquantaine d'échantillons a montré les insuffisances de cette classification car le rapport $\frac{S}{R}$ varie en fonction de la classe granulaire de la latérite. Le tableau 1.2 suivant montre la variation de ce rapport pour les échantillons de latérites étudiés par Autret (1952)

Tableau 1.1 – Valeur $\frac{S}{R}$ en fonction de la tranche granulométrique des latérites

Classe granulaire	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	$\frac{S}{R}$
0/20 mm	55.4	15.35	23.90	3
0/2 mm	78.10	12.50	3.10	9
2/20 mm	32.70	18.20	44.70	1.2

Le rapport Ki est utilisé avec le rapport $\frac{S}{R}$ pour qualifier les latérites selon une conception d'Harrassowitz (Harrassowitz, 1926). Il n'a d'intérêt du point de vue géochimique et minéralogique que s'il est évalué à partir des valeurs de silice et d'alumine correspondant aux seuls minéraux secondaires (argile et hydroxyde). Pedro, cité par Autret (1952), a proposé deux modes opératoires selon que la matière première étudiée provienne d'une roche entièrement transformée ne contenant pas d'espèces secondaires cristallisées (argiles et hydroxydes) ou selon qu'elle contient des constituants amorphes (gels aluminosiliciques). Il indique en outre que l'évaluation du rapport Ki n'a jamais de signification sur le plan minéralogique lorsque la transformation de la roche-mère n'est pas complète.

Les nombreuses controverses soulevées ont amené bon nombre de chercheurs à abandonner la classification basée sur ces deux rapports au profit d'une classification reposant sur le processus pédogénétique. Par exemple le BRRI Ghana propose l'utilisation des termes plus descriptifs de sols ferrugineux, sols ferrallitiques et ferisols à la place du terme latéritique (Lyon Associates,

1971). De telle recommandation n'apporte rien à l'ingénieur qui voudrait utiliser ce matériau sous sa forme rocheuse ou sa forme meuble.

Par contre les travaux de Fall (1993); Fall *et al.* (1994) sur l'identification, la classification et la caractérisation mécanique de graveleux latéritiques du Sénégal pour une application dans le domaine routier est un exemple d'adaptation des techniques de dimensionnement routier proposées dans la littérature telle que la détermination de l'épaisseur des couches de chaussées sur la base du calcul élaboré par Peltier pour les pays européens.

1.7 Utilité des latérites

1.7.1 Latérite comme ressource minérale

Il est signalé dans la littérature la présence dans les latérites de certains métaux tels que l'or, le nickel, le cobalt, le platine et le cuivre. Certains de ces métaux sont exploités et d'autres ne le sont pas pour des raisons économiques ou de faible teneur. D'une manière générale, il est démontré que les minéraux résistants à l'altération latéritique, ou s'altérant plus lentement (corindon, disthène, columbotantalite, diamant, cassiterite, chromite, or, ...) que les minéraux principaux des roches-mères peuvent s'accumuler dans les horizons où la fonte géochimique est accentuée (Grandin, 1990).

Routhier (1963) a montré par exemple la présence de l'or dans la latérite d'Ity (Côte d'Ivoire) à partir d'un simple traitement de cyanuration. Cet or était passé à l'état colloïdal grâce à l'action de processus de latéritisation.

Au Burkina, les mines d'or se situent dans des zones latéritiques (la mine d'or de Kalsaka, les exploitations artisanales de la région de Yako ...)

Le gisement du nickel d'Ambatovy (Madagascar oriental) est issu de l'altération des roches ultrabasiques (dunite) qui a donné naissance à des horizons cuirassés qui reposent sur des latérites et des saprolites. La teneur en nickel de ces formations sous-jacentes est supérieure à 1% (Mandimiharison *et al.*, 2012). La Nouvelle-Calédonie, avec ses minerais saprolitiques (1/5) et latéritiques (4/5), possède 20 à 25% des ressources mondiales en nickel. E. Glasser a attribué l'origine des minerais de nickel de Nouvelle-Calédonie à des phénomènes d'altération superficielle (Glasser, 1903).

Également en Nouvelle-Calédonie, on a découvert du cobalt associé au nickel dans les latérites des massifs miniers. Il y est notamment concentré dans des dépôts d'Asbolane qui forment des trainées noirâtres dans les latérites ou, à la base de celles-ci, des encroûtements noir-bleutés. Ces concentrations furent exploitées depuis les années 1890 jusqu'au début du siècle suivant de façon artisanale par les "cobaleurs" qui ouvraient d'étroites galeries pour les extraire. Jusqu'à 1909, le territoire fut le quasi unique producteur mondial de ce métal (Croix du Sud, Mise en ligne en 2012, consulter le 04 avril 2013).

Aujourd'hui, avec le besoin croissant en Terres Rares (REE) dans les technologies de pointe telles que la métallurgie, la défense et les énergies alternatives, les recherches sur les terres rares se multiplient pour diversifier les sources d'approvisionnement très limitées. Les formations latéritiques sont considérées comme des gisements possibles et les prospections se multiplient ces dernières années dans ces formations. Au Cameroun, la géochimie et la minéralogie du thorium, de l'uranium et des terres rares ont été étudiées dans un profil latéritique dans un projet de thèse (Braun, 1991). Il ressort de cette étude que les terres rares peuvent être accumulées de façon absolue dans les veines blanches très poreuses de la base des saprolites. Après la Chine, Madagascar (zone latéritique) est cité parmi les pays qui posséderaient ces nouvelles ressources.

1.7.2 Latérite comme matériau de construction

1.7.2.1 Utilisation à travers le monde

Les latérites sont utilisées depuis des millénaires dans le génie civil ; c'est ainsi qu'on retrouve encore des infrastructures en blocs de latérite au Cambodge datant du VIII^e siècle (par exemple le pont Angkorien en blocs de latérite à Kampung Kdei, large de 16 m et toujours en service, le mur en ruine de Loropeni au Burkina Faso en bloc et cuirasse de latérite.)

De nos jours, les latérites sont toujours utilisées soit dans la construction routière, soit dans la construction des maisons.

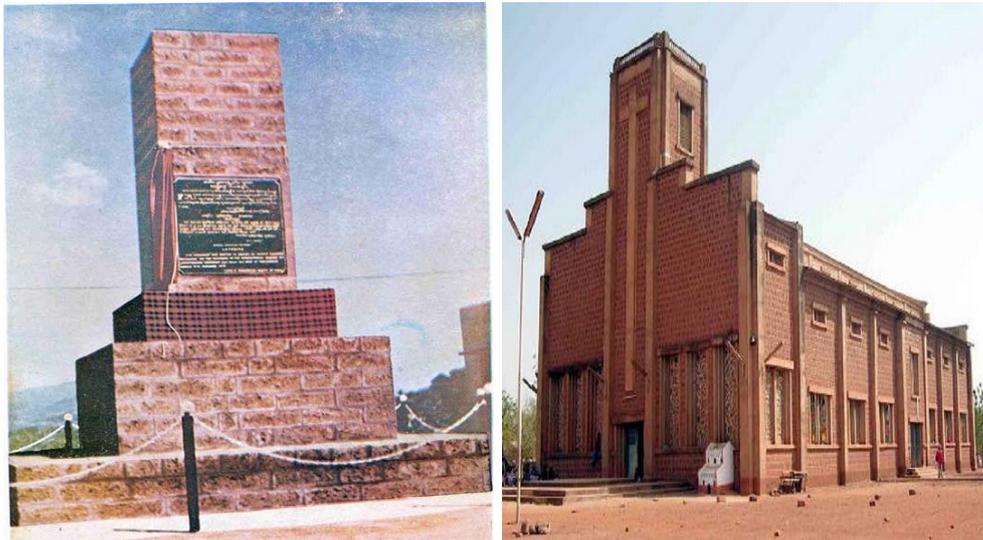
La latérite meuble est la plus exploitée et sert à produire des blocs de terre (cuites, comprimées), des tuiles pour la construction des habitations mais aussi dans les travaux publics où elle joue un grand rôle dans les remblais des barrages d'eau, les couches de fondation et de base dans le cas des routes revêtues ou tout simplement de couche de roulement dans le cas des routes en terre mais aussi dans les petits barrages en terre, digues dans certaines régions du Burkina Faso et un peu partout en Afrique de l'ouest où le matériau est disponible.

La latérite indurée n'est pas aussi utilisée que la latérite meuble. Son utilisation dans le bâtiment est fréquente dans les pays comme le Burkina Faso et surtout l'Inde. On la retrouve comme maçonnerie de remplissage (Figure 1.6) ou murs porteurs des bâtiments mais quelquefois en mur de soutènement et éléments de maçonnerie des ponts.

1.7.2.2 Evolution des constructions en BLT au Burkina Faso

L'utilisation des blocs des latérites taillées (BLT) au Burkina Faso remonte à l'époque de la colonisation et a connu une évolution par phases (Wyss, 2005) :

- Le début marquait la construction d'édifices administratifs, militaires et de culte, notamment à Bobo Dioulasso sous le régime colonial. A cette époque, le travail se faisait essentiellement par régime de travaux forcés et la matière première était extraite dans des carrières pour ce qui est du grès et en partie de la latérite, mais aussi à partir de pierres



(a) Monument national en latérite, Angadipuram, Inde, (Kasthurba, 2006). (b) Cathédrale de Koudougou, parement en BLT, 1939, (Wyss et Sauret, 2007).

FIGURE 1.6 – Construction en latérite en Inde et au Burkina

latéritiques, les « cailloux sauvages », extrêmement durs à tailler ;

- La deuxième phase, après la décolonisation, a été essentiellement caractérisée par un rapport direct entre le client et le producteur. En fait, l'église catholique, pratiquement l'unique client pendant cette phase, engageait elle-même des jeunes pour l'extraction de la pierre, la taille et la mise en œuvre. Ces hommes ne travaillaient pas selon les lois du marché, mais en tant qu'employés directs de l'utilisateur ;
- La troisième phase est celle d'ouvertures de carrières « libres » un peu partout dans le pays où le matériau est connu de la population. Cette phase a initié l'extraction de ce matériau dans certaines régions, par exemple à Toussiana, dans les années 1980 suivies successivement par d'autres régions.

1.7.2.3 Les contraintes liées à l'utilisation du BLT au Burkina Faso

Les contraintes liées à l'utilisation du BLT sont d'ordre socio-culturel :

- D'abord le sol latéritique est perçu comme "l'habitat éternel" dans la culture burkinabè. C'est dans ce sol que tout le monde repose après la mort. De ce fait, vivre dans une maison en latérite est perçu comme une anticipation à la mort, un mauvais sort, ou une pauvreté extrême ;
- Aussi, la construction des premiers monuments en BLT pendant la période coloniale s'est faite par des travaux forcés, souvent au prix de la vie des ouvriers sur les chantiers. Les maisons en BLT rappellent encore à certains les mauvais souvenirs de cette période difficile, contribuant ainsi à un rejet du matériau ;

- Une deuxième tentative de la valorisation de la latérite a également été initiée pendant la révolution de 1983 souvent avec des méthodes semblables à celle de la période coloniale. La participation à la réalisation de certains chantiers publics a été souvent forcée. Cela a confirmé certaines croyances qui considèrent la latérite comme "matériaux de malheur" ;
- Pour la génération récente, une construction en BLT est synonyme de la pauvreté. Seule une construction en parpaing de ciment ou en béton est considérée comme un signe de richesse. Cette contrainte sociale a beaucoup contribué à la fin de certains projets nationaux initié à partir des années 80 avec le LOCOMAT.

1.7.2.4 La latérite et les règles de l'art de son utilisation

Plusieurs règles régissent l'utilisation de la latérite meuble suite aux études faites sur ce matériau. C'est pourquoi, on retrouve une bibliographie enrichissante et des normes (exemple ARS670 à ARS683 rédigé par l'ARSO), en ce qui concerne son utilisation aussi bien dans le bâtiment que dans le domaine des travaux publics.

La latérite indurée, par contre, n'a pas bénéficié de la même attention que la précédente; on retrouve tout de même des études surtout dans les régions où son utilisation est fréquente (Inde et Burkina Faso). Toutefois, si en Inde, un certain nombre d'études a été fait aboutissant à l'élaboration d'une norme quant à l'utilisation des blocs de latérites, ce n'est pas le cas du Burkina Faso et des autres pays africains. Au vu de l'hétérogénéité des latérites selon la position géographique, de l'industrialisation de son exploitation qui gagne peu à peu le terrain et des conditions socio-économiques, il s'avère nécessaire de procéder à une série d'études qui permettront à terme la normalisation de l'utilisation de ce matériau.

Au Burkina Faso, comme le signale [Dauphin \(2007\)](#), il est primordial que l'élaboration de la norme découle d'une discussion entre les acteurs, tenant compte d'un certain nombre de critères raisonnables pouvant être révisés le cas échéant. Cet auteur a identifié quelques critères, en se basant sur la norme indienne et les résultats d'enquête auprès des acteurs. Il s'agit de la résistance à la compression simple, de l'absorption de l'eau, la masse volumique des grains solides et du module d'élasticité. Il serait intéressant d'ajouter à cette liste la dureté du bloc de latérite, les résistances après cycle de chargement-déchargement et humidification-séchage, le coefficient de Poisson et le gonflement en présence d'eau. Toutefois, les exigences doivent être simples et progresser en fonction de l'évolution du contexte.

Après discussions et enquêtes, on a pu recenser un certain nombre de critères autour desquels pourraient s'accorder les acteurs au Burkina Faso : les dimensions, la dureté, la masse volumique et la résistance à la compression et à l'eau. Les deux derniers critères pourraient être fastidieux à déterminer par les carriers. C'est pourquoi seuls les deux premiers, à savoir les dimensions et la dureté, peuvent d'abord être pris en compte et les autres seront introduits progressivement.

Tableau 1.2 – Les critères pouvant faire l’objet d’une première normalisation

Critères	Acteurs			Observations
	Carrière informelles	Carrières formelles	Expert	
Dimensions usuelles LxlxH(cm)	30 x 15 x 15	40 x 20 x 15 40 x 20 x 20	40 x 20 x 15	La plupart des producteurs informels font des briques aux dimensions des clients
Dureté	Aucune mention	Aucune mention	Aucune mention	Appréciation non conventionnelle (par le son en cognant, par l’aspect)
Masse volumique	Aucune mention	Disponible dans les carrières exploitées	Aucune mention	Aucune valeur n’est proposée mais les études ont déjà pu en donner quelques valeurs
Résistance à la compression	Aucune mention	Disponible dans les carrières exploitées	Aucune mention	Aucune valeur n’est proposée mais les études ont déjà pu en donner quelques valeurs
Résistance à l’eau	Aucune mention	Aucune mention	Aucune mention	La plupart des acteurs disent que le matériau est résistant à la pluie

Les exploitants des carrières traditionnelles pourront bénéficier d’une expertise publique ou parapublique en vue de la détermination des autres paramètres. Le tableau 1.2 présente la situation actuelle concernant ces critères.

Pour pouvoir proposer des valeurs à ces caractéristiques physiques, mécaniques et hydriques des BLT, une série de tests doit pouvoir être effectuée dans des laboratoires spécialisés, permettant de juger la qualité du matériau quant à son utilisation possible.

1.8 Conclusion

La bibliographie actuelle sur les latérites se résume surtout à des tentatives de définitions des matériaux selon des considérations géologiques, chimiques, minéralogiques, structurales ou texturales. Les définitions proposées restent ambiguës et des divergences persistent encore entre les auteurs. Aujourd’hui, la définition qui fait l’unanimité est celle proposé par Schellmann : « Les latérites sont des produits d’intense altération météorique et sont constituées d’un assemblage minéral qui peut être fait de goethite, d’hématite, d’hydroxyde d’aluminium, de kaolinite et de quartz. Le rapport $SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ comparé à celui de la roche-mère doit être tel que la formation latéritique ne contienne pas plus de silice que celle qui est retenue dans le quartz qui subsiste et celle qui est nécessaire à la formation de la kaolinite» (Schellmann, 2003). Elle est tendre à l’état frais et devient dure une fois exposée à l’air (Bourman et Ollier, 2002).

Bien que Bouchanan ait décrit premièrement la latérite comme un matériau de construction, elle a plutôt suscité dans un premier temps des intérêts miniers. Des nombreuses prospections dans ce sens ont été conduites.

Enfin, sa prédisposition à être utilisée comme matériau de construction n'a été reconsidérée que tardivement. D'abord, les latérites meubles qui ont bénéficié d'une attention particulière du fait de performances observées du matériau lorsqu'il est utilisé dans les différentes couches des chaussées. La latérite indurée, objet de cette étude, n'est pas aussi bien étudiée. Bien que sa prédisposition à être utilisée comme matériau de construction dans l'habitat soit bien connue de tous, les données sur ses caractéristiques physiques, mécaniques, thermiques et hydriques manquent cruellement, surtout en Afrique où le matériau est abondant. Cependant, en Inde, certaines caractéristiques du matériau sont plus ou moins bien étudiées, aboutissant souvent à des normes. La thèse de Kasthurba et ses publications sont des exemples de tentative pour la valorisation de ce matériau dans le domaine de l'habitat ([Kasthurba, 2006](#); [Kasthurba *et al.*, 2008](#))

Sites et matériaux étudiés

Sommaire

2.1	Introduction	29
2.2	Aperçu sur la géologie du Burkina Faso	30
2.2.1	Histoire des formations géologiques du Burkina Faso	30
2.2.2	Des nouvelles connaissances de la géologie du Burkina Faso	34
2.2.3	Les formations cuirassées du Burkina Faso	37
2.3	Présentation des sites d'étude	38
2.3.1	Situation géographique	38
2.3.2	Géologie des sites d'étude	39
2.4	Profils géologiques des carrières	45
2.4.1	Méthodologie	45
2.4.2	Carrières de Ouagadougou et de Koubri	45
2.4.3	Carrière de Dano	47
2.5	Chimie et minéralogie des échantillons	49
2.5.1	Les différentes techniques d'analyses chimiques et minéralogiques	49
2.5.2	Prélèvement et préparation des échantillons	51
2.5.3	Matériels et méthodes d'analyse	52
2.5.4	Résultats et discussions	53
2.6	Conclusion	62

2.1 Introduction

Le Burkina Faso est un pays d'Afrique occidentale, situé entre 3° de longitude Est et 6° de longitude Ouest, et les parallèles 9° et 15° de latitude Nord. Son climat tropical est de type soudano-sahélien avec deux saisons très contrastées : la saison des pluies d'environ quatre mois avec des précipitations comprises entre 300 mm et 1200 mm et la saison sèche durant laquelle souffle l'harmattan, un vent chaud, sec et chargé de poussière.

Les échantillons de blocs de latérite taillée utilisés dans cette étude proviennent de trois localités distinctes du Burkina Faso : Dano, Koubri et Ouagadougou. Ils ont été prélevés dans

des carrières artisanales exploitées avec des équipements rudimentaires par les populations locales (Koubri, Dano, Ouagadougou) et dans une carrière industrielle (Dano) exploitée par une entreprise mécanisée Pierres Naturelles(PN).¹

Les blocs de latérite exploités dans ces localités sont destinés à la consommation locale ou à l'exportation vers les grands centres urbains du pays. Ils servent essentiellement à la construction des habitations (mur de clôture et maison d'habitation), de lieux de culte, d'écoles, de centres de santé, . . .

Ce chapitre présente dans une première partie un aperçu bibliographique de la géologie globale du Burkina Faso. La deuxième partie décrit les trois sites d'étude (situation géographique, climat et géologie). La troisième partie présente les résultats d'étude de terrain qui ont permis de décrire la morphologie et les profils géologiques des carrières de BLT qui ont servi aux prélèvements d'échantillons de cette étude. La quatrième partie est consacrée à l'étude géochimique des échantillons prélevés.

2.2 Aperçu sur la géologie du Burkina Faso

En se référant à la carte géologique de l'Afrique de l'Ouest réalisée par [Rocci \(1965\)](#), (Figure 2.1), le Burkina se situe précisément entre le Craton Ouest-africain représenté par les roches affleurant près de la Dorsale de Reguibat, au nord, le domaine de Kenema-Man et de la Dorsale de Léo, séparé de la faille de Sassandre, au sud. Entre ces deux domaines, il y a un vaste bassin sédimentaire : le Bassin de Taoudeni avec des sédiments du Protérozoïque (~ 1000 Ma) jusqu'au Carbonifère (~ 300 Ma). La plus grande partie du pays appartient à la Dorsale de Léo, laquelle est caractérisée par la présence de roches très anciennes de l'Archéen (~ 3700 , ~ 2500 Ma), liées à une activité magmatique acide (pour la plupart granitique et tonalitique). Au-dessus, en discordance, il y a les sédiments du Bassin de Taoudeni qui recouvrent le nord et l'ouest du Pays.

2.2.1 Histoire des formations géologiques du Burkina Faso

En 1975, les données géologiques du Burkina ont été synthétisées par [Hottin et Ouedraogo \(1975\)](#) sur une carte au $1.000.000^{me}$ (Figure 2.2). Il ressort de l'analyse de cette carte que les principaux traits de l'histoire géologique du Burkina sont le Précambrien D ou Antébirrimien, le Précambrien C ou Birrimien et le Précambrien A ou Postbirrimien que nous décrivons ci-dessous.

2.2.1.1 Le Précambrien D (ou Antébirrimien - Age $< - 2.500$ MA)

Il représente plus de la moitié du territoire et comporte essentiellement des granito-gneiss indifférenciés (granites, migmatites et gneiss) comme le « noyau mossi » autour de Ouagadougou

1. Pierres Naturelles est une entreprise, Sarl qui a servi de partenaire au début de nos travaux. Elle a fermé ses portes avant la fin de nos travaux.

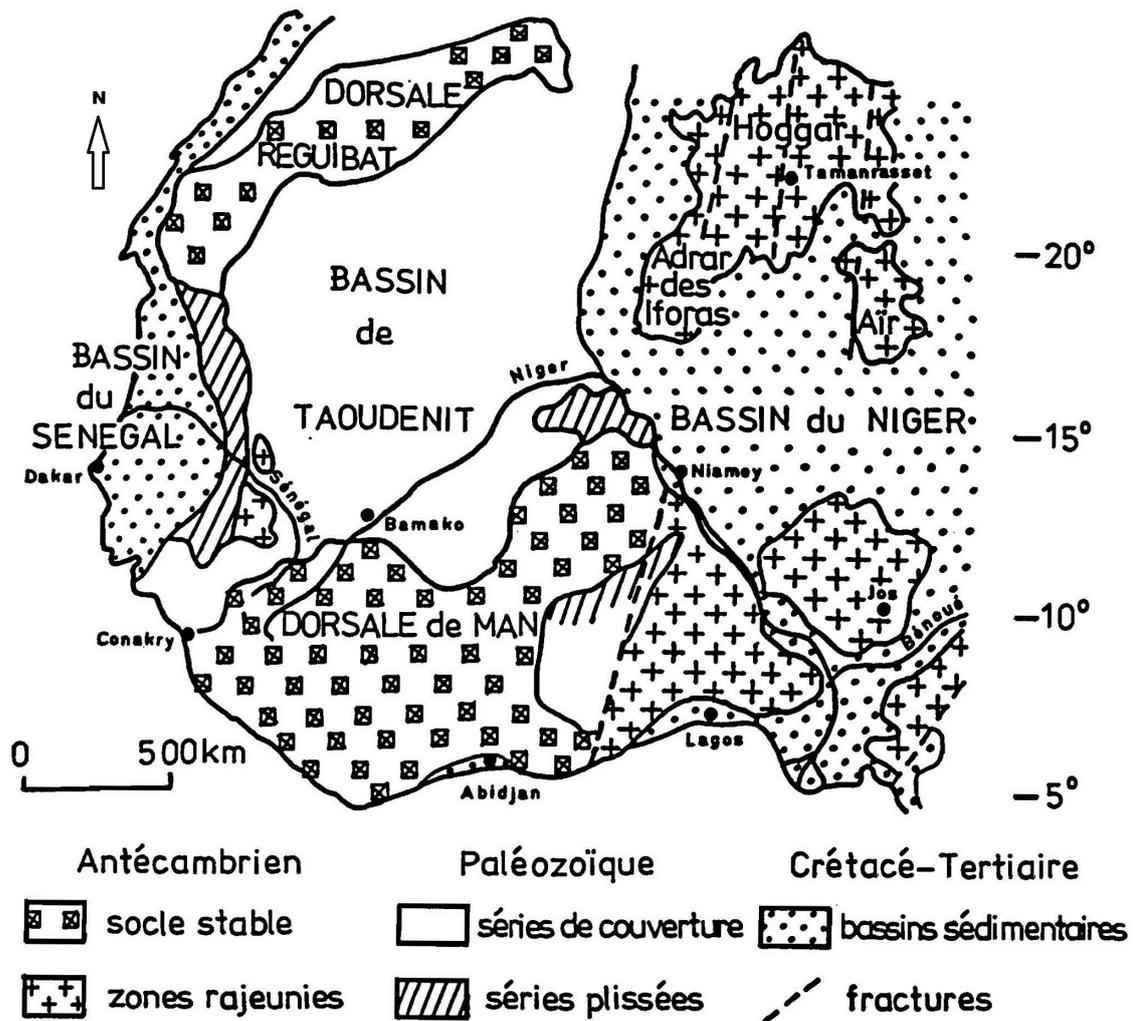


FIGURE 2.1 – Grands traits géologiques de l'Afrique occidentale, (Rocci, 1965)

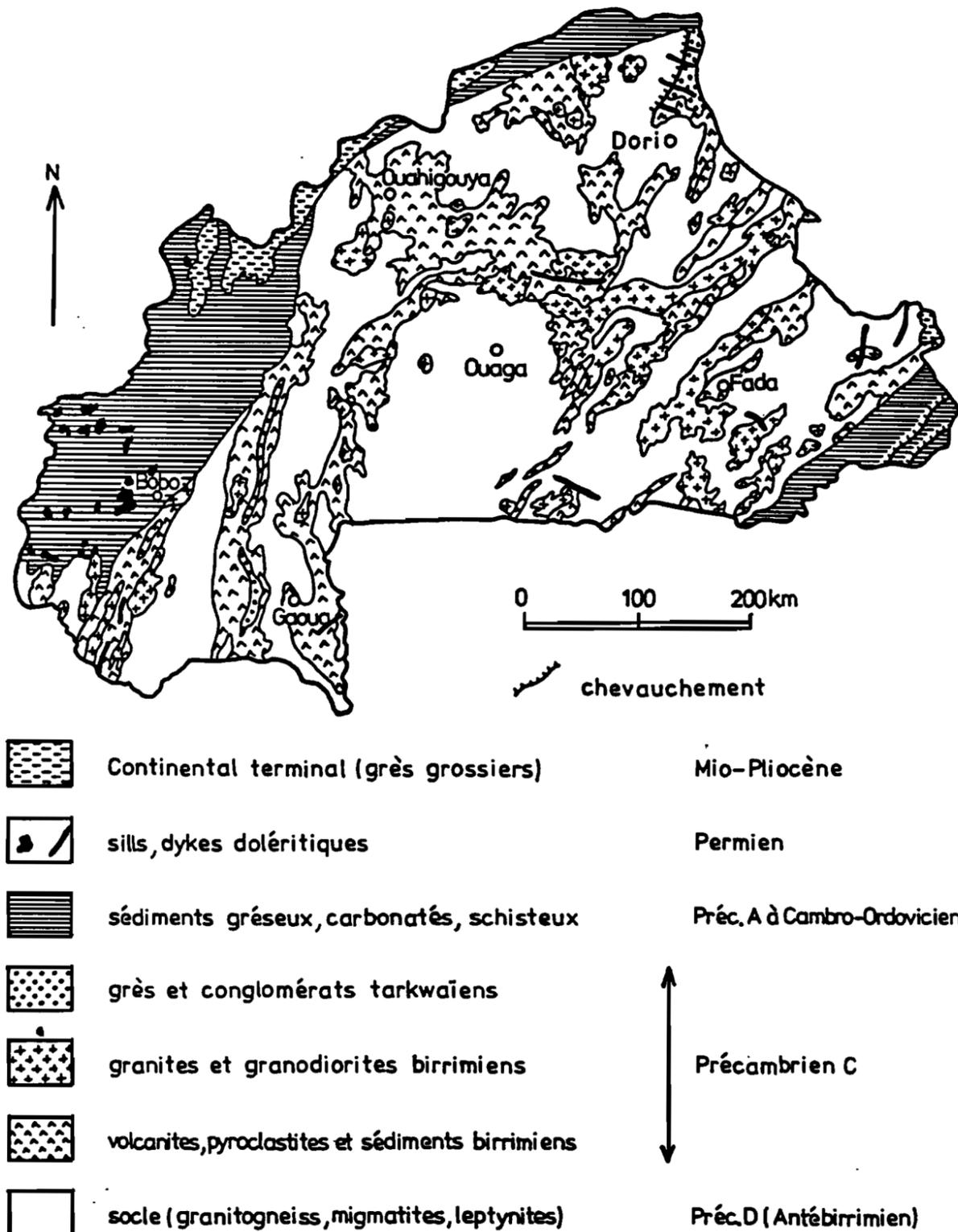


FIGURE 2.2 – Carte géologique du Burkina Faso (Hottin et Ouedraogo, 1975)

(Boeglin et Mazaltarim, 1989). L'étude de ces formations a été menée au Nord-Est de la Côte d'Ivoire par Ducellier et Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières de Paris (1963) et au Burkina central et septentrional, par Arnould (1961), puis complétée par Bonnard (1965). Pour ces auteurs, il est difficile de distinguer les formations du Précambrien D de celles du Précambrien C. Seuls les gneiss à grenats de Banga, les migmatites de la Comoé et le Craton de Bouroum-Bouroum peuvent être d'âge antébirrimien tandis que la plupart des formations granitiques sont d'âge birrimien.

Cependant, des études pétrographiques et tectoniques plus récentes réalisées à partir des observations locales (Marcelin et Serre, 1971b; Delfour et Jeambrun, 1970) ont permis de différencier l'Antébirrimien du Birrimien. Selon leur répartition régionale, ces roches se diversifient à partir d'un certain pourcentage de minéraux (biotite, amphibole, pyroxène, ...).

2.2.1.2 Précambrien C (ou birrimien - Age : -2.400 MA à -1.300 MA)

Il représente les parties non érodées du remplissage des sillons ultracratoniques. Ce remplissage est d'origine volcanique, pyroclastique et sédimentaire. Ces roches, pendant leur mise en place, ont subi plusieurs transformations rendant ainsi très complexes leurs compositions physico-chimiques d'où l'appellation volcano-sédimentaire. Cette série englobe un grand nombre de formations rocheuses parmi lesquelles, on distingue des roches volcaniques (basaltes, andésites, rhyolites, tufs, etc.) et des roches intrusives (diorites, gabbros, granodiorites, granites, etc.) (Ouedraogo et Prost, 1986; Marcelin et Serre, 1971a; Van Eyk, 1964).

Ce système birrimien qui est le plus important du point de vue de la diversité de ses roches, affleure dans la région du Sud-Ouest de Banfora à Batié. On remarque deux bandes parallèles, larges d'environ 20 à 50 km et d'une direction générale Nord Sud. La première bande s'étend de la frontière ivoirienne (Kampti) jusqu'à Dédougou et la seconde longe la frontière du Ghana entre Batié, Diébougou et Boromo.

Les sillons birrimiens prennent l'allure d'une courbe au Nord de Ouagadougou et couvrent les localités de Kaya, Kongoussi, Séguénéga et Ouahigouya. Ils réapparaissent au Nord Est de Djibo, Gorom-Gorom jusqu'au Nord Est de Dori, Bogandé et enfin au Nord Est de Fada N'Gourma.

2.2.1.3 Précambrien A à cambro-ordovicien (Age : -1.300 MA à - 440 MA)

C'est un ensemble essentiellement fait de roches sédimentaires. Il regroupe une grande série composée de grès, calcaires, dolomie, conglomérats, schistes argileux, grès quartzitiques, ... Ces roches représentent une grande partie des matériaux utilisés dans les constructions du Burkina. On distingue :

Les grès calcaires : Ils occupent une grande partie de l'Ouest du Burkina et affleurent depuis le Nord de Banfora passant par Orodara, Bobo-Dioulasso, Dédougou, Nouna pour se terminer en pointe au Nord de Tougan. Ces dépôts subtabulaires gréseux correspondent à une sédimentation littorale ou fluviatile, avec quelques intercalations marines carbonatées (Seret, 1978; Marcelin et Serre, 1971a; Jonquet, 1963).

Les sables éoliens, les argiles et les alluvions : Tout le long de la frontière malienne, au Nord de Nouna jusqu'au Nord de Djibo, les terrains considérés comme anciens sont totalement couverts de sables éoliens, d'argiles et d'alluvions constituant des sédiments jeunes. C'est la plaine du Gondo.

A l'extrême Nord du pays, dans le bassin du Béli, on remarque la répartition des calcaires dolomitiques, des grès quartzitiques, des schistes argileux et des conglomérats. Cette série est appelée système Nigérien ;

Les sédiments gréseux, grès arkosiques à ciment calcaire : Au Sud Est du Burkina entre Pama et Diapaga, le long de la frontière du Bénin se dresse une grande falaise (falaise du Gobinangou). Elle est composée de sédiments gréseux, grès arkosiques à ciment calcaire (Vyain, 1967).

Parallèlement, au Sud Est de cette falaise du Gobinangou viennent en juxtaposition deux autres types de formations rocheuses : le Buem (sédiments détritiques grossiers aux faciès plissés) et l'Atacorien (schistes et quartzites métamorphisés à faciès plissé) (Leprun et Trompette, 1969).

Les latérites : Le recouvrement latéritique est un caractère dominant des paysages de pénéplaines ou tabulaires qui caractérisent la plus grande partie du Burkina. Ces latérites, on en observe partout. Elles se présentent sous forme de plateaux étendus, buttes témoins, cuirasses indurées, etc. L'épaisseur de ces latérites varie selon la nature des formations sur lesquelles elles reposent. Les latérites sont particulièrement impressionnantes dans les régions où affleurent les formations birrimiennes, notamment entre Kaya et Ouahigouya, près de Gaoua et Houndé, entre Djibo et Dori. Ces formations feront l'objet d'une étude bibliographique plus détaillée dans la suite (cf. §2.3).

2.2.2 Des nouvelles connaissances de la géologie du Burkina Faso

Une étude récente sur la cartographie géologique du Burkina Faso réalisée par le projet SYSMIN pour le compte du BRGM (Castaing et Chevremont, 2003), à la différence des auteurs cités ci-dessous, ne distingue plus le Précambrien D au Burkina Faso. Elle signale seulement la présence de deux unités de formations géologiques :

- La première unité géologique est essentiellement constituée des ceintures de roches vertes (mégastructures dépassant les frontières) mises en place au cours de l'orogénèse éburnéenne

(2250-200 Ma) sous forme de projections volcaniques, et recoupées par des roches ultrabasiqes intrusives sous forme de batholites ;

- La deuxième unité est la couverture sédimentaire qui s'est déposée entre le néo protérozoïque et le paléozoïque. Cette unité recouvre 20% de l'ensemble du territoire.

Cette étude précise également que 80% de l'ensemble du territoire burkinabè sont constitués par des formations du socle paléo protérozoïque. La figure 2.3 ci-dessous représente la carte géologique du Burkina Faso proposée par cette étude.

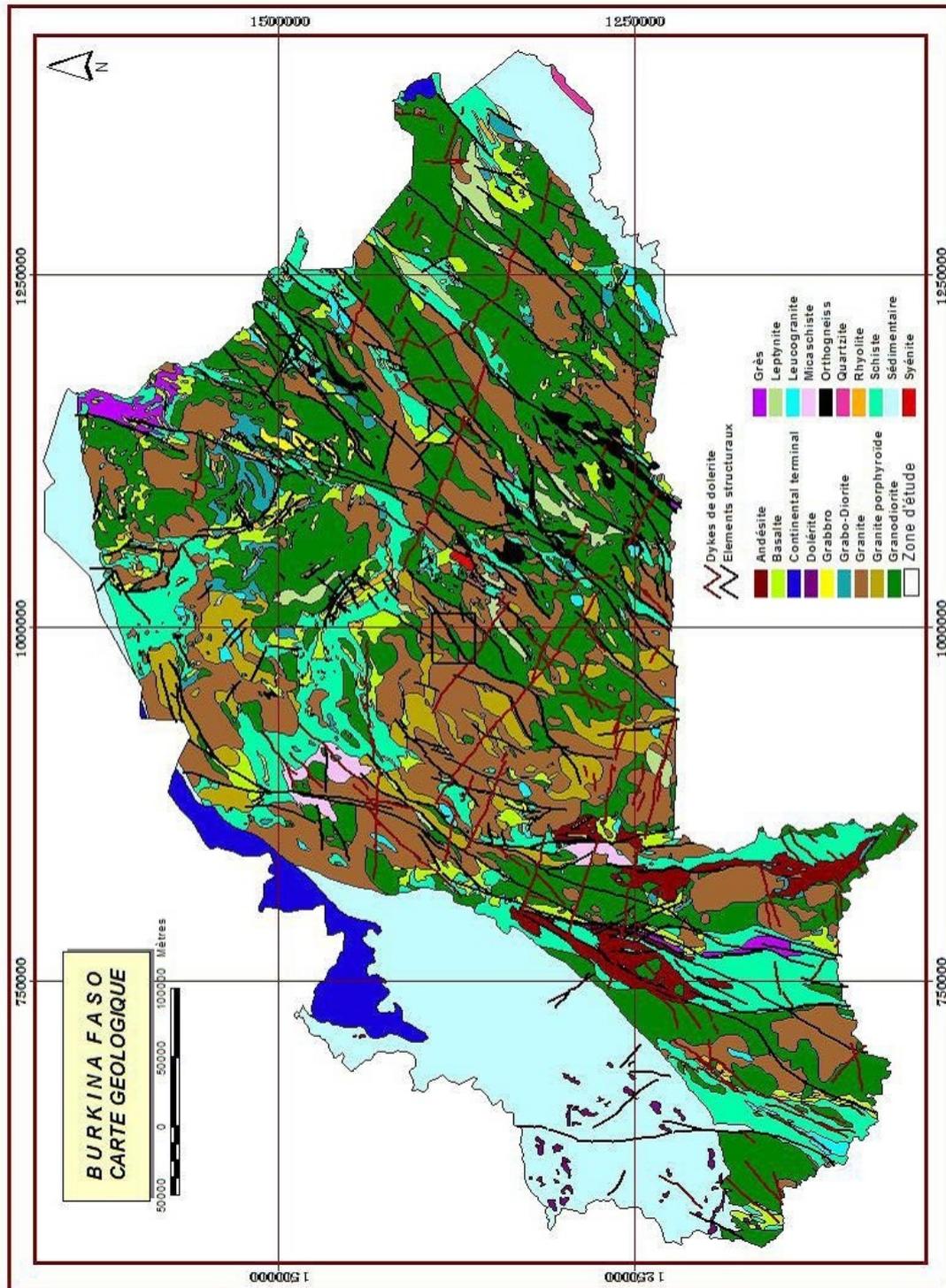


FIGURE 2.3 – Carte géologique du Burkina Faso (Castaing et Chevremont, 2003)

2.2.3 Les formations cuirassées du Burkina Faso

Les cuirasses latéritiques constituent un élément fondamental dans les paysages du Burkina Faso. Elles coiffent de nombreux plateaux et de buttes résiduelles. Elles se présentent sous différentes natures : ferrugineuses, le plus fréquemment ; alumino-ferrugineuses, alumineuses dans le cas rare de bauxite ; et quelquefois manganésifères (Beaudet et Coque, 1986; Boulet, 1970; Leprun et Trompette, 1969; Daveau *et al.*, 1962). Sous ces formations cuirassées se trouvent souvent les latérites indurées qui font l'objet de notre étude.

Michel (1973), puis Tardy et Roquin (1992) ont proposé une chronologie de différents niveaux cuirassés en Afrique de l'Ouest : les surfaces bauxitiques, le niveau intermédiaire, les surfaces inférieures. Ces trois familles de cuirasses se retrouvent au Burkina Faso. Leur répartition sur le territoire burkinabè est la suivante :

- Les surfaces bauxitiques : ce sont les surfaces de Labé, du Dogol Sigon et de Fantofa qui sont datées respectivement, selon Michel (1978), du Jurassique moyen, du Crétacé (Albien) et de l'Eocène inférieur. Une chronologie plus ancienne a été aussi proposée par Tardy et Roquin (1992). Ces surfaces sont localisées dans la région Centre-Nord (Sylvestre, 1970) : Wempapapassédo, Yougounini, Tomwaka, ou dans la zone ouest (Sabou, Kosso, ...) (COMTEC et P., 1975). Ces surfaces se sont en général développées à partir des roches birrimiennes d'origine volcanique ou volcano-sédimentaires (arc Kaya-Koungoussi) ou sur des formations gréseuses du Précambrien supérieur (dolérites de Bobo-Dioulasso). On les retrouve également à proximité de Banfora (Marcelin et Serre, 1971b); dans la région de Gaoua sous forme de dalle cuirassée à faciès alumino-ferrugineux (Eschenbrenner et Grandin, 1970), au Nord-ouest d'Aribinda (Boulet, 1970);
- Le niveau intermédiaire : les reliefs intermédiaires cuirassés sont datés du Pliocène selon Michel (1978) et du Oligocène selon Tardy et Roquin (1992). Ils sont de nature ferrugineuse, souvent avec des éléments arrondis de bauxite. Au Burkina, on les rencontre dans l'arc Kaya-Koungoussi sous forme de faciès pisolitique (Boulet, 1978; Boulet, 1970; Leprun et Trompette, 1969);
- Les surfaces inférieures sont des glacis (haut, moyen et bas glacis). Ils sont respectivement du Miocène, du pliocène et du Quaternaire selon Tardy et Roquin (1992) alors que Michel (1978) les classe respectivement dans le Quaternaire ancien, moyen et récent. Au Burkina Faso, ces trois glacis ont été reconnus dans la partie sud-ouest du pays (Eschenbrenner et Grandin, 1970); dans la vallée des Volta (KALOGA, 1970); dans la vallée de Sourou (Leprun, 1979) et dans la zone nord (Boulet, 1970).

2.3 Présentation des sites d'étude

2.3.1 Situation géographique

Trois sites sont concernés par cette étude. La figure 2.4 ci-après donne la position des sites sur une carte du Burkina Faso et le tableau 2.1 synthétise les coordonnées géographiques des carrières étudiées.

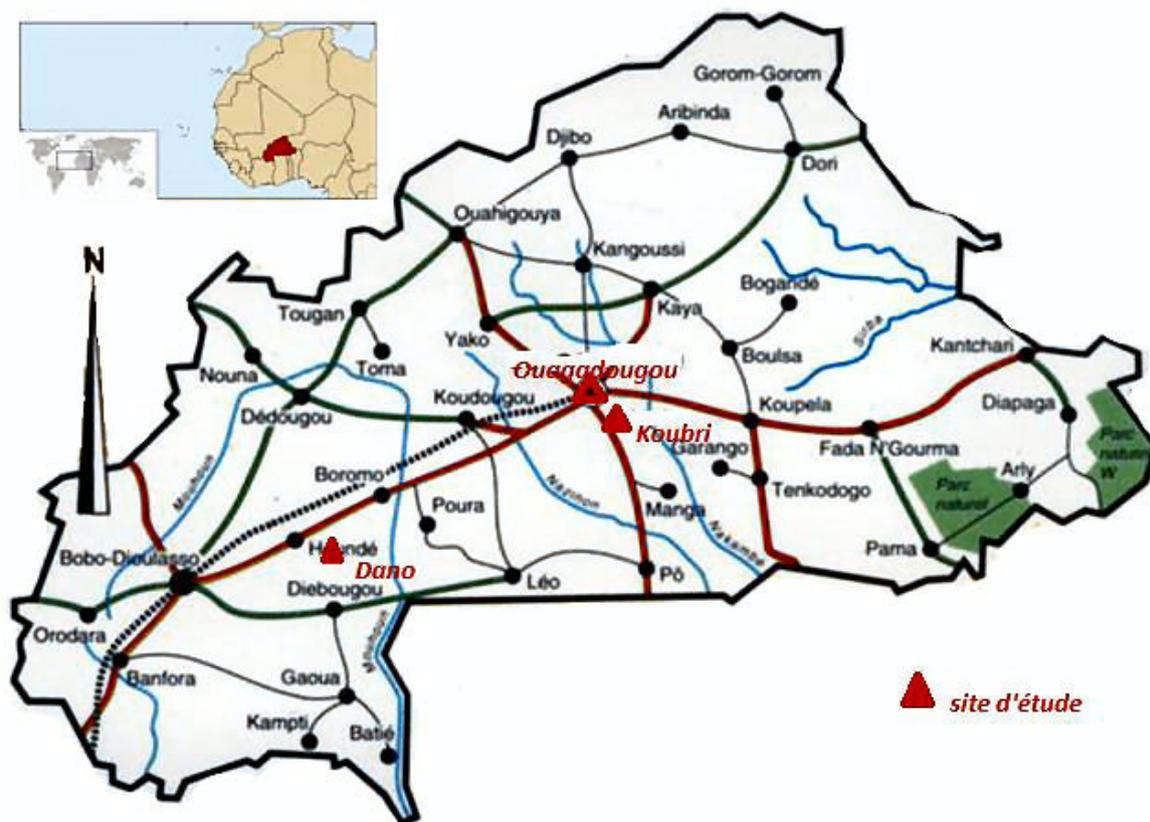


FIGURE 2.4 – Localisation des sites d'étude

Tableau 2.1 – Coordonnées géographiques des carrières

Sites d'étude	Carrières	Coordonnées	Type d'exploitation
Dano 11°09'N-03°04'W	Pierre Nat.	11°10'07"N-03°03'55"O	Industriel
	Dakolé	11°08'40"N-03°04'26"O	Artisanal
Koubri 12°10'03"N-01°21'20"E	Saint Paul	12°12'40"N-01°21'01"O	Artisanal
	Barrage	12°13'36"N-01°21'20"O	Artisanal
Ouagadougou 12°21'58"N-01°31'05"E	Balkouin	12°17'24"N-01°27'48"O	Artisanal
	Tigaldégué	12°15'59"N-01°35'30"O	Artisanal

Le site de Dano :

Dano est une localité située dans le sud-ouest du Burkina Faso, dans la province d'Ioba. Elle est accessible par la route nationale RN 12; au sud de la ville de Pâ et à 60 km de la frontière du Ghana. Ses coordonnées géographiques sont : Latitude : 11° 9' N; Longitude : 3° 4' W. Le climat est de type soudanien caractérisé par deux saisons, une saison sèche longue (entre 6 et 7 mois) et une saison pluvieuse courte, les précipitations atteignent 1500 mm. Les carrières étudiées se situent à proximité de la ville de Dano. Il s'agit à la fois d'une carrière industrielle qui a été exploitée par « Pierres Naturelles » au Nord et des carrières artisanales exploitées individuellement par les habitants dans un vallon au Sud-Ouest, à la périphérie du quartier Dakolé. Les conditions de sécurité sont inexistantes dans ces carrières exploitées avec des outils rudimentaires.

Le site de Koubri :

Koubri est une localité située dans la province de Kadiogo, au sud de Ouagadougou, à 30 km sur l'axe Ouagadougou-Pô. Ses coordonnées géographiques sont : Latitude : 12°10'3" N et Longitude : 1°21'20" E. Le climat est de type tropical de savane avec une saison longue sèche (7 mois) et une courte saison pluvieuse dont la précipitation moyenne est de 750mm. Les carrières concernées sont celle de Saint Paul, à l'Ouest de la ville et celle du Barrage à l'Est. Elles sont toutes exploitées artisanalement avec des conditions similaires à celles de la carrière de Dakolé décrite plus haut.

Le site de Ouagadougou :

Ouagadougou est la capitale politique et se situe dans la province du Kadiogo, au centre du pays. Ses coordonnées géographiques sont : Latitude : 12°21'58"N et Longitude : 1°31'05"E. Ouagadougou est soumise aux mêmes conditions climatiques que la ville de Koubri. Les carrières concernées sont celle de Balkouin, située juste à la périphérie Sud de Ouagadougou, sur l'axe Ouagadougou-Koubri-Pô, et celle de Tigaldégue à la périphérie Sud- Ouest du Ouagadougou, sur l'axe Ouagadougou- Sapouy.

2.3.2 Géologie des sites d'étude

Nos connaissances géologiques des sites d'étude sont tirées des travaux de la synthèse géologique de [Hottin et Ouedraogo \(1975\)](#); la notice explicative de la carte géologique de Houndé au 1/200 000 réalisée par [Ladmirant et al. \(1977\)](#); la notice explicative de la carte géologique de Ouagadougou au 1/200 000 dressée par [Castaing et Chevremont \(2003\)](#) dans le cadre du projet SYSMIN et de nos propres observations de terrain.

2.3.2.1 Le site de Dano :

La carte géologique de Houndé au 1/200 000 (Figure : 2.5, (Ladmirant *et al.*, 1977)) indique un socle d'âge Précambrien inférieur et moyen, constitué de roches acides (granites, migmatites et de gneiss - anté-birrimien) et d'une série birrimienne avec des roches basiques d'origine volcanique, pyroclastique et volcano-sédimentaire. Sur ce socle érodé et altéré reposent des formations récentes, tertiaires et quaternaires, constituées d'un recouvrement latéritique, d'alluvions et de complexes fluvio-lacustres.

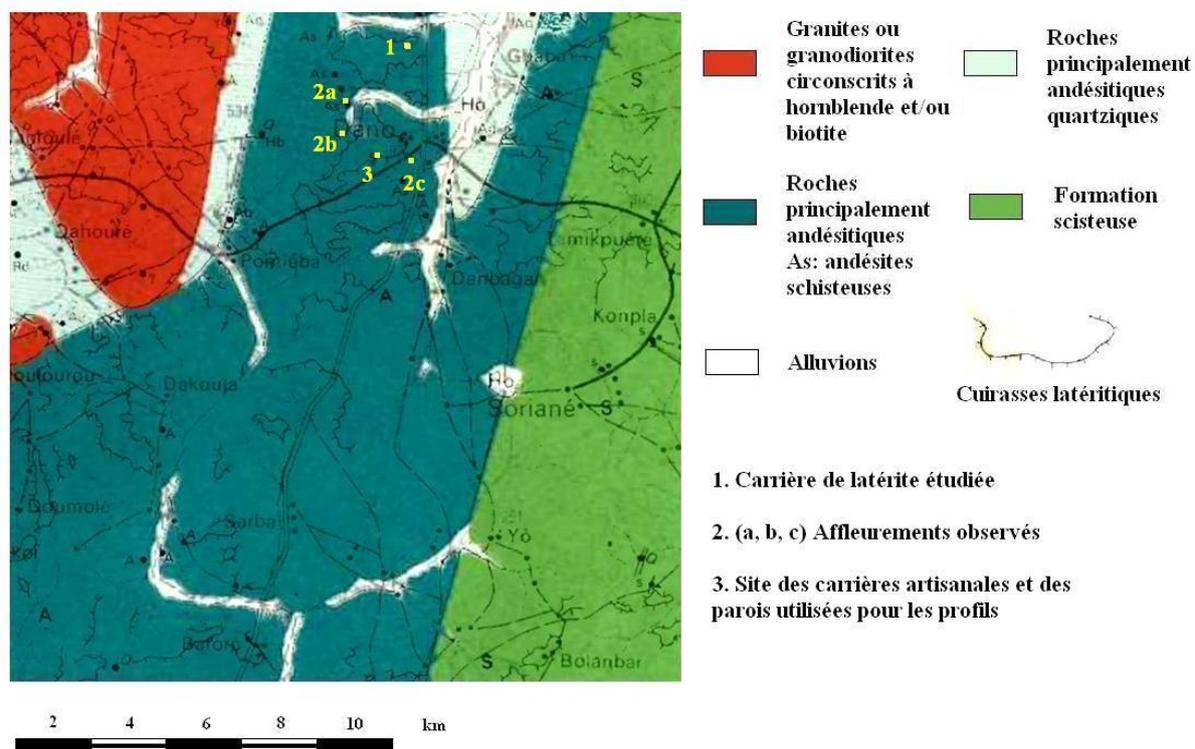


FIGURE 2.5 – Extrait de la carte géologique de Houndé aux alentours de Dano (Ladmirant *et al.*, 1977)

Sur cette carte, les carrières de latérite étudiées et les affleurements observés sur le terrain sont aussi matérialisés. Les recouvrements latéritiques sont bien visibles dans le paysage de Dano avec leur forme tabulaire légèrement inclinée vers l'Est. Les latérites reposent sur un substratum identifié comme des andésites schisteuses, dont la schistosité suit les directions birrimiennes NNE-SSW et N60° à N80° E comme les filons de quartz intercalés. Les failles, difficilement repérables, ont une direction N 120° E. Les tables ou buttes cuirassées (interfluves) sont constituées de latérites indurées (Figures 2.6, photo a et b) et sont entaillées par des dépressions et des larges vallées peu encaissées, où affleurent sporadiquement la roche du substrat

constituée de schistes blancs très altérés. Un contact a été directement observé au pied de la colline sacrée de Dano et d'autres ont été perçus à proximité du barrage et dans la rivière (Figure 2.6, Photo c et d). La schistosité a une direction N 20°E et est de pendage de 80° vers le NW.



Photo a : Table cuirassée Nord Dano



Photo b : Butte cuirassée Sud Dano

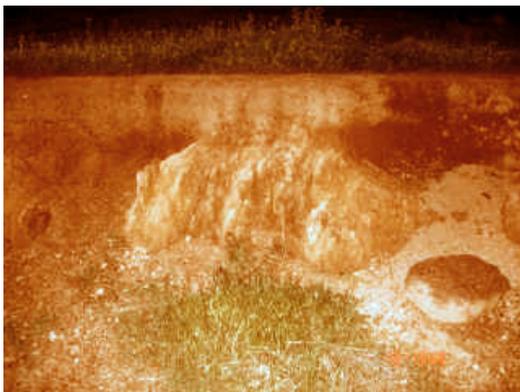
Photo c : Contact latérite-schiste blanc
(colline sacrée de Dano- Sortie Sud
Dano)Photo d : Contact latérite-schiste blanc
(Barrage de Dano- Nord Dano)

FIGURE 2.6 – Observations de formations géologiques sur le site de Dano

Les pentes très adoucies sont recouvertes de colluvions, qui présentent une orientation parallèle à la pente du terrain. Par érosion régressive, de nombreux blocs métriques à décimétriques parsèment les pentes (Figure 2.6, Photo a). Des filons décimétriques de quartz hyalin ont été directement observés, certains renferment des paillettes d'or. De plus, il a été noté sur le terrain la présence localement de nombreuses pierres de quartz suggérant la présence de filons démantelés ainsi que des roches vertes microlitiques (dolérites) issus de dykes ou de sills.

Les observations en accord avec les données géologiques suggèrent le schéma géologique proposé par la coupe AB réalisée de la colline au nord de Dano vers le barrage (Figure 2.7) avec l'existence

d'une altérite probablement allochtone aujourd'hui fortement indurée en latérite. L'érosion des reliefs initiaux granitiques et andésitiques en pénéplaine, accompagnée d'un déplacement modéré des résidus, au faciès légèrement roulés, conduit progressivement à la latérisation des formations détritiques résiduelles. Ainsi, se forment des plateaux latéritiques désormais très résistants à l'érosion de surface, notamment à l'action du ruissellement mais pouvant être entaillés par les cours d'eau, qui mettent à jour ponctuellement la roche-mère identifiée comme un schiste blanc. La figure 2.7 est une coupe réalisée entre la colline nord et le Barrage de Dano Elle matérialise ce phénomène d'érosion des reliefs à pente plus ou moins élevée.

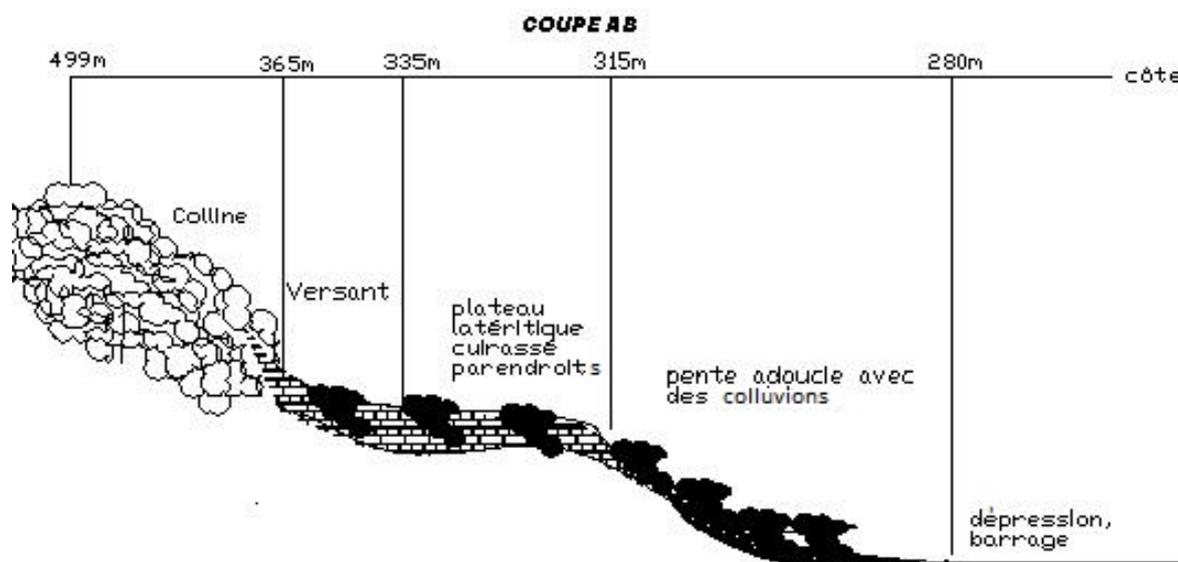


FIGURE 2.7 – Schéma géologique coupe Nord-Sud (colline nord Dano- Barrage Dano)

2.3.2.2 Les sites de Ouagadougou et de Koubri

Les carrières de Koubri (Barrage et Saint Paul) et de Ouagadougou (Balkouin et Tigaldégué) appartiennent à une zone triangulaire d'environ 30 km de côtés au Sud et Sud-Ouest de Ouagadougou. Cette zone de la région de Kadiogo est essentiellement constituée de socle cristallin et cristallophyllien, appelé le môle de Ouagadougou. Les travaux de [Castaing et Chevremont \(2003\)](#) indiquent que les formations géologiques sont constituées de trois grands ensembles : les alluvions du quaternaire ; les dolérites post-birrimiennes et les granitoïdes du socle birrimien :

- Les granitoïdes du socle birrimien sont généralement des diorites quartzifères (au sud-ouest de Ouagadougou) ; des granitoïdes à amphibole et biotite et des roches gneissiques à amphibole et biotite (au sud de Ouagadougou) ; des granites à grain moyen à biotite et amphibole associées à des granitoïdes porphyroïdes à biotite et quelques rares amphiboles (à l'Est et au Nord de Ouagadougou) ;

- Les dolérites post-birrimiennes sont peu présentes dans la zone d'étude. Elles affleurent sous forme d'un filon au Sud-ouest (vers Tigaldégué) sur cette carte ;
- Les alluvions du Quaternaire sont constituées de dépôts de sables, de graviers et d'argiles, et sont généralement dans les bas-fonds du bassin d'Ouagadougou et le long de quelques cours d'eau temporaires.

La figure 2.8 ci-dessous qui est un extrait de la carte géologique simplifiée de Ouagadougou (Castaing et Chevremont, 2003) présente la géologie de la zone sud de Ouagadougou concernée par cette étude.

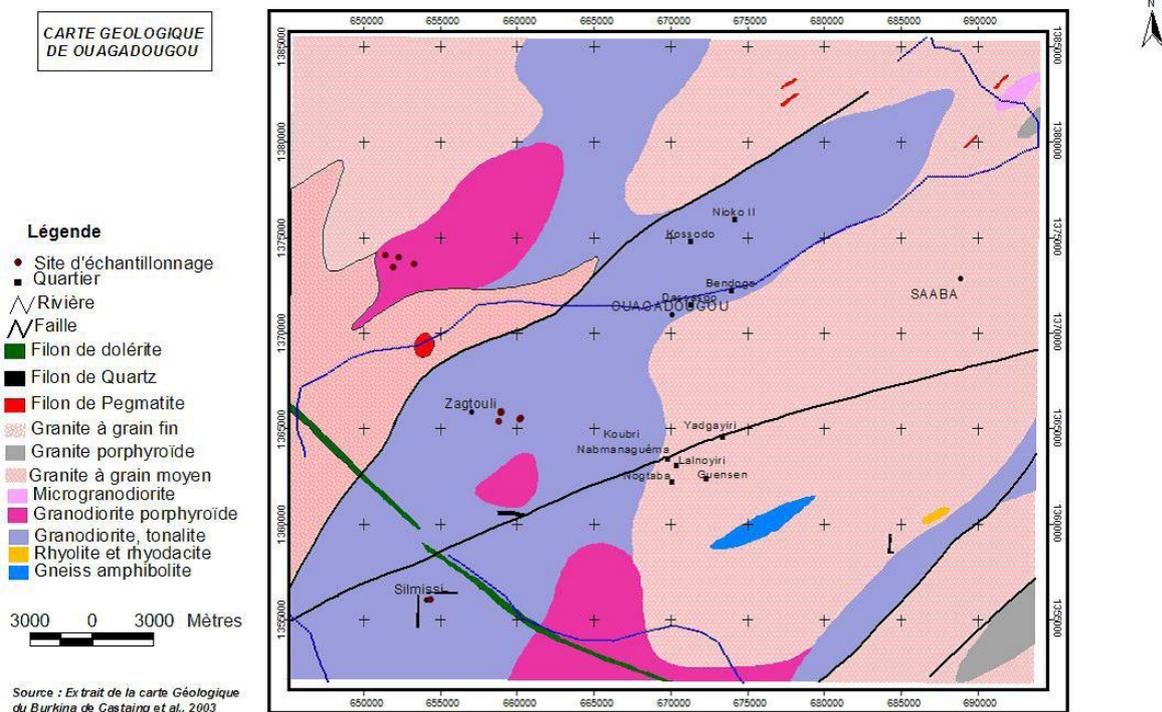


FIGURE 2.8 – Extrait de carte géologique de Ouagadougou, (Castaing et Chevremont, 2003)

Dans cette zone d'étude, toutes les formations de socle sont masquées par une cuirasse latéritique alumino-ferrugineuse (Figure 2.9) surmontant des altérites argileuses et des arènes grenues avec des épaisseurs importantes. Ces cuirasses omniprésentes sont les témoins d'un niveau très ancien de pénéplaine et sont souvent mises en évidence par l'érosion hydrique et éolienne sous forme de buttes tabulaires.

Selon Castaing et Chevremont (2003), les affleurements de cette zone sont constitués de deux faciès : le faciès de granodiorite, tonalite et diorite quartzite foliée et le faciès de granodiorite porphyroïde à amphibole et biotite. Les granodiorites sont généralement des roches à composition minéralogique dominée par le quartz, l'orthose, le microcline, les plagioclases (oligoclase et andésine).



FIGURE 2.9 – Cuirasse latéritique aluminoferrugineuse sur l'axe Ouagadougou-Koubri

Dans le triangle Ouagadougou-Koubri- Tigaldégue (zone d'étude), les affleurements sont rares. C'est une vaste pénéplaine de latérite où affleurent des cuirasses épaisses. Nous avons cependant noté la présence d'un affleurement granitique près de la carrière de Balkouin (Figure 2.10.a).



(a) Affleurement granitique

(b) Affleurement de granodiorite



(c) Contact latérite-roche mère saprolite

FIGURE 2.10 – Affleurement des roches mères sur l'axe Ouagadougou - Koubri

Cette roche à grain moyen montre la présence des phénocristaux de K-feldspath avec une orientation très faible des minéraux. Elle pourrait dériver d'un magmatisme granitique/granodioritique. Un autre affleurement de granodiorite est cartographié au nord de Koubri (Figure 2.10.b). C'est une granodiorite porphyroïde avec des déformations sigmoïdales des minéraux phylliteux. Près de ces affleurements, le premier niveau d'altération en contact direct de la latérite avec la roche

mère est constitué d'horizons très friables et peut correspondre à la saprolite, marquée par une altération iso-volumique. (Figure 2.10.a)

2.4 Profils géologiques des carrières

2.4.1 Méthodologie

A partir des informations fournies par les documents géologiques citées dans le paragraphe précédent, une prospection des affleurements dans les zones d'étude et une analyse des fronts de taille des carrières ont permis de décrire les profils géologiques et d'identifier les roches mères qui ont donné probablement naissance par altération aux latérites. Les carrières concernées par cette prospection sont celles de Dano (carrière industrielle de Pierres Naturelles et carrière artisanale de Dakolé) et de Balkouin.

- Pour la carrière industrielle de Pierres Naturelles (PN), qui a une forme carrée de 37 x 37 m et une profondeur d'environ 2,50 m, deux profils d'observation ont été retenus : Profil sud sur le côté sud de la carrière et Profil Ouest sur le côté Ouest de la carrière.
- Pour la carrière artisanale de Dakolé, deux points d'observations Profil P1 et Profil P2) sur deux fronts de taille de 5 à 6 mètres de profondeur ont été retenus.
- La carrière de Balkouin (Profil B), qui se trouve au centre des carrières Koubri (Saint Paul et Barrage) d'Ouagadougou (Tigaldégue et Balkouin) a été retenue parce qu'elle offre une profondeur d'observation représentative et se situant à proximité d'une tranchée, réalisée pour la construction de la route Ouagadougou-Pô, qui permet des observations plus en profondeur. Les coordonnées géographiques des profils d'observation sont données dans le tableau 2.2 ci-dessous.

Tableau 2.2 – Coordonnées géographiques des profils d'observation

Carrière	Profils	Coordonnées géographiques
Pierre Nat.(PN)	Profil Sud PN.	11°10'06"N et 3°03'55"O
	Profil Ouest PN	11°10'58"N et 3°03'57"O
Dakolé	P1 carrière artisanale	11°08'35"N et 3°04'22"O
	P1 carrière artisanale	11°08'39"N et 3°04'23"O
Balkouin	Profil B Balkouin	12°17'24"N et 1°27'48"O

2.4.2 Carrières de Ouagadougou et de Koubri

Les carrières appartenant à ces deux zones sont semblables et les exploitations, toutes artisanales, ont une profondeur de moins de deux mètres. Les points d'observation (Tableau 2.2) se situent sur l'axe Ouagadougou - Koubri. La zone est marquée par des affleurements cuirassés qui couvrent des horizons latéritiques à morphologie variable. La stratigraphie de cette formation, reconstituée

grâce à la carrière ouverte à Balkouin et aux tranchées réalisées pour la construction de la route Ouagadougou-Pô (Figure 2.11), indique du haut vers le bas :

- une cuirasse latéritique ferrugineuse rougeâtre à patine noire caractérisée par la présence de nombreuses concrétions et nodules et d'une dureté et d'une compacité élevées ;
- une cuirasse ferrugineuse rouge à structure moins nodulaire et avec peu de concrétions ocre, très dure avec une matrice massive et une dureté élevée ;
- une cuirasse latéritique de couleur ocre, moins dure avec des vermicules de couleur ocre et des portions plus jaunâtres. La matrice de fond est uniforme avec peu de concrétions ;
- une latérite de couleur rouge claire avec des portions marquées par une coloration jaune. Elle est épaisse d'environ 3 mètres avec une structure homogène et cohérente ;
- un horizon latéritique peu cohérent et très friable marqué par des portions de couleurs blanche, jaune et rouge claire. La teneur en argile de cet horizon est plus élevée que celle de la couche supérieure.

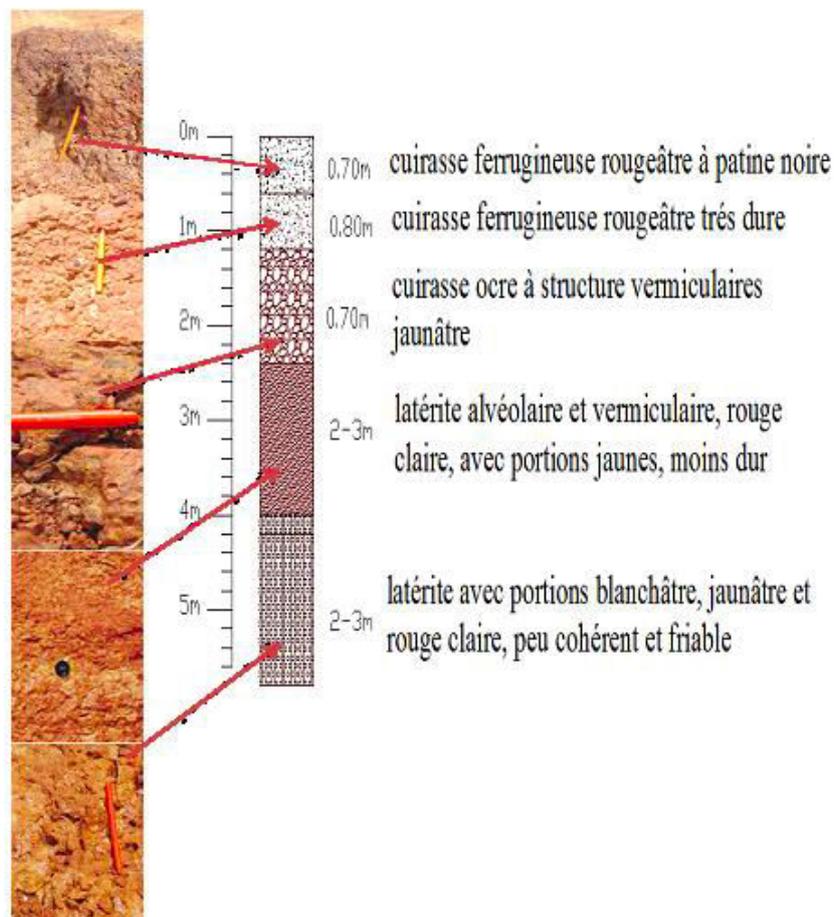


FIGURE 2.11 – Profil carrière de Balkouin (axe Ouagadougou-Koubri)

Une corrélation de ce profil avec celui d'une tranchée située à un niveau topographique plus bas (Figure 2.12) montre que les horizons sous-jacents sont argileux caractérisés par :

- une partie supérieure riche en granulats de quartz de dimensions hétérogènes avec une matrice fine de couleur ocre. Elle est caractérisée par la présence de fragments de quartz et une partie sous-jacente d'une couleur blanchâtre, friable, avec beaucoup de minéraux argileux qui donnent une coloration très claire au niveau ;
- une partie inférieure purement argileuse, de couleur blanchâtre, friable marquée par la présence des minéraux argileux. Sa couleur est plus claire que celle du niveau supérieur.



FIGURE 2.12 – Profil observé sur une tranchée routière

2.4.3 Carrière de Dano

Les profils Sud et Ouest réalisés dans la carrière « Pierres Naturelles » (PN) , profonde d'environ 2,50 m (Figure 2.13.a et b) indiquent qu'il s'agit du haut vers le bas d'une latérite à patine rouge et à structure alvéolaire reposant sur une latérite ocre-rouge, tachetée blanc et noir à structure compacte. Par endroits, la latérite du bas a une texture limoneuse et graveleuse (pisolithes).

Les profils P1 et P2 réalisés au niveau des carrières artisanales (Figure 2.13.c et d) indiquent du haut en bas la présence d'une cuirasse de latérite noire en surface puis rouge foncée (0,4-0,60m). Des faciès latéritiques meubles graveleux apparaissent sur une épaisseur de 1,10m sous forme de lentilles de géométrie variable. De la profondeur 2,30 à 4,20 m, la latérite est compacte, de couleur ocre-rouge, tachetée de blanc et est marquée par un fin niveau de 10 cm de latérite graveleuse. De 4,20 à 5,20 m (fond de la fouille), la latérite devient rouge foncé, tachetée et vermiculée, renfermant des argiles blanchâtres friables. Les interfaces des bancs sont quasi horizontales et les plans préférentiels des fronts d'exploitation sont N30°E et N120°E. Cette direction préférentielle d'exploitation est celle de la direction birrimienne.

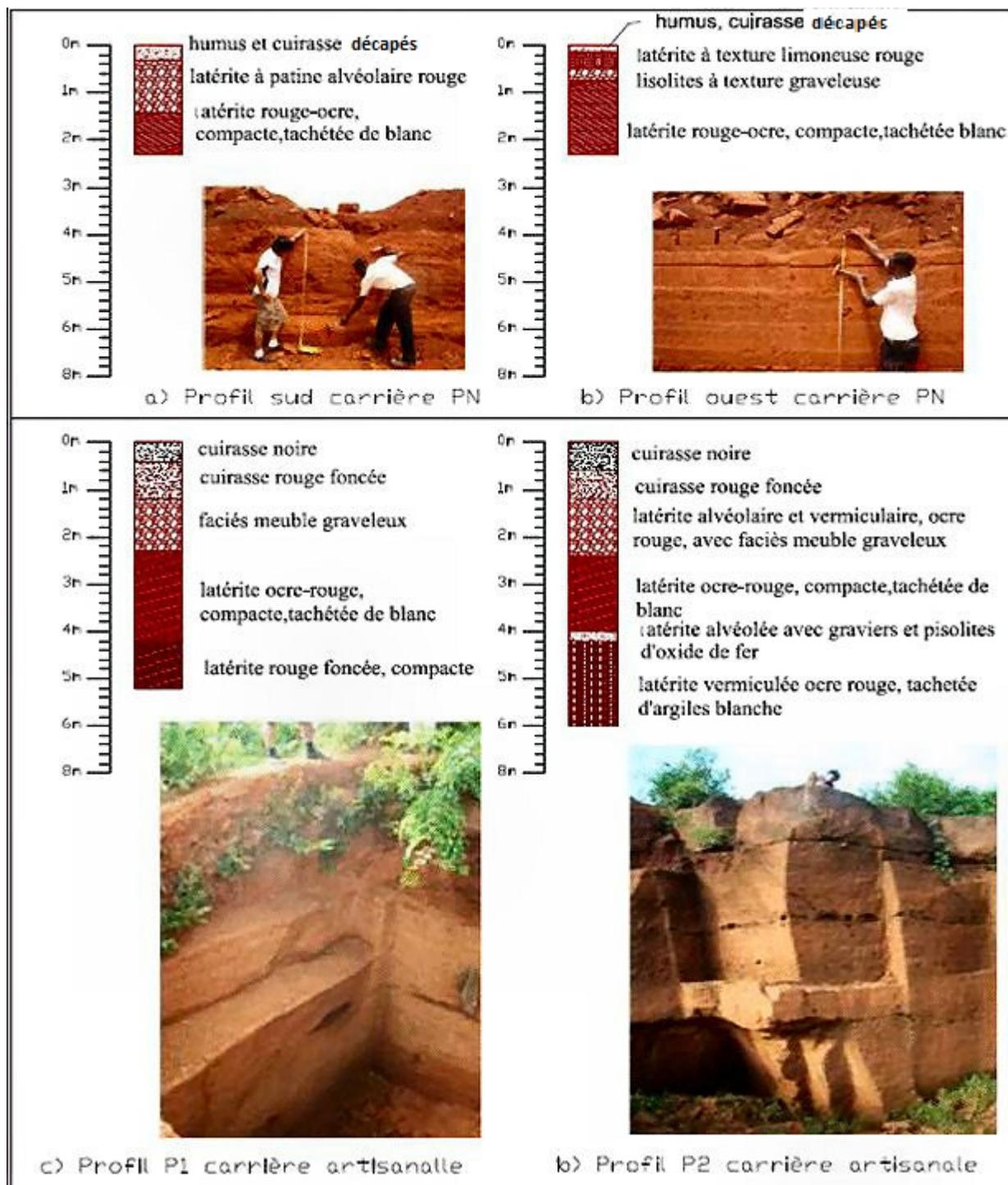


FIGURE 2.13 – Profils des carrières industrielles et artisanales de Dano

2.5 Chimie et minéralogie des échantillons

2.5.1 Les différentes techniques d'analyses chimiques et minéralogiques

2.5.1.1 La loupe binoculaire

La loupe binoculaire permet de réaliser une analyse macroscopique des échantillons. C'est un stéréomicroscope qui fournit une image tridimensionnelle de faible grossissement d'un échantillon. Contrairement au microscope électronique à balayage, la loupe binoculaire n'exige pas des échantillons plats de faible épaisseur, ou réfléchissants, et permet d'observer des pièces naturelles sans préparation en grossissant l'image d'un facteur peu élevé, mais en gardant une vision stéréoscopique propice à l'examen macroscopique révélateur de grains, de criques, de fissures, etc.

2.5.1.2 Le microscope optique

Le microscope optique est un instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions (ce qui caractérise son grossissement) et de séparer les détails de cette image (et son pouvoir de résolution) afin qu'il soit observable par l'œil humain. Il est utilisé en pétrographie pour reconnaître, à partir des lames minces, les roches et analyser sa texture par agrandissement d'images.

2.5.1.3 La microscopie électronique à balayage (MEB)

Le MEB est une technique de reproduction et d'analyse d'image d'un échantillon. Elle consiste à utiliser un faisceau très fin d'électrons qui balaye point par point la surface d'un échantillon pour reconstruire la topographie de l'échantillon et de fournir une image en relief. Cette image donne des informations sur les caractéristiques microstructurales du matériau observé. Elle permet aussi de visualiser les minéraux qui le constituent à des grossissements variables. Les caractéristiques microstructurales ainsi obtenues permettent de prédire le comportement mécanique du matériau.

2.5.1.4 La microscopie électronique à transmission (MET)

C'est une technique de microscopie où un faisceau d'électrons est « transmis » à travers un échantillon très mince. Les effets d'interaction entre les électrons et l'échantillon donnent naissance à une image, dont la résolution peut atteindre 0,08 nanomètre. Les images obtenues ne sont généralement pas explicites, et doivent être interprétées à l'aide d'un support théorique. L'intérêt principal de ce microscope est de pouvoir combiner cette grande résolution avec les informations de l'espace de Fourier, c'est-à-dire la diffraction. Il est aussi possible d'étudier la composition chimique de l'échantillon en étudiant le rayonnement X provoqué par le faisceau électronique. Contrairement aux microscopes optiques, la résolution n'est pas limitée par la longueur d'onde des électrons, mais par les aberrations dues aux lentilles magnétiques. La technique

consiste à placer un échantillon suffisamment mince sous un faisceau d'électrons, et d'utiliser un système de lentilles magnétiques pour projeter l'image de l'échantillon sur un écran phosphorescent qui transforme l'image électronique en image optique. Pour les échantillons cristallins, un autre mode d'utilisation consiste à visualiser le cliché de diffraction de l'échantillon.

2.5.1.5 La diffraction de rayons X (DRX)

La DRX est une méthode d'analyse physico-chimique couramment utilisée pour l'identification des espèces minérales cristallisées d'une matière première. Elle fonctionne mieux sur la matière cristallisée (minéraux, métaux, céramiques, produits organiques cristallisés), mais donne des résultats diffus sur la matière amorphe (liquides, polymères, verres). La technique permet de reconnaître des produits ayant la même composition chimique brute, mais une forme de cristallisation différente. Par exemple, elle permet de distinguer les différentes silices (qui ont toutes la même formule brute SiO_2 : quartz, cristobalite).

2.5.1.6 Analyse thermique différentielle - A.T.D.

L'analyse thermique différentielle permet de mettre en évidence la quantité de chaleur dégagée (réactions exothermiques) ou absorbée (réactions endothermiques) lors des différentes transformations chimiques et minéralogiques pouvant se produire au cours de la cuisson (frittage) d'un échantillon. En A.T.D, on enregistre la différence de température (ΔT) entre l'échantillon étudié et une substance (référence : alumine calcinée) qui ne manifeste aucun accident thermique dans la zone de température explorée. Tout comme la D.R.X., l'A.T.D. constitue aussi un moyen privilégié d'identification qualitative des constituants d'un échantillon. D'une manière générale, aux réactions endothermiques ($\Delta T < 0$) correspondent successivement le départ de l'eau absorbée, de l'eau interfoliaire et de l'eau de cristallisation. Aux réactions exothermiques ($\Delta T > 0$) correspond la formation de nouveaux minéraux (néocristallisation) comme par exemple celle de la phase spinelle à partir du métakaolin à 980°C (Sigg, 1991).

2.5.1.7 La spectroscopie infrarouge

La spectroscopie infrarouge est une méthode d'identification des espèces minérales d'un échantillon à partir des fréquences de vibration des principales liaisons de ces espèces minérales. Les liaisons formées à partir d'atomes ou de groupements d'atomes ont des fréquences de vibration qui leur sont propres. Quand elles sont éclairées par des rayonnements électromagnétiques dont la fréquence est voisine de celle de leurs vibrations, elles entrent en résonance et puisent de l'énergie dans le faisceau. C'est cette perte d'énergie que l'on mesure. Le fondement de la spectroscopie d'absorption est basé sur la loi Beer-Lambert.

$$I = I_0 \exp(-a.l.p) \quad (2.1)$$

Où, I est l'intensité de la lumière transmise par une cellule de longueur l contenant un gaz sous pression p , I_0 correspond à l'intensité de la lumière incidente et a représente le coefficient d'absorption par unité de pression.

Plusieurs autres techniques existent pour l'analyse chimique et minéralogique. Dans le cadre de ce travail seuls la DRX et le MEB ont été utilisés. Les procédures expérimentales utilisées sont détaillées dans les paragraphes suivants.

2.5.2 Prélèvement et préparation des échantillons

Les échantillons ont été prélevés dans toutes les carrières de l'étude. Ils ont été prélevés en deux phases :

- Phase I : Des prélèvements sur les deux premiers mètres des profils des carrières de Dano, Koubri et Tigaldégue. Les coordonnées géographiques des points de prélèvement sont celles mentionnées dans les tableaux 2.1 et 2.2 du paragraphe précédent. Des échantillons des roches identifiées comme roche mère sont également prélevés.
- Phase II : Des prélèvements sur un profil complet reconstitué de la carrière de Balkouin. Les différents horizons de ce profil et les points de prélèvement sont indiqués sur la figure 2.14. Des échantillons des roches mères identifiées dans l'étude géologique sont également prélevés.

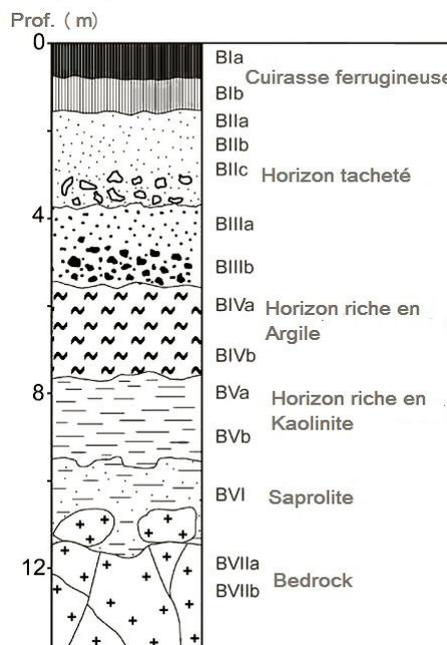


FIGURE 2.14 – Profils de la carrière de Balkouin et points de prélèvement des échantillons, d'après (Giorgis *et al.*, 2014)

Tous ces échantillons ont été séchés à l'étuve (105°C) pendant une à deux semaines avant d'être conditionnés dans des sachets plastiques et envoyés au laboratoire CRISMAT en France (prélèvement phase I) et au laboratoire de Université de Turin (prélèvement phase II) pour effectuer les analyses au MEB et au DRX.

2.5.3 Matériels et méthodes d'analyse

Le MEB utilisé est de type ZEISS SUPRA 55 équipé d'un analyseur EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) EDAX du laboratoire CRISMAT de Caen(France). Le système de détection est composé d'un détecteur d'électrons secondaires « in-lens » ou SE1, d'un détecteur d'électrons secondaires Everhart Thornley ou SE2 avec un «collector bias» ajustable de -250 à + 400 V situé dans la chambre et d'un détecteur d'électrons rétrodiffusés AsB situé à l'extrémité de la colonne. La chambre est également équipée d'une caméra InfraRouge aidant le positionnement de la platine.

Les analyses quantitatives de phases sont effectuées par la méthode de Rietveld à l'aide du programme PANalytical HighScore-plus. Elle consiste à simuler un diffractogramme à partir d'un modèle cristallographique de l'échantillon, puis d'ajuster les paramètres de ce modèle afin que le diffractogramme simulé soit le plus proche possible du diffractogramme mesuré.

De par les faibles quantités d'échantillons analysés, ces analyses EDS ne sont que semi-quantitatives ; par conséquent seules les compositions élémentaires des latérites sont à retenir.

La DRX utilisée est un diffractomètre Bruker D8 vario1 du Laboratoire CRISMAT. Il est équipé d'un monochromateur avant et d'un détecteur Lynx-Eye. Les analyses quantitatives de phases sont effectuées par la méthode de Rietveld à l'aide du programme PANalytical HighScore-plus. Elle consiste à simuler un diffractogramme à partir d'un modèle cristallographique de l'échantillon, puis d'ajuster les paramètres de ce modèle afin que le diffractogramme simulé soit le plus proche possible du diffractogramme mesuré. Cette méthode basée sur la théorie de la diffraction par un cristal consiste à déterminer la position des pics de diffraction, ainsi que leur surface à un facteur près qui dépend de la puissance de la source de rayonnement, du rendement du détecteur, etc.

Une étude géochimique et minéralogique plus complète a été effectuée sur la carrière de Balkouin en collaboration avec l'Université de Turin (Italie). Elle a consisté à déterminer la composition géochimique et minéralogique sur un profil reconstitué de 12 m de la carrière, figure 2.14. Des prélèvements ont été effectués sur chaque couche de ce profil pour faire une analyse totale des roches qui le composent, depuis les horizons cuirassés jusqu'à la roche mère.

Pour obtenir la composition des roches, des méthodes spectrométriques d'émission atomique (AES) et de masse (MS) ont été utilisées. Ces deux techniques ont permis de déterminer

respectivement les éléments majeurs et les éléments mineurs (notamment terres rares) de tous les échantillons des horizons latéritiques et des roches sous-jacentes tels que le saprolite et la roche mère.

Sur les mêmes échantillons de tout le profil, des analyses minéralogiques par DRX ont également été réalisées. L'appareil et le système d'analyse sont identiques à ceux du laboratoire de CRISMAT. Les échantillons ont été également préparés dans les mêmes conditions décrites au paragraphe précédent.

Des analyses localisées sur des échantillons sélectionnés ont également été effectuées de manière à caractériser éventuellement les phases dont la présence est mineure et encore confirmer la composition minéralogique des différents horizons latéritiques. Cette analyse a été également combinée aux deux techniques spectroscopiques précédentes pour reconnaître sans ambiguïté des phases minérales difficiles à détecter par DRX et/ou MEB-EDS, en raison de leur faible teneur et/ou de leur chimie particulière (par exemple, les polymorphes de TiO_2 ; l'hématite et le goethite, etc.)

Cette étude géochimique et minéralogique sur le profil latéritique de Balkouin a fait l'objet d'une publication dans le "Journal of African Earth" ([Giorgis et al., 2014](#)). Nous présenterons ici, une partie des résultats obtenus pour décrire l'évolution des compositions chimique et minéralogique des latérites en fonction de la profondeur.

2.5.4 Résultats et discussions

2.5.4.1 Morphologie

Les morphologies observées au MEB (Figure 2.15) montrent que la microstructure des latérites est caractérisée par des espaces inter et intra granulaires présentant des irrégularités de taille et de forme, et communiquant par des connexions plus ou moins larges. Quelle que soit la carrière, on observe un agencement plus ou moins compact des grains solides, engendrant des espaces vides qui ne sont pas occupés par des éléments minéraux, induisant une porosité importante dans le matériau. La présence de ces espaces vides (macropores) (Figure 2.15.a) et l'insuffisance de cimentation par endroits (fissure, micropore) (Figure 2.15.b) entre les grains sont les principaux facteurs qui pourraient expliquer la variation des propriétés mécaniques au sein d'une même carrière de latérite.

La présence des fissures pourrait également être due au départ d'eau dans les argiles qui contiennent les latérites et au temps de séchage prolongé des échantillons avant l'observation au microscope.

D'autres images MEB sont jointes en annexe A.

D'une carrière à l'autre, les formes et les agencements des minéraux sont variables. Les images MEB laissent prévoir des agencements pseudo hexagonaux avec des liants visibles de matériau

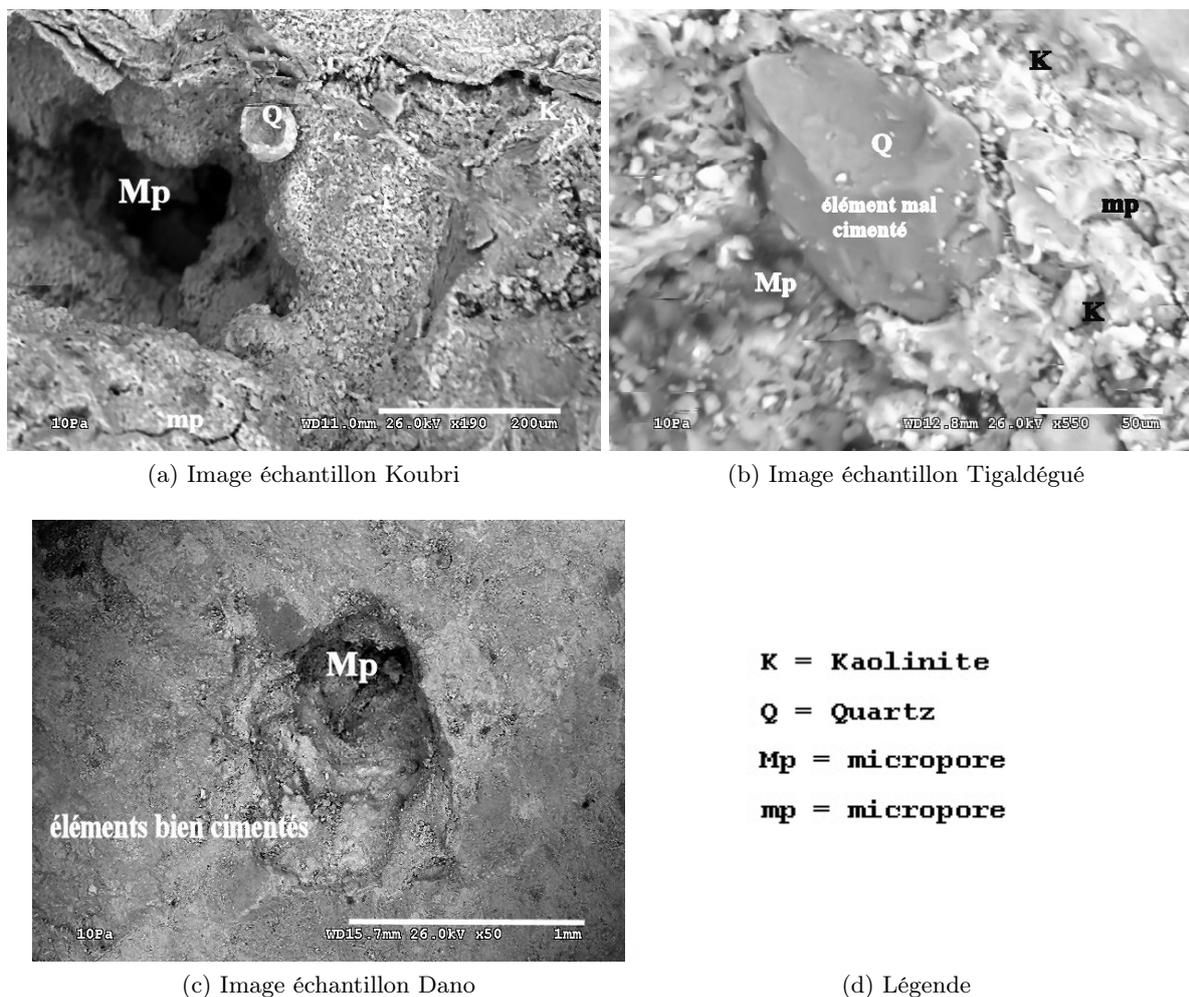


FIGURE 2.15 – Image MEB des échantillons prélevés

plastique qui pourrait être de la kaolinite. Des quartz mal cimentés sont visibles par endroits (Figure 2.14.b). Certains minéraux constituant le matériau sont mis en évidence par leur forme et leur teinte de gris plus ou moins foncées : le quartz, la kaolinite sont facilement identifiables.

2.5.4.2 Composition chimique

Les analyses EDS semi-quantitatives effectuées sur les couches superficielles des carrières (0.8-1.0m) en trois zones descendantes (zone 1, zone 2 et zone 3) ont permis d'identifier les éléments communs de tous les échantillons provenant des quatre carrières. La Figure 2.16 représente les spectres obtenus à une tension accélération de 20 kV sur quelques échantillons observés.

Les histogrammes de la figure 2.17 montrent que les éléments communs de tous les échantillons sont l'aluminium, le silicium et le fer. Leurs proportions sont supérieures à 30%. D'autres éléments tels que le magnésium, le manganèse, titane, le calcium sont également

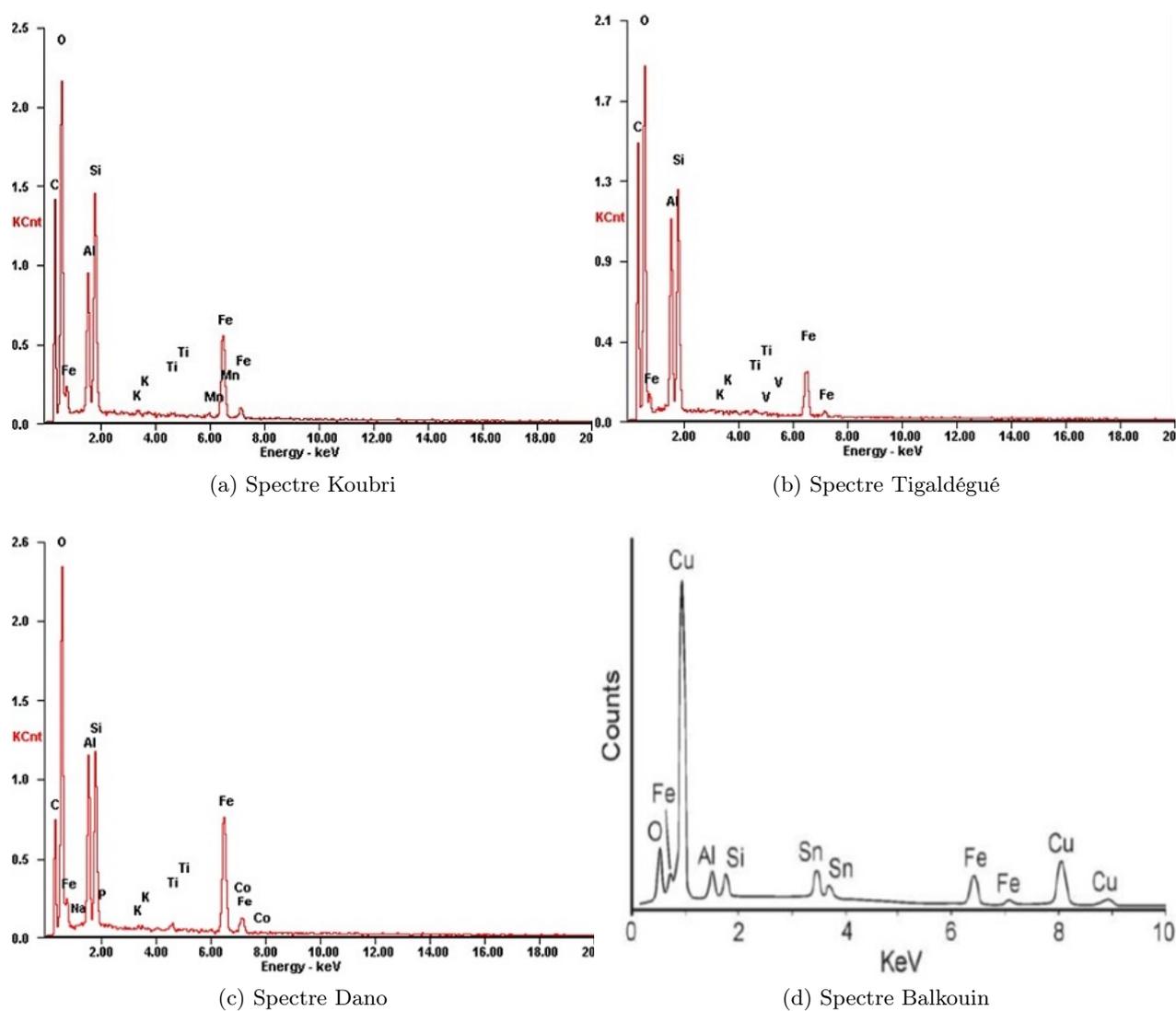


FIGURE 2.16 – Spectre de quatre échantillons acquis à 20 KV

présents et leurs proportions sont faibles (souvent des traces) et variables d'une carrière à l'autre.

L'étude géochimique détaillée de la carrière de Balkouin (Giorgis *et al.*, 2014) sur le profil de 12m (figure 2.18) a permis, à partir de l'analyse des éléments majeurs et des éléments en trace, de mettre en évidence :

- une diminution en fonction de la profondeur de Fe_2O_3 au profit de SiO_2 (2.18.a). Cette réduction de la teneur en fer pourrait expliquer la perte de résistance des blocs en fonction de la profondeur comme cela a pu être constaté par les exploitants mais aussi par d'autres chercheurs (Kasthurba, 2006; Kasthurba *et al.*, 2008) ;

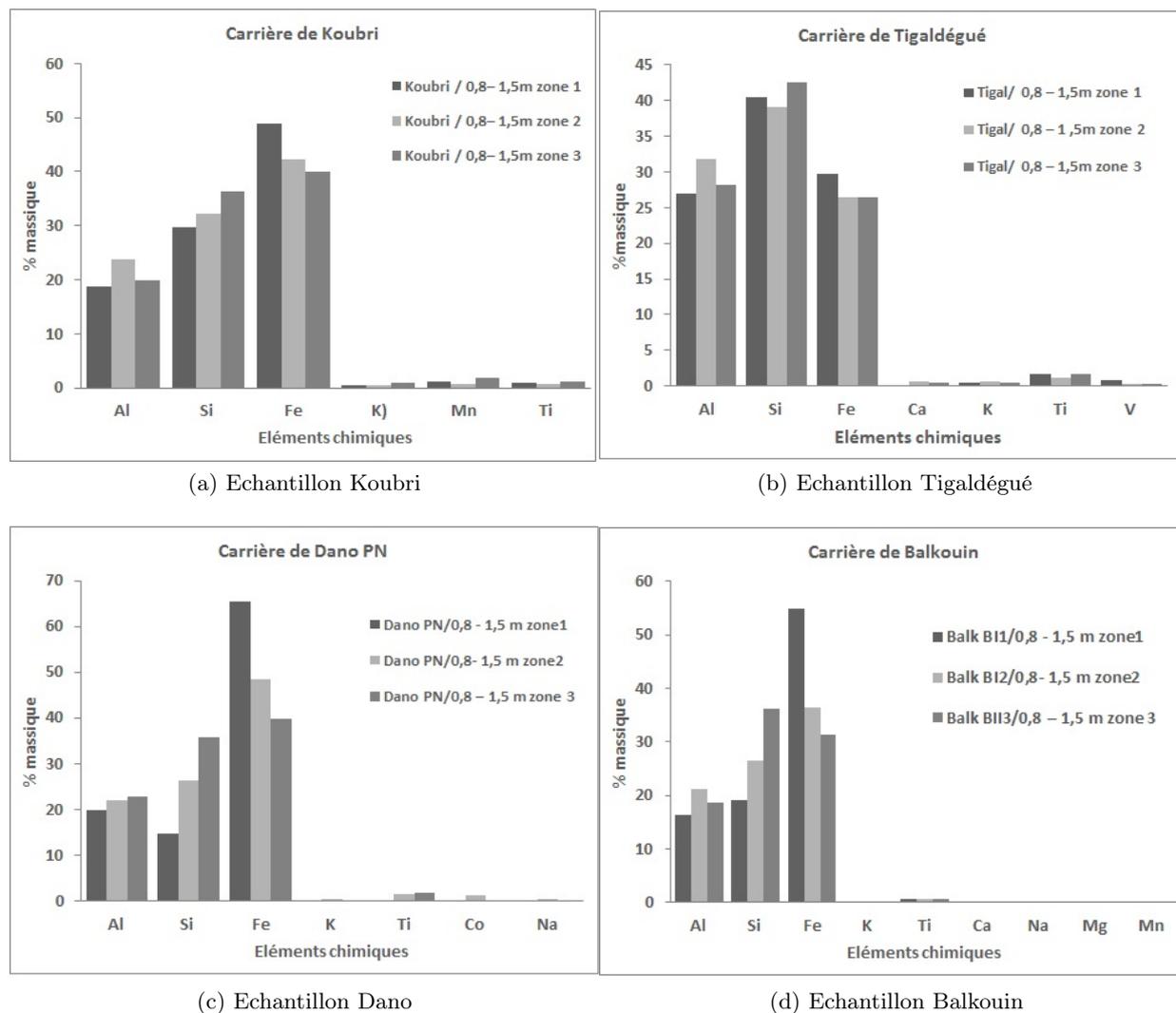


FIGURE 2.17 – Composition chimique des carrières (0.8-1m)

- une évolution pratiquement constante sur les 8 premiers mètres des teneurs en Al_2O_3 et en TiO_2 avant de présenter une légère baisse au-delà des 8m (figure2.18.b) ;
- une augmentation remarquable, au-delà des 8 premiers mètres du profil, des éléments rares à faible profondeur tels que CaO , Na_2O , K_2O , MgO (figure2.18.c) ;
- d'autres éléments tels que le Ba , le Sr , le Rb , pratiquement absents à faible profondeur, apparaissent au fur et à mesure que l'on s'approche de la saprolite et du Bedroch (figure 2.17.d).

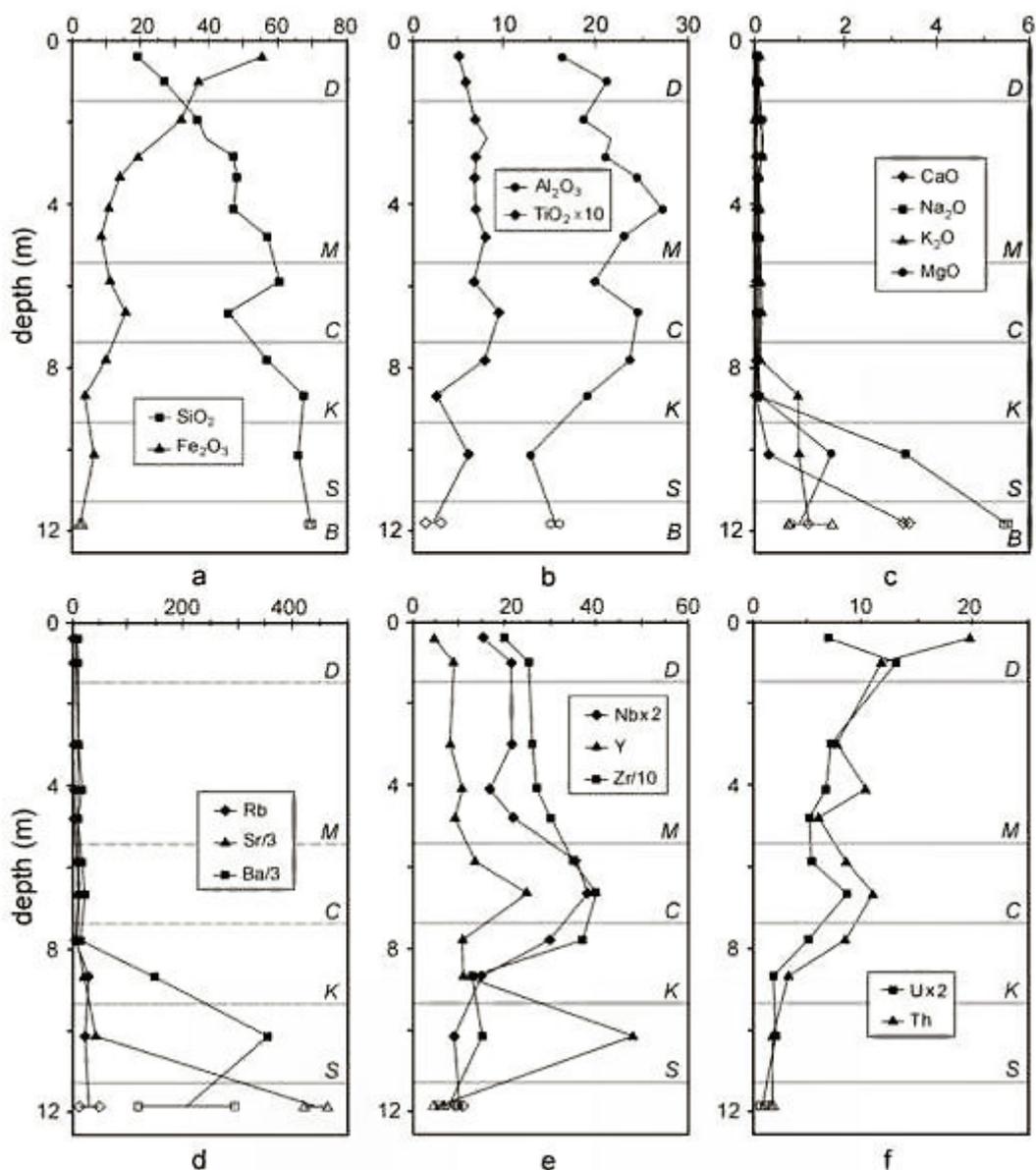
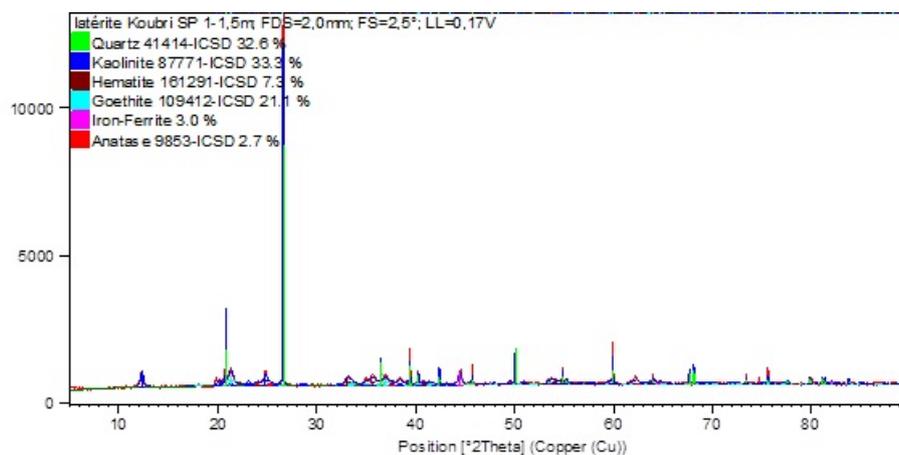


FIGURE 2.18 – Composition chimique en fonction de la profondeur - Carrière de Balkouin

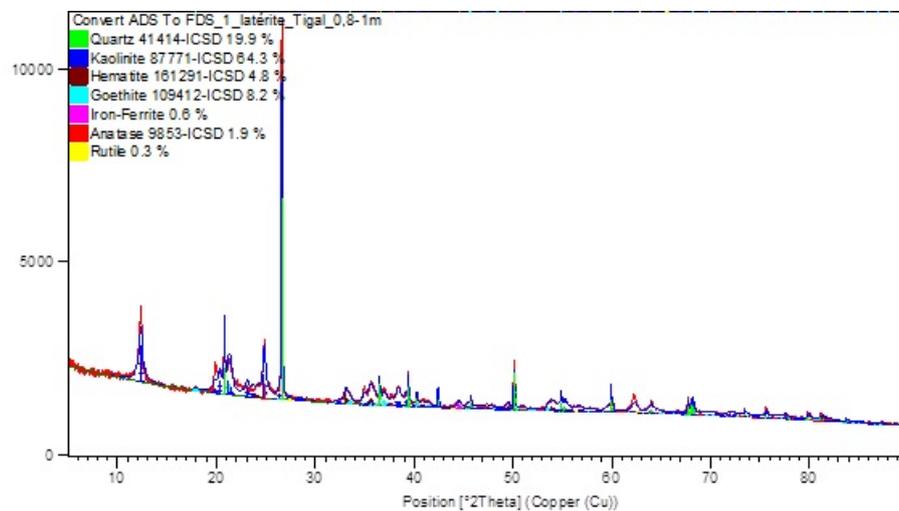
2.5.4.3 Composition minéralogique

Analyses sur les échantillons de latérite des quatre carrières : Les diffractogrammes des rayons X enregistrés sur ces échantillons qui ont permis de faire cette analyse quantitative sont illustrés sur la figure 2.19.

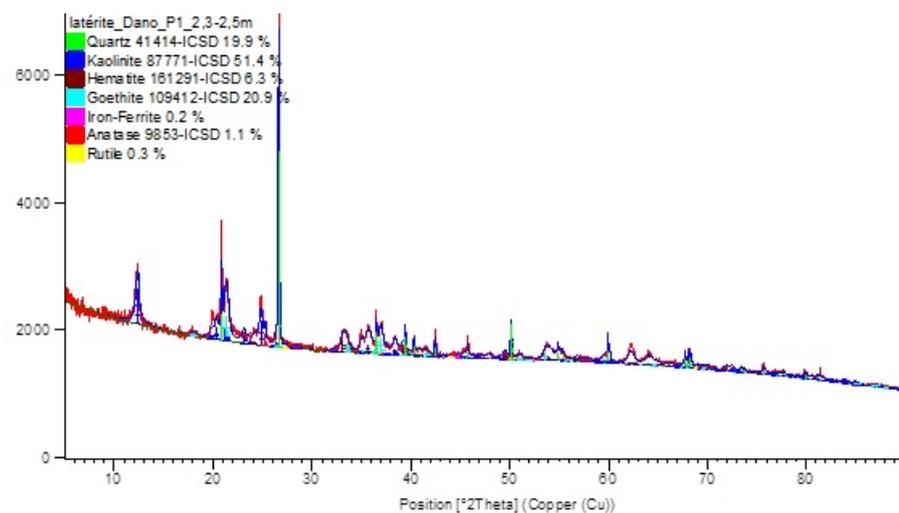
Les résultats de l'analyse quantitative des phases cristallines par la méthode de Rietveld effectuée sur les échantillons prélevés à des profondeurs comprises entre 0.8 et 1.5 m des quatre carrières sont présentés sur la figure 2.20.



(a) Diffractogramme Kouabri



(b) Diffractogramme Tigaldégué



(c) Diffractogramme Dano

FIGURE 2.19 – Diffractogrammes de quelques échantillons

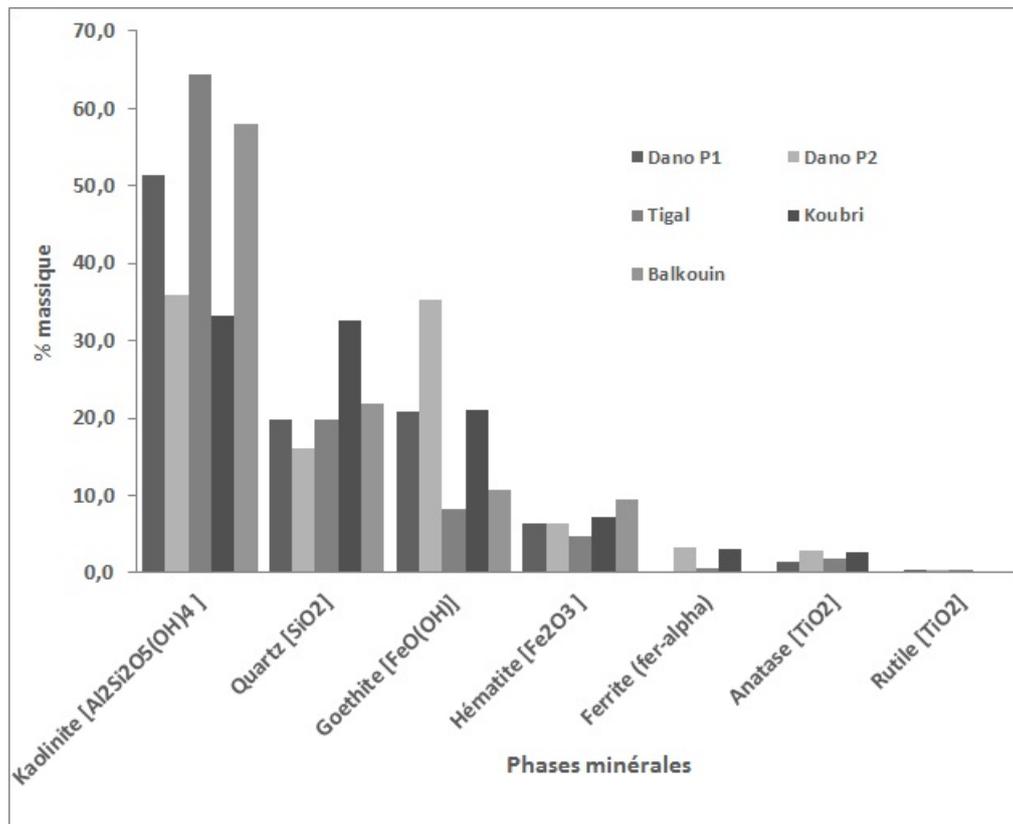


FIGURE 2.20 – Composition minéralogique des carrières (0.8-1m)

Il ressort de cette analyse par carrière :

a. Echantillon de la carrière de Dano P1 :

- Les phases principales sont la Kaolinite $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ qui est la phase majoritaire avec 51.4 %-massique et le Quartz avec 19.9 %-massique ;
- Les phases à base de fer forment le deuxième sous-ensemble avec principalement de la Goethite $FeO(OH)$ à 20.9 %-massique, de l'hématite Fe_2O_3 à 6.3%-massique ainsi qu'une très faible quantité de Ferrite (fer-alpha) à 0.3 %-massique ;
- Enfin deux phases de formule TiO_2 sont également présentes en moindre quantité : l'Anatase avec 1.1 %-massique et la Rutile avec 0.3 %-massique.

b. Echantillon de la carrière de Dano P2 :

- La Kaolinite $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ est la phase majoritaire avec 36.0 %-massique, suivi du Quartz avec 16.1 %-massique ;
- Les phases à base de fer forment le deuxième sous-ensemble avec principalement de la Goethite $FeO(OH)$ à 35.2%-massique, de l'hématite Fe_2O_3 à 6.3%-massique ainsi que de la Ferrite (fer-alpha) à 3.2 %-massique ;

- Deux autres phases de formule TiO_2 sont également présentes en moindre quantité : L'Anatase avec 2.8 %-massique et la Rutile avec 0.4 %-massique.

c. Echantillon de la carrière de Tigaldégué :

- La Kaolinite $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ est la phase majoritaire avec 64.3 %-massique, suivi du Quartz avec 19.9 %-massique ;
- Les phases à base de fer forme le deuxième sous-ensemble avec principalement de la Goethite $FeO(OH)$ à 8.2 %-massique, de l'hématite Fe_2O_3 à 4.8 %-massique ainsi qu'une très faible quantité de la Ferrite (fer-alpha) à 0.6 %-massique ;
- Deux phases de formule TiO_2 sont également présentes en moindre quantité : L'Anatase avec 1.9 %-massique et la Rutile avec 0.3 %-massique.

d. Echantillon de la carrière de Koubri :

- la Kaolinite $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ qui est la phase majoritaire avec 33.3%-massique et le Quartz avec 32.6%-massique ;
- Les phases à base de fer forment le deuxième sous-ensemble de phase avec principalement de la Goethite $FeO(OH)$ à 21.1%-massique, de l'hématite Fe_2O_3 à 7.3%-massique ainsi que de la Ferrite (fer-alpha) à 3.0%-massique ;
- La phase Anatase TiO_2 est également présente avec 2.7%-massique.

e. Echantillon de la carrière de Balkouin :

- la Kaolinite $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ qui est la phase majoritaire avec 57.9%-massique et le Quartz avec 21.8%-massique ;
- Les phases à base de fer forme le deuxième sous-ensemble de phase avec principalement de la Goethite $FeO(OH)$ à 10.8%-massique, de l'hématite Fe_2O_3 à 7.3%-massique ainsi que de la Ferrite (fer-alpha) à 9.4%-massique ;
- Les autres phases n'ont pas été identifiées à cette profondeur.

Variation de la composition minéralogique en fonction de la profondeur :

L'étude sur le profil de la carrière de Balkouin a permis de suivre l'évolution de la composition minéralogique en fonction de la profondeur. La figure 2.21 donne les compositions minéralogiques moyennes des différents horizons identifiés sur ce profil. Sur tout le profil, quatre minéraux (Hématite , Goethite , Kaolinite et Quartz) sont omniprésents à des proportions variables d'une couche à l'autre. La classification en minéraux majeurs, mineurs et en trace des horizons identifiés du profil d'observation est présentée dans le tableau 2.3 On remarque que :

- **La cuirasse ferrugineuse** est très riche en fer avec une dominance de la l'hématite (35,9%) sur la goethite (12.8%). Elle est marquée également par une proportion de kaolinite dix fois plus élevée (47.0%) à celle de Quartz (4.4%)

- **L’horizon tacheté** a une fraction importante de Kaolinite (57.9%). Le quartz représente 21%. La teneur en goethite est légèrement supérieure à celle de l’hématite.
- **L’horizon riche en silice**, contrairement à l’horizon riche en Kaolinite, a une teneur très élevée en Quartz (62%) ; le teneur en Kaolinite a subi une forte diminution. Les autres minéraux observés dans l’horizon supérieur sont également présents dans des proportions semblables à l’horizon supérieur ;
- **L’horizon riche en kaolinite** a une fraction importante de quartz (55%) suivi de la Kaolinite (44%). Des traces de rutile ($< 1\%$) sont également observées. Cette couche, dans sa partie supérieure, a une composition minéralogique typique des latérites avec la présence de la goethite (13%) et de l’hématite (6%). Les proportions de quartz et de la kaolinite diminuent vers les couches plus profondes.

Globalement, la tendance de l’évolution des minéraux en fonction de la profondeur est caractérisée par :

- une réduction de la proportion des phases ferrugineuses (Hématite et Goethite) en profondeur, jusqu’à une disparition totale au niveau des sous-jacentes (Saprolite et Bedrock) ;
- la cuirasse ferrugineuse a la plus forte teneur en Hématite et Goethite ;
- une augmentation de la teneur en Kaolinite au fur et à mesure que l’on s’approche de la Saprolite.
- l’horizon tacheté a la plus forte teneur en kaolinite, suivie de l’horizon riche en argile.

Tableau 2.3 – Minéralogie en fonction des couches du profil de la figure 2.14

Horizon	Minéraux majeurs (> 10%)	Minéraux majeurs (1 – 10%)	Minéraux -trace (< 1%)
Cuirasse ferrugineuse	Hématite, Kaolinite, Goethite .	quartz	Dioxyde de Titane, Apatite
Horizon tacheté	Kaolinite, Quartz, Goethite	Hématite	Rutile, Apatite, phase Cu-Sn
Horizon riche en Argile	Kaolinite, Quartz, Goethite	Hématite	Anatase, Apatite, phase Cu-Sn
Horizon riche en Kaolinite	Kaolinite, Quartz, Goethite	Hématite	Rutile, Anatase, Zircon
Saprolite	Quartz Albite, Nontro-nite		Dioxyde de Titane
Bedrock	Plagioclase, Quartz	Orthoclase, Biotite, Hornblende	Mg- Titane, Zircon, Apatite, Rutile, Epidote, All-nite, oxyde-Ferrique

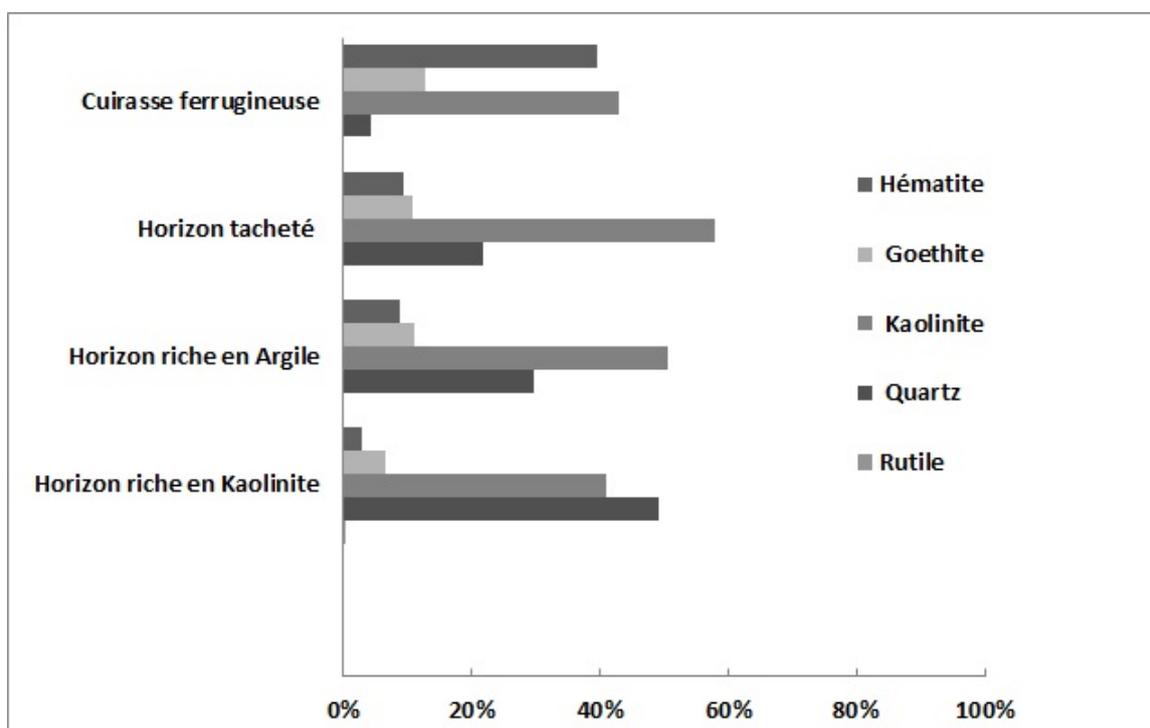


FIGURE 2.21 – Minéralogie en fonction de la profondeur de prélèvement- Balkouin

2.6 Conclusion

La ville de Dano repose sur un substratum identifié comme des andésites schisteuses. Des roches acides d'âge Précambrien (granites, migmatiques, gneiss) et d'origine volcanique, pyroclastiques et volcano-sédimentaires constituent les principales formations de ce site. Les observations du terrain ont permis de déceler des contacts directs entre la latérite et les schistes blancs. On note également la présence de quartz hyalin et des roches vertes microlitiques.

Le triangle « Ouagadougou-Koubri-Tigaldégué » repose sur un socle cristallin et cristallogénique. C'est un vaste plateau de latérite marqué par des affleurements cuirassés. Les quelques roches identifiées dans cette zone correspondent à des granodiorites. En profondeur, les latérites reposent sur de la saprolite, riche en quartz et en kaolinite, et renferment souvent des terres rares.

Les profils d'observation des carrières d'exploitation indiquent que les formations latérites sont composées du haut vers bas :

- des cuirasses ferrugineuses marquées par une oxydation prononcée allant du noir au rouge ocre et d'une dureté élevée qui diminue vers le bas. Elles couvrent localement ou sur une grande surface les horizons latéritiques ;
- de différentes couches de latérites indurées de couleur allant du rouge tacheté au rouge

jaunâtre et qui s'éclaircit en profondeur pour tendre une couleur jaunâtre. Les teneurs en hématite et en goethite diminuent au profit de la Kaolinite et de la silice et par conséquent leur dureté diminue avec cette augmentation de la teneur en argile ;

- des phases minérales rares tels que l'Anatase, l'Apatite, les phase Cu-Sn, Rutile, Zircon, Orthoclase, Biotite, Mg-Hornblende et quelques terres rares.

Cette composition variable des latérites en fonction de la profondeur a-t-elle un impact sur la résistance des blocs extraits des carrières ? Quelles sont les indicateurs traditionnels de qualité ou de résistance à prendre en compte dans le choix des carrières d'exploitation ? Nous essayerons de discuter ces questions dans le chapitre suivant.

Étude expérimentale des blocs de latérite taillés

Sommaire

3.1	Introduction	65
3.2	Définition des paramètres expérimentaux et techniques de mesure	67
3.2.1	Les propriétés physiques et hydriques	67
3.2.2	Les propriétés mécaniques	74
3.2.3	Les propriétés thermiques	89
3.3	Protocoles d'étude expérimentale	97
3.3.1	Les essais physiques et hydriques	97
3.3.2	Les essais mécaniques	100
3.3.3	Les essais thermiques	105
3.4	Résultats et discussions	111
3.4.1	Les propriétés physiques et hydriques	111
3.4.2	Les caractéristiques mécaniques	114
3.4.3	Les propriétés thermiques	133
3.5	Conclusion	138

3.1 Introduction

Pour l'utilisation d'une roche comme élément de maçonnerie, il est nécessaire de quantifier :

- certains paramètres physiques et mécaniques qui entrent directement dans l'évaluation de sa qualité, le calcul et le dimensionnement d'ouvrages, et l'estimation de son vieillissement ou de sa dégradation ;
- les propriétés thermiques qui permettront d'évaluer le confort thermique des ouvrages construits avec ces éléments de maçonnerie.

Le choix des paramètres doit être guidé par la méthode de calcul utilisée dans le dimensionnement des ouvrages mais, surtout par le coût des essais et leur adaptation aux contextes locaux pour reproduire les essais en grand nombre de façon à obtenir les résultats qui tiennent compte de la dispersion, caractéristique des résultats de tests effectués sur les roches. Par exemple

en Europe, les normes Eurocodes sont basées sur une approche semi-probabiliste de sécurité des constructions (méthode des coefficients partiels) avec des méthodes de dimensionnement fondées sur le concept des états limites (états limites de service et états limites ultimes). Elles s'appliquent à différents matériaux (béton, acier, bois, maçonnerie, aluminium ...) et à différents types de construction (bâtiments, ponts, silos, réservoirs ...)

Les essais réalisables sur les matériaux de construction pour évaluer leur performance et leur durabilité sont nombreux et variés. On peut les résumer en trois grandes familles :

- les essais d'identification pétrophysique qui renseignent sur la nature et l'état du matériau ;
- les essais de résistance et de sensibilité qui renseignent sur le comportement du matériau ;
- les essais thermiques qui renseignent la capacité du matériau à conduire la chaleur (matériau isolant ou conducteur).

D'une part, les résultats de ces essais sont souvent liés aux propriétés intrinsèques des roches utilisées comme matériaux de construction et les valeurs obtenues par deux essais différents se corrélaient parfois étroitement (Panet *et al.*, 1976).

D'autre part, la dispersion des résultats des essais sur les roches naturelles est toujours importante compte tenu de l'hétérogénéité des constituants et des défauts de structure.

Dans ce chapitre, il est question de faire le choix des paramètres physiques, mécaniques et thermiques qui seront mesurés pour les BLT des carrières présentées dans le chapitre précédent. Ce choix tient donc compte du contexte local de production et de mise en œuvre, mais aussi des équipements disponibles dans les deux laboratoires d'étude.

La première partie de ce chapitre sera consacrée à la définition des paramètres physique, mécanique et thermophysique des matériaux rocheux et à la bibliographie sur les techniques permettant de les quantifier.

La deuxième partie présente les protocoles expérimentaux mis en œuvre pour mesurer les paramètres choisis en fonction des équipements disponibles dans nos deux laboratoires d'étude (préparation des échantillons et protocoles d'essais).

La troisième partie présente les résultats obtenus, les interprétations et les discussions engagées au sens de l'utilisation du matériau dans la maçonnerie. Ces discussions permettront de définir les caractéristiques mécaniques des BLT en suivant la démarche de l'Eurocode 6.

3.2 Définition des paramètres expérimentaux et techniques de mesure

De nombreuses roches sont utilisées comme pierre de construction (tuffeau, calcaire, grès, granite, ...). Si la caractérisation géologique et minéralogique est indispensable, elle doit être complétée par des essais qui permettent de rendre compte des qualités de résistance aux efforts et de durabilité aux intempéries que doivent assurer les constructions.

Pour répondre à ces exigences, les concepts et les normes de calcul qui accompagnent les constructions, définissent certains paramètres qui permettent d'évaluer les propriétés des matériaux rocheux utilisés comme éléments de maçonnerie. Ces propriétés sont ici regroupées en trois grandes familles : les propriétés physiques et hydriques, les propriétés mécaniques, les propriétés thermiques.

3.2.1 Les propriétés physiques et hydriques

Dans une roche, la matière minérale forme un squelette solide qui ne remplit pas tout l'espace, et le complément, les vides, forment le réseau poreux. La forme des vides, leur taille, leur répartition, leur connectivité ou au contraire l'isolement de certains, influent sur le comportement hydromécanique du matériau. Les masses volumiques de la matière minérale, et les masses volumiques apparentes à l'état sec, humide et saturé, renseignent sur la porosité existante dans un matériau.

3.2.1.1 Propriétés physiques

Les roches sont constituées d'agrégats naturels (minéraux, verres, substances minérales ou organiques) définissant des vides remplis de gaz ou de liquide. Ce sont donc des matériaux poreux avec des caractéristiques physiques variables. La masse volumique et la porosité sont les caractéristiques physiques les plus pertinentes des roches pour décrire leurs comportements mécanique ou thermique.

Les masses et/ou poids volumiques :

On peut assimiler la roche latéritique, tout comme les autres matériaux poreux, au schéma de la figure 3.1. Cette représentation de la roche n'est académiquement pour distinguer les différentes phases contenue dans la roche (phases solide, liquide et gazeuse). En réalité, les trois phases sont intimement liées. Les différentes masses volumiques évaluées dans ce travail sont définies également.

Tout comme les masses volumiques, on distingue les poids volumiques apparent, sec, et absolu ou spécifique. Ils sont notés respectivement :

$$- \gamma = g \cdot \rho;$$

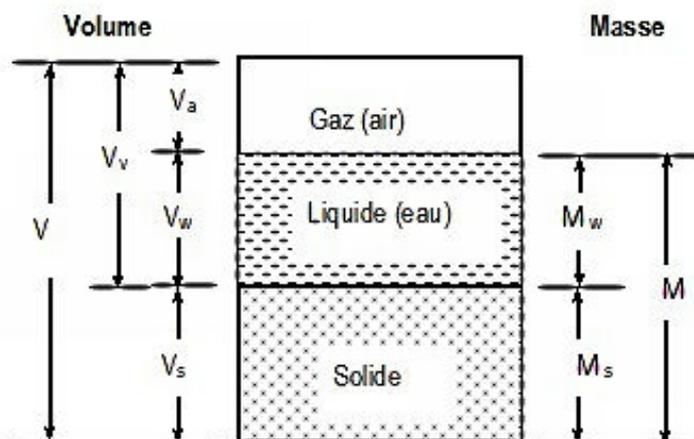


FIGURE 3.1 – Diagramme de phases d'un milieu poreux

V : volume apparent total	$[m^3]$	M : masse totale	$[kg]$
V_s : volume solide	$[m^3]$	M_s : masse de solide	$[kg]$
V_w : volume liquide	$[m^3]$	M_w : masse de liquide	$[kg]$
V_g : volume gazeux	$[m^3]$	M_g : masse de gaz	$[kg]$
V_v : volume des pores	$[m^3]$		
Masse totale :	$M = M_s + M_w + M_g$		$[kg]$
Masse de gaz :	M_g est considérée comme négligeable		
Volume apparent :	$V = V_s + V_w + V_g$		$[m^3]$
Volume des pores :	$V_v = V_w + V_g$		$[m^3]$
Masse volumique apparente :	$\rho = \frac{M}{V}$		$[kg/m^3]$
Masse volumique sèche :	$\rho_{sec} = \frac{M_s}{V}$		$[kg/m^3]$
Masse volumique absolue :	$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$		$[kg/m^3]$

$$- \gamma_{sec} = g \cdot \rho_{sec};$$

$$- \gamma_s = g \cdot \rho_s.$$

Il existe plusieurs méthodes normalisées pour la détermination des masses et des poids volumiques. On peut citer entre autres :

- la norme française NF P94-064 Sols : reconnaissance et essais - Masse volumique sèche d'un élément de roche - Méthode par pesée hydrostatique ;
- la norme française NF EN 1936 Méthodes d'essai des pierres naturelles - Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouverte et totale ;
- la série des normes américaines similaires à celle de normes européennes.

Pour un matériau, très souvent, on parle de la densité (d_s) qui est le rapport entre sa masse

et celle du même volume d'eau. La densité correspond donc approximativement à la masse volumique exprimée en g/cm^3 .

Les latérites présentent une densité variable avec des constituants minéraux très denses comme le fer. Beaucoup de minéraux ont une densité qui se situe autour de 2,7, soit 2,7 fois plus lourd qu'un volume égal d'eau. Mais certains ont une densité relativement faible, comme le sel qui a une densité de $2,1g/cm^3$; d'autres se situent à l'autre extrême, comme la galène (sulfure de plomb) avec une densité de $7,5g/cm^3$ et l'or dont la densité est de $19,3g/cm^3$.

Les porosités :

La porosité totale n d'une roche est, par définition, le rapport du volume de l'espace des vides (air + fluide) au volume total de l'échantillon :

$$n = \frac{V_v}{V} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Du point de vue qualitatif, il est important de faire une distinction entre la porosité intragranulaire (vide dans les grains solides) et la porosité intergranulaire (vides entre les grains et au sein de la phase de liaison). Dans le cas des latérites, les observations microscopiques (chapitre 2) montrent l'existence de ces deux types de vide. Les vides intergranulaires résultent des joints entre les grains et au manque de cimentation.

Du point de vue quantitatif, nous distinguerons plusieurs types de porosité selon la nature des pores (pores canaux, pores circuits, poches fermées, micropores ou fissures) :

- La porosité occluse qui représente l'espace poreux totalement déconnecté du réseau poreux et non accessible aux fluides mouillants même sous pression. Dans les latérites, la porosité occluse, bien qu'elle soit faible joue un rôle dans la résistance de la roche et dans l'évolution de la dégradation si elle devient connectée.
- La porosité piégée qui représente les pores dont les tailles d'accès sont réduites par rapport à la dimension totale des pores. La circulation des fluides mouillants y est difficile. Ainsi, la roche ne se sature pas en fluide lors de l'imbibition du milieu ou ne restitue pas les fluides lors de drainage.
- La porosité interconnectée : les macropores peuvent être connectés par de petits pores capillaires de forme globalement cylindrique augmentant le volume des fluides absorbés par capillarité, ou alors ils se connectent directement les uns avec les autres (macropore avec un fort degré de connexion, et qui induit une réduction du volume de fluide absorbé par capillarité).
- La porosité libre qui représente la fraction de la porosité qui se sature de fluide mouillant

et, lors de la désaturation du milieu, la quantité du fluide absorbé est totalement restituée.

- La porosité des fissures due à l'hétérogénéité des propriétés physiques des minéraux qui constituent les roches. Elle joue un rôle important dans le comportement mécanique des roches.

Plusieurs études ont montré que la porosité constitue un facteur essentiel dans l'estimation de la résistance et la dégradation des roches. (Benavente *et al.*, 2004; Fitzner *et al.*, 2000). La taille des pores et la morphologie du réseau poreux sont les paramètres essentiels qui influent la cinétique de cette dégradation. En effet un réseau de micropores interconnectés facilite les transferts des fluides par capillarité et rend ainsi la roche fragile.

Il existe plusieurs techniques de mesure de la porosité : pesée, lame mince et traitement d'image associée, porosité au mercure, courbe caractéristique de rétention d'eau par absorption. Cette dernière technique permet en plus de définir la distribution de la taille des pores. Le principe de la porosimétrie au mercure est basé sur l'injection sous pression (jusqu'à 205 MPa) de mercure (liquide non mouillant) dans un matériau poreux dégazé (vide de 0,0035 MPa).

La mesure expérimentale consiste à déterminer la quantité de mercure disparue suite à la pénétration dans les pores en fonction de la pression appliquée. On obtient alors la courbe de répartition du volume poreux en taille de pores. Le volume de mercure injecté correspond au volume cumulé des pores accessibles au mercure à une pression donnée. La pression appliquée P est reliée au rayon d'accès aux pores r_c grâce à formule de Washburn déduite de la loi de Laplace :

$$P = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{r_c} \quad (3.2)$$

où σ est la tension superficielle du mercure ($\sigma = 485.10^{-3} N/m$ à $25^\circ C$) et θ l'angle de contact du ménisque solide-mercure ($\theta = 130^\circ C > 90^\circ C$ car le mercure est un fluide non mouillant).

Lors des essais d'injection de mercure, on procède par incrément de pression, et à chaque incrément la quantité de mercure introduite est mesurée. On peut donc explorer les différentes classes de pores présents dans le matériau. En effet, en faisant une hypothèse sur la forme des pores, le volume de mercure injecté correspond à celui des pores ayant un diamètre donné, et ainsi une distribution porale caractérisant le matériau est obtenue. L'exploitation des mesures d'intrusion du mercure repose sur un modèle de pores cylindriques.

Ce modèle pour le calcul des rayons équivalents de pores n'est bien sûr pas totalement représentatif des matériaux naturels tels que les roches mais, il forme une représentation conventionnelle de la structure poreuse. Le réseau poreux d'une roche présente une géométrie complexe, et la porosité au mercure, avec l'hypothèse simplifiée de pores cylindriques, donne donc une mesure du rayon d'accès au pore, qui n'est pas nécessairement égale au rayon du pore lui-même. C'est pourquoi cette technique ne semble pas rigoureusement quantitative mais, elle

est très utile pour la comparaison de différents matériaux.

Aussi la principale difficulté d'interprétation de la porosimétrie au mercure est l'effet "bouteille d'encre" qui a principalement pour résultat de surestimer les petits pores au détriment des plus grands (Renault, 1988; Fitzner, 1990). La figure 3.2 explique ce phénomène : si pour arriver dans un pore de rayon R_2 , le mercure doit passer par un pore de rayon r inférieur à R_2 , la pression appliquée au mercure pour le remplissage du pore de rayon R_2 sera R_r et non R_{r2} ($R_r > R_{r2}$) et donc le volume du pore de rayon R_2 sera attribué au pore de rayon $r < R_2$. Le volume poreux envahi par le mercure à une pression donnée, représente donc la fraction de l'espace poral, composée de pores de diamètres variables, uniquement accessibles par des étranglements de rayons donnés par la loi de Laplace.

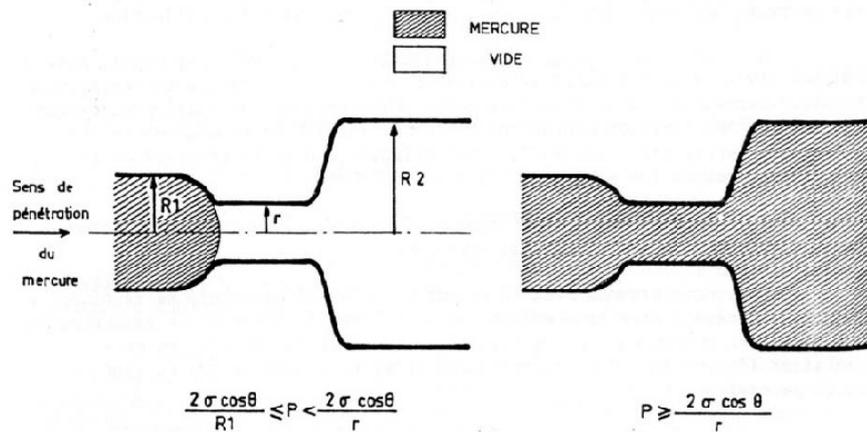


FIGURE 3.2 – Schéma explicatif de l'effet "bouteille d'encre" d'après (Bousquié, 1979)

Une autre limitation de cette technique est liée à la pression maximale d'injection. En effet, cette pression maximale définit, selon la loi de Laplace, le rayon minimal de pore que l'on peut observer.

Cette pression peut s'avérer insuffisante dans le cas d'une roche renfermant une infraporosité. Et dans ce cas, la porosité totale du matériau, correspondant au volume maximal d'intrusion du mercure, sera sous-évaluée car une partie du volume poreux n'est alors pas accessible.

Cependant, l'étude de la distribution porale avec le porosimètre au mercure a permis de classer les pores en 3 grandes familles

- microporosité : relatif aux pores dont le diamètre n'excède pas les 2 nanomètres ;
- mésoporosité : relatif aux pores dont le diamètre est compris entre 2 et 50 nanomètres ;
- macroporosité : relatif aux pores dont le diamètre est supérieur à 50 nanomètres.

3.2.1.2 Propriétés et transferts hydriques

A cause de leur porosité, les matériaux rocheux ont la capacité d'échanger de l'humidité ou de l'eau avec le milieu environnant. Cet échange, lorsqu'il est cyclique ou prolongé dans le temps, entraîne la détérioration des propriétés du matériau. Cette détérioration se manifeste par la modification de l'aspect physique et de la cohérence des forces de liaison, la perte de dimensions ou le changement du comportement chimique du matériau. Tous ces processus entraînent la perte de la résistance mécanique du matériau, voire sa détérioration complète. Cette détérioration est une loi de la nature (cycle de vie du matériau) et seul son ralentissement peut être envisagé par des interventions efficaces (Feilden, 2003).

La résistance de la pierre n'est donc pas seulement tributaire de sa structure interne et de sa composition pétrographique, mais elle dépend aussi de l'environnement auquel elle est exposée. L'exposition à l'eau fait partie des facteurs qui influent considérablement sur la résistance et la dégradation des matériaux poreux.

Une augmentation de l'humidité au voisinage du matériau poreux entraîne une augmentation de la masse apparente de celui-ci. Cette augmentation de la masse apparente est due à la fixation des molécules d'eau : c'est le phénomène d'absorption. Inversement, une diminution de l'humidité de l'air environnant entraîne une diminution de la masse apparente : c'est le phénomène de désorption. Ces deux phénomènes caractérisent la sensibilité à l'eau d'un matériau de construction. Ils sont d'autant plus importants qu'ils modifient considérablement les propriétés physiques, mécaniques mais aussi thermiques du matériau.

On distingue trois grandes catégories d'eau dans un matériau poreux :

- l'eau absorbée : qui se trouve dans les vides entre les particules de matière solide ;
- l'eau adsorbée : qui se trouve à la surface des particules solides. Plus les particules sont petites, plus cette eau joue un rôle important. La première couche moléculaire est orientée et présente des propriétés voisines de celles de l'état solide ;
- l'eau chimiquement liée : qui fait partie des particules solides.

Ces distinctions ne sont pas toujours absolument claires.

Pour caractériser la sensibilité à l'eau des géomatériaux on évalue les paramètres suivants :

La teneur en eau naturelle : C'est la quantité d'eau réelle contenue dans le matériau à un temps donné. Elle est déterminée par la mesure de masse d'un échantillon avant et après un étuvage à 105 °C pendant 24 heures. La formule utilisée pour son évaluation est la suivante :

$$\omega = \frac{M - M_s}{M_s} [\%] \quad (3.3)$$

L'absorption de l'eau par immersion et teneur en eau de saturation : L'absorption de l'eau par un matériau est sa capacité de conserver de l'eau quand il est immergé dans l'eau à une température de 20,5 °C et à la pression atmosphérique. A cette condition, l'eau peut pénétrer dans la plupart des vides interstitiels du matériau. Elle évolue en fonction du temps d'immersion du matériau plus ou moins rapidement avant de se stabiliser. Si la porosité du matériau est importante, l'absorption de l'eau est grande. On peut déterminer le degré d'absorption de deux manières :

- L'absorption volumique calculée à partir du volume apparent de l'échantillon : elle représente la masse d'eau retenue dans le volume apparent du matériau :

$$H_v = \frac{M_w}{V} [\%] \quad (3.4)$$

- L'absorption pondérale calculée à partir la masse sèche de l'échantillon : Elle représente le pourcentage de la masse d'eau retenue par rapport à la masse sèche de l'échantillon.

$$H_p = \frac{M_w}{M_s} [\%] \quad (3.5)$$

Avec M_w = masse d'eau absorbée par l'échantillon et M_s = masse des grains solides.

Ces paramètres sont suivis à des intervalles de temps réguliers jusqu'à la saturation pour tracer la courbe de saturation du matériau.

La teneur de saturation est la teneur en eau du matériau lorsque tous les vides accessibles à l'eau sont saturés. Elle se calcule par la formule suivante à la fin de la phase de saturation ; c'est à dire lorsque la masse de l'échantillon immergé ne varie plus.

$$\omega_{sat} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} [\%] \quad (3.6)$$

Le degré de saturation : Lorsque tous les vides d'un corps sont remplis d'eau, on dit qu'il est saturé. Le degré de saturation d'un matériau, noté S_r , est le rapport du volume de vides remplis d'eau au volume total de vides. Il est donc égal à l'absorption volumique maximale du matériau. Il joue un grand rôle dans les phénomènes de destruction des matériaux poreux par le gel.

La mesure du degré de la saturation S_r est déterminée par la formule suivante :

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (3.7)$$

où V_w est la quantité d'eau absorbée pendant la phase d'immersion et V_v le volume de vides défini dans le paragraphe précédent.

L'absorption de l'eau par remontée capillaire : Cette caractéristique reflète la quantité d'eau pouvant être absorbée par la pierre lorsqu'une seule face de l'élément est en contact avec

de l'eau. En maçonnerie, elle correspond à l'absorption de l'humidité par la maçonnerie. Elle s'exprime par le coefficient de capillarité C ($g/(m^2 \cdot s^{1/2})$).

De par leur degré de porosité et perméabilité, les matériaux permettent une ascension de l'eau par les réseaux capillaires et le dépôt de sels hygroscopiques. Une remontée capillaire se caractérise par une migration permanente d'eau dans la maçonnerie depuis les fondations. Elle s'observe en bas de tout type de mur (cloisons, façades, murs porteurs, dallages...), sur les sols intérieurs et extérieurs, et sur l'ensemble des bâtiments. Elle se manifeste par la prolifération de salpêtres, de champignons et moisissures sur les murs de maçonnerie.

Le phénomène de la remontée capillaire a fait l'objet de nombreux modèles sur des matériaux à structure poreuse. [Gummerson et al. \(1980\)](#) ont par exemple proposé, pour les matériaux, une relation linéaire entre le volume cumulé d'eau absorbée par unité de surface d'un échantillon prismatique et la racine carrée du temps. Ce modèle est exprimé par l'équation :

$$i = S \cdot \sqrt{t} \quad (3.8)$$

où i est le volume cumulé d'eau absorbée par unité de la surface soumise à la capillarité de l'échantillon, t , le temps et S l'absorptivité du matériau.

[Hall \(1989\)](#) a proposé, pour le béton, une relation similaire en remplaçant la variable i par la masse d'eau absorbée.

Par contre, [Shonlin et Hilsdorf \(1989\)](#) proposent de relier la quantité d'eau absorbée au temps par une expression de la forme :

$$V_w = V_1 \cdot \sqrt{t} \quad (3.9)$$

où V_w est le volume cumulé d'eau absorbée pendant le temps t , et V_1 , le volume d'eau absorbée en une heure.

Pour la terre cuite, [Grandet et Thenoz \(1973\)](#), proposent une relation du type :

$$V_w = k_1 \cdot r^{\frac{5}{2}} \sqrt{t} \quad (3.10)$$

où k_1 est un coefficient qui dépend de la viscosité, de la tension superficielle et de l'angle de raccordement du liquide interstitiel et r , le rayon moyen des capillaires.

Ces relations permettent de déduire que la quantité d'eau absorbée par un matériau poreux est fortement conditionnée par la répartition porométrique dans le domaine des macropores.

3.2.2 Les propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques sont généralement mesurées à partir des courbes contrainte-déformation (Exemple de la figure 3.3). Elles présentent une allure classique comme celle exposée

par de nombreux auteurs (Jaeger et Cook, 1969; Panet *et al.*, 1976). On distingue quatre phases dans le comportement mécanique lors d'un essai de compression :

- la phase de serrage où la concavité de la courbe contrainte-déformation est dirigée vers le haut (la compressibilité axiale diminue), correspondant microscopiquement à la fermeture des fissures préexistantes ;
- la phase pseudo-élastique où la courbe contrainte- déformation est linéaire ;
- la phase non-linéaire pré-pic, manifestation macroscopique de la coalescence de fissures qui formeront les futures fractures macroscopiques ;
- la phase post-pic, phase de propagation de la fracturation macroscopique.

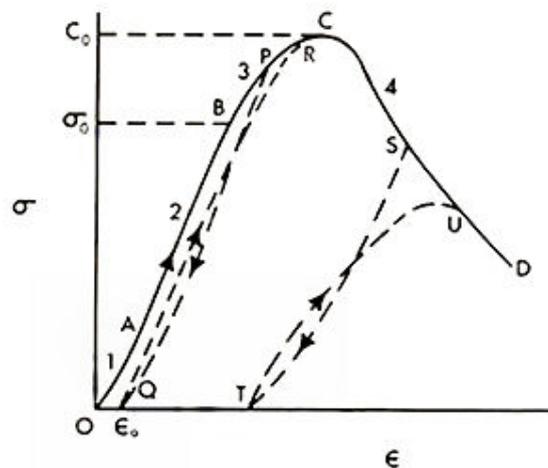


FIGURE 3.3 – Courbe contrainte-déformation des roches (Jaeger et Cook, 1969)

Les propriétés mécaniques d'une roche peuvent être classées en deux catégories :

- les résistances à des sollicitations mécaniques évaluées par la résistance à la traction, à la flexion et à la compression uniaxiale ou triaxiale, qui définissent les seuils ou critères de rupture de la roche selon le plan de sollicitation ;
- les modules de déformation qui traduisent la déformabilité des matériaux sous l'effet des sollicitations mécaniques, physiques ou thermiques. Ils peuvent être évalués, pour le cas des matériaux de construction, suivant plusieurs méthodes. Ils sont qualifiés de modules statiques ou dynamiques s'ils sont évalués respectivement par des essais destructifs ou dynamiques.

3.2.2.1 Les résistances aux sollicitations mécaniques

La résistance d'une roche dépend de celle des grains solides (mono ou pluricristallins) qui la constituent, des forces de liaison intergranulaire et des discontinuités (vides intergranulaires, microfissures et fissures). Elle est évaluée par différents paramètres selon le type d'essai pratiqué.

on distingue :

La résistance à la compression uniaxiale :

La résistance à la compression uniaxiale (R_c ou σ_c) est la contrainte ultime d'un échantillon de roche sous chargement uniaxial. Elle est déterminée par le rapport de la force ultime d'écrasement F_c et la section S soumise à la force :

$$R_c = \sigma_c = \frac{F_c}{S} \quad (3.11)$$

L'essai de compression uniaxiale ou de compression simple permet de déterminer la valeur de σ_c . Il consiste à comprimer un échantillon de roche de forme cylindrique entre deux plateaux parallèles d'une presse rigide. Les essais se font généralement par lots de 5 échantillons d'une roche homogène pour obtenir une bonne moyenne. Dans certains cas, et selon la taille de l'échantillon de roche disponible, les lots peuvent être plus grands ou plus petits. Selon les recommandations de la Société Internationale de Mécanique des Roches (I.S.R.M.), l'échantillon doit présenter de préférence une elongation (rapport hauteur sur diamètre) de 2 à 2,5. La dimension usuelle dans le laboratoire est de 80 mm de hauteur par 40 mm de diamètre. Dans certains cas (manque de matériaux, qualité de la roche, . . .) les échantillons peuvent avoir des dimensions inférieures pour pouvoir réaliser les essais. Au cours de l'essai, un enregistreur permet de relever l'évolution de la contrainte axiale grâce à un capteur de force ou de pression, ainsi que celle des déformations, soit par des capteurs de déplacement, soit par des jauges de déformation. Cet enregistrement permet de tracer la courbe contrainte-déformation (figure 3.4) et de déterminer différentes caractéristiques mécaniques selon le besoin : la résistance à la compression uniaxiale σ_c , la limite élastique σ_e , le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν .

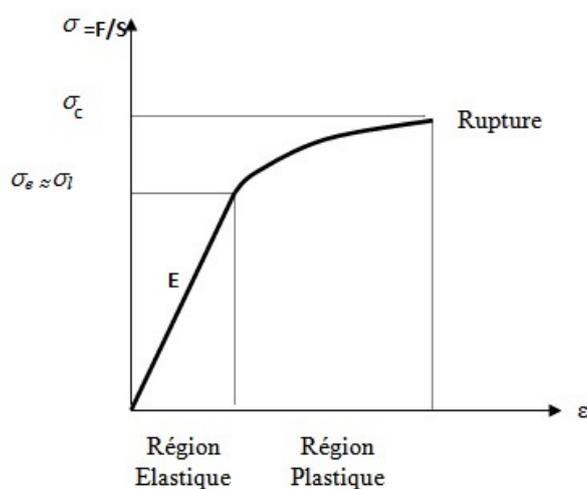


FIGURE 3.4 – Exemple de courbe contrainte-déformation en compression simple

Ces valeurs constituent une information très utile et parfois suffisante sur les performances mécaniques escomptées de la roche. La résistance à la compression uniaxiale est utilisée en dimensionnement, analyse et modélisation des ouvrages en maçonnerie.

Selon la valeur de σ_c , la Société Internationale de Mécanique des Roches (I.S.R.M.) propose par exemple une classification des roches en fonction de leur résistance à la compression uniaxiale (Tableau 1.1). Les roches qui ont des résistances à la compression très faibles (< 6 MPa) sont qualifiées de roches tendres. Les calcaires, les grès, les dolomites, truffs, les igniminites, . . . , appartiennent à cette famille.

Tableau 3.1 – Qualification de la résistance d’une roche en fonction de la valeur de σ_c (USRM)

Résistance à la compression uniaxiale σ_c (MPa)	Terme descriptif
$\sigma_c > 200$	Très élevée
$60 < \sigma_c < 200$	Elevée
$20 < \sigma_c < 60$	Moyenne
$6 < \sigma_c < 20$	Faible
$\sigma_c < 6$	Très faible

La résistance à la compression est fortement liée aux propriétés physiques, telles que la porosité, les microfissures, la masse volumique, la teneur en eau . . . La présence des vides, qu’il s’agisse des microfissures ou des pores, réduit considérablement la résistance de la roche.

Des études sur des roches carbonatées (calcaire et dolomite) et d’autres types de pierres ont permis de mettre en évidence une relation exponentielle entre la porosité et la résistance à la compression avec des corrélations de l’ordre de 0.8 (Smorodinov, cité par [Shakoor et Brown \(1996\)](#)) de type :

$$\sigma_c = a. \exp^{b.n} \quad (3.12)$$

avec a, et b des constantes variables selon la nature de la roche. Une telle relation fut également établie pour les calcaires suite à des études réalisées sur la pierre calcaire de la Vallée du Nil (Sayed et al 1999).

[Ezzdine \(1999\)](#) a par contre établi, pour les blocs de calcaire utilisés dans la maçonnerie de la citadelle de Blaye, des relations linéaires entre la masse volumique et la résistance à la compression d’une part, entre les porosités (ouverte et totale) et la résistance à la compression d’autre part, avec des corrélations de l’ordre de 0.8.

L’existence des surfaces de discontinuité dans les roches est aussi un facteur qui influe sur leur comportement mécanique. La nature, la forme et la densité des discontinuités sont variables dans une roche rendant difficile de relier leur estimation aux paramètres mécaniques. Cependant, [Panet et al. \(1976\)](#) ont défini des constantes de raideur normale K_n et tangentielle K_t qui relient

l'épaisseur de la discontinuité (e) à la résistance normale de compression (σ_n) ou à la résistance de cisaillement (σ_t) par les relations suivantes :

$$\sigma_n = K_n e \quad (3.13)$$

$$\sigma_t = K_t e \quad (3.14)$$

Ces constantes de raideurs sont définies comment étant le rapport de l'accroissement de la contrainte normale ou tangentielle par unité d'accroissement de l'épaisseur de la discontinuité dans la direction de la contrainte normale ou tangentielle. La détermination de ces constantes est rendue complexe par la difficulté à déterminer la variation de l'épaisseur des discontinuités. Pour ces raisons, elles sont souvent assimilées au module de Young et au module de cisaillement.

La résistance à la traction :

La résistance à la traction des roches est un critère de qualité indiscutable. Dans un état de confinement faible, les roches ont une résistance à la traction nettement plus faible qu'à la compression. La résistance à la traction permet donc de mettre en évidence le point faible de la roche. La résistance à la traction des roches est en général faible, la rupture est brutale et est obtenue pour des faibles déformations. Les modèles développés pour sa détermination sont donc basés sur les théories de la rupture fragile développées par Griffith en étudiant la rupture du verre (Morgan *et al.*, 1965). Griffith a estimé la résistance à la traction des roches fragiles par une valeur limite σ_1^l donnée par la relation :

$$\sigma_1^l = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad (3.15)$$

avec a la largeur d'une fissure et γ une caractéristique du matériau analogue à la tension superficielle des liquides.

Cette valeur correspond au début du développement de la fissuration. Pour une norite, Bieniawski *et al.* (1967) trouvent que $\sigma_1^l \simeq 95\% \sigma_t$.

L'équation précédente a été établie en contrainte plane. En déformation plane elle devient :

$$\sigma_1^l = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi(1-\nu^2)a}} \quad (3.16)$$

Sack (1946) a étendu la théorie de Griffith à trois dimensions en assimilant la fissure à un ellipsoïde de révolution très aplati et propose la formule :

$$\sigma_1^l = \sqrt{\frac{\pi E\gamma}{4(1-\nu^2)a}} \quad (3.17)$$

Cette formule montre que la résistance à la traction est inversement proportionnelle à la racine

carrée de la largeur de fissure. Pour le calcaire, [Tourenq et Denis \(1970\)](#) trouvent une corrélation satisfaisante entre la valeur expérimentale de la résistance à la traction et la formule de Griffith en prenant pour γ une valeur correspondante à celle du calcite ($0.23J/m^2$).

Les deux méthodes le plus souvent utilisées pour mesurer la résistance à la traction des roches sont l'essai brésilien et l'essai de traction directe (figure 3.5 A et B).

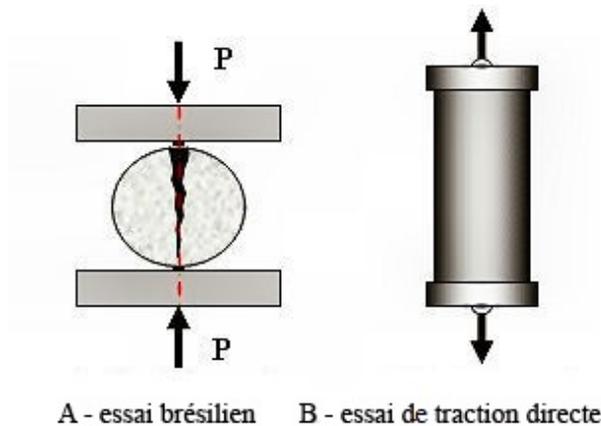


FIGURE 3.5 – Essais de traction

Pour [Tourenq et Denis \(1970\)](#), qui ont pratiqué ces deux essais sur des roches, l'essai brésilien semble donner des résultats peu dispersés car il tient compte des microfissures existantes dans la roche. De ce fait, il caractérise surtout la matrice de la roche avec ses vides intergranulaires. Par contre l'essai de traction directe donne des résultats très dispersés car il réagit essentiellement à l'état de microfissuration de la roche. Le rapport de ces deux essais traduit donc l'état de fissuration de la roche.

L'essai brésilien est le plus adapté aux roches qui ont un comportement élasto-fragile et permet ainsi de déterminer la résistance à la traction des éprouvettes cylindriques par la formule :

$$R_{tb} = \sigma_t = \frac{2P}{\pi \cdot \phi \cdot h} \quad (3.18)$$

avec ϕ le diamètre de l'éprouvette, h la hauteur de l'éprouvette et P la charge de rupture.

La résistance à la traction par essai de flexion est un autre paramètre qui influe sur le choix du matériau. La méthode basée sur l'essai de flexion est surtout utilisée par l'industrie du bâtiment dès lors qu'on sait *a priori* que la résistance à la traction des roches reste très faible comparée à celle à la compression. De ce fait, leur utilisation dans les parties tendues des ouvrages est fortement déconseillée.

L'essai peut se faire en flexion 3 points ou 4 points selon les schémas de la figure 3.6.

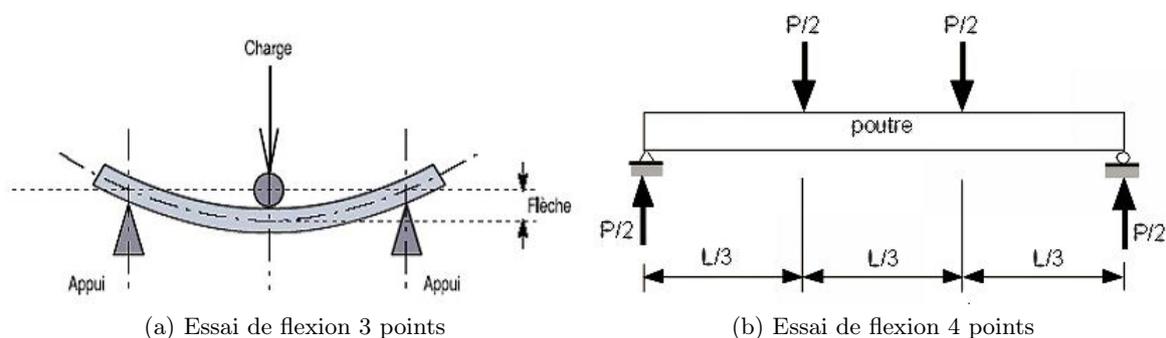


FIGURE 3.6 – Essais de flexion

Les éprouvettes prismatiques de dimensions ($b \times h \times L$) utilisées pour ce type d'essai travaillent en flexion simple avec un moment maximum au centre de l'éprouvette. La valeur de la résistance est donc la contrainte maximale obtenue avec ce moment :

$$\sigma_t = \frac{3F.l}{2b.h^2} \quad (3.19)$$

3.2.2.2 Les modules de déformation

Les modules de déformation peuvent être mesurés par des méthodes statique ou dynamique.

La méthode statique permet de mesurer le module de déformation par les essais destructifs de résistances (compression, traction, ...). Durant ces essais, la variation d'une dimension locale ou globale de l'échantillon est mesurée en fonction des sollicitations appliquées de façon lente. Par exemple, en compression uniaxiale, pour une éprouvette de section S et de hauteur h , ce suivi permet de tracer la courbe contrainte-déformation illustrée par la figure 3.3.

En supposant la théorie de l'élasticité applicable aux roches (milieu isotrope et déformation parfaitement élastique), le module de déformation est évalué par la pente de la partie linéaire de la courbe contrainte-déformation. Il est alors souvent appelé module d'élasticité ou module de Young E . Sur cette partie où la déformation est supposée être élastique, la relation qui le lie à la contrainte σ et à la déformation générée ε est :

$$\sigma = \varepsilon.E \quad (3.20)$$

Ce module pourrait être évalué en suivant les déformations axiale ou transversale, volumique ou locale pour tenir compte de l'hétérogénéité des roches et de la variabilité de ce module en fonction de l'échelle. La figure 3.7 ci-dessous est un exemple de ce type d'essais réalisé sur les

roches par Panet *et al.* (1976).



Figure a : Position des jauges

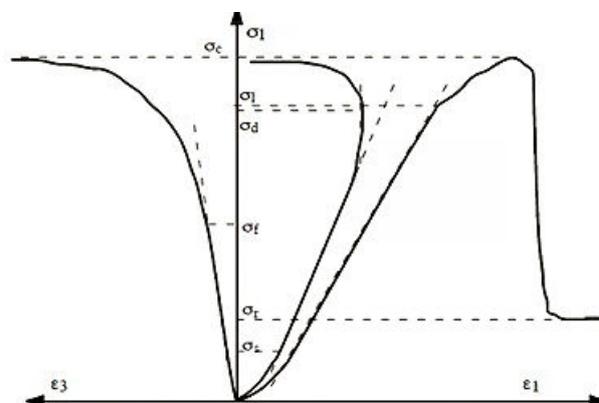


Figure b : Courbe contrainte- déformation axiale transversale et volumique

FIGURE 3.7 – Mesure des déformations axiale, transversale et volumique (Panet *et al.*, 1976)

L'isotropie est difficilement admissible pour une roche. Cependant, si les dimensions de l'échantillon sont suffisamment grandes par rapport à celles des éléments de la roche, et si les déformations sont d'élasticité parfaite, les modules déterminés en utilisant les relations de la théorie de l'élasticité constituent en quelque sorte des modules moyens de l'échantillon considéré.

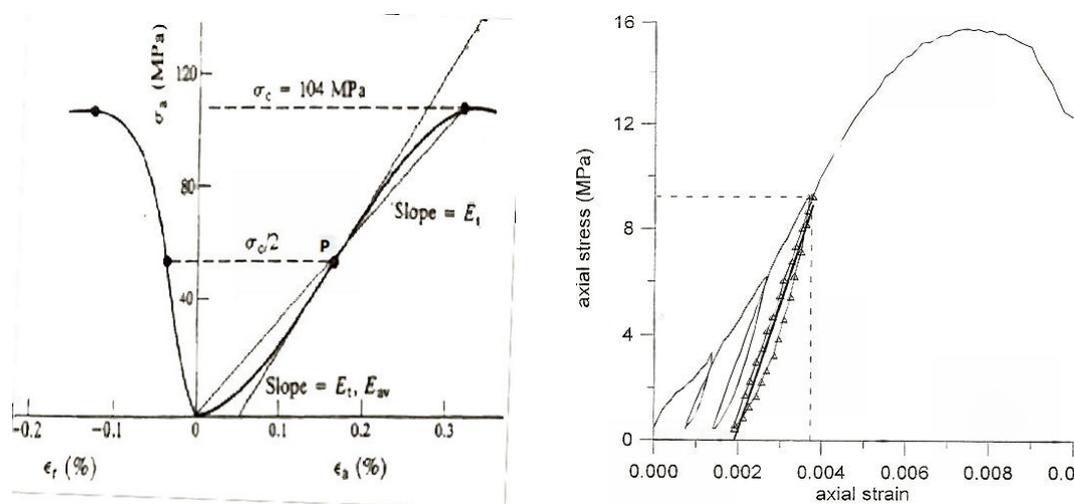
On assimile souvent en mécanique des roches, pour simplifier, la phase de comportement pré-pic à de l'élasticité linéaire. Il est bien connu pourtant que le serrage des pores dans le matériau peut conférer aux courbes de contrainte-déformation un caractère non linéaire plus ou moins accentué (Oulahna, 1996). D'après Goodman (1989), le module d'élasticité ne peut être choisi constant, car sa valeur dépend du chemin de contraintes suivi et de la pression de confinement appliquée (essai triaxial) ou des cycles de chargement-déchargement appliqués à l'échantillon. Ce phénomène est dû au processus de serrage ou de fermetures des pores de la roche. Les courbes efforts-déformations présentent dans ce cas, une concavité tournée vers le haut, la concavité des courbes vers le bas au voisinage de la rupture doit être attribuée à des irréversibilités de type "endommagement" ou "plasticité". Dans le cas d'un comportement élastique non linéaire, le module d'élasticité ne peut donc être défini d'une manière unique.

Le module de Young axial E de l'échantillon varie le long de l'histoire de chargement et n'est pas une constante déterminée de façon unique pour le matériau. Il peut être calculé de différentes manières, la figure 3.8(a) proposée par Brady et Brown (2004) définit :

- Le module de Young tangent E_t qui est défini comme la pente de la tangente de la courbe contrainte axiale / déformation axiale à des pourcentages fixés, généralement à 50% du pic de

résistance.

- Le module de Young moyen E_{av} qui est la pente moyenne de la portion linéaire droite de la courbe contrainte-déformation. Cette pente ne correspond pas à la pente initiale pour les essais à faible confinement mais à la pente après la phase de fermeture des fissures.
- Le module de Young sécant E_s est la pente de la ligne droite OP joignant l'origine O de la courbe contrainte axiale / déformation et un point donné P de la courbe correspondant à un pourcentage fixé de la résistance au pic (Figure 3.8.a). Une autre définition du module de Young sécant E_s est proposé par Sulem *et al.* (1998). Il est évalué à partir des cycles de déchargement-chargeement lors d'un essai de compression (figure 3.8.b)



(a) modules axiaux tangent, sécant et moyen. (Brady et Brown, 2004)

(b) modules élastiques à partir des cycles de charge-décharge. (Sulem *et al.*, 1998)

FIGURE 3.8 – Illustration et évaluation des différents modules élastiques

La méthode dynamique permet de déterminer le module d'élasticité à partir des mesures de la fréquence des oscillations propres d'une verge constituée par un échantillon de roche.

La nécessité de déterminer *in situ* les caractérisations des matériaux rocheux a amené les chercheurs à développer des essais non destructifs. Des méthodes ultrasoniques ont été développées à partir de 1972. Depuis, la vitesse de propagation des ondes ultrasonores est devenue une des principales mesures appliquées pour qualifier l'état des pierres naturelles du point de vue homogénéité et degré d'altération. Mamillan (1991) a appliqué cette méthode non destructive dans le domaine du diagnostic et de la conservation des sculptures en marbre.

L'étude de la propagation des ondes de compression et de cisaillement dans un matériau à l'état sec et à l'état saturé permet d'évaluer les propriétés physiques du matériau telles que la porosité, son état de fissuration et ses propriétés élastiques (module d'Young, coefficient de Poisson) dans le cadre de la modélisation de la propagation des ondes. Pour les roches,

on s'intéresse souvent à la propagation des ondes de compression (Ondes P) et des ondes de cisaillement (Onde S).

Pour une onde P, le mouvement vibratoire a lieu suivant la direction de propagation et affecte le volume de la roche. Pour une onde S, le mouvement vibratoire se propage dans un plan normal à la direction de propagation, elle est plus lente que l'onde P et ne se propage pas dans l'eau. L'onde P et l'onde S sont caractérisées par leurs vitesses V_p et V_s qui représentent respectivement la vitesse primaire et la vitesse secondaire d'après l'ordre de leur réception et de leur atténuation.

De manière générale, la vitesse des ondes P s'exprime simplement en fonction des constantes élastiques et de la densité du milieu sollicité par l'équation (Guéguen et Palciauskas, 1997; Raj et Tayib, 1994; Grolier *et al.*, 1991) :

$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\nu}{\rho}} \quad (3.21)$$

où k est le module d'incompressibilité, ν est le coefficient de Poisson et ρ la masse volumique du milieu.

Ces auteurs ont distingué deux cas :

1. **la longueur d'onde utilisée est comparable à l'échelle des obstacles et discontinuités du matériau (grains, pores, fissures)** : le matériau est considéré comme une superposition de plusieurs phases d'épaisseur l_i . Le temps de transit de l'onde à travers la roche (t) et la vitesse sont calculés selon l'équation de la moyenne temporelle en plusieurs parties :

$$t = \sum \left(\frac{l_i}{V_{pi}} \right) \quad (3.22)$$

$$V_{pi} = \sqrt{\frac{k_i + \frac{4}{3}\nu_i}{\rho_i}} \quad (3.23)$$

avec V_{pi} , k_i , ν_i et ρ_i la vitesse, le module d'incompressibilité, le coefficient de Poisson et la masse volumique de la phase i . Pour les milieux biphasiques (squelette solide et fluide remplissant les pores), à partir de ces équations, Damaj (2006) propose selon la porosité (ici notée P) de la roche :

- Pour les roches consolidées, $P < 35\%$;

$$V_p = (1 - P)^2 V_{ps} + P V_{pf} \quad (3.24)$$

- Pour les sédiments marins non consolidés, $P > 45\%$;

$$\frac{1}{\rho V_p^2} = \frac{P}{\rho_f V_{pf}^2} + \frac{1 - P}{\rho_s V_{ps}^2} \quad (3.25)$$

avec ρ_s et ρ_f les masses volumiques respectives du solide et du fluide saturant ; V_{ps} et V_{pf} respectivement les vitesses des ondes P dans les phases solide et fluide.

2. **La longueur d'onde utilisée est comparable à l'échelle de l'éprouvette testée :** dans ce cas le matériau est considéré comme homogène. La vitesse de l'onde P est alors :

$$V_p = \sqrt{\frac{k_{hom} + \frac{4}{3}\nu_{hom}}{\rho_{hom}}} \quad (3.26)$$

Où k_{hom} , ν_{hom} et ρ_{hom} ne sont plus que les valeurs des modules intrinsèques d'une roche intacte (ne contenant ni pores ni fissures). [Berryman \(2007\)](#) propose les formules ci-dessous pour le calcul de ces modules dans le milieu poreux homogénéisé.

$$\begin{aligned} \text{Module d'incompressibilité} & \quad k_{hom} = k_s(1 - \beta \frac{P}{A}) \\ \text{Coefficient de Poisson} & \quad \nu_{hom} = \nu_s(1 - \beta' \frac{P}{A}) \\ \text{Densité} & \quad \rho_{hom} = \rho_s(1 - P) \end{aligned}$$

Où β , β' sont des constantes proches de l'unité et A un facteur de forme des vides. $A \leq 1$ pour une fissure soumise à une pression suffisante (pression de fermeture).

Pour les roches sédimentaires, [Guéguen et Palciauskas \(1997\)](#) proposent les valeurs de vitesse des ondes ultrasoniques du tableau 3.2 ci-dessous et justifient leur variabilité par celle de la porosité au sein d'une roche et de la présence des minéraux secondaires (Fe, Mg, P ...) dont la vitesse et la densité peuvent être très élevées .

Tableau 3.2 – Valeurs des vitesses V_p des principales roches sédimentaires ([Guéguen et Palciauskas, 1997](#))

Roche	Vitesse V_p (km/s)
Calcaires	4 - 7
Grès	2 - 5.5
Dolomites	5 - 7.5
Anydrites	5 - 6.5
Shales	1.8 - 4
Argiles	1.8 - 2.4
Sels	4.5

3.2.2.3 Représentativité des mesures physiques et mécaniques

L'estimation des propriétés mécaniques des roches, étudiées au laboratoire à partir d'échantillons de dimensions centimétriques, se heurte à plusieurs types de difficultés liées à l'aptitude de ces échantillons à représenter les propriétés de la roche dont ils sont extraits. Ce problème concerne plus les propriétés mécaniques (résistance, modules de déformation) que les propriétés

physiques comme la masse volumique et la porosité estimées à partir des propriétés de type additif (la masse et le volume).

Les hétérogénéités et les défauts de structure, au niveau de l'éprouvette de laboratoire comme au niveau du massif rocheux, sont à l'origine de la variation d'une caractéristique en fonction de la taille de l'échantillon testé. En effet, une roche contient des défauts de dimensions variables et répartis de façon aléatoire qui affaiblissent ses propriétés mécaniques. Plus la taille de l'éprouvette est grande, plus la probabilité qu'elle contienne des défauts importants est grande. Par exemple, certains types de défauts comme les microfissures, peuvent être présents dans un bloc de roche, mais moins probablement présents dans un échantillon de petites dimensions prélevé dans le même bloc, et donc échappant à l'analyse. Cet effet d'échelle se manifeste par le fait que les propriétés mécaniques mesurées sont fonction des dimensions des éprouvettes. Cette difficulté à définir un Volume Élémentaire Représentatif (VER) a amené certains auteurs à préconiser une approche probabiliste des propriétés mécaniques qui sont liées à la porosité de la roche (Grolier *et al.*, 1991). En effet toutes les mesures de propriétés physiques comme la porosité, la résistance mécanique, la perméabilité,... nécessitent une taille d'échantillon qui soit représentative du matériau. Il existe donc une taille limite pour laquelle on peut encore considérer le matériau comme continu et homogène en moyennant ses propriétés à une certaine échelle. Le plus petit volume sur lequel les propriétés sont moyennes est appelé Volume Élémentaire Représentatif (VER) (Grolier *et al.*, 1991). Il doit être suffisamment petit pour prendre en compte la structure microscopique du matériau et suffisamment grand pour pouvoir en décrire le comportement global. De plus, ses propriétés doivent être indépendantes de sa situation dans le matériau. La valeur mesurée dépend de la quantité de matière étudiée et peut varier très fortement si on se trouve dans une zone plus ou moins dense. La taille du VER dépassée, les variations des mesures s'atténuent car elles peuvent se moyennner. Ainsi, une différence est observée entre les mesures *in situ* de dimension de l'ordre de 0.3 m à 1 m et celles au laboratoire sur des éprouvettes de dimension d'ordre décimétrique. L'hétérogénéité du matériau, cause principale de l'effet d'échelle, joue sur la moyenne des valeurs des mesures et sur la dispersion de ces valeurs.

Le VER est très utile en modélisation numérique car il peut être traité comme un point mathématique représentatif des propriétés macroscopiques du milieu qui peut être alors considéré comme la répétition suivant les trois directions de l'espace du VER (Al-Raoush *et Willson*, 2005). L'étude réalisée sur la porosité n'a pas pour objectif de donner une estimation du VER au sens strict pour les latérites mais de prendre en compte cet effet d'échelle dans l'interprétation des résultats.

3.2.2.4 Variabilité des propriétés mécaniques des roches

Chaque roche utilisée en maçonnerie a ses propres caractéristiques. Celles-ci peuvent aussi varier dans le temps sous l'effet des contraintes mécaniques et climatiques appliquées à la maçonnerie. Certaines pierres, comme le Tuffeau, la Pierre de Sébastopol, utilisées en maçonnerie, sont qualifiées de tendre compte tenu de leur faible module de Young et de leur grande capacité à se déformer sous l'effet des contraintes mécaniques. Or, ces valeurs sont importantes car la résistance d'une structure maçonnée est directement liée à celle de ses éléments maçonnés (corps et joints). Par exemple, Beck et Al-Mukhtar (2004) ont réalisé des essais de compression uniaxiale sur ces deux roches (Tableau 3.3) et ont trouvé des valeurs de module de Young très faibles avec des résistances à la compression variables en fonction de la teneur en eau. En effet, la présence de l'eau dans les pores des roches conduit à une réduction de la résistance à la compression, pouvant s'expliquer par le phénomène de succion ou par une modification des liens intergranulaires (Ojo et Brook, 1990).

Tableau 3.3 – Résultats des essais de compression uniaxiale sur le Tuffeau et la pierre de Sébastopol (Beck et Al-Mukhtar, 2004)

	Résistance à la compression Rc (MPa)		Indice d'anisotropie
	état sec	état saturé	
Tuffeau blanc	sens \perp : $11,67 \pm 0,33$ sens \parallel : $9,13 \pm 0,35$	sens \perp : $4,83 \pm 0,33$ sens \parallel : $3,86 \pm 0,15$	21 %
Pierre de Sébastopol	sens \perp : $9,88 \pm 0,50$ sens \parallel : $8,43 \pm 0,42$	sens \perp : $6,28 \pm 0,30$ sens \parallel : $5,41 \pm 0,28$	15 %
	Module élastique E (MPa)		Indice d'anisotropie
	état sec	état saturé	
Tuffeau blanc	sens \perp : 2037 ± 234 sens \parallel : 1481 ± 196	sens \perp : 988 ± 115 sens \parallel : 687 ± 106	29 %
Pierre de Sébastopol	sens \perp : 1968 ± 291 sens \parallel : 1806 ± 243	sens \perp : 1500 ± 210 sens \parallel : 1342 ± 146	10 %

Aussi en fonction de l'état physique de la roche (fracture, fissure, porosité, ...) les propriétés mécaniques peuvent fortement varier. Le tableau 3.4 établi par Bieniawski et Balkema (1984) fournit les valeurs de la résistance à la compression, de la résistance en traction, du module de Young et du coefficient de Poisson en fonction des roches saines, moyennement et fortement fracturées. Ces valeurs varient de plus de 50% d'un état de facturation à l'autre.

Pour les latérites, Kasthurba (2006), qui a fait l'étude de quatre carrières de la région de Malaba,

Tableau 3.4 – Caractéristiques mécaniques des roches (Bieniawski et Balkema, 1984)

Etat de la roche	Roche	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	E (GPa)	ν
Intact	Norite	300	20	100	0.24
	Granite	166	12	45	0.23
	Quartzite	250	25	90	0.16
	Grès	100	6	22	0.24
	Dolerite	280	20	70	0.20
	Calcaire	102	4	48	0.25
moyennement fracturée	Norite	19	0.480	50	
	Granite	10.5	0.265	22.5	
	Quartzite	15.8	0.665	45	
	Grès	6.3	0.266	11	
	Dolerite	17.7	0.657	35	
	Calcaire	6.5	0.538	24	
très fracturée	Norite	0.95	0.023	20	
	Granite	0.525	0.0127	9	
	Quartzite	0.790	0.031	18	
	Grès	0.315	0.125	4	
	Dolerite	0.885	0.031	14	
	Calcaire	0.325	0.025	10	

a obtenu des valeurs de la résistance à la compression des propriétés physiques très dispersées (Tableau 3.5). Ces valeurs restent faibles comparées à d'autres matériaux utilisés en maçonnerie (voir Tableau 3.3).

Tableau 3.5 – Caractéristiques physiques et mécaniques des latérites indiennes (Kasthurba, 2006)

Carrière	σ_c (MPa)		densité sec	Absorption (%)
	saturé	sec		
UL	1.29	5.20	1.83	16.67
PTA	1.96	4.49	1.86	16.88
MU	2.07	3.96	2.02	11.53
PM	4.95	8.29	2.92	9.89

Les essais pour la détermination des propriétés des roches sont normalisés. Pour la compression par exemple, les normes imposent généralement des éprouvettes (les plus utilisées) avec un élanement de 2 (rapport entre dimensions longitudinale et transversale). Mais, bien que l'élanement soit respecté, la résistance à la compression varie suivant la taille des éprouvettes testées. Par exemple, pour les roches calcaires, les travaux de Berthier et Tourenq (1966) ont montré une décroissance de même ordre en fonction de l'élanement. Plus les élanements sont petits et plus les résistances sont élevées (Figure 3.9). De tels essais ont été beaucoup plus pratiqués avec le béton.

La résistance à la compression est aussi fonction de la forme de l'éprouvette. En effet, La résistance obtenue sur cylindre d'élanement 2 (par exemple diamètre de 16 cm, hauteur de 32 cm) est plus faible de l'ordre de 20% que la résistance sur cubes de 20 cm (Figure 3.10).

La résistance en compression est donc à associer à la forme de l'éprouvette, à la méthode d'essai (ou à la référence à la norme utilisée) et à l'échéance fixée.

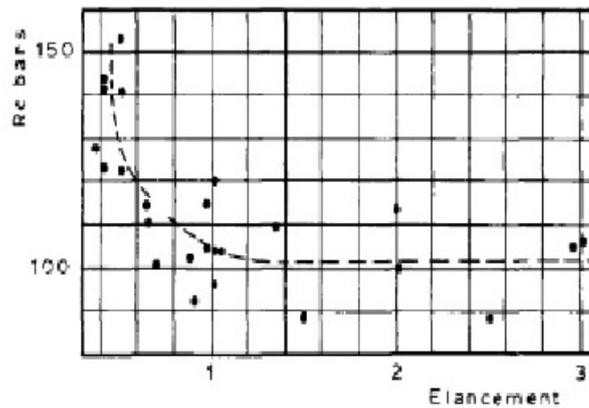


FIGURE 3.9 – Variations des résistances en compression d'une roche calcaire en fonction des dimensions des éprouvettes

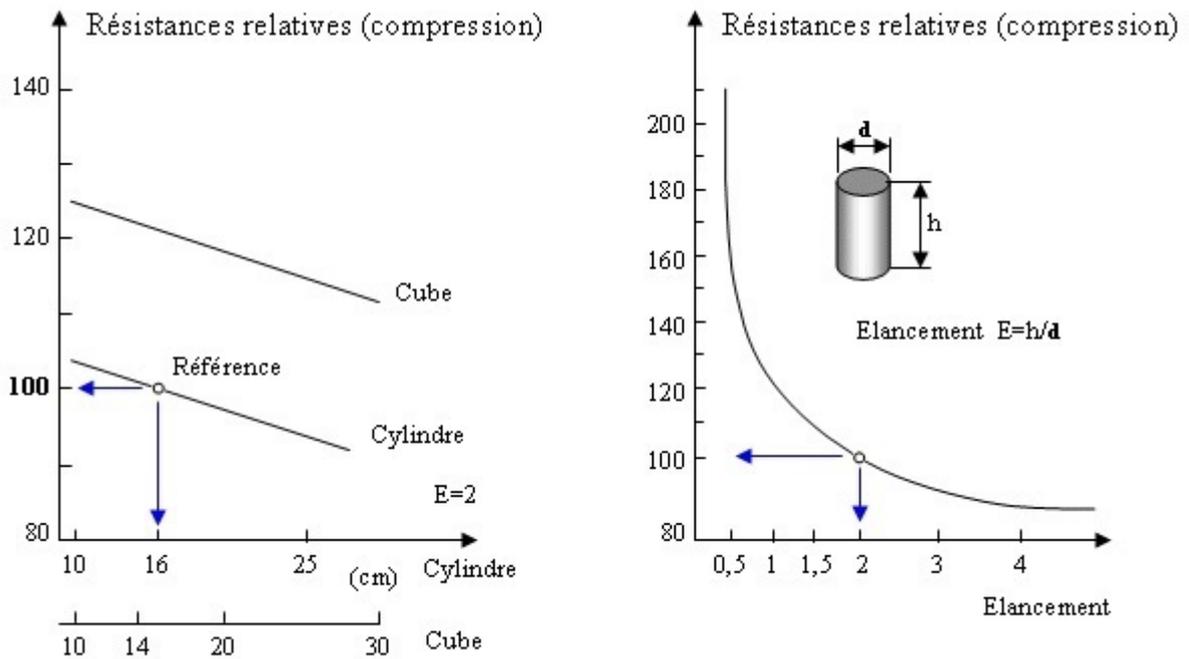


FIGURE 3.10 – Variations des résistances en compression d'un béton en fonction de la forme et des dimensions des éprouvettes

3.2.3 Les propriétés thermiques

Le secteur du bâtiment est, parmi les secteurs économiques, le plus gros consommateur d'énergie. De la production des matériaux à la construction et l'exploitation du bâtiment, la consommation énergétique est très élevée contribuant à près de 20 % des émissions de CO_2 (Mazria, 2007). Il est donc indispensable de développer des éco-bâtiments qui, de par leur conception et le matériau utilisé, vont minimiser l'impact environnemental de leur construction, de leur exploitation et de leur destruction, tout en assurant un haut niveau de confort et de salubrité à ses usagers.

Les matériaux locaux connaissent actuellement un regain d'intérêt suite à la crise de l'énergie et à celle du logement dans la plupart des pays africains où le revenu d'une grande majorité d'habitants ne leur permet de construire que des logements sociaux économiques. Certains de ces matériaux permettent d'éviter une grande partie des problèmes liés à leur production et contribuent à la création d'une ambiance saine à l'intérieur d'une maison.

Toutes les performances des BLT en termes d'isolation thermique des bâtiments restent encore peu connues. Pour juger cette performance, l'estimation des propriétés thermo-physiques de ce matériau est primordiale. Cette partie est donc consacrée à la détermination de la conductivité thermique, de la diffusivité thermique, de l'effusivité thermique et des capacités thermiques massique et volumétrique du BLT.

3.2.3.1 La conductivité thermique et la capacité thermique

Il existe deux propriétés thermiques qui décrivent le procédé de conduction permettant les transferts de chaleur à l'intérieur du corps solide : la conductivité thermique (λ) et la capacité thermique (C).

La conductivité thermique est l'une des propriétés thermo-physiques les plus recherchées pour les matériaux de construction. Elle représente un processus de propagation de chaleur, de proche en proche, par transfert d'énergie d'agitation thermique lors de collisions moléculaires dans le matériau (Musy et Soutter, 1991). En régime permanent, dans le cas le plus simple de l'écoulement unidimensionnel de flux de chaleur à travers un mur homogène d'épaisseur e et de températures uniformes, ce flux de chaleur (ϕ) s'exprime sous la forme :

$$\phi = \frac{\lambda}{e}(T_1 - T_2)S \quad (3.27)$$

Où :

S est l'aire des faces latérales [m^2]

λ est la conductivité thermique [$Wm^{-1}K^{-1}$]

T_1 et T_2 sont respectivement la température de la face chaude et la température de la face froide [K]

e est l'épaisseur du mur [m].

La conductivité thermique mesure donc la faculté qu'a la chaleur de traverser plus ou moins aisément un corps en régime permanent. Elle dépend de la nature du corps et de sa température.

La capacité thermique (C) d'un matériau se définit de deux manières :

- La capacité thermique massique : l'équation calorimétrique classique : $Q = mC_p(T_2 - T_1)$ montre que la quantité de chaleur absorbée par un corps est proportionnelle à la chaleur massique C_p du solide considéré. Pratiquement, la chaleur massique C_p d'un corps correspond à la quantité de chaleur dont il a besoin pour que la température d'une unité de sa masse s'élève d'un degré. Elle s'exprime en $J.K^{-1}.kg^{-1}$;
- La capacité thermique volumétrique d'un matériau (C_v) s'exprime par la somme des chaleurs spécifiques de ses constituants (fractions liquide, solide et gazeuse). Toutefois, il est envisageable de négliger la portion gazeuse étant donné sa faible proportion massique. De plus, la fraction solide regroupe deux ensembles (organique et minéral). Finalement, on peut remplacer l'indice de la fraction massique de l'eau par son contenu gravimétrique équivalent. L'équation résultante est :

$$C_v = d_s(\varphi_o C_o + \varphi_m C_m + \theta_g C_e) \quad (3.28)$$

où d_s est la densité apparente du sol, φ_o et φ_m sont les fractions massiques respectives de la matière organique et des minéraux. Les C_o et C_m correspondent à leur chaleur spécifique respective. Quant au C_e et au θ_g , ils s'associent à la chaleur spécifique et au contenu gravimétrique de l'eau.

La résistivité thermique(R) est utilisée pour quantifier le pouvoir isolant des matériaux pour une épaisseur donnée. Elle est le rapport entre l'épaisseur (e) et la conductivité thermique du matériau. Elle s'exprime en $m^2.K.W^{-1}$.

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (3.29)$$

La diffusivité thermique(D) est une propriété dynamique du matériau car elle intervient dans les transports en régime transitoire de température. Elle caractérise l'aptitude d'un matériau à transmettre la chaleur (en terme de vitesse). En effet, lorsque la température du milieu est fonction du temps et que la conductivité dépend de la température et des coordonnées spatiales, l'équation de chaleur de Fourier s'écrit :

$$\rho.C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}[\lambda.\vec{\text{grad}}(T)] \quad (3.30)$$

Lorsque les paramètres thermiques sont indépendants de la température, la relation ci-dessus

s'écrit sous forme simplifiée :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho.C_p} \Delta T \quad (3.31)$$

avec

$$\Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3.32)$$

Cette relation fait apparaître le rapport noté :

$$D = \lambda/(\rho.C_p) \quad (3.33)$$

Elle s'exprime en $m^2.s^{-1}$.

L'effusivité thermique(b) est la racine carrée du produit de la conductivité thermique, de la masse volumique et de la capacité thermique massique :

$$b = \sqrt{\lambda.\rho.C_p} \quad (3.34)$$

Elle s'exprime en $J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-1/2}$. sa valeur permet de quantifier l'aptitude d'un matériau à changer de température (plus ou moins rapidement) lorsqu'il reçoit un apport d'énergie thermique distribué de manière non uniforme. Deux phénomènes se conjuguent alors simultanément : l'énergie est absorbée localement en fonction de la capacité thermique et est transférée aux régions voisines en fonction de la conductivité thermique du matériau.

3.2.3.2 Transfert de chaleur dans les matériaux poreux humides

A cause de leurs structures poreuses, les matériaux de construction humides (triphases) se caractérisent par un comportement complexe. Considérées individuellement, chacune des phases présente des caractéristiques thermiques qui lui sont propres, des interactions thermiques se manifestent aussi entre les différentes phases. Une évaluation rigoureuse d'un comportement global du matériau doit tenir compte de l'ensemble de ces réalités.

La notion de conductivité effective λ_e est alors, souvent utilisée. Dans la littérature, de nombreux modèles de calcul sont proposés.

Les modèles empiriques s'expriment par des corrélations basées sur les résultats de mesures directes. Les modèles théoriques sont construits en tenant compte de la structure du milieu poreux et dépendent généralement de la porosité, de la saturation, des conductivités respectives des phases en présence et de la proportion de chaque phase (Gruescu *et al.*, 2007).

Si on s'intéresse au transfert de chaleur monodimensionnel dans une paroi poreuse humide, l'équation de la chaleur simplifiée s'écrit :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_e \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.35)$$

λ_e est dépendante de la saturation. Il est donc nécessaire de déterminer le profil de saturation à chaque instant. De nombreux modèles théoriques (Whitaker, 1977; Crausse, 1983) basés sur différentes approches, sont actuellement utilisés, pour l'étude des transferts de chaleur et de masse dans les milieux poreux. Le modèle de diffusion est, peut être le moins compliqué et s'adapte plutôt bien à ce genre de problème. L'équation de diffusion pour la saturation, s'écrit :

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial S}{\partial x} \right) \quad (3.36)$$

avec :

λ_e : conductivité effective [$W/m^\circ C$]

D : coefficient de diffusion massique [m^2/s]

C_p : chaleur massique, [$J/kg^\circ C$]

S : degré de saturation

T : température, [K ou $^\circ C$]

t : temps [s].

Le coefficient de diffusion D est mesuré directement (Crausse, 1983) ou construit, en utilisant les autres paramètres thermo-physiques du milieu (perméabilité, pression capillaire, ...) (Belhamri, 2003). Ces paramètres dépendent aussi du degré de saturation et de la température.

La solution de ces deux équations couplées peut être obtenue suivant les conditions de chaque problème. Des processus itératifs peuvent être utilisés pour s'affranchir de la non-linéarité des équations.

A de faibles teneurs en eau, la phase gazeuse des pores contrôle la conductivité thermique. L'augmentation de la teneur en eau se traduit rapidement par une hausse de la conductivité thermique. Le mince film d'eau qui se juxtapose aux particules permet de les relier les unes aux autres. Plus la quantité d'eau augmente, plus la conductivité est contrôlée par la phase solide (organique et minérale) et provoque un ralentissement de la hausse de la conductivité. La transition entre une basse et une haute conductivité survient donc à un faible contenu en eau pour les sables et à un haut contenu en eau pour les sols plus argileux.

Pour le matériau sol, Campbell (1985) a réussi à élaborer une fonction empirique simple, basée sur les travaux de McInnes (1981), qui tenait compte de la teneur en eau. Elle est basée sur l'équation suivante :

$$\lambda_e = A + B.\theta_v - (A - D)\exp(-(D.\theta_v)^E) \quad (3.37)$$

où θ_v est le contenu volumétrique en eau et A , B , C , D et E sont des coefficients dépendants du sol. Ceux-ci ont été définis par Campbell (1985) et sont relatifs à un certain nombre de propriétés

citées dans la littérature scientifique.

$$A = \frac{0.57 + 1.73\varphi_q + 0.93\varphi_{rm}}{1 - 0.74\varphi_q - 0.49\varphi_{rm}} - 2.8\varphi_s(1 - \varphi_s) \quad (3.38)$$

avec : $B = 2.8\varphi_s$, $C = 1 + \frac{2.6}{m_c^{0.5}}$, $D = 0.03 + 0.7\varphi_s$, $E = 4$.

où φ_s est la fraction volumique de la composante particulaire ; q , rm et s représentent respectivement le quartz, les minéraux autres que le quartz et les solides totaux ; mc est la fraction massique d'argile et θ_v est le contenu volumétrique en eau.

3.2.3.3 Les différentes méthodes de mesures thermiques

La conductivité thermique, la chaleur spécifique et la diffusivité thermique peuvent être mesurées par diverses méthodes. Les méthodes de mesure peuvent être classées selon trois critères :

- les méthodes à régime thermique, qui peuvent être stationnaire ou transitoire. Dans les appareillages à plaque chaude gardée, à fluxmètres et à symétrie cylindrique, le régime thermique couramment utilisé est stationnaire. Dans certains appareillages à fluxmètres, dans la méthode flash et dans la méthode du fil chaud, le régime thermique est transitoire ;
- les méthodes de comparaison (classées comme absolues ou relatives) : ce sont la méthode de la plaque chaude gardée, la méthode à symétrie cylindrique, la méthode du fil chaud et la majorité des méthodes en régime thermique transitoire ;
- le dernier critère de classement peut être la géométrie de l'appareillage et des éprouvettes. On parle de géométrie plane avec des éprouvettes de section soit carrée, soit circulaire pour les appareillages à plaque chaude gardée ou à fluxmètres. On parle de géométrie cylindrique pour les appareillages à symétrie cylindrique. Enfin on parle d'approximation de l'espace semi-infini pour certaines méthodes flash ou d'espace infini à symétrie radiale pour la méthode du fil chaud.

Généralement, ces méthodes mesurent deux des trois paramètres cités ci-dessus et le troisième est déduit de la relation définie par l'équation :

$$D = \lambda/(\rho.Cp) \quad (3.39)$$

Nous nous limitons ici à la présentation des principes des trois méthodes que nous avons utilisées dans cette étude.

Principe de la méthode de plan chaud :

Le principe de la méthode repose sur la théorie de transfert de chaleur unidirectionnelle. Il consiste à placer une résistance chauffante plane de faible épaisseur entre deux échantillons du matériau à caractériser. Le dispositif de mesure peut être schématisé par la figure 3.11.

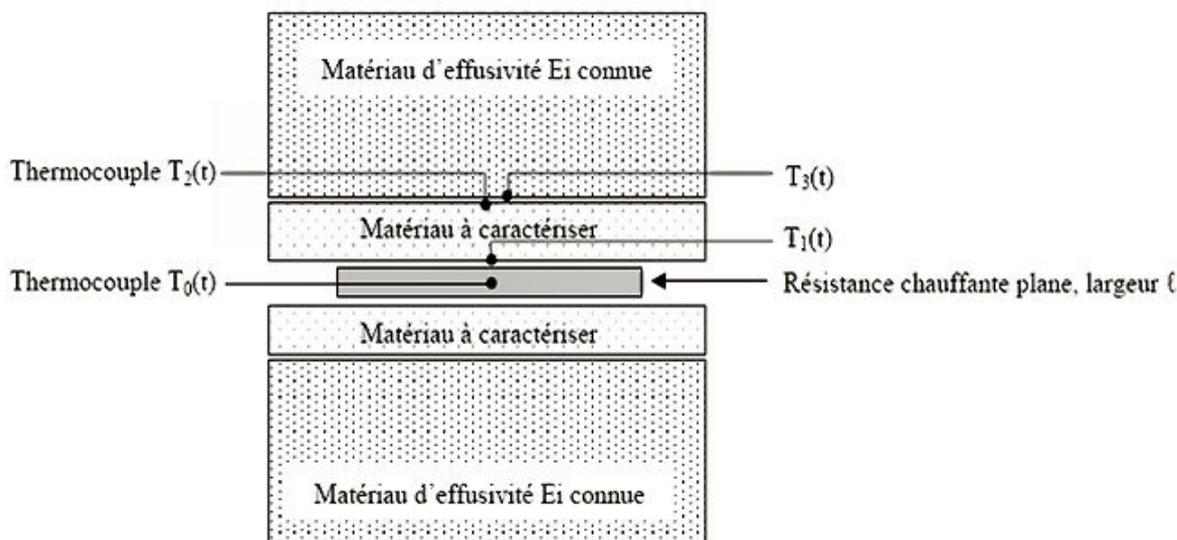


FIGURE 3.11 – Schéma du montage de la méthode du plan chaud.

Un échelon de flux de chaleur constant est appliqué à la résistance chauffante. Ainsi, on relève l'évolution de la température $T_0(t)$ au centre de la résistance dans / ou sur laquelle a été placé un thermocouple. On peut également relever la température $T_2(t)$ de la face non-chauffée d'un échantillon sur lequel on aura fixé un thermocouple. Si les dimensions transversales de la résistance sont grandes devant l'épaisseur de l'échantillon et pendant le temps où la perturbation n'a pas atteint les autres faces, on peut considérer que le transfert de chaleur reste unidirectionnel au centre et le modéliser à l'aide de la méthode des quadripôles. On applique ensuite une méthode d'estimation des paramètres pour calculer les valeurs de :

- L'effusivité thermique $\sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C_p}$, et dans certains cas de la conductivité thermique du matériau à caractériser ;
- La capacité thermique spécifique $(m_c)_s$ de l'ensemble sonde + résistance ;
- Les résistances de contact (R_{c1}) à l'interface sonde/échantillon et (R_{c2}) à l'interface échantillon matériau connue.

Principe de la méthode du fluxmètre :

La méthode fluxmétrique, comme la méthode à plaque chaude gardée, est basée sur le principe d'établissement en régime permanent d'une densité de flux thermique unidirectionnelle, constante dans le temps et uniforme dans l'espace, qui traverse simultanément la zone centrale de mesure des éprouvettes planes.

Le fluxmètre est un capteur qui mesure la densité de flux thermique à travers l'éprouvette (ou les éprouvettes) par une différence de température générée par cette densité de flux thermique

traversant l'éprouvette (ou les éprouvettes) et le fluxmètre lui-même. Le plus souvent, il se compose d'un noyau homogène, d'un détecteur de différence de température de surface (une thermopile à jonctions multiples) et d'un détecteur de température de surface. La zone du noyau du fluxmètre, où sont placés les détecteurs de différence de température, est appelée zone de mesure.

Les éprouvettes sont placées entre deux surfaces planes et isothermes. Ces surfaces sont constituées d'une plaque chaude de température T_1 et une plaque froide de température T_2 . La mesure se fait grâce à un fluxmètre fixé sur une des faces de l'échantillon. Le schéma de la figure 3.12 illustre ce dispositif de mesure.

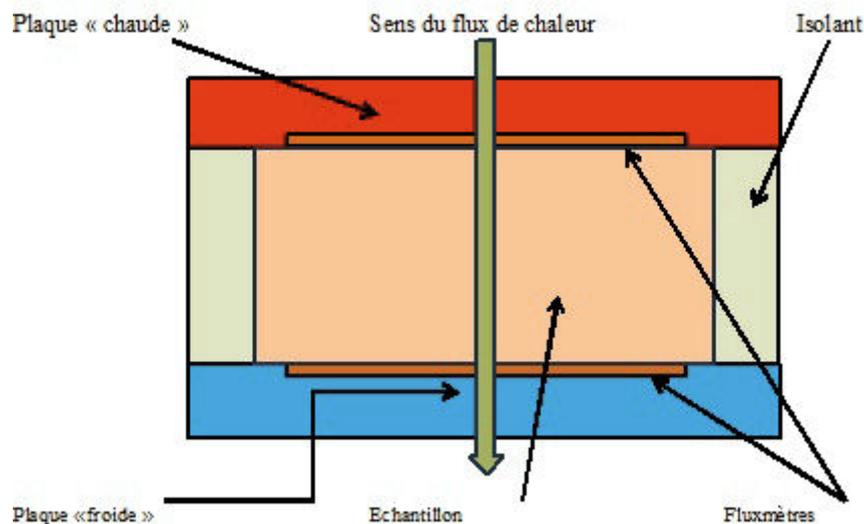


FIGURE 3.12 – Illustration du principe de la méthode fluxmétrique.

Par cette méthode, on mesure la conductivité thermique des matériaux par la mesure de la puissance thermique traversant le matériau pour une épaisseur donnée, par unité de surface et par degré. Le régime de mesure est un régime transitoire, entre 10 à 40 minutes et la température ambiante est fixée à 23°C avec une précision de 5 %. En effet, le temps d'attente nécessaire pour que le transfert de chaleur au sein de l'isolant atteigne le régime établi dépend des conditions de mesures et des caractéristiques du milieu isolant. Après ce temps, on suppose que le transfert thermique est parfaitement établi (plus de variations temporelles de température ni de flux au sein de l'isolant).

La conductivité équivalente du matériau est déduite des mesures du flux de chaleur au niveau des deux plaques à partir de l'équation :

$$\lambda = \frac{\phi \cdot e}{\Delta T} \quad (3.40)$$

Où ϕ est la quantité du flux de chaleur entre les deux plaques, e est l'épaisseur du matériau et ΔT est la différence de température entre les faces chaude et froide.

Principe de la méthode de K2D Pro :

Le principe de cette méthode est de calculer la conductivité thermique (λ), la diffusivité thermique (D) et la résistivité thermique (R) par l'analyse de la dissipation de chaleur depuis une source de chaleur linéaire soumise à un voltage connu. Cette méthode est basée sur les normes de mesure de la conductivité / résistivité thermique de l'IEEE et de l'ASTM (IEEE 442, 1981; ASTM, 2005). Le dispositif utilise le modèle proposé par Carslaw et Jaeger (1986) pour résoudre l'équation de transfert de chaleur par la méthode de propagation de source de chaleur linéaire en régime transitoire dans un milieu semi-infini, homogène et isotrope, publiée dans les normes IEEE et ASTM. Cette méthode dite "méthode de l'aiguille chauffée transitoire" permet de résoudre le problème de la conduction radiale de la chaleur dans un tel milieu donné, à partir de l'équation :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + r^{-1} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.41)$$

où

T est la température [K], t est le temps [s]

D est la diffusivité thermique [m^2/s], r est la distance radiale [m].

Lorsque la source de chaleur linéaire est introduite dans le milieu, l'augmentation de la température, depuis une température initiale T_0 , à une distance r de l'axe de la source est donnée par l'équation :

$$\Delta T = T(r, t) - T_0(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} E_i \left(\frac{-r^2}{4Dt} \right) \quad (3.42)$$

Dans cette formule, q est la chaleur produite sur une longueur unitaire dans un temps unitaire [W/m], K est la conductivité thermique du milieu [W/m.K], et E_i est la fonction intégrale exponentielle :

$$E_i \left(\frac{-r^2}{4Dt} \right) = \int_0^\infty \exp\left(\frac{1}{u}\right) du - \gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4Dt}\right) + \frac{r}{4Dt} - \left(\frac{r^2}{4Dt}\right) + \dots \quad (3.43)$$

avec γ la constante d'Euler ($\gamma = 0,5772$).

Lorsque t est assez grand, r est très petit et D très grand, par approximation, on a :

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln t + C \quad (3.44)$$

Cette équation montre que la relation entre ΔT et $\ln(t)$ est linéaire avec une pente : $m = \frac{q}{4\pi\lambda}$. La pente m , tracée sur le graphe T en fonction de $\ln(t)$ (Figure 3.13), permet de calculer la

conductivité thermique par la formule suivante : $\lambda = \frac{q}{4\pi m}$.

$$K = q / 4\pi m$$

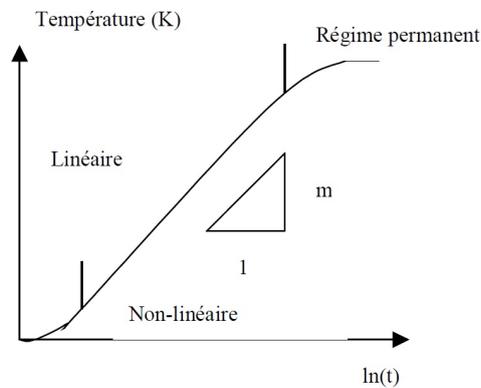


FIGURE 3.13 – Résultat expérimental sur la variation de la température du thermocouple dans le temps

3.3 Protocoles d'étude expérimentale

3.3.1 Les essais physiques et hydriques

3.3.1.1 Mesures des masses volumiques

Quatre types de masse volumique ont été déterminés au laboratoire :

- la masse volumique à l'état naturel (ρ);
- la masse volumique sèche (ρ_{sec});
- la masse volumique à l'état saturé (ρ_{sat});
- la masse volumique absolue (ρ_s).

La masse volumique apparente (à l'état naturel et à l'état sec) et la masse volumique absolue sont mesurées conformément à la norme européenne **NF EN 1936 (2007)**. Ces paramètres ont été d'abord déterminés sur des échantillons de petites tailles et de forme quelconque provenant de toutes les carrières d'étude, puis sur des briques de forme régulière (parallélépipédique) avant chaque essai mécanique.

Une étude en fonction de la profondeur d'extraction des briques a également fait l'objet de l'étude conduite sur les échantillons des carrières de Kouabri et de Tigaldégué.

La masse volumique sèche et celle à l'état naturel ont été déterminées avec les échantillons de petite taille. La méthode consiste à :

- peser la masse à l'état naturel, puis la masse sèche après un étuvage à 105° pendant 24h ;
- déterminer le volume de l'échantillon par la méthode de la paraffine. Elle consiste à enrober l'échantillon avec de la paraffine pour le rendre étanche, puis l'immerger dans un volume d'eau connu. Le volume de "l'échantillon + la paraffine" est alors égal au volume d'eau déplacée ;
- déduire le volume de l'échantillon, en soustrayant le volume de la paraffine de masse volumique égale à 973 kg/m^3 ;
- calculer la masse volumique sèche et à l'état naturel de l'échantillon en utilisant les formules citées dans le paragraphe précédent.

La figure 3.14 présente le dispositif de mesure de la masse volumique des échantillons par la méthode de pesée et de la paraffine.



FIGURE 3.14 – Dispositif de mesure de volume par la méthode de la paraffine

Pour les briques de forme parallélépipédique, le volume est déterminé par mesure des dimensions avec un pied à coulisse. Les masses des briques sont déterminées par pesée.

Pendant cette étape, la teneur en eau des briques et des échantillons de forme quelconque est également déterminée. Ce qui permet de confronter les résultats des deux méthodes.

La masse volumique saturée des briques est déterminée par la même méthode de pesée après leur immersion totale pendant 48 heures.

La masse volumique absolue (ρ_s) est déterminée avec le pycnomètre à air (Figure 3.15), conformément à la norme **NF EN 1097-7 (2008)**. Le pycnomètre à air est un dispositif à deux enceintes volumiques (V_1 , V_2) communiquant entre elles par une soupape. Quand ces deux enceintes ne sont pas connectées, chacune a une pression donnée (P_1 et P_{atm}).

Le principe de la méthode consiste à déterminer le volume des grains solides en utilisant la loi de Boyle-Mariotte, appliquée à l'air contenu dans le pycnomètre (hypothèse de la température

constante) :

$$P_1.V_1 + P_{atm}.V_2 = P.V \quad (3.45)$$



FIGURE 3.15 – Dispositif de mesure de la masse volumique absolue

Les échantillons sont d'abord concassés pour obtenir des grains de matériaux de tailles inférieures à 0,2 mm , séchés à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures puis pesés pour déterminer leur masse sèche m_s . Ces échantillons sont dans l'une des enceintes du pycnomètre pour déterminer leur volume V_s en utilisant la loi de Boyle-Mariotte. La masse volumique absolue est alors calculée par la formule $\rho_s = \frac{m}{V_s} [kg/m^3]$.

La figure 3.15 présente le dispositif de mesure et la préparation des échantillons.

3.3.1.2 Mesures de la porosité

Les différentes porosités évaluées dans le cadre de ce travail sont :

- La porosité totale (n) ;
- La porosité accessible à l'eau ou degré d'absorption d'eau (H_v) ;
- La porosité accessible au mercure (n_{mg}).

La porosité totale par la méthode de pesée : elle est déduite des mesures de masses volumiques dont la méthode est présentée dans le paragraphe précédent. La relation utilisée est :

$$n[\%] = \frac{V_v}{V} . 100 = 100 \left(1 - \frac{\rho_{sec}}{\rho_s} \right) \quad (3.46)$$

Ces calculs de porosité sont faits sur tous les échantillons et les blocs décrits au paragraphe 3.2.

La porosité accessible à l'eau ou degré d'absorption d'eau : elle est déduite des essais de saturation à l'eau des blocs. Elle est égale au degré d'absorption maximum (H_v) obtenue à

la fin de la phase de saturation (conf. section 3). Cette phase dure 24 heures pour les essais sur bloc.

La porosité accessible au mercure : l'analyse par porosimétrie au mercure a pu être effectuée sur des échantillons de latérite d'un volume proche de 1 cm^3 provenant de trois carrières d'étude (Dano, Koubri et Tigaldégué). Ces échantillons ont été préalablement séchés à l'étuve à 105°C pendant 5 jours afin que l'ensemble du réseau poreux soit accessible au mercure. Cette procédure présente un risque d'altération de la microstructure (microfissuration, rétrécissement de l'espace poral, ...)

L'appareil utilisé est un porosimètre à mercure AUTOPORE IV 9500 du Laboratoire LOMC. Il comprend trois parties :

- le pénétromètre qui est constitué d'une tige capillaire dont une des extrémités est constituée par une ampoule porte échantillon ;
- l'étage basse pression ;
- et l'étage haute pression.

Ces deux étages accueillent le pénétromètre dans lequel est placé l'échantillon respectivement pendant la montée en haute et basse pression lors des mesures. Pendant la montée en basse pression, l'échantillon est dégazé, l'air présent dans la cellule est vidé. Ce test au pénétromètre est très couramment employé car il permet de déterminer de manière assez simple la porosité et la distribution en taille des pores des matériaux poreux tels que les roches.

3.3.2 Les essais mécaniques

Les essais de compression simple et cyclique, de traction par flexion trois points et de détermination de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques sont les essais réalisés pendant cette phase de caractérisation mécanique.

3.3.2.1 Préparation des échantillons

Durant la phase d'étude-terrain, plusieurs types d'échantillons ont été taillés dans les différentes carrières d'étude.

Pour les carrières traditionnelles, dans le souci de déterminer les propriétés des latérites dans les conditions d'exploitation et de mise en œuvre, la taille des échantillons a été confiée aux artisans. Les outils de taille utilisés par ces artisans sont les pioches, les pelles et les barres à mine. Il est bien vrai que ces outils créent souvent des fissurations préalables des échantillons avant même les tests envisagés. Aussi, les dimensions ne sont pas régulières. Cependant, ces échantillons ont l'avantage de nous fournir les caractéristiques mécaniques du matériau tel qu'il est utilisé sur les chantiers. Seuls des rectifications des surfaces d'application des charges ont été

effectuées en faisant passer un coup de scie mécanique ou en réalisant un surfaçage au mortier de chaux ou de soufre mélangé avec du sable.

Pour les carrières de PN de Dano, les échantillons sont taillés à la scie mécanisée. Les dimensions sont de ce fait régulières et le surfaçage avant les essais est simplement réalisé en appliquant une couche de mortier de chaux ou de soufre mélangé avec du sable.

Dans chacune de ces carrières, des formes parallélépipédiques et/ou cylindriques d'éprouvettes ont été taillées. Les formes cylindriques ont été rectifiées au laboratoire avec une scie mécanique. Les différentes dimensions des blocs testés et le type d'essai envisagé pour chaque forme sont listées dans le tableau 3.6 ci-dessous.

Tableau 3.6 – Taille et forme des échantillons testés

Forme des éprouvettes	Dimensions (cm)	Tests envisagés
Parallélépipède L x l x h	40x20x15	Compression simple
	40x15x5	Flexion trois points
	30x20x15	Compression simple
	20x20x15	Compression simple et cycle d'humidification - séchage
	20x15x15	Compression simple
	15x15x15	Compression simple
Cylindre D x h	10x10x10	Compression simple
	5x10	Compression simple, cyclique, Pundit
	10x20	Compression simple, cyclique, Pundit

3.3.2.2 Dispositifs d'essais

Essais destructifs :

Trois presses ont été utilisées pour les essais de compressions simple, cyclique, et de flexion 3 points (Figure 3.16).

Les essais de compression monoaxiale et de flexion 3 points :

Pour réaliser les essais de compression monoaxiale et de flexion 3 points en grand nombre, une presse de marque CONTROLAB de capacité 160kN du Laboratoire LEMC a été utilisée. Elle est équipée d'un vérin hydraulique et d'un comparateur classique qui permet de suivre le déplacement vertical lors de l'écrasement des éprouvettes. (Figure 3.16 (a) et (b)).

Ces essais ont été réalisés sur les éprouvettes parallélépipédiques de dimensions mentionnées dans le tableau 3.6 de la section précédente. Pour certains échantillons, le suivi du déplacement est utilisé pour tracer la courbe contrainte-déformation et estimer le module de déformation.

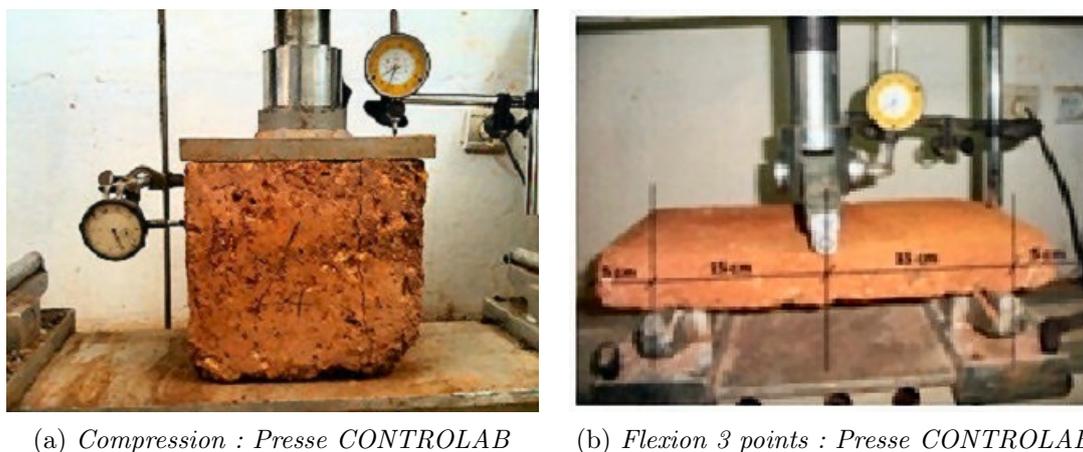


FIGURE 3.16 – Essais de compression monoaxiale et de flexion 3 points

Il faut signaler que l'acquisition des données (couple force-déplacement) est effectuée avec des comparateurs qui nécessitent un relevé manuel. Avec cette presse, les courbes obtenues ne présentent donc pas toutes les phases décrites dans la section "résultats et discussions" (section 2.4).

Pour comparer les résultats obtenus avec ceux de la première presse, une autre presse de marque TECHNOTEST du laboratoire LEMC a été utilisée pour réaliser des essais de compression mono-axiale sur les éprouvettes parallélépipédiques et cylindriques. C'est une presse hydraulique de capacité 1 500 kN. Un système d'acquisition automatique de données piloté par le logiciel LabVIEW, formé par un capteur de déplacement de type LVDT de longueur maximale 65 mm et un capteur de pression de capacité 400 bar, est couplé à la presse. Ce système a permis, grâce à un programme Excel, de déterminer les résistances à la compression et les modules de Young (tangent et sécant).

Il faut signaler que pour les systèmes d'acquisition des données ont été conçus et couplés aux presses par nous-mêmes.

Pour valider nos résultats des essais de compression monoaxiale simple, une autre presse plus sophistiquée du laboratoire LOMC a été également utilisée. C'est un appareil utilisé à la fois pour les essais triaxiaux de révolution et de compression simple. Il est constitué d'une cellule triaxiale de type Bishop et Wesley (Bishop et al., 1965 ; Bishop et Wesley, 1975) et d'un système de chargement hydraulique, le tout relié à un système d'acquisition (Figure 3.17).

Les échantillons utilisés sont des éprouvettes cylindriques de dimensions $(\phi x h) = (10 \times 20 \text{ cm})$ et $(5 \times 10 \text{ cm})$. La vitesse de chargement est de 0.1mm/mn.

Les normes utilisées pour les essais de compression monoaxiale et de traction par flexion 3 points sont respectivement les normes NF EN 14617-15 (2005) et NF EN 12372 (2007).

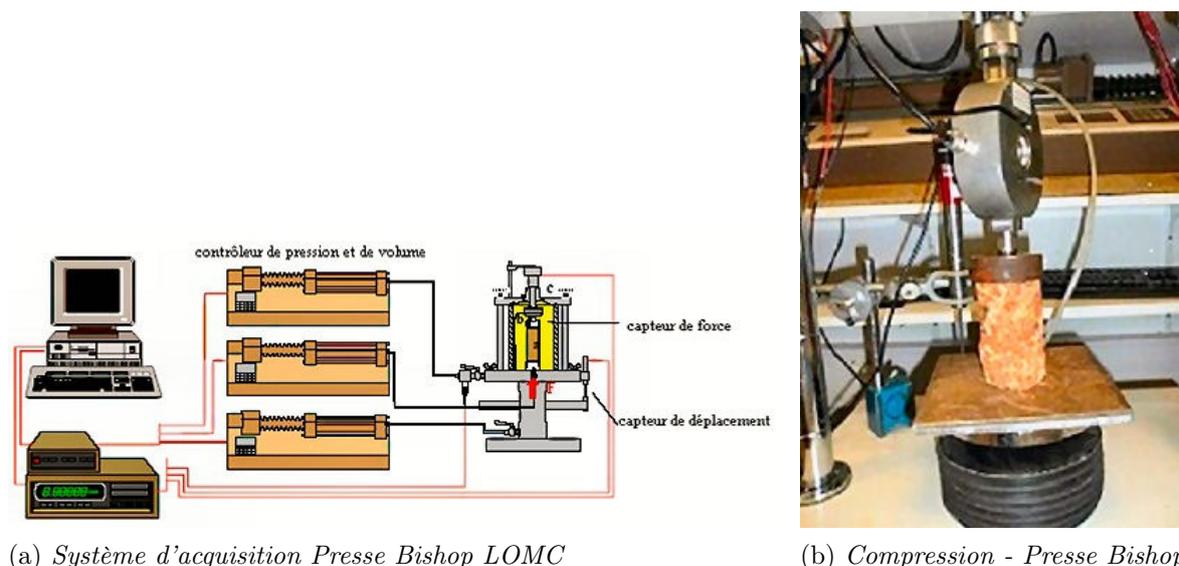


FIGURE 3.17 – Presse de type Bishop et Wesley du LOMC

Les essais de compression monoaxiale cyclique :

Pour ce type d'essais cycliques, effectués avec la presse du LOMC, le cycle de chargement et de déchargement est choisi en fonction de la contrainte à la rupture des éprouvettes, déterminée après les essais de compression simple. Les échantillons de forme cylindrique (100 x 200 mm et 50 x 100 mm) proviennent de la carrière de Dano PN. Ils ont été taillés dans les horizons moyens (3-5m) compte tenu de la difficulté à tailler ce type de forme dans les horizons supérieurs plus résistants aux outils des tailleurs. Durant l'essai, grâce aux capteurs numériques, il a été possible de suivre les déplacements axiaux et de tracer les courbes contrainte-déformation. Par la suite, les modules de déformations tangents, les modules sécants et moyens à 50% de la résistance de rupture seront calculés.

Les essais de compression avec cycle d'humidification - séchage :

Le test de compression avec des cycles d'humidification - séchage consiste à déterminer la contrainte de rupture en compression simple sur les blocs après qu'ils aient subi plusieurs cycles d'immersion dans l'eau et de séchage à l'étuve. Les échantillons sont des blocs de dimensions moyennes de 20 x 20 x 20 cm prélevés dans les carrières de Kouabri et de Tigaldégue. Le choix de ces carrières se justifie par les faibles résistances à la compression des blocs extraits, observées pendant les essais de compression simple.

Chaque cycle d'humidification-séchage consiste à immerger les blocs dans un bassin d'eau pendant 1 heure, puis sécher à l'étuve à 70°C pendant 23 heures (Figure 3.18). Les tests de compression sont effectués après 3 cycles, 5 cycles et 10 cycles. Le but de ces essais est de simuler

l'altération de la roche sous l'effet des conditions climatiques telles que l'humidité et la chaleur. Les valeurs de la résistance à la compression après altération par humification-séchage sont comparées à celles des blocs intacts à teneur à eau naturelle et à celle des blocs séchés à 105 °C pendant 24 heures. Ces essais ont été réalisés avec la presse CONTROLAB de capacité 160kN du Laboratoire LEMC.



(a) immersion des blocs pendant 1 h



(b) Séchage des blocs à 70 °C pendant 23 h

FIGURE 3.18 – Dispositif d'essai d'humidification-séchage

Essais non destructifs :

Mesure de vitesse par la propagation des ondes ultrasonique :

Les éprouvettes utilisées pour cette mesure sont de forme cylindrique de dimensions 5 x 10 cm et 10 x 20 cm ; les mêmes que celles utilisées pour les essais de compression avec la presse Bishop du LOMC. Ces éprouvettes ont été préalablement séchées à l'étude à 105 °C pendant 72 heures. La masse volumique sèche des éprouvettes a été déterminée par la méthode de pesée. La porosité totale est calculée à partir de l'équation 3.46 définie dans le paragraphe 3.3.1.2.

Le dispositif expérimental utilisé pour la mesure de la vitesse de propagation des ondes dans le matériau est le PUNDIT de marque "PUNDIT PLUS". Il est constitué d'un générateur d'ultrasons et deux transducteurs piézométriques (émetteur et récepteur) que l'on fixe de part et d'autre de l'éprouvette.

Les principaux problèmes sont dus aux conditions de contact entre les capteurs et les éprouvettes en raison des défauts de planéité et des porosités ouvertes sur les faces des échantillons. Un gel de contact a été utilisé pour minimiser ce problème. L'instant initial est défini avant chaque

essai en mettant en contact l'émetteur et le récepteur d'impulsion (étalonnage de l'appareil). La figure 3.19 présente le dispositif de l'essai.



FIGURE 3.19 – Dispositif utilisé pour la mesure de vitesse de l'onde P (PUNDIT)

Le principe de mesure repose sur la relation simple :

$$Distance = vitesse \star temps$$

On mesure le temps écoulé entre les deux impulsions, et on en déduit la vitesse à partir de l'équation ci-dessus. Cette vitesse de propagation des ondes a permis de calculer le module de Young dynamique avec la formule ci-dessous :

$$E_d = \rho_{sec} \cdot v^2 \cdot \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (3.47)$$

avec : ν : le coefficient de Poisson pris égale à 0.34

E_d : module de Young dynamique [kg/m^2]

ρ_{sec} : la masse volumique sèche de l'éprouvette [kg/m^3]

V : la vitesse de propagation des ondes dans l'éprouvette [m/s]

Pour tenir compte de la dispersion des résultats, trois mesures de la vitesse ont été effectuées par échantillon. La vitesse moyenne a été utilisée dans les calculs du module de Young.

3.3.3 Les essais thermiques

Trois dispositifs ont été utilisés dans cette étude pour déterminer la conductivité thermique, la diffusivité, et la capacité thermique : la méthode du plan chaud, la méthode de fluxmètre et la sonde K2D pro. Les premières méthodes ont été utilisées pour quelques échantillons provenant

de la carrière de Dano tandis que la Sonde KD2 pro a été utilisée pour évaluer ces paramètres en grand nombre compte tenu de la simplicité du dispositif. Par la suite, une comparaison des résultats de trois méthodes a été effectuée.

3.3.3.1 La méthode de plan chaud

Dispositif expérimental :

Le dispositif utilisé est celui qui a été monté dans le Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement (LPCE) de l'Université de Ouagadougou. Il a été mis en oeuvre de manière simple en utilisant une résistance chauffante plate rectangulaire de surface égale à 25 cm^2 . Au centre de cette résistance est fixé un thermocouple réalisé en fils fins (diamètre $< 0,1 \text{ mm}$). Quatre autres thermocouples permettent de mesurer la température des faces froide et chaude des échantillons. Ce dispositif est couplé à un programme d'acquisition de cinq températures mesurées qui permet d'enregistrer les températures mesurées toutes les secondes, et de les visualiser en temps réel. La figure 3.20 ci-dessous présente le dispositif de mesure avec l'écran d'acquisition des données.



FIGURE 3.20 – Dispositif de montage de la méthode du plan chaud du LPCE.

Les matériaux utilisés sont des blocs de latérite taillés extraits de la carrière exploitée par la société Pierres Naturelles dans la ville de Dano. Ils ont été taillés aux dimensions du dispositif qui reçoit les échantillons ($33 \times 24,6 \times 5 \text{ cm}$) (figure 3.21)

L'échantillon est placé entre la capacité isotherme et la source à flux constant du dispositif : il est supposé être traversé par un flux thermique unidirectionnel. La mesure du gradient de température qui s'établit entre les deux faces, lorsque celui-ci devient constant, c'est-à-dire en régime permanent, permet de mesurer la conductivité thermique apparente donnée par l'équation ci-dessous.

$$\lambda = \frac{e}{S \cdot \Delta T (R \cdot I^2 + C \cdot \Delta T')} \quad (3.48)$$

où :

R est la résistance de la plaque chauffante [Ohm]

I est l'intensité du courant fourni à la plaque chauffante [A]



FIGURE 3.21 – Photographie des échantillons utilisés.

T est l'écart de température entre les ambiances extérieure et intérieure [K]

T' est l'écart de température entre les faces chaude et froide de l'échantillon

e est l'épaisseur de l'échantillon [m]

S est la surface de l'échantillon traversée par le flux de chaleur [m^2]

C est le coefficient de déperdition thermique.

Limites de la méthode :

Le dispositif n'est pas complètement calorifugé, il existe des déperditions thermiques. L'échantillon ne reçoit pas la totalité du flux de chaleur issu de la source chaude, des pertes sont enregistrées. Ces pertes sont appelées pertes thermiques latérales dues au dispositif. Si on désigne par Pl cette puissance perdue, le flux reçu est en réalité égal à la puissance fournie P par la source chaude diminuée des pertes latérales Pl . C'est-à-dire :

$$\phi = P - Pl$$

Les pertes latérales sont proportionnelles à l'amplitude de l'écart entre la température extérieure et la température interne du dispositif, l'expression de Pl est donc définie comme suit :

$$Pl = C(T_{int} - T_{ext}); \text{ Où } C \text{ est le coefficient de déperdition thermique [W/K].}$$

De plus, la puissance fournie par la source P s'écrit :

$$P = RI^2.$$

C'est donc cette prise en compte de la déperdition qui a permis d'aboutir à l'expression de λ écrite plus haut.

La principale source d'incertitude est la valeur de la surface utile de chauffe S qu'il est préférable d'étalonner à partir de plusieurs mesures réalisées sur des échantillons « étalons » de propriétés

thermiques connues.

La mise en œuvre de la méthode nécessite en outre une alimentation stabilisée et un dispositif d'enregistrement de la tension délivrée aux bornes du thermocouple. L'enregistrement de température sera effectué jusqu'à ce que la différence de température $T_2(t) - T_0(t)$ ne varie plus. On a en effet montré que même si la condition $T_0(t)$ constante n'est plus rigoureusement exacte pour des temps très longs, le modèle établi représente alors parfaitement la différence $T_2(t) - T_0(t)$. Un pas de temps de 0,1 s pour l'enregistrement de la température donne des résultats satisfaisants.

3.3.3.2 La méthode fluxmétrique

Dispositif expérimental :

Les fluxmètres utilisés sont du type « à gradients tangentiels » du laboratoire LGCgE de l'Université d'Artois à Béthune. Ils permettent de déterminer la conductivité thermique et la chaleur volumique des échantillons.

Les mesures sont basées sur l'utilisation de capteurs fluxmétriques qui autorisent une mesure simultanée du flux thermique et de la température dans le même plan. Ils ont une section de 15 cm x 15 cm ou 6 cm x 20 cm et une épaisseur de 0.2 mm. Leur sensibilité est de l'ordre de $120V/W/m^2$. En fonction de la forme de l'échantillon, ils sont positionnés sur chaque face de l'échantillon en contact avec les plaques échangeuses.

Les sollicitations sont imposées par des plaques échangeuses en aluminium alimentées par des bains thermostatés régulés à 0.1 °C. Les conditions limites imposées à l'échantillon sont de type adiabatique (flux nul) sur la périphérie en utilisant un matériau isolant, et de type isotherme sur les faces principales d'étude (plaques échangeuses). Ceci permet d'assurer l'unidirectionnalité du flux à travers l'échantillon. Les capteurs ont été placés sur les deux faces de l'échantillon (cf. figure 3.10).

Les échantillons de latérite utilisés proviennent de la carrière PN de Dano. Ils ont été taillés sous forme parallélépipédique de dimensions 20,5 x 20,5 x 5,4 cm (échantillon nommé "pavé") ou 7 x 7 x 24 cm (échantillon nommé "barre"). Ces échantillons au nombre de 6 (3 pavés et 3 barres) sont représentés sur les photographies de la figure 3.22 ci-dessous. Avant les mesures au fluxmètre, la masse volumique de chaque échantillon a été déterminée. Afin de réduire les résistances de contact, les pores ouverts en surface d'échantillon ont été comblés par un mortier sable/ciment.

3.3.3.3 La méthode de la Sonde K2D Pro

Dispositif expérimental :

KD2-pro (figure 3.23) est une sonde à aiguille chauffante développée par la Société [Decagon](#)

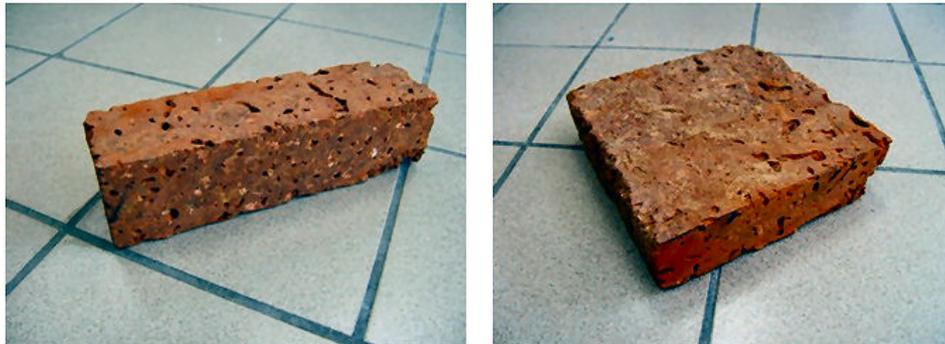


Photo a : échantillon type "Barre"

Photo b : échantillon type "Pavé"

FIGURE 3.22 – Photographie des échantillons utilisés pour les essais au fluxmètre

(2009) pour mesurer simultanément la conductivité thermique (λ), la diffusivité thermique (D) et la résistivité thermique (R). Les avantages de ce type de méthode se situent essentiellement au niveau de la simplicité de l'appareillage, de la rapidité de mesures et de la possibilité d'opérer *in situ* dans les conditions hygrothermiques quelconques, en respectant l'état physique du milieu.



FIGURE 3.23 – Dispositif de mesure KD2 Pro

Le KD2-Pro utilise 3 capteurs inox pour mesurer les propriétés thermiques de n'importe quel milieu. La dimension des échantillons à étudier doit correspondre à la longueur de l'aiguille car il faut qu'elle soit complètement immergée pour obtenir une mesure fiable. Les spécifications de l'appareil sont résumées dans le tableau 3.7.

Nous avons utilisé des éprouvettes cylindriques de dimensions 50 x 100 mm, taillées dans la

carrière artisanale de Dano. Un perceur électrique a permis de réaliser deux trous au centre de la section circulaire des éprouvettes échantillons. Le capteur à double aiguille SH-1, le plus adapté pour ce type de matériau a été utilisé pour les lectures. Les aiguilles du capteur sont enrobées d'un gel thermique pour minimiser la perte de chaleur, avant l'introduction dans les trous de même diamètre que celles-ci. Les lectures sont faites dans un premier temps sur les échantillons séchés à l'étuve à 105°C pendant 72 heures.

Par la suite, ces éprouvettes ont été saturées à l'eau et des lectures ont été faites à l'état saturé. Pour évaluer les paramètres thermiques en fonction de la teneur en eau des éprouvettes, pendant la phase de séchage à l'air, des lectures sont faites régulièrement. Les éprouvettes sont systématiquement pesées pour déterminer leur teneur en eau.

Tableau 3.7 – Spécifications de l'appareil K2D Pro

Temps de mesure	90 s
Gamme de mesure	Conductivité λ (0.02 à 2 $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$) Résistivité R (0.5 à 50 $m.^{\circ}C^{-1}$) Diffusivité D (0.1 à 1 $mm^2.s^{-1}$) Chaleur Spécifique C (0.5 à 4 $MJ.m^{-3}.^{\circ}C^{-1}$)
Précision	Conductivité : 5 à 10% Résistivité : 7% Diffusivité : 7% Chaleur Spécifique 7%
Alimentation	4 piles AA
Dimensions de la valise	15,5 x 9,5 x 3,5 cm
Dimensions des aiguilles et câbles	KS-1, 60 mm longueur x 1,27 mm diamètre. TR-1, 100 mm longueur x 2,40 mm diamètre. SH-1, 30 mm longueur x 1,28 mm diamètre. câble de 0,8m.
Température	-50°C + 150°C
Boîtier de lecture enregistreur	Microcontrôleur 16 bits alimentation ultra faible convertisseur A/D 14 bits affichage LCD 7.5cm x 4 cm interface série enregistrement 4095 données sur mémoire flash

3.4 Résultats et discussions

3.4.1 Les propriétés physiques et hydriques

Les grandeurs mesurées sont les masses volumiques (sèche et absolue), la teneur en eau naturelle, la porosité totale et le degré d'absorption volumique d'eau maximum. Les masses volumiques ont été converties en poids volumiques sec (γ_{sec}) et absolu (γ_s). Le tableau 3.8 ci-dessous présente les valeurs moyennes des résultats obtenus ainsi que les écart-types entre ces grandeurs.

Tableau 3.8 – Valeurs moyennes des propriétés physiques des carrières \pm Ecart-type

Paramètre	Symb.	Uté	Nb. Ech.	Dano	Koubri	Tigaldégué	Balkouin
				Moy. E.typ	Moy. E.typ	Moy. E.typ	Moy. E.typ
Poids vol. sec	γ	$kN.m^{-3}$	10	21,7 \pm 0,9	19,7 \pm 2,6	19,8 \pm 0,8	19,5 \pm 1,0
Poids vol. absolu	γ_s	$kN.m^{-3}$	10	31,0 \pm 1,1	28,2 \pm 1,0	29,3 \pm 0,9	29,6 \pm 1,0
Teneur en eau	ω	%	10	2,3 \pm 0,8	6,3 \pm 0,9	5,6 \pm 0,9	5,1 \pm 1,1
Porosité totale	n	%	10	30,0 \pm 1,5	30,1 \pm 2,4	32,4 \pm 3,1	34,2 \pm 2,3

Les poids volumiques :

Les poids spécifiques, très élevés et variables d'une carrière à l'autre, sont supérieurs à 28 $kN.m^{-3}$. Ils atteignent même 31 $kN.m^{-3}$ pour la carrière de Dano. Au sein même d'une carrière, la dispersion est élevée comme l'indiquent les valeurs des écart-types (3.8). Ces remarques restent aussi vraies pour les poids volumiques secs. Ces valeurs élevées du poids spécifique sont certainement dues à la présence d'une fraction importante d'oxydes de fer dans la composition minéralogique des latérites de toutes les carrières. En effet les analyses minéralogiques sur les échantillons de ces carrières ont révélé une proportion d'oxydes de fer (hématite, goethite et Ferrite) comprise entre 20 et 44,7% (cf. Chapitre 2). Les carrières de Ouagadougou (Tigaldégué et Balkouin) qui ont de faible teneur en fer présentent naturellement de faibles poids volumiques.

La porosité totale et mésoporosité

La porosité totale moyenne déduite des autres paramètres, de l'ordre de 30-35% est élevée. Elle varie d'une carrière à l'autre et au sein même d'une carrière en fonction des couches. Sa distribution, comme l'indiquent les images MEB (cf. Chapitre 2) et les observations directes sur

les affleurements, est très complexe avec des chenaux privilégiés.

La morphologie du milieu poreux a été approchée par porosimétrie au mercure qui donne une allure de la distribution porale du matériau. Les échantillons prélevés dans trois carrières (Dano, Koubri, Tigaldégue) ont un volume de l'ordre de 1 cm^3 . Les résultats sont présentés à la figure 3.24 et le tableau 3.9.

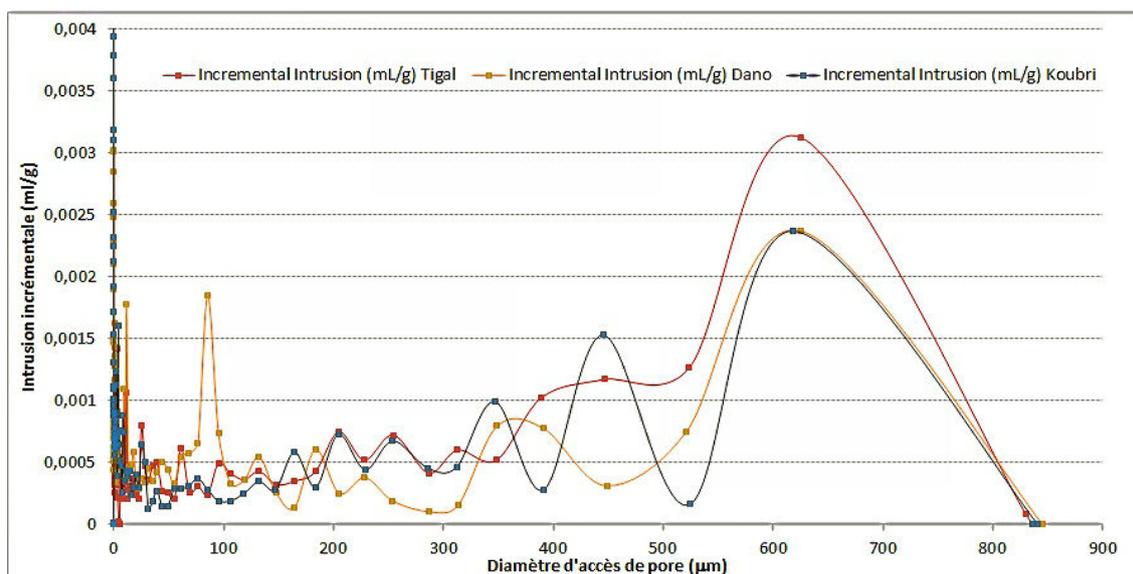


FIGURE 3.24 – Distribution porale des latérites obtenue par porosimétrie au mercure

Tableau 3.9 – Résultats de la porosimétrie à mercure pour les échantillons de Dano, Koubri et Tigaldégue

Paramètre	Symbole	Unité	Ech. Tigal.	Ech. Dano	Ech. Koubri
Masse volumique apparente	ρ	g/cm^3	2,84	2,82	2,72
Porosité au mercure	n_g	%	25,95	20,38	24,19
Diamètre moyen des pores	D	μm	0,0378	0,0348	0,0589

Les valeurs de porosité au mercure obtenues sont de l'ordre de 85% des porosités totales calculées plus haut. Ceci pourrait s'expliquer certainement par la taille des échantillons qui reste inférieure à celle des échantillons utilisés pour la mesure de la porosité totale. En effet, en taillant les échantillons à un volume d'environ 1 cm^3 , les macropores plurimillimétriques sont absents. On se retrouve avec une partie compacte qui ne représente pas forcément toute la distribution porale de la structure d'ensemble.

Malgré une différence observée entre les valeurs obtenues pour chaque échantillon de 1 cm^3 , les courbes d'intrusion du mercure sont assez similaires.

La latérite est un matériau typiquement multi-échelles car il possède un spectre de porosité très étalé (de quelques μm à $900 \mu m$) avec une importante mésoporosité (pores de diamètre d'accès compris entre 1 et $10 \mu m$) représentant près de 50% de l'espace poral investigué, et une micro-porosité plus ou moins aussi importante. Il faut néanmoins remarquer que d'après les images MEB obtenues à la microscopie électronique, les macropores et les mésopores sont assez présents.

La porosité accessible à l'eau et l'évolution de l'absorption dans le temps :

Les essais d'absorption de l'eau, effectués sur des blocs de 20 x 20 x 15 cm (3 blocs par carrière) provenant des trois carrières ont permis de suivre son évolution au cours du temps. Les valeurs moyennes par carrière de l'absorption H_p et H_v sont résumées dans le tableau 3.10.

Ces valeurs montrent que la carrière de Dano semble avoir une meilleure résistance à l'infiltration d'eau dans les pores, d'où une porosité accessible à l'eau plus faible. Les valeurs de H_v , de l'ordre de 50% de la porosité totale des blocs, montrent que pendant la phase d'immersion l'eau ne parvient pas à pénétrer tous les pores. Il y a donc une forte proportion de porosité occluse et/ou de porosité ne pouvant pas être atteinte par l'eau compte tenu du dispositif d'essai.

Tableau 3.10 – Valeurs moyennes de l'absorption par carrière

Carrière	H_p moy. (%)	H_v moy. (%)
Dano	8,75	14,81
Koubri	9,44	14,98
Tigal	10,88	18,57

La courbe de la figure 3.25 (H_p en fonction de la racine carrée du temps) montre que le processus de saturation suit une loi logarithmique avec un taux de régression assez satisfaisant.

Bien que les valeurs de degrés de saturation soient dispersées, les blocs de toutes les carrières se saturent après un temps d'immersion dans l'eau de 24 heures. Les lignes en pointillés indiquent qu'après 10 minutes, environ 33% de la saturation finale est atteinte, et qu'après 70 minutes (ligne en trait plein) la saturation est de 55 à 65%.

Le degré d'absorption moyen est de l'ordre de 10%, correspondant à une porosité accessible à l'eau de 25% inférieure à la porosité totale (calculée précédemment de 30%). Il reste inférieur à la valeur maximale (12%) proposée par la norme indienne pour une utilisation des blocs de latérite dans la maçonnerie (IS :3620-1979, 1998) et aux valeurs trouvées par Kasthurba (2006) pour les latérites de Malabar (14-16%).

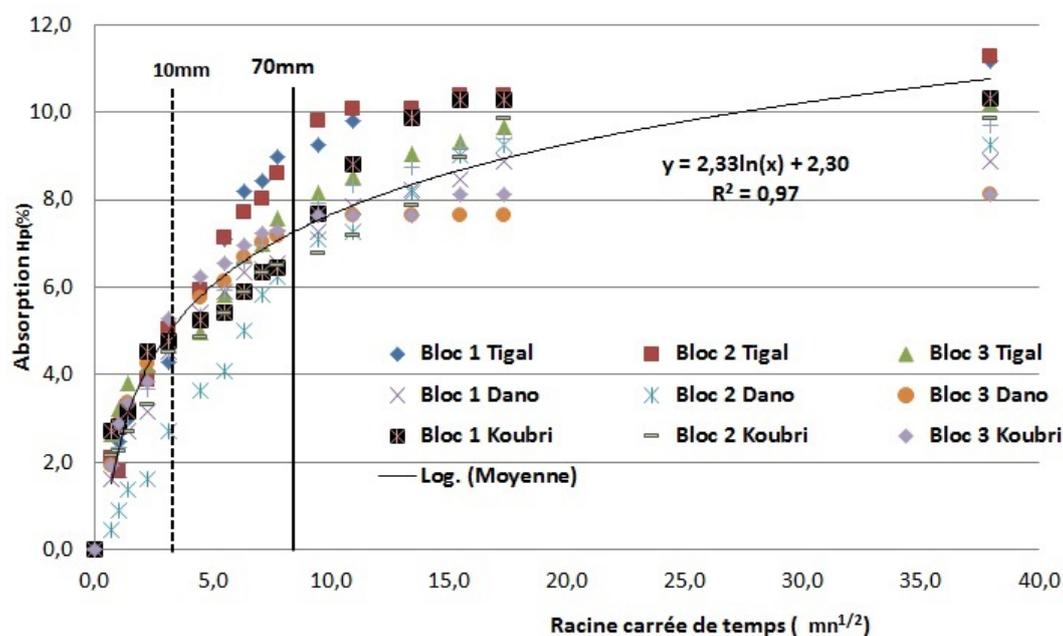


FIGURE 3.25 – Évolution de l'absorption d'eau des blocs en fonction du temps

3.4.2 Les caractéristiques mécaniques

3.4.2.1 Résistance à la compression uniaxiale

Résultats des tests sur blocs de 20 × 20 × 15 cm :

Les valeurs moyennes, maximales et minimales de résistance à la compression uniaxiale obtenues sur des blocs de dimensions 20 x 20 x 15 provenant de toutes les carrières d'étude sont rassemblées dans le tableau 3.11.

La presse qui a servi à ces tests est celle du laboratoire LEMC de marque CONTROLAB décrite dans le paragraphe 3.3.3.2. Les tests sont effectués pour chaque carrière sous trois conditions hydriques qui sont :

- bloc à teneur en eau naturelle qui varie entre 2,5 et 6,5% ;
- bloc à l'état sec, après un étuvage des blocs à 105°C pendant 24 h ;
- bloc saturé, après une immersion dans l'eau des blocs pendant 24 h.

Le nombre d'échantillons par test, préalablement fixé à 15 n'a pas été respecté compte tenu des pertes de certains blocs durant le transport de la carrière au laboratoire, ou lors de la

Tableau 3.11 – Résistance à la compression sur blocs 20x20x15 cm par carrière - Presse LEMC

Carrière	Nb. Ech.	Etat hydrique	σ_c (MPa)			
			Moy.	Max	Min	Ecart-type
Dano PN mécanisée	7	sec	6,80	9,38	4,77	$\pm 2,04$
	7	nat.	2,99	4,87	1,01	$\pm 1,57$
	7	sat.	2,70	4,16	0,92	$\pm 1,16$
Dano artisanale	10	sec	3,81	4,9	1,41	$\pm 1,28$
Koubri artisanale	14	sec	1,93	3,33	0,92	$\pm 0,63$
	14	nat.	0,92	1,63	0,38	$\pm 0,38$
	13	sat.	0,75	1,05	0,34	$\pm 0,19$
Tigal artisanale	8	sec	1,05	1,56	0,66	$\pm 0,28$
	12	nat.	0,87	1,30	0,54	$\pm 0,26$
	9	sat.	0,48	0,96	0,16	$\pm 0,25$
Balkouin artisanale	17	sec	1,90	2,41	1,16	$\pm 0,37$
	12	nat.	1,39	2,14	0,73	$\pm 0,36$
	10	sat.	0,78	1,25	0,49	$\pm 0,22$

préparation des échantillons. Pour la carrière industrielle "Dano PN" le nombre d'échantillons de départ était de 10 blocs.

Pour l'ensemble des carrières, les valeurs à l'état naturel de la résistance à la compression uniaxiale (σ_c) comprises entre 0,38 et 4,87 MPa sont comparables à celles obtenues avec les latérites Indiennes (0,5 à 3 MPa) (Kasthurba *et al.*, 2008; Kasthurba, 2006; Kasthurba et Santhanam, 2005). Ces valeurs sont également du même ordre de grandeurs que celles des autres pierres naturelles utilisées dans la construction d'habitats en Turquie telles que les dépôts quaternaires de caliche (2,03 à 10,4 MPa) (Dinçer *et al.*, 2008), les ignimbrites (1,6 à 2,8 MPa) (Öner *et al.*, 2006) et les tuffs (6,2 MPa) (Kiliç et Teymen, 2008).

Excepté pour les carrières de Dano, les valeurs de résistance à la compression sont faibles comparées au seuil recommandé par CRATerre (4 MPa) pour les constructions en brique de terre et à celle proposée par les normes indiennes pour les blocs de latérite (3,5 MPa) (IS :3620-1979, 1998) utilisés dans la maçonnerie. Cependant, tous les auteurs cités ci-dessus, indiquent les potentialités de ces roches pour leur utilisation en construction tout comme celles de la latérite. En Inde, Kasthurba (2012) a d'ailleurs proposé une révision de la norme IS :3620-1979 (1998) face au seuil de résistance difficilement atteint par les blocs de latérite.

Les valeurs de résistance à la compression sont très dispersées au sein d'une même carrière

et d'une carrière à l'autre avec des écart-types très élevés (Tableau 3.11). Ceux-ci pourraient s'expliquer par plusieurs facteurs :

- La composition minéralogique des carrières présentées dans le chapitre 2 indique que les latérites de Dano sont plus riches en oxydes de fer et moins poreuses, donc plus résistantes. Ce qui explique probablement la préférence des consommateurs pour les pierres de Dano ;
- Au sein d'une carrière, la composition minéralogique et la porosité varient considérablement. Ceci pourrait également expliquer cette variation de résistance au sein de la même carrière ;
- L'irrégularité des surfaces pourraient également expliquer à la fois la faible résistance et la dispersion des résultats. En effet, les blocs de Dano PN (σ_c plus élevée) dont l'exploitation se fait par une scie mécanisée ont des sections relativement plates contrairement à ceux des carrières artisanales. D'où une bonne répartition des efforts sur les sections d'application des efforts pendant les tests d'écrasement. Malgré des rectifications de section apportées au laboratoire par des opérations de surfacage, cette hypothèse ne semble pas être écartée ;
- Les conditions d'exploitation pourraient également expliquer cette dispersion. En effet, la taille des blocs se fait par une application successive de chocs localisés (coup de pioche). D'où une fissuration pré-existante peu visible sur le terrain mais perceptible à la manipulation des blocs. Ceci pourrait également expliquer la perte de certains échantillons pendant nos opérations au laboratoire. Cette observation a été notée par [Kasthurba \(2006\)](#) ;
- Contrairement à l'exploitation mécanisée où les exploitants cherchent des zones de grande résistance par des méthodes propres à eux, les artisans-tailleurs choisissent les carrières en fonction de la facilité qu'elles offrent à leur moyens d'exploitation. En effet, les zones dures sont très difficilement exploitables avec la force humaine et les coups de pioche ne produisent pas l'effet attendu. A force de donner des coups plus élevés, on assiste à des fissurations dans tous les sens. Aussi, la demande des clients conditionnée souvent par des délais courts nécessite un rendement d'exploitation meilleur. De ce fait les zones les plus indurées dans les carrières sont systématiquement abandonnées.

Influence de la teneur en eau :

La résistance à la compression des blocs dépend de l'état hydrique du matériau. La figure 3.26 montre une diminution de résistance à la compression quand la teneur en eau augmente. En effet, quelle que soit la carrière, les échantillons séchés à l'étuve à 105°C pendant 24 heures ont une résistance d'environ deux fois supérieures à celle des échantillons à l'état naturel alors qu'il n'y a pas une grande différence entre celles des échantillons saturés et à l'état naturel. Ce phénomène confirme la description de la latérite par [Buchanan \(1807\)](#) : la latérite durcit quand

elle est exposée à l'air.

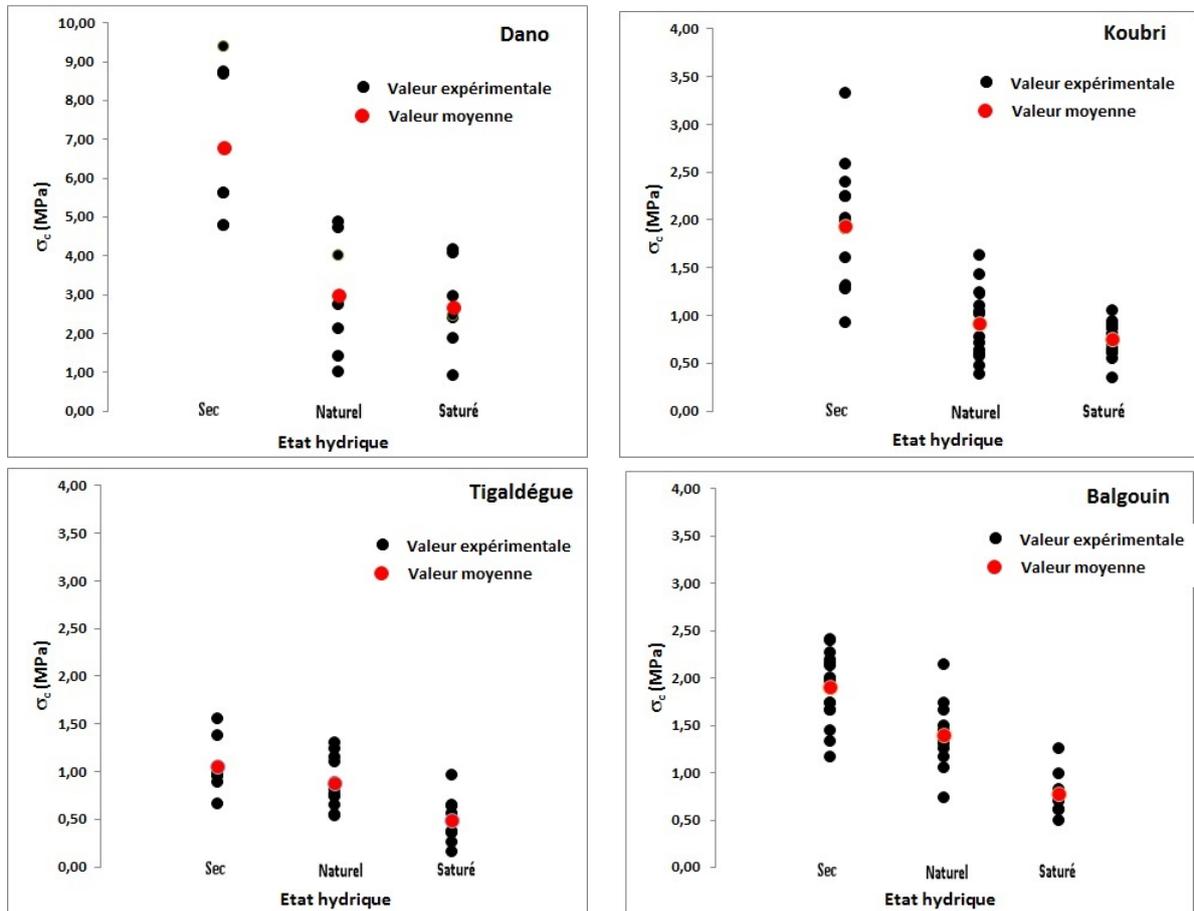


FIGURE 3.26 – Résistance à la compression des blocs en fonction de l'état hydrique

Influence des cycles d'humidification-séchage :

Les résultats moyens d'essais de résistance à la compression simple après 3, 5 et 10 cycles d'humidification (immersion d'une heure)-séchage (étuvage à 70 ° C pendant 23 heures) sur les carrières de Kouabri et de Tigaldégué sont présentés sur la figure 3.27.

De façon générale, après 3 cycles d'humidification-séchage, les blocs de deux carrières (Kouabri et Tigel) perdent environ 45% de leur résistance à la compression à teneur en eau naturelle. On assiste à une reprise de résistance après les 5 et les 10 cycles sans atteindre celle des blocs séchés à 105 ° C pendant 24 heures. Pour les blocs de Kouabri, la résistance moyenne après les 10 cycles reste inférieure, de l'ordre de 34%, à celle à teneur en eau naturelle. La résistance moyenne des blocs de Tigaldégué dépasse celle à teneur en eau naturelle de l'ordre de 37%.

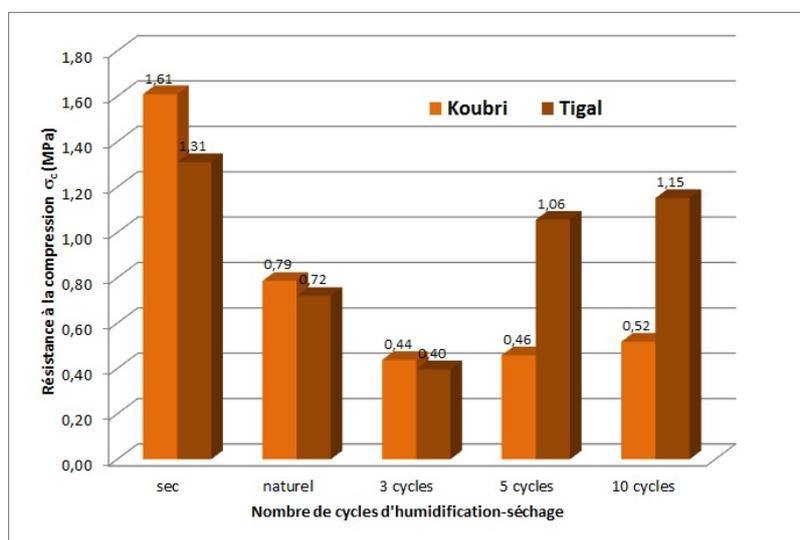


FIGURE 3.27 – Valeurs moyennes de résistance à la compression par cycle d'humidification-séchage

Influence du volume des blocs :

Le tableau 3.12 présente les résultats des tests sur une série de blocs de dimensions variables avec la presse CONTROLAB. Les échantillons proviennent de la carrière de Dano. Ce tableau montre que la résistance à la compression est dépendante de la géométrie et du volume des blocs testés. Elle diminue avec l'augmentation de tailles des échantillons. La figure 3.28 obtenue en ramenant les dimensions du bloc au volume qu'il occupe, montre une bonne corrélation (0,90) entre le volume et la résistance à la compression.

Tableau 3.12 – Carrière de Dano PN- Rc en fonction de la taille des blocs.

Dimensions Ech. L x lx h (cm)	Nb. Ech.	Rc.Moy. (MPa)	E. type.	Rc.Max. (MPa)	Rc.Min. (MPa)
40x20x15	7	1,77	0,34	2,23	1,27
30x20x15	4	3,40	0,38	3,67	2,84
20x20x15	10	3,81	1,28	4,9	1,41
15x15x15	5	3,92	1,14	5,26	2,19
10x10x10	4	5,39	0,60	5,92	4,52

Ce résultat était prévisible et confirmé par d'autres auteurs dans la littérature (Kasthurba, 2006). Cette observation est d'une grande importance car elle implique que la taille réelle des BLT utilisés pour les applications de la maçonnerie a un impact considérable sur la résistance de l'ouvrage. Par conséquent, pour la définition des codes de normalisation, il est nécessaire de préciser les conditions d'essai et les dimensions de l'éprouvette. Cette même conclusion a été exprimée, sous d'autres formes, par Kasthurba (2006).

Influence de la profondeur d'extraction :

Pour la carrière de Balkouin où l'étude minéralogique a été effectuée, des tests de la résistance à la compression uniaxiale en fonction de la profondeur ont été réalisés. Des séries de 5 échantillons de dimensions 20 x 20 x 15 cm par profondeur d'extraction (0.2-3m) ont été écrasées. La presse qui a servi à ces essais est celle du Laboratoire LEMC.

Les moyennes des résistances par série en fonction de la profondeur sont représentées sur la figure 3.29. On remarque que la résistance à la compression diminue quand la profondeur d'extraction augmente. Cette observation a également été formulée par Kasthurba (2006).

En superposant cette courbe à celle de la variation des proportions en minéraux (hématite + Goethite) en fonction de la profondeur (figure 3.30), on peut conclure que la diminution de la résistance à la compression est certainement due à la diminution des minéraux riche en fer en profondeur. L'objectif de cette partie n'est pas de définir une relation stricte entre résistance et minéralogie mais d'émettre une hypothèse dans ce sens qui pourrait être étudiée dans les

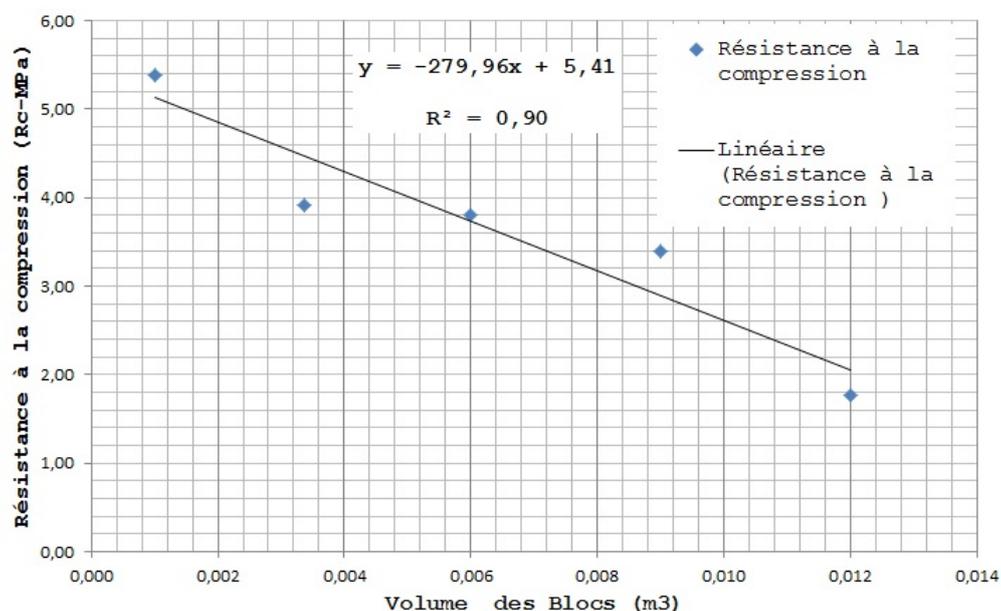


FIGURE 3.28 – Rc moyenne en fonction du volume des blocs, carrière de Dano PN

travaux futurs prenant en compte également la nature de la roche-mère.

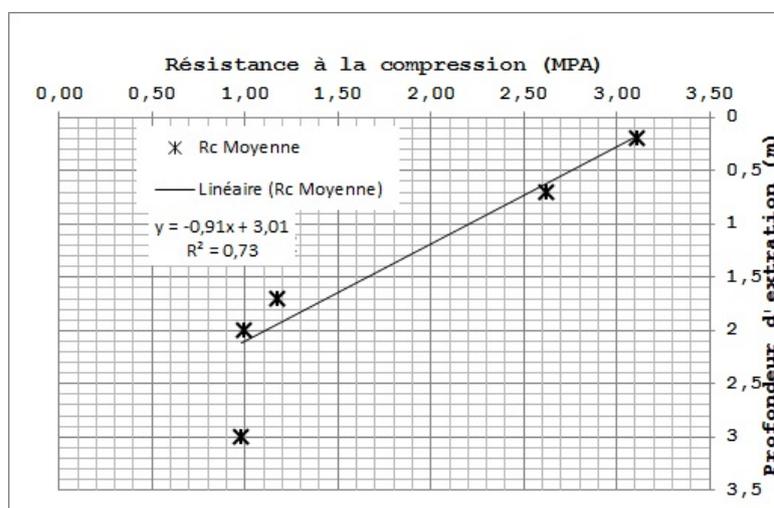


FIGURE 3.29 – Rc en fonction de la profondeur d'extraction - Carrière de Balkouin

3.4.2.2 Comportement du matériau en compression uniaxiale

Pour les blocs parallélépipédiques de dimensions 20 x 20 x 15 cm, le comportement du matériau a été suivi avec des comparateurs de déplacement fixés sur la presse CONTROLAB du LEMC.

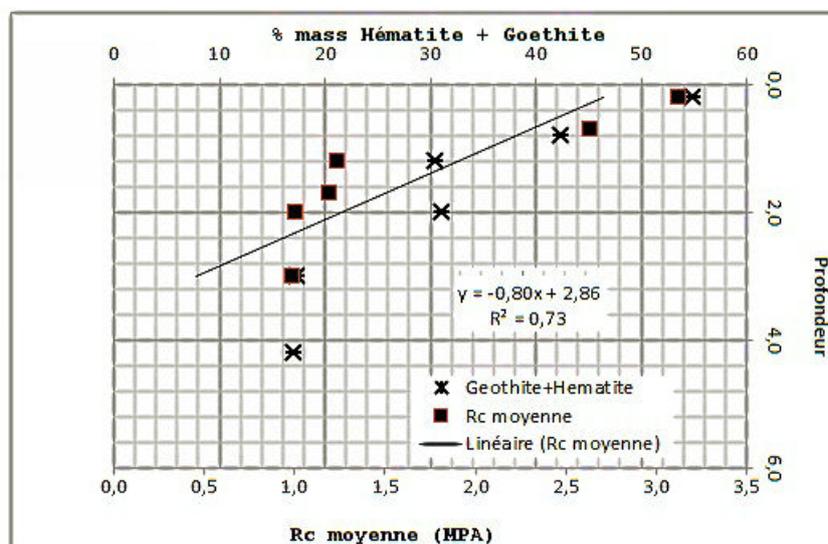


FIGURE 3.30 – Rc et minéralogie en fonction de la profondeur - Carrière de Balkouin

Ces blocs proviennent de la carrière de Dano PN. Ils présentent de ce fait une assez bonne régularité de surface.

Des petites éprouvettes cylindriques de dimensions 100 x 200 mm et 50 x 100 mm (carrière de Dano PN) ont été également testées avec la presse Bishop du laboratoire LOMC qui a un système d'acquisition fiable comparé à celui de la presse CONTROLAB. Pour ces dernières éprouvettes, les essais sont conduits de deux façons :

- écrasement en compression uniaxiale classique sans cycle de chargement- déchargement ;
- écrasement en compression uniaxiale à cycle de chargement-déchargement.

Courbe contrainte-déformation en compression uniaxiale simple :

Les courbes contraintes-déformations des blocs (exemple de la figure 3.31) ne permettent pas d'interpréter leurs allures compte tenu du dispositif de capteurs de déplacement (comparateur) qui nécessite un relevé manuel des points.

Par contre, l'observation des courbes obtenues à partir des éprouvettes cylindriques (100 x 200 mm et 50 x 100 mm, photos de la figure 3.32) permet de décrire ce comportement.

Le matériau présente une phase de serrage, ensuite une partie linéaire, puis une phase non linéaire avant le maximum de la courbe $\sigma_c - \varepsilon$ et se termine par une phase post-pic courbe (figure 3.33) :

- **Phase 1** : Cette phase se situe à un niveau de contrainte faible ($< 0,2\text{MPa}$). Elle est provoquée par les conditions des essais (le centrage de l'éprouvette, le parallélisme et la planéité des faces en contact avec les plateaux de la machine) mais aussi par la fermeture

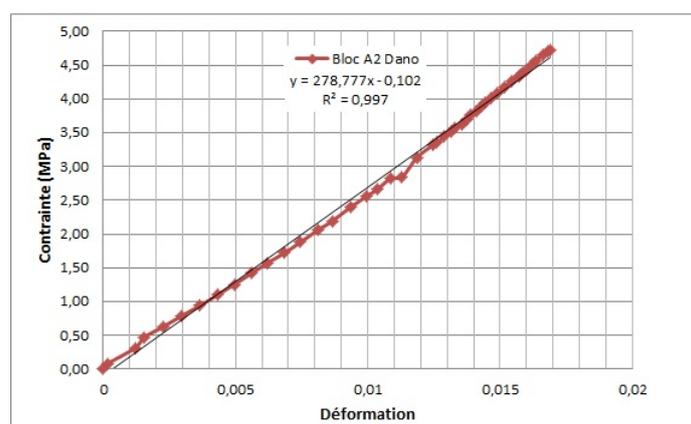


FIGURE 3.31 – Exemple de courbe contrainte - déformation des blocs



Eprouvette A2 en phase 4

Eprouvette A2 en phase 4

FIGURE 3.32 – Observation des éprouvettes en phase d'écrasement

des microfissures préexistantes dans le matériau qui se rigidifie. Cette phase se traduit par une concavité tournée vers le haut de la courbe contrainte-déformation avant d'être linéaire avec l'augmentation progressive de la rigidité du matériau.

- **Phase 2** : Cette phase correspond à une phase linéaire de la courbe contrainte-déformation. Pour les roches tendres, cette phase dépasse rarement 40% de la résistance à la rupture. Dans les cas de la latérite, pour la plupart des éprouvettes testées, on atteint un niveau de contrainte compris entre 30% et 60% de la résistance à la rupture. Durant cette phase, les fissures susceptibles de se fermer le sont déjà mais le niveau de contrainte à l'échelle microscopique reste insuffisant pour générer de nouvelles discontinuités. La partie

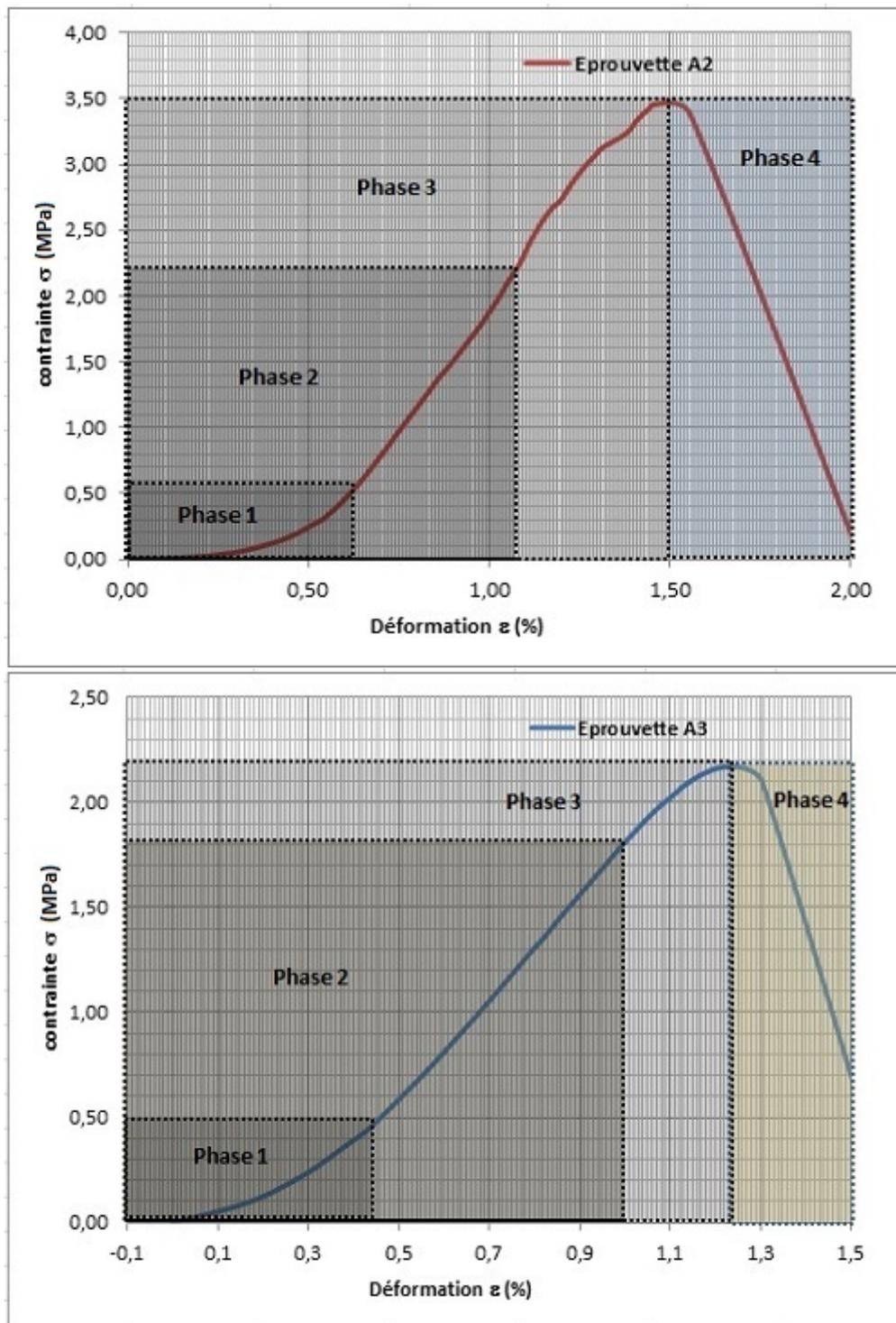


FIGURE 3.33 – Courbe contrainte - déformation des échantillons cylindriques en compression uniaxiale simple

linéaire de la courbe contrainte-déformation est due alors à la déformation élastique des grains et des pores (Pasterson, 1978).

- **Phase 3 :** Cette phase correspond à l'apparition des premières microfissures mécaniques induites par la contrainte. Elle débute à un niveau qui se situe en général à plus 60% de la résistance à la rupture et va jusqu'au pic de la rupture. Cette phase marque le début d'amorçage et de propagation de la microfissuration (phase d'endommagement). Les microfissures induites sont réparties aléatoirement et uniformément dans l'éprouvette dans un premier temps puis deviennent fortement inhomogènes et se concentrent sur une zone pour se relier entre elles et évoluer vers une macrofissure.
- **Phase 4 :** C'est la phase post-pic. Elle correspond à l'endommagement progressif de la zone de déformation localisée qui mène à la phase finale de l'effondrement de certaines éprouvettes ou au détachement de certaines parties (figure 3.32). Pour les latérites, la phase post-pic est brutale et on observe rarement un deuxième pic. Ceci se traduit par un effondrement total ou, après la contrainte de rupture, sans remise en compression des parties résistantes.

D'autres courbes enregistrées lors des essais sur blocs et éprouvettes cylindriques effectués dans les deux laboratoires sont jointes en Annexe B

Les courbes enregistrées sur le matériau présentent une allure contrainte-déformation comparable à celle observée sur des roches fragiles (Nougier, 2000) avec une rupture rapidement atteinte. La rupture intervient en même temps que la perte de linéarité du matériau. Les latérites ont donc un comportement élastique-fragile (Grolier *et al.*, 1991).

Courbe contrainte-déformation avec cycle de chargement-déchargement :

Pour les essais sur éprouvette cylindrique (100 x 200 mm) avec cycle de chargement-déchargement à vitesse constante (0.1mm/s), sur les courbes de la figure 3.34, on observe les mêmes phases enregistrées qu'en compression simple. Cependant, sur ces courbes, on observe l'irréversibilité des déformations après chaque cycle de chargement-déchargement qui peut être attribué au serrage des grains et des pores. Les parties inférieures des courbes de la figure 3.34 montrent bien qu'il reste des déformations résiduelles après les cycles de chargement-déchargement.

L'anélasticité de la latérite : Sur les deux premières courbes de la figure 3.34 (Cycle à déchargement complet et le Zoom de la partie A), les chemins du chargement et du déchargement ne coïncident pas. La latérite a donc un comportement anélastique. A la rupture, la déformation ε_r se décompose en une partie ε_{el} , récupérable par déchargement (partie élastique) et une partie ε_p qui subsiste après déchargement (partie plastique ou anélastique de la déformation) :

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{el} + \varepsilon_p \quad (3.49)$$

Plusieurs auteurs ont démontré ce comportement anélastique des roches et le caractère permanent de la déformation irréversible tant que l'application d'une nouvelle contrainte ne vient pas la perturber (Leblond, 2003; Onaisi, 1989; McClintock et Argon, 1966).

D'un échantillon à l'autre, ces déformations irréversibles après un premier cycle de chargement (0,20 MPa) peuvent atteindre 0,10% à 0,20%, et ce, en fonction de la résistance à la rupture de l'échantillon. Aux cycles suivants, la variation de la déformation résiduelle en fonction de la charge maximale du cycle est remarquable et croît de façon linéaire avec une très bonne corrélation (Figure 3.35).

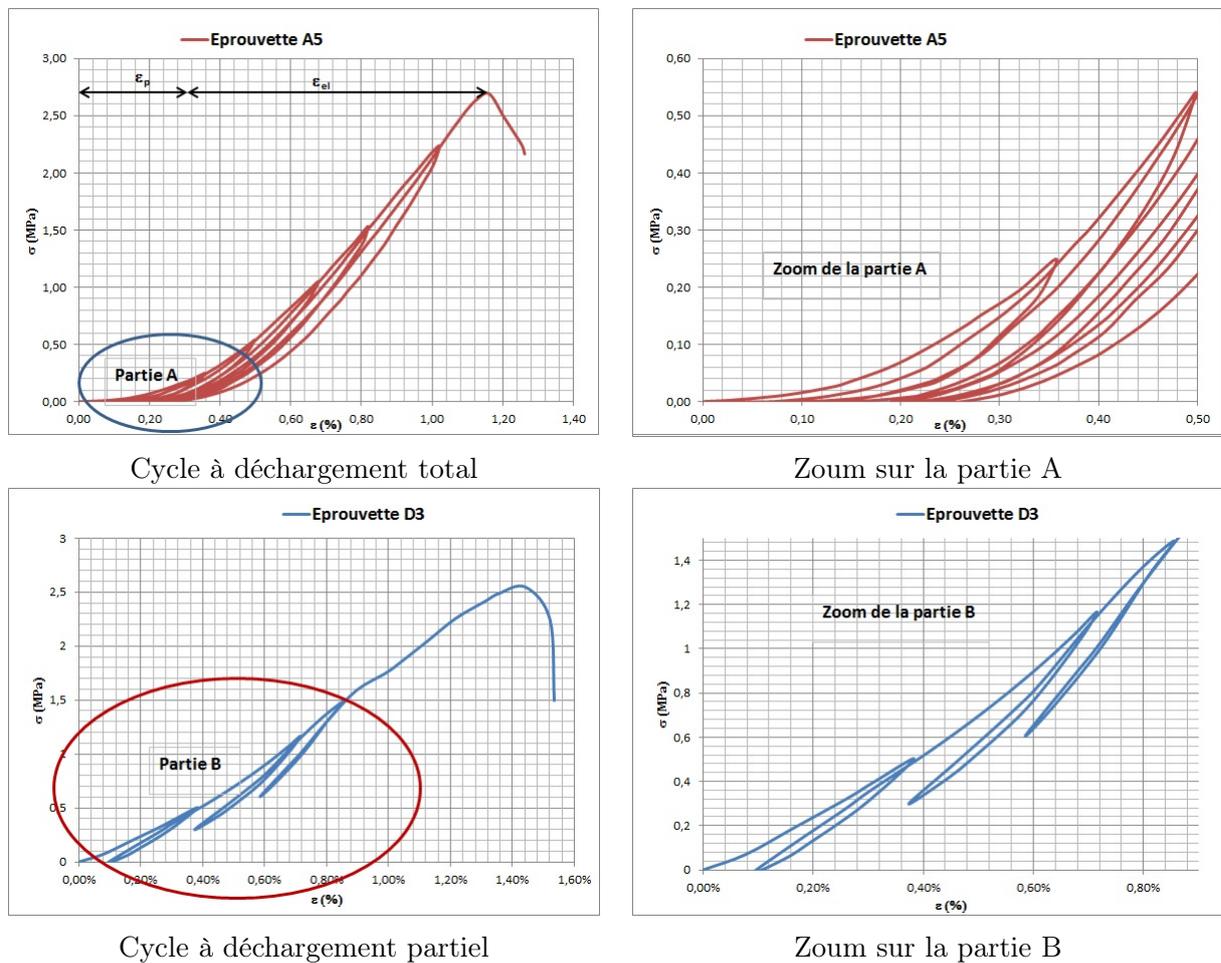


FIGURE 3.34 – Courbe contrainte - déformation avec cycle de chargement-déchargement

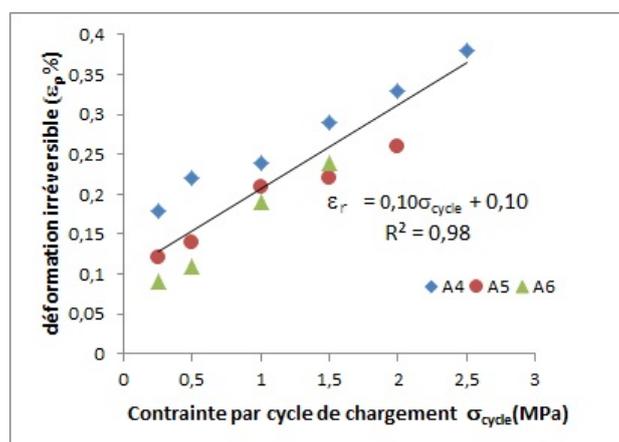


FIGURE 3.35 – Variation de la déformation irréversible en fonction du cycle de chargement

3.4.2.3 Modules de déformation de la latérite

Résultats des essais sur blocs avec la presse CONTROLAB- LEMC :

L'utilisation de cette presse ne permet de tracer que la partie linéaire de la courbe contrainte déformation. Les modules tangents (pente de la partie linéaire) des blocs de dimensions 20 x 20 x 15 cm sont les seuls calculés. Les résultats moyens par carrière sont rassemblés dans le tableau 3.13.

Tableau 3.13 – Module d'élasticité tangent des blocs 20 x20 x 15 cm (Presse CONTROLAB)

Carrière	Nb. Ech.	Etat	σ _c (MPa)	Module d'élasticité tangent E _t (MPa)			
			Moy.	Moy.	Max.	Min.	Ecart-type
Dano PN	4	nat.	7,14	250	276	221	±23
	5	sec	3,56	289	357	224	±50
	6	sat.	3,12	178	264	104	±68
Koubri	15	sec	1,93	49	100	21	±25
	15	nat	0,92	31	57	14	±33
	15	sat.	0,75	30	70	12	±36
Tigal	15	sec	1,04	35	37	33	±40
	15	nat	1,01	32	36	27	±38
	15	sat.	0,76	27	39	21	±31

Il ressort, tout comme pour la résistance à la compression, que le module tangent moyen des blocs de la carrière de Dano PN est nettement supérieur à ceux des carrières de la région du Kadiogo (Koubri, Tigaldégué et Balkouin). Ceci pourrait s'expliquer par les mêmes raisons

exposées dans le paragraphe 2.4.2.1. Elles se résument en deux points : la qualité visiblement meilleure des blocs de Dano PN et la taille mécanisée qui leur confère une régularité de surface d'application de contrainte lors de l'écrasement des éprouvettes ; la tendance à choisir les zones de faibles résistances compte tenu des moyens très limités dont disposent les artisans-tailleurs pour l'exploitation des blocs.

Les résultats sont également dispersés mais dans le même ordre de grandeur que les modules de certains matériaux utilisés en maçonnerie tels que le calcaire (20-100 MPa) utilisé dans la construction des remparts de Blaye (Ezzdine, 1999) ; le BLT de Malabar (50-200 MPa) (Kasthurba, 2006) utilisé dans la maçonnerie en Inde, ...

Résultats des essais sur éprouvettes cylindriques avec la presse Bishop - LOMC :

Ces essais ont porté uniquement sur les échantillons provenant de la carrière de Dano.

Avec la presse Bishop, la qualité du système d'acquisition de la presse a permis d'obtenir des courbes contrainte-déformation qui permettent de calculer le module d'élasticité tangent (E_t), le module moyen (E_{av}) et le module sécant (E_s) en compression monoaxiale simple, selon les définitions exposées dans la partie bibliographie de ce chapitre. Pour les essais de compression avec cycle de chargement-déchargement, les modules sécants des éprouvettes ont été calculés en suivant la méthode illustrée par les figures 3.36 (a) et (b).

Les tableaux 3.14 et 3.15 présentent les valeurs des modules obtenus sur toutes les éprouvettes cylindriques de dimensions 100 x 200 mm et 50 x 100 mm. Les essais n'ont pas pu être réalisés en grand nombre compte tenu de la difficulté à transporter les éprouvettes du Burkina Faso en France.

Tableau 3.14 – Modules de Young sécant, moyen et tangent en compression simple - Presse Bishop

Paramètre	Eprouvettes 100x200				Eprouvettes 50x100				
	A1	A2	A3	Moy.	B1	B5	D4	D5	Moy.
σ_c (MPa)	3,27	3,46	2,17	2,97	2,08	3,14	3,29	2,08	2,65
E_t (MPa)	475	477	340	431	313	795	532	327	492
E_{av} (MPa)	350	377	248	325	281	681	341	304	402
E_s (MPa)	311	176	151	212	208	476	235	208	282
$\frac{E_{av}}{E_t}$	0,74	0,79	0,73	0,75	0,90	0,86	0,64	0,93	0,82
$\frac{E_{av}}{E_s}$	1,13	2,15	1,64	1,53	1,35	1,43	1,45	1,46	1,43

Pour la carrière de Dano PN, bien que les formes des éprouvettes soient différentes, la valeur du

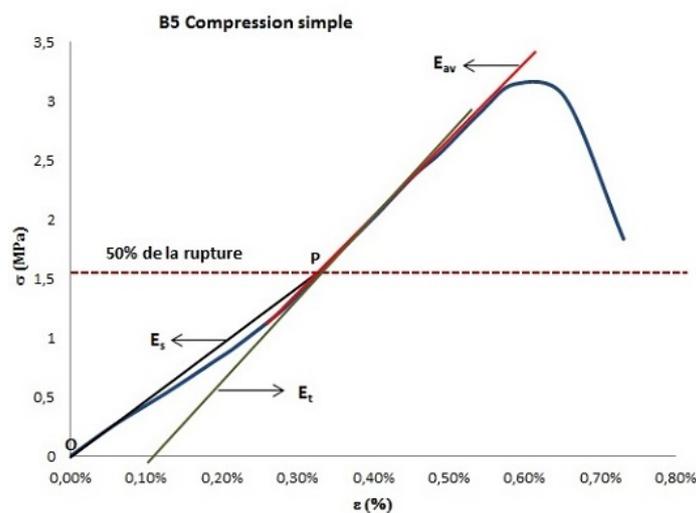
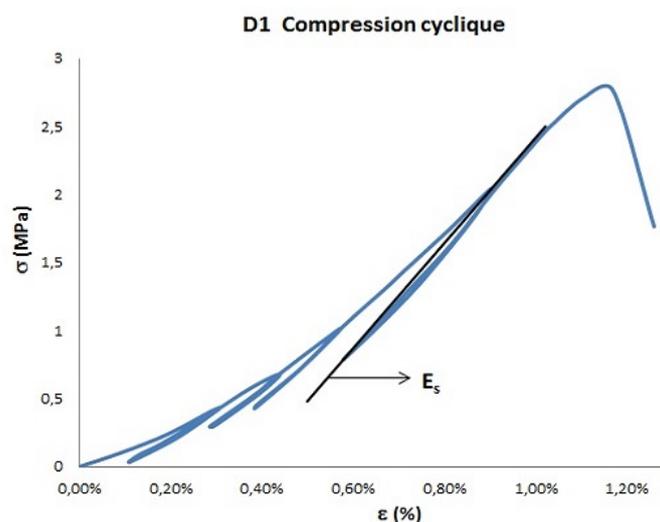
(a) Modules E_t , E_s et E_{av} en compression simple(b) Module E_s en compression cyclique

FIGURE 3.36 – Illustration des différents modules calculés

module de Young moyen en compression simple des blocs secs obtenu avec la presse CONTROLAB du LEMC (250 MPa) est du même ordre de grandeur que ceux des éprouvettes testées avec la presse Bishop du LOMC (212 MPa, 282 MPa respectivement pour les éprouvettes 100 x 200 mm et 50 x 100 mm). La forme et la taille des éprouvettes ont une grande importance dans les essais de compression. En effet, des travaux sur des roches ont montré cette dépendance. La résistance et le module de Young augmentent quand la taille des éprouvettes diminue.

Le suivi de la variation du module sécant en fonction du cycle de charge-décharge a permis de mettre en évidence une relation linéaire en ce module et la contrainte appliquée par cycle (figure 3.36).

Tableau 3.15 – Modules de Young sécants à cycle de chargement-déchargement - Presse Bishop

Paramètre	Module sécant - E_s (MPa)						
	Déchargement complet				Déchargement partiel		
	A4	A5	A6	Moy.	D1	D3	Moy.
σ_c (MPa)	3,75	2,70	3,51	3,32	2,77	2,55	2,66
Cycle 1 (0,5 MPa)	95	107	140	114	118	173	146
Cycle 3 (1,0 MPa)	195	153	169	172	271	249	260
Cycle 4 (1,5 MPa)	237	223	214	225	305	326	316
Cycle 5 (2,0 MPa)	275	257	277	270	394	-	394
Cycle 6 (2,5 MPa)	318	280	-	299	-	-	-

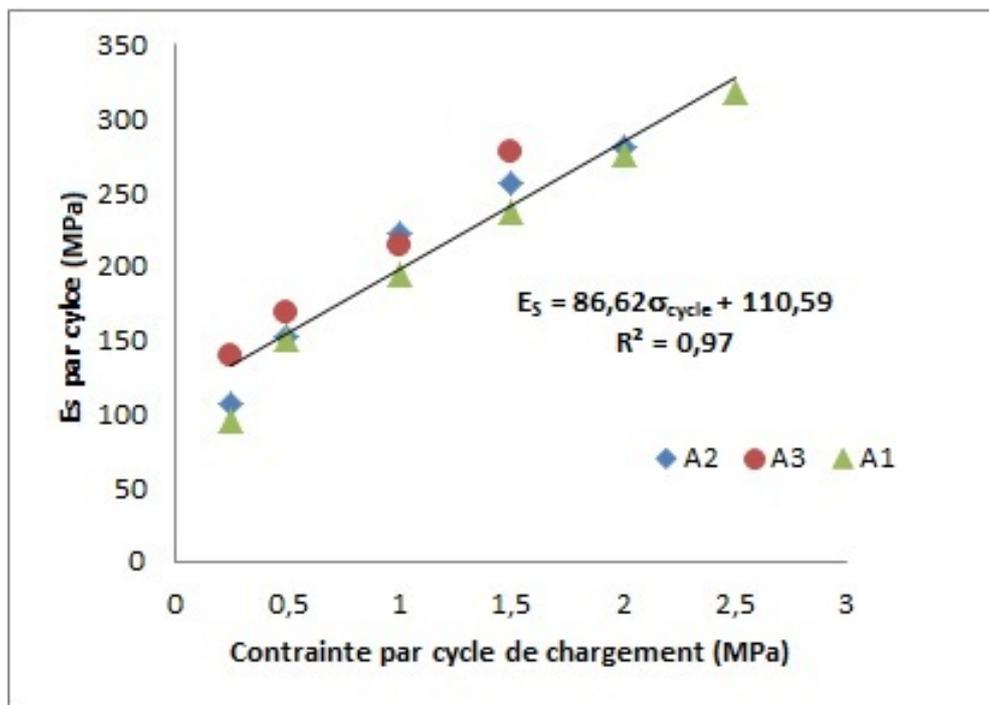


FIGURE 3.37 – Variation du module sécant en fonction de la contrainte du cycle de charge-décharge

3.4.2.4 Résistance à la flexion 3 points

Les valeurs moyennes, maximales et minimales, obtenues avec l'essai de flexion 3 points sur des dalles de dimensions 10 x 20 x 5 cm, sont présentées dans le tableau 3.16.

La carrière de Dano PN semble présenter de meilleurs résultats avec des valeurs de contrainte à la flexion à l'état sec comprises entre 0,5 à 1,8 MPa et une valeur moyenne de 1,15 MPa contre

Tableau 3.16 – Résultats des essais de résistance à la flexion 3 points (σ_t) par carrière

Carrière	Nb. Ech.	Etat hydrique	σ_t (MPa)			
			Moy.	Max	Min	Ecart-type
Dano PN mécanisée 40 x 20 x 5 cm	9	nat	1,15	1,85	0,54	$\pm 0,40$
Koubri artisanale 40 x 20 x 5 cm	6	sec	1,02	1,64	0,71	$\pm 0,36$
	6	nat.	0,59	0,76	0,45	$\pm 0,16$
	6	sat.	0,36	0,74	0,21	$\pm 0,22$
Tigal artisanale 40 x 20 x 5 cm	3	sec	0,44	0,73	0,22	$\pm 0,20$
	11	nat.	0,41	0,47	0,31	$\pm 0,08$
	7	sat.	0,31	0,63	0,13	$\pm 0,17$

1.02 pour la carrière de Koubri et 0.44 MPa pour la carrière de Tigaldégué.

Tout comme la résistance à la compression, la résistance à la flexion diminue avec l'état hydrique des éprouvettes. Les résultats sont variables et les meilleures valeurs dans une carrière sont obtenues dans les horizons superficiels ($< 3m$).

La résistance moyenne à la flexion à l'état sec de Dano PN est de l'ordre de 30% de la résistance à la compression moyenne obtenue dans le même état hydrique, contre 42% pour la carrière de Tigaldégué et 52% pour la carrière de Koubri. La discussion du ratio "résistance à la compression/résistance à la traction" est délicate car la résistance à la traction varie suivant la procédure utilisée soit par essai brésilien, soit par flexion 3 points (Hudson et Harrison, 1997).

3.4.2.5 Vitesse des ondes ultrasoniques et corrélations avec d'autres propriétés

Les mesures de la vitesse des ultrasons à l'état sec (étuvage à 105°C pendant 48 heures) ont été effectuées sur 20 éprouvettes dont les masses volumiques et la porosité ont été déterminées préalablement. Pour tenir compte de la variabilité des mesures, trois mesures ont été effectuées par éprouvettes et par la suite, la moyenne considérée comme vitesse de l'éprouvette.

Tout comme les paramètres physiques et mécaniques, la vitesse des ultrasons des ondes P est variable (2175 m/s - 3310 m/s) avec une moyenne de 2700 m/s. D'après la littérature, cette variabilité peut s'expliquer par plusieurs facteurs. En effet, la vitesse des ondes P des roches est contrôlée par :

- les minéraux fortement anisotropes contenus dans les roches qui peuvent entraîner une anisotropie de vitesse de l'ordre de 10% (Guéguen et Palciauskas, 1997). L'indice d'anisotropie de la vitesse V_p des minéraux est variable (cf. section 3.2, Tableau 3.2);

- l'orientation préférentielle des minéraux, la porosité ou l'orientation des microfissures affectant l'échantillon, peuvent imposer aux ondes de suivre un chemin préférentiel ;
- la lithologie est aussi un facteur déterminant en ce qui concerne les vitesses des ondes dans la mesure où les caractéristiques élastiques des minéraux constitutifs sont différentes. Bien qu'ici, les mesures de la vitesse n'ont été mesurées que dans la direction perpendiculaire à la stratification, la variation de la vitesse selon la direction parallèle et la direction perpendiculaire a été observée par de nombreux chercheurs (Guéguen, 1992; Guéguen et Palciauskas, 1997; Ezzdine, 1999).

Pour ces raisons, les interprétations faites avec les mesures de la vitesse des ultrasons concernent uniquement la variation de celle-ci en fonction de la masse volumique, de la porosité et de la résistance à la compression des échantillons.

Vitesse et propriétés physiques :

Les figures 3.38 (a) et (b) présentent les variations observées en fonction de la masse volumique et de la porosité des échantillons testés.

Nous remarquons qu'à l'état sec, la vitesse et la densité augmentent ensemble alors que la vitesse diminue dans les échantillons plus poreux. Les éprouvettes qui ont servi à cet essai proviennent d'une carrière poreuse (porosité moyenne de l'ordre de 31%), riche en kaolinite (40%) et contenant des proportions moyennes d'oxyde de fer et d'autres éléments secondaires comme le Mg, le P

La variation de la vitesse est donc liée à la variation de la porosité et à la présence des minéraux dont la vitesse et la densité sont variables. En effet, la vitesse de fer est de l'ordre de 3,4 km/s alors que les phases argileuses dont la kaolinite, ont une vitesse comprise entre 1,8 et 2,4 km/s (conf. section 3.2, tableau 3.2). La vitesse moyenne faible des échantillons confirme bien la dominance de la kaolinite et la porosité élevée des éprouvettes. D'une manière plus générale, la corrélation vitesse-densité a des fondements plus compliqués et se situe à l'échelle microscopique. En effet, pour les minéraux, dans l'équation 3.50 (voir section 3.2), le module k d'incompressibilité dépend des constantes microscopiques comme les masses atomiques des éléments chimiques des minéraux. Donc à masse atomique moyenne constante, k augmente avec la masse volumique ρ ainsi que V_p .

$$V_p = \sqrt{\frac{k_{hom} + \frac{4}{3}\nu_{hom}}{\rho_{hom}}} \quad (3.50)$$

La variation de la vitesse avec la porosité peut s'expliquer par le fait que la vitesse s'exprime en fonction des propriétés élastiques du matériau qui varient tous en fonction de la propriété (voir

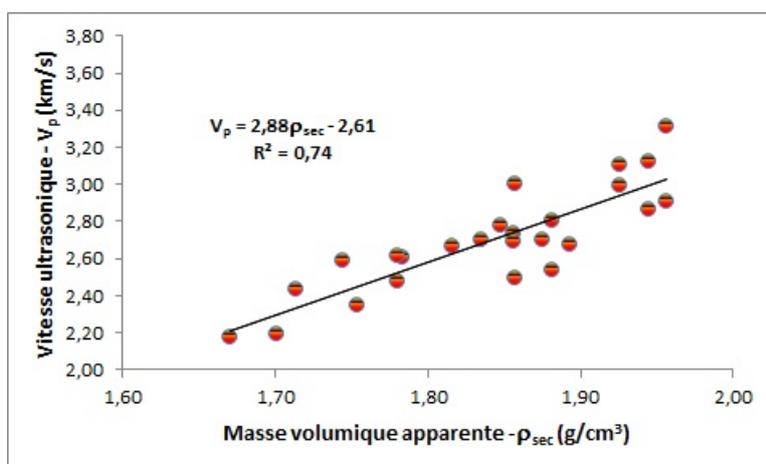
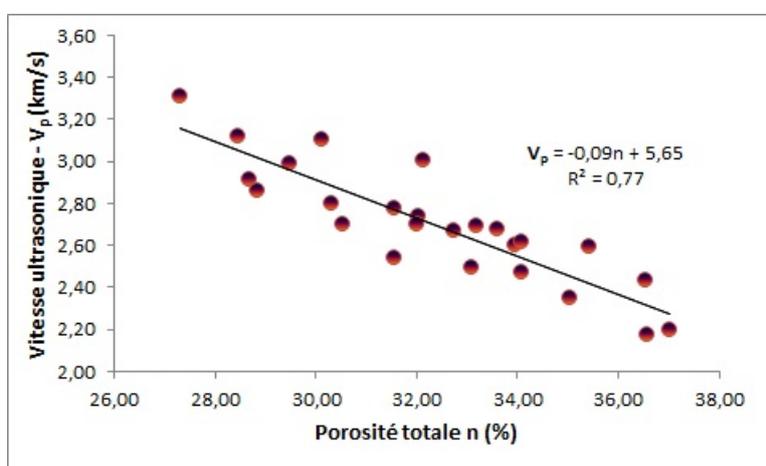
(a) Variation de V_p avec de la masse volumique(b) Variation de V_p avec la porosité

FIGURE 3.38 – Variation de la vitesse des ondes P en fonction de la masse volumique sec et de la porosité

Equation 3.50).

Vitesse des ondes ultrasoniques et propriétés mécaniques

Une augmentation de la résistance à la compression avec celle de la vitesse a été également observée pour les éprouvettes qui ont été soumises au test de compression (Figure 3.39). Une telle corrélation permet d'estimer la résistance des latérites sur le site de façon rapide, avec cet essai non destructif et peu coûteux. Cependant, compte tenu de la spécificité de chaque carrière, des mesures préalables en grand nombre sont nécessaires pour extrapoler les résultats.

Le module de Young dynamique E_d calculé avec l'équation 3.47 pour quelques échantillons est présenté dans le tableau 3.17. Ce module comparé au module statique sécant déterminé avec la

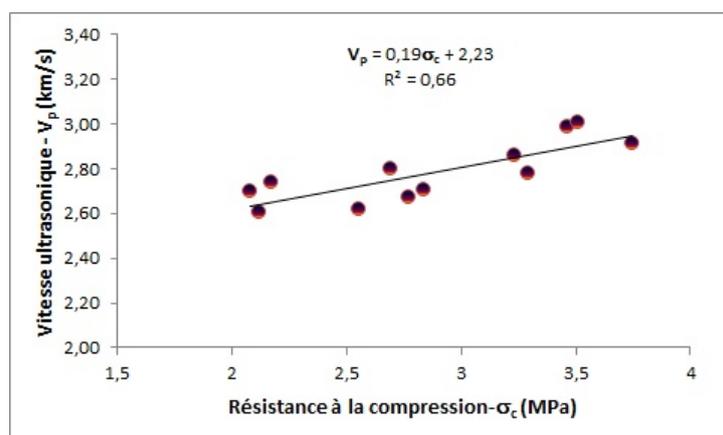


FIGURE 3.39 – Variation de la vitesse des ondes P avec la résistance à la compression

courbe contrainte-déformation, est de l'ordre 20 fois plus élevé. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que la méthode dynamique est basée sur la mesure des petites déformations.

Tableau 3.17 – Module de Young dynamique et statique

Echan	Module statique (E_s -GPa)	Module tangent (E_t -GPa)	Module dynamique (E_d -GPa)	$\frac{E_d}{E_s}$	$\frac{E_d}{E_t}$
A1	0,311	0,475	4,27	8,99	13,74
A2	0,176	0,477	4,33	9,08	24,58
A3	0,151	0,340	3,76	11,08	24,87
B1	0,208	0,313	4,66	14,89	22,40
D4	0,235	0,532	3,87	7,27	16,48
D5	0,208	0,327	3,87	11,83	18,62
Moy.				10,52	20,11

3.4.3 Les propriétés thermiques

Les échantillons utilisés pour l'étude thermique proviennent de la carrière de Dano mais sont de qualité différente :

- Ceux utilisés pour les essais par la méthode de fluxmètre et celle du plan chaud sont denses, de couleur rouge ocre, riche en oxyde de fer, avec une porosité de l'ordre de 30% (voir section 3.3.4 : Figures 3.21 et 3.22). Ils ont été prélevés dans les horizons supérieurs (1 - 3 m) de la carrière de Pierres Naturelles. Ils ont été taillés à la scie mécanique et présentent de ce fait, des surfaces régulières, nécessaires à la superposition de la résistance chauffante plate rectangulaire (pour la méthode de plan chaud) et des surfaces planes des capteurs du fluxmètre ;

- Ceux utilisés pour les essais par la méthode de K2D Pro proviennent d'une autre carrière plus poreuse (30-38%) et tachetés de blanc (riche en kaolinite), exploitée de façon traditionnelle par les "artisan-tailleurs" avec des moyens artisanaux compte tenu de sa tendresse (voir section 3.3.4 : Figure 3.19). Pour cette carrière qui offre une facilité de perforation des éprouvettes sans rupture pour introduire la sonde K2D Pro, quatre profils ont été étudiés sans distinction de la profondeur d'extraction. En plus des essais sur échantillons séchés à l'étude à 105 ° pendant 24 h, les tests à teneur en eau variable jusqu'à la saturation des échantillons ont été également effectués.

3.4.3.1 Présentation des résultats obtenus par les trois essais

Les tableaux 3.18 et 3.19 présentent les résultats des paramètres mesurés avec les méthodes de plan chaud et du fluxmètre.

Tableau 3.18 – Résultats des mesures par la méthode de de plan chaud

N° Echan. ¹	Masse.Vol. ² ρ [kg/m ³]	Cond. Ther. ³ λ [W/(m. ° K)]	Chaleur Spé. ⁴ C_p [J/(kg.K)]	Effus. ⁵ E [W.s ^{0.5} /(m ² .°C)]	Dif. ⁶ a [10 ⁷ .m ² /s]
E01	2272	0,856	705	1171	5,34
E03	2270	0,889	747	1229	5,24
Moy.	2271	0,872	726	1200	5,29

Tableau 3.19 – Résultats des mesures par la méthode de fluxmètre

N° Echan.	Masse.Vol. ρ [kg/m ³]	Cond. Ther. λ [W/(m. ° K)]	Chaleur Vol. $\rho.C_p$ [kJ/(m ³ .K)]	Chaleur Spé. C_p [J/(kg.K)]
Pavé 1	1976	0,755	2302	1165
Pavé 2	1973	0,770	2291	1161
Pavé 3	1981	0,775	2310	1166
Moy. Pavé	1977	0,767	2301	1164
Barre 1	1986	0,783	2274	1145
Barre 2	1973	0,786	2270	1150
Barre 3	1990	0,792	2293	1152
Moy. Barre	1983	0,787	2279	1149

1. Echantillon
2. Masse volumique
3. Conductivité thermique
4. Chaleur spécifique
5. Effusivité
6. Diffusivité

Les valeurs moyennes de conductivité thermique obtenues par ces deux méthodes sont de même ordre de grandeur (0,872 W/(m. ° K) pour la méthode de plan chaud, 0,767-0,787 W/(m. ° K) pour la méthode de fluxmètre).

Les valeurs élevées de la conductivité déterminée par ces deux méthodes pourraient être expliquées par la densité très élevée des grains solides du matériau de la carrière de Dano PN (3.1). En effet, certains auteurs (Dawson et Briggs, 1981; Doat, 1985), ont proposé un modèle d'estimation de la conductivité d'un matériau par une moyenne pondérée de la conductivité de la phase solide (λ_s) et de la phase fluide (λ_f) par une relation de type :

$$\lambda = \lambda_s^{1-n} \cdot \lambda_f^n \quad (3.51)$$

où n est la porosité du matériau.

Les minéraux dominants de la latérite de Dano sont le quartz de conductivité thermique, $\lambda_s \approx 6$ W/m ° K et les autres minéraux tels que le fer, le silice, de conductivité thermique moyenne $\lambda_s \approx 3$ W/m ° K.

Pour les essais effectués en grand nombre (21 échantillons) avec la méthode du K2D Pro, les résultats sont présentés dans le tableau 3.20. Il faut signaler que pour ces essais, des étalonnages préalables ont été effectués avec des étalons de paramètres thermophysiques connus (acier, cuivre). Aussi, pour le calcul de la porosité, la mesure de poids spécifique des grains n'a pas été effectuée sur tous les échantillons. Des tests sur quelques échantillons a donné une valeur moyenne de $28kN/m^3$. Cette valeur a été considérée pour tous les échantillons.

La valeur moyenne de la conductivité thermique de 0,510 est inférieure à celles obtenues avec les deux autres méthodes même à cause de la densité moyenne faible des échantillons (1,82 contre ≈ 2 pour ceux de deux autres méthodes).

Par la suite, compte tenu du nombre de tests et des résultats globalement moins dispersés, les discussions vont être basées sur les résultats de cette méthode.

Le tableau 3.21 présente les conductivités thermiques des matériaux couramment utilisés en maçonnerie et un indice de comparaison (I_λ) défini comme le rapport de ces conductivités et celle de la valeur moyenne de la carrière artisanale de Dano.

On peut observer que certaines roches comme le calcaire, le granite et autres roches volcaniques massives, ont une conductivité thermique de 2 à 6 fois plus élevée à celle du BLT de la carrière artisanale de Dano. Ceci pourrait être expliqué par la différence structurale des roches. En effet, pour le BLT de Dano, la porosité est très élevée, par conséquent, une plus faible conductivité thermique. La même interprétation peut être faite pour d'autres matériaux massifs comme les briques de terre cuites, les briques de terre comprimée ou le béton. Pour les matériaux moins denses comme le béton léger, les briques comprimés, l'indice de comparaison est proche de 1, c'est à dire que les conductivités thermiques sont comparables.

Tableau 3.20 – Résultats des mesures avec KD2-Pro

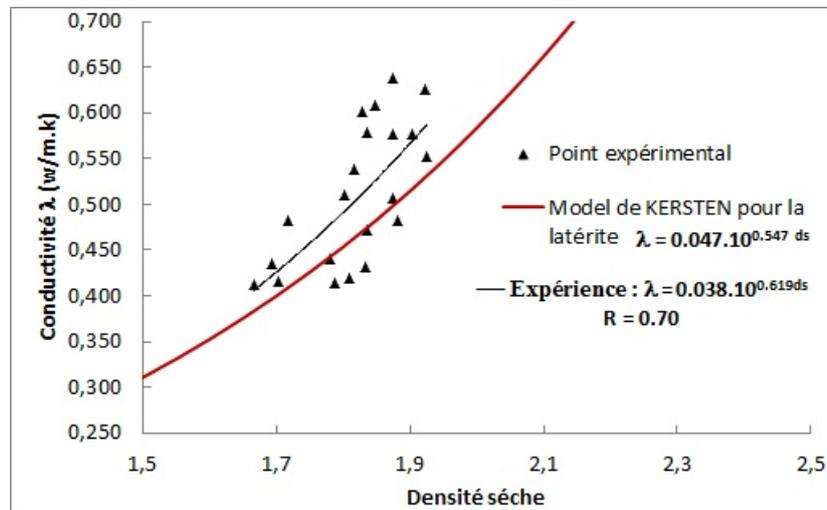
Profil	N° Echan.	Densité	Porosité	Cond.Ther.	Cap.vol.	Dif.
N°	N°	(d_s)	(n %)	$\lambda(\text{W/m.}^\circ\text{K})$	$C_p(\text{MJ/m}^3.\text{K})$	(mm^2/s)
A	A1	1,92	30,12	0,625	1,916	0,326
	A2	1,90	30,76	0,577	1,395	0,414
	A3	1,83	33,28	0,471	1,632	0,289
	A4	1,93	29,98	0,552	1,922	0,287
	A5	1,88	31,57	0,482	1,621	0,275
	A6	1,83	33,38	0,432	1,625	0,266
B	B1	1,70	38,08	0,415	1,246	0,333
	B2	1,69	38,39	0,435	1,252	0,339
	B3	1,87	31,88	0,576	1,704	0,338
	B4	1,87	31,88	0,638	1,092	0,585
	B5	1,81	34,23	0,420	1,367	0,307
C	C1	1,72	37,51	0,483	1,158	0,422
	C2	1,79	35,03	0,414	1,274	0,325
	C3	1,80	34,51	0,510	1,248	0,409
	C4	1,67	39,44	0,413	1,530	0,270
	C5	1,83	33,47	0,601	1,667	0,360
D	D1	1,82	33,98	0,538	1,737	0,310
	D2	1,78	35,28	0,441	1,175	0,375
	D3	1,85	32,82	0,609	1,260	0,555
	D4	1,88	31,81	0,507	1,253	0,405
	D5	1,84	33,26	0,579	1,303	0,445
Moy.[E.type.]	.	1,82[0,07]	33,84[2,69]	0,510[0,08]	1,447[0,25]	0,364[0,09]

Tableau 3.21 – Valeurs de conductivité thermique des matériaux

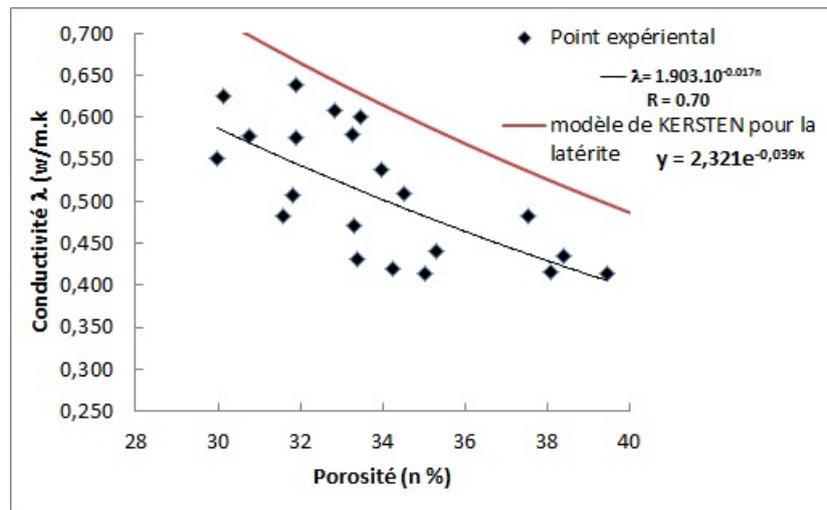
Matériau	Cond.Ther.(λ)	Indice comparaison	Référence
	($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	(I_λ)	
Roche calcaire Turc	1,42	2,78	Turgut <i>et al.</i> (2008)
Roche volcanique	3,50	6,86	Couasnet et Blachère (2007)
Calcaire	1,70	3,33	Couasnet et Blachère (2007)
Roches variables	0,60 - 2,90	1,18 - 5,69	Yasar <i>et al.</i> (2008)
BTC stabilisée au ciment	0,50 - 1,15	0,98 - 2,25	Meukam <i>et al.</i> (2004)
Brique de terre cuite	1,00 - 1,35	1,96 - 2,65	Recknagel <i>et al.</i> (1995)
BTC non stabilisée	1,05	2,06	Recknagel <i>et al.</i> (1995)
Béton	1,40 - 1,75	2,75 - 3,43	Couasnet et Blachère (2007)
Béton léger	0,15 - 0,85	0,29 - 1,67	Couasnet et Blachère (2007)

3.4.3.2 Influence de la densité sèche et de la porosité

Les figures 3.40 (a) et (b) présentent respectivement la variation de la conductivité thermique en fonction de la densité apparente et de la porosité des éprouvettes.



(a) Conductivité en fonction de la densité



(b) Conductivité en fonction de la porosité

FIGURE 3.40 – Conductivité thermique en fonction de la densité et de la porosité

Elles permettent de mettre en évidence une variation remarquable de ce paramètre en fonction de la densité sèche (d_s) ou de la porosité totale (n) selon une loi exponentielle avec corrélation de l'ordre de 0,70.

Kersten *et al.* (1966) ont proposé pour les sols un modèle de type :

$$\lambda = A.10^{(B.d_s)} \quad (3.52)$$

ou

$$\lambda = A' \cdot 10^{(B'n)} \quad (3.53)$$

où A , A' , B , et B' sont des constantes et d_s et n la densité sèche et la porosité.

Ce modèle testé par d'autres auteurs (Farouki, 1986; Kluitenberg *et al.*, 1993) pour différents types de sol a donné des résultats satisfaisants.

Pour les blocs de latérite comprimés (BTC) d'Afrique (densité de grain solide 3.1 et de porosité comprise entre 15% et 45%), Laurent (1987) a trouvé les valeurs de A , B , A' , B' présentées dans le tableau 3.22 avec un très bon coefficient de régression ($r=0,978$). Les coefficients obtenus pour la latérite de Dano (Tableau 3.22) sont proches de ceux de Laurent (1987) et les deux courbes sont assez semblables dans leur partie inférieure. La dispersion des résultats pour les valeurs de densité supérieure à 1,8 s'explique par la répartition aléatoire de la porosité dans les échantillons, contrairement à celles des blocs de latérite compactée utilisés par Laurent (1987). Cependant les valeurs restent en dessous de celles du modèle de Laurent tout en suivant l'allure de la courbe.

Tableau 3.22 – Coefficients A , B , A' , B' selon le modèle de Kersten *et al.* (1966)

	A	B	A'	B'	r
BTC (d'après Laurent (1987))	0,047	0,547	2,321	-1,697	0,978
BLT Dano	0,038	0,619	1,903	-0,017	0,700

3.4.3.3 Influence de la teneur en eau

Des essais contrôlés de saturation des échantillons ont permis de tracer la courbe de la variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau (Figure 3.41). L'augmentation de la teneur en eau se traduit rapidement par une hausse de la conductivité thermique. La corrélation linéaire (Figure 3.41) obtenue n'est pas proche de la fonction empirique proposée par Campbell *et al.* (1994) qui relie la conductivité à la teneur en eau et à des coefficients dépendant de la composition minéralogique du sol. À saturation, toutes les conductivités observées restent inférieures à 1.8 W/(m. ° k). En Afrique tropicale, cette valeur ne peut être observée dans les maçonneries du fait de la mauvaise pluviométrie et de la position verticale des édifices qui n'encouragent pas les infiltrations.

3.5 Conclusion

Afin de caractériser le matériau, une série de mesures physiques, mécaniques et thermiques a été réalisée sur les quatre carrières de latérite.

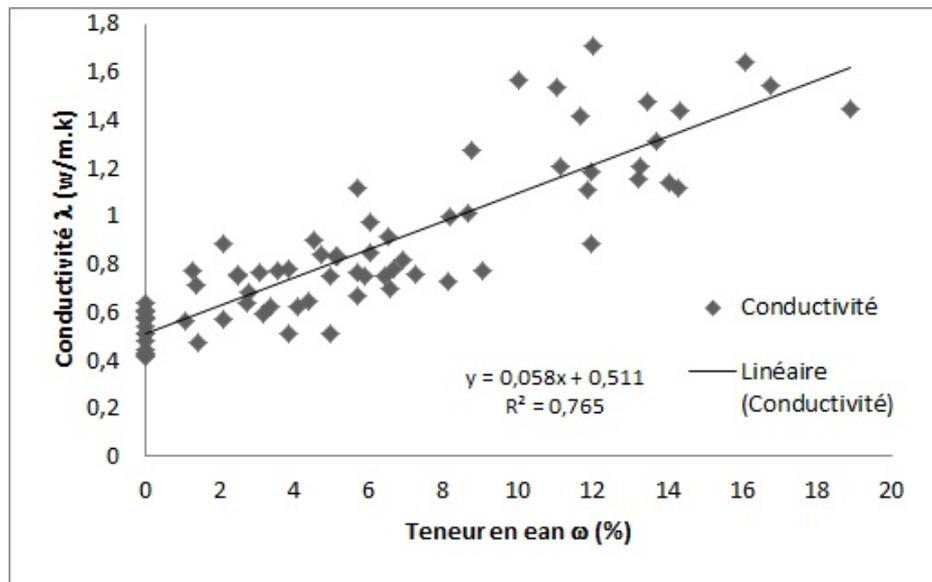


FIGURE 3.41 – Conductivité en fonction de la teneur en eau

- Les études physiques ont montré que :
 - La porosité du matériau est variable d'une carrière à l'autre et au sein même d'une carrière. La porosité totale de la carrière de Dano de l'ordre de 30% est inférieure à celle des autres carrières qui avoisine souvent une porosité proche de 40%. Ces valeurs de porosité n'ont pas pu être approchées au porosimètre au mercure qui donne des valeurs de l'ordre de 20% compte tenu de la représentativité de la taille des échantillons utilisés mais elles restent supérieures à celles de la porosité accessible à l'eau approchée par des mesures d'absorption maximale par immersion (14-16%). Le suivi de l'absorption dans le temps a révélé que globalement, ces valeurs maximales sont atteintes après 24 heures.
 - Les valeurs moyennes du poids spécifique des échantillons de toutes les carrières sont dans le même ordre de grandeur ($28-31 \text{ kN/m}^3$) avec des valeurs plus élevées observées avec les échantillons provenant de la la carrière de Dano.
 - Le poids volumique apparent des blocs est également variable ($21,7-19,7 \text{ kN/m}^3$). Des valeurs plus petites ont été obtenues avec des éprouvettes isolées, plus poreuses, utilisées dans les études mécaniques (17 kN/m^3). Les valeurs élevées sont également observées dans la carrière de Dano.
- Les études mécaniques ont porté sur la détermination de la résistance à la compression

uniaxiale simple et avec des cycles de charge-décharge, la détermination des modules de déformation élastique en compression sur des éprouvettes parallélépipédiques et cylindriques, la mesure des résistances à la traction par flexion 3 points et la mesure de vitesse des ondes ultrasoniques. Ces mesures ont révélé que :

- Globalement les BLT présentent un comportement de type élasto-fragile avec une rupture brutale et un endommagement du matériau par détachement après la phase post-rupture.
- La résistance à la compression est variable au sein d'une carrière en fonction de l'état hydrique du matériau, de la profondeur, de la porosité et de la densité des éprouvettes. En effet, les éprouvettes séchées présentent une résistance à la compression deux fois supérieures alors qu'il n'y a pas une grande différence entre les valeurs de résistance des éprouvettes à teneur en eau naturelle et à l'état saturé. La même variabilité est observée en fonction de la profondeur d'exploitation et de la variation de la taille des blocs mais à des échelles différentes.

Dans l'ensemble des carrières étudiées, les valeurs obtenues à l'état naturel sont inférieures à 5 MPa alors que, certaines éprouvettes séchées à 105°C pendant 24 h ont données des valeurs supérieures à 9 MPa. La carrière mécanisée de Dano a donné les valeurs de résistance les plus élevées alors que les carrières artisanales ont des valeurs faibles. Cela pourrait s'expliquer par la différence des moyens d'exploitation et la tendance à choisir par les artisan-tailleurs des carrières exploitables par leur force physique.

- Selon l'Eurocode 6, le BLT pourrait appartenir au groupe 1 (éléments pleins ou constitués de trous de faible importance). Il doit être caractérisé par une résistance à la compression normalisée f_b déduite de la résistance de moyenne obtenue lors des essais de compression et d'autres paramètres de forme et de conditionnement des échantillons. Pour les BLT, compte tenu la variabilité de la résistance à la compression en fonction de plusieurs facteurs (géologie de la carrière, profondeur, minéralogie et chimie, état hydrique), nous pourrions proposer, au vu des résultats de ce travail, trois classes du matériau dont les tranches de résistance à la compression normalisée sont définies dans le tableau ??.

Tableau 3.23 – Définition des classes de la résistance à la compression normalisée f_b des BLT

Classe	Symbole	Unité	Valeur de f_b
1	R1	MPa	>4
2	R2	MPa	2-4
3	R1	MPa	1-2

- Les modules de Young sont également variables d’une carrière à l’autre. Ceux obtenus avec les éprouvettes de Dano (178-250 MPa) sont 3 à 5 fois plus élevés que ceux des autres carrières (30-50 MPa). Cette variabilité pourrait également s’expliquer par les mêmes raisons présentées ci-dessus mais aussi par l’augmentation de la densité des fissures pendant la phase d’exploitation (coups des pioches).
- La résistance à la traction par flexion 3 points des éprouvettes sont de l’ordre de 30 à 50% de la résistance à la compression. Les valeurs les plus élevées sont observées sur la carrières de Dano PN.
- La mesure des vitesses des ondes P a révélé une forte variabilité de celles-ci en fonction de la densité et de la porosité. La valeur moyenne de 2,03 km/s des éprouvettes montre que ces vitesses sont proches de celles des argiles (vitesse comprise entre 1,8 et 2,4 km/s).
- Les mesures thermiques effectuées sur des éprouvettes de qualités différentes (riches en oxyde de fer d’une part et en kaolinite d’autre part) avec trois méthodes différentes ont montré que la conductivité thermique moyenne des éprouvettes est comprise entre 0,510 et 0,875 W/(m. ° K). Ces valeurs de conductivité de la latérite sont légèrement inférieures à celles des matériaux couramment utilisés dans les constructions comme le BTC et le béton. Elles sont également très largement inférieures à celles des autres roches denses utilisées en maçonnerie. Des corrélations exponentielles et linéaires ont pu être établies entre la porosité des éprouvettes et la conductivité d’une part, et entre la teneur en eau des éprouvettes et la conductivité d’autre part.

Maçonnerie en BLT, modèle mécanique et suivi hygrothermique

Sommaire

4.1 Introduction	143
4.2 Généralités autour de la maçonnerie	145
4.2.1 Typologie des maçonneries	146
4.2.2 Dégradations des maçonneries en pierre de taille	149
4.2.3 Dimensionnement des ouvrages en maçonnerie	154
4.3 Étude de cas de la maçonnerie en BLT de Dano	160
4.3.1 Présentation de la ville de Dano et des carrières d'extraction du BLT	160
4.3.2 Description de la méthodologie	160
4.3.3 Les types d'habitation de la zone enquêtée	162
4.3.4 Description des maçonneries utilisant le BLT	164
4.4 Modélisation mécanique d'un bâtiment en BLT selon l'Eurocode 6	172
4.4.1 Méthodologie	172
4.4.2 Caractéristiques des éléments de maçonnerie	175
4.4.3 Hypothèses de calcul	177
4.4.4 Résultats des modèles et discussions	180
4.5 Suivi hygro-thermique d'un bâtiment en BLT	188
4.6 Conclusion	197

« Depuis l'Antiquité, ce sont les maçons qui ont construit la quasi-totalité de notre patrimoine architectural, dont les cathédrales constituent peut-être le plus beau fleuron » Franck Cotton, 1998.

4.1 Introduction

Après l'étude de caractérisation du matériau BLT et de ses performances mécaniques et thermiques, il faut désormais s'intéresser à son utilisation comme matériau de construction et ainsi répondre aux exigences essentielles de résistance mécanique et de stabilité des constructions en maçonnerie pour prouver la conformité de ces ouvrages. A ces exigences, il

faut également considérer le bien être des usagers, surtout dans les conditions climatiques des zones soudano-sahéliennes (aride en période sèche et chaud et humide en période de mousson). L'exigence de stabilité et de la sécurité en cas d'incendie ne sera pas abordée dans cette étude.

La maçonnerie de BLT cultive des paradoxes : elle est à la fois locale et internationale, locale parce qu'elle est le fruit de besoin de matériaux et de savoir-faire locaux et pourtant internationale parce qu'elle est présente sur toute la ceinture tropicale du globe. Elle est utilisée à la fois pour la construction des ouvrages prestigieux (mairie, musée, villa de standing, fondations . . .) et des habitations courantes. Elle est à la fois très ancienne (le mur de la forteresse de Loropéni au Burkina Faso datée du XI^e siècle, le site d'Angkor au Cambodge datant du IX^e siècle, la stèle commémorative en hommage de F. Buchaman à Angadipuram, dans la province de Kérala en Inde sont en BLT) et encore très actuelle.

Au Burkina Faso, en sillonnant le pays, on trouve un peu partout des constructions en maçonnerie de BLT, non seulement des églises et des monastères, des dispensaires et des écoles, des bâtiments administratifs et de l'habitat, mais aussi des culées ou des piles de viaduc et des caniveaux ou des margelles de puits. Si ce mode de construction fut un temps abandonné au profit des techniques modernes de construction (parpaing, béton, . . .) mais aussi par manque de moyens financiers des populations utilisant ainsi plus le banco ou la terre ou également par choix et traditions, tels que l'habitat en terre du pays Lobi ou à Tiebéle, on observe depuis les années 80 avec la création de LOCOMAT et la bonne volonté et le soutien de certains organismes et entrepreneurs, l'usage de plus en plus fréquent de ce matériau de construction .

Malgré l'intérêt suscité à travers la mise en place des nombreux projets pour valoriser le matériau, préserver le patrimoine en BLT et développer le savoir-faire traditionnel de la maçonnerie en BLT, son expansion est freinée par l'absence de cadre scientifique permettant de garantir sa fiabilité auprès des décideurs. Un des problèmes majeurs de l'utilisation du matériau latérite semble être également le manque de critères standardisés pour en évaluer les performances. Un certain nombre de pays d'Asie et d'Amérique ont élaboré des normes pour valider l'emploi du matériau (Kasthurba, 2006) mais pour les latérites africaines, malgré les multiples recherches menées, cette normalisation n'existe toujours pas.

Pour contribuer à la résolution de ce problème, le travail de caractérisation du matériau qui vient d'être fait, doit être accompagné par l'adaptation (voire l'élaboration) des normes et des outils de l'ingénieur pour les rendre facilement utilisables dans la conception et la mise en œuvre des édifices qui utilisent ce matériau comme élément de maçonnerie.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à l'analyse de la conception d'un habitat en condition sahélienne afin d'apporter des éléments de réponse pour valider la conformité des bâtiments en BLT. Les autres ouvrages de génie Civil ne sont pas considérés dans cette étude, bien qu'il

existe des ouvrages en BLT, comme des piles de pont et des culées, ou des murs de soutènements.

Dans la première partie, nous rassemblerons des éléments bibliographiques relatifs à la maçonnerie, (1) en définissant les techniques d'assemblages des moellons en murs, du rôle de ces murs dans l'ouvrage, (2) en répertoriant les dégradations observables sur les pierres de taille (hors pathologies de mise en œuvre ou structurales) et (3) en présentant les règles de l'art et les méthodes de calcul qui encadrent le dimensionnement des maçonneries non armées.

La deuxième partie présente une étude de cas sur l'usage de la maçonnerie en BLT dans la ville de Dano dont les carrières ont été étudiées dans les chapitres précédents. Cette partie permet de répertorier les techniques de constructions usuelles et d'examiner le comportement des maçonneries en BLT à long terme en examinant des ouvrages anciens, et également de mieux comprendre les causes de l'arrêt de l'usage des BLT et de son redéveloppement récent.

La troisième partie est consacrée à l'étude technique d'une habitation courante en maçonnerie de BLT et permettra ainsi de définir les possibilités et les limites de l'usage des BLT pour la construction des bâtiments, en s'appuyant sur les méthodes de calcul des ouvrages en maçonnerie, notamment pour des aspects fondamentaux qu'est l'étude de la stabilité mécanique par des approches de résistance des matériaux telles que celles proposées par l'Eurocode 6 et des approches de la mécanique des milieux continus, avec la méthode des éléments finis.

La quatrième partie présente les résultats du suivi de confort thermique d'une habitation en maçonnerie en BLT dans la ville de Ouagadougou. Le confort dans l'habitat est un paramètre essentiel en climat aride. Un bâtiment à usage d'habitation a été récemment équipé de capteurs thermo-hydriques pour suivre en conditions réelles les mécanismes de transfert entre l'extérieur et l'intérieur.

4.2 Généralités autour de la maçonnerie

Il faut rappeler que la maçonnerie, qui est un assemblage d'éléments de maçonnerie posés selon un appareillage spécifié et hourdés ensemble à l'aide d'un mortier, est le mode constructif le plus répandu dans le monde. Elle doit son succès à sa mise en œuvre qui ne requiert qu'un approvisionnement en pierres ou en briques et quelques outils de pose. Toutefois, l'assemblage des éléments de maçonnerie présente différentes méthodes suivant le type et la qualité des éléments et du mortier de pose mais aussi en fonction de l'ampleur de l'ouvrage à construire.

En s'appuyant sur une bibliographie consacrée à la technique de construction de maçonnerie, les termes généraux, caractérisant plus spécifiquement la maçonnerie en pierres de taille vont être définis en fonction de leur appareillage et en fonction de leurs rôles (maçonnerie porteuse ou de remplissage). Comme la stabilité mécanique des parois porteuses doit être établie pour la

durée de vie de l'ouvrage, il est aussi nécessaire de définir les facteurs qui peuvent intervenir sur les performances et la durabilité de la maçonnerie. Aussi les principales dégradations répertoriées sur les pierres de taille seront décrites et adaptées à la latérite, pour initier un descriptif normalisé des dommages observables. Les pathologies d'ouvrage dues à des défauts d'ouvrages ou des dysfonctionnements liés à des surcharges accidentelles ne seront pas développées, on cherchera plutôt à définir le domaine d'utilisation des BLT, en examinant les principes généraux de dimensionnement des murs en maçonnerie.

4.2.1 Typologie des maçonneries

Dans l'Eurocode 6 (PR XP ENV 1996-3, 2001; NF EN 1996 1-1 A1, 2013), il est référencé six types d'éléments de maçonnerie :

- les éléments en terre cuite conformément à la norme EN 771-1 ;
- les éléments en silico-calcaire conformément à la norme EN 771-2 ;
- les éléments en béton de granulats (courants ou allégés) conformément à la norme EN 771-3 ;
- les éléments en béton cellulaire autoclavé conformément à la norme EN 771-4 ;
- les éléments en pierre reconstituée conformément à la norme EN 771-5 ;
- les éléments prétaillés en pierre naturelle conformément à la norme EN 771-6.

Ces éléments sont répartis dans quatre groupes. Un groupe est défini en fonction de la dimension et de l'orientation des alvéoles des éléments tels que mis en place dans la maçonnerie.

Dans notre étude, la maçonnerie est constituée de pierres de taille, appartenant donc au groupe 1, et hourdée au mortier de base.

Selon les époques et les lieux de construction, l'appareillage des maçonneries diffère en fonction du rôle qu'elles assurent et les types d'agencement des éléments constitutifs.

En fonction des types d'agencement et les techniques de pose (Martinet et Quénée, 2014; Merlet, 2014; Humbaire, 1979), on distingue (Figure 4.1) :

- La maçonnerie en *opus incertum* : les pierres sont taillées en hexagone et l'épaisseur de joints est variable mais ne doit pas dépasser un seuil rigoureusement contrôlé lors de la mise en œuvre ;
- La maçonnerie assisée : les pierres taillées sont alignées et tirées au cordeau, pour obtenir des lits réguliers. Les joints sont d'épaisseur constante ;
- La maçonnerie appareillée : les découpages des pierres taillées sont soignés de sorte à avoir des joints d'épaisseur constante et très faible.

Suivant l'ampleur des ouvrages, on peut dissocier les ouvrages monolithiques avec des murs porteurs ou les ouvrages à structure maçonnée avec des piliers et éventuellement des voutes avec un remplissage maçonné. En fonction des efforts, la maçonnerie sera chaînée ou éventuellement

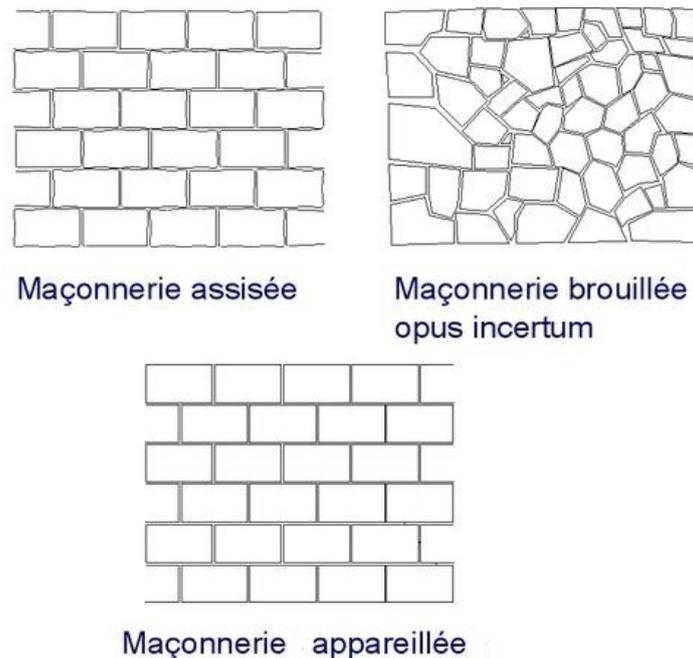


FIGURE 4.1 – Les types d’agencement de la maçonnerie (DDMT, 2007)

armée. Elle peut être en remplissage associée aussi avec une ossature en béton armé.

Ainsi, selon les rôles qu’ils assurent, les murs de maçonnerie sont classés en :

- Maçonneries porteuses ;
- Maçonneries de remplissage ;
- Maçonneries de façade non porteuse ou en doublage ;
- Maçonneries de cloison.

L’ancien **DTU 20.1 (1985)**, le premier document français qui traite de la maçonnerie avant l’Eurocode 6, illustre deux conceptions de murs en maçonnerie traditionnelle (Figure 4.2) :

- Les murs à parois simples enduites ou non : on distingue les murs simples dont la paroi est constituée par un seul matériau principal et les murs composites dont la paroi est constituée par plusieurs matériaux principaux solidarisés de façon continue par un mortier ;
- Les murs à double paroi qui comportent deux parois distinctes d’épaisseurs sensiblement égales (murs doubles) ou nettement inégales (mur avec cloison de doublage).

Le nouveau **DTU 20.1 P4 (2008)** apporte des évolutions qui tiennent compte de l’intégration des normes européennes concernant les produits et méthodes d’essais. Désormais, en se référant

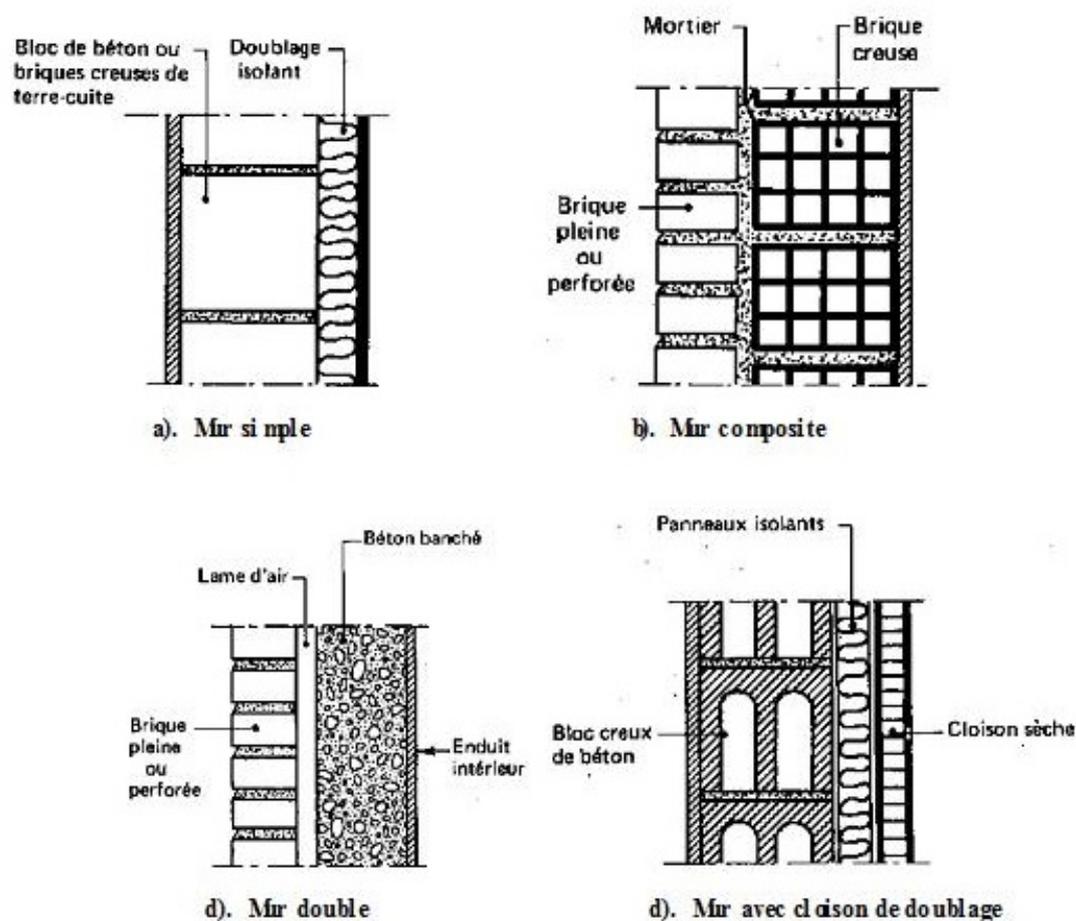


FIGURE 4.2 – Les Types de mur en maçonnerie DTU 20.1 (1985)

à l'Eurocode 6 (PR XP ENV 1996-3, 2001) [NF EN 1996-1-1+A1(P 10-611-1) élaboré par le Comité Technique "CEN/TC 250 " Eurocodes structuraux], les termes relatifs aux types de mur sont mieux précisés et plus nombreux :

- **mur porteur** : mur principalement calculé pour supporter une charge imposée en plus de son poids propre ;
- **mur simple** : mur sans vide ou joint longitudinal continu dans son plan ;
- **mur creux (cavity wall)** : mur comprenant deux parois simples parallèles, efficacement reliées par des attaches ou des armatures pour joints d'assise. L'espace entre les deux parois est laissé vide ou est rempli complètement ou partiellement par un isolant thermique non porteur comme un mur constitué de deux murs (mur porteur simple +

mur d'habillage) ;

- **mur à double paroi (double-leaf wall)** : mur constitué de deux parois parallèles dont le joint longitudinal intermédiaire est rempli complètement de mortier, et efficacement liées entre elles par des attaches de façon qu'elles fonctionnent ensemble sous l'effet des charges ;
- **mur creux rempli (grouted cavity wall)** : mur constitué de deux parois parallèles, dont le vide intermédiaire est rempli de béton ou de coulis, efficacement liées entre elles par des attaches ou une armature pour joints d'assise de façon qu'elles fonctionnent ensemble sous l'effet des charges ;
- **mur à parement apparent** : mur associant des éléments destinés à rester apparents à d'autres non apparents de façon à ce qu'ils fonctionnent ensemble sous l'effet des charges ;
- **mur à joints interrompus (shell bedded wall)** : mur dont les éléments de maçonnerie sont hourdés en deux bandes de mortier disposées le long des bords extérieurs de la face de pose des éléments ;
- **mur d'habillage** : mur utilisé comme un parement mais non relié à ou ne contribuant pas à la résistance du mur support ou de l'ossature ;
- **mur de contreventement** : mur destiné à résister à des forces latérales dans son plan ;
- **mur raidisseur** : mur établi perpendiculairement à un autre mur pour lui fournir un appui contre les forces latérales ou pour résister au flambement et aussi contribuer à la stabilité de la construction ;
- **mur non porteur** : mur qui n'est pas supposé résister à des efforts de telle façon qu'il pourrait être supprimé sans porter préjudice à l'intégrité du reste de la structure.

4.2.2 Dégradations des maçonneries en pierre de taille

Les pathologies observées sur les ouvrages peuvent résulter, soit des problèmes de fondation, soit de la dégradation des matériaux (joints, pierre de taille), soit des défauts de mise en œuvre, soit des excès de charges mécaniques conduisant à une fissuration préjudiciable à l'ouvrage, voire de la fatigue des matériaux sous effets cycliques. On s'intéressera ici à définir les dégradations qu'on pourrait observer sur les ouvrages en latérite, à partir des descriptions faites sur des autres pierres

naturelles utilisées dans la maçonnerie. Les pathologies d'origine mécanique ou constructive ne seront pas illustrées.

4.2.2.1 Les facteurs de dégradation et l'importance de l'humidité

Selon [Starkel \(1986\)](#), la dégradation des matériaux est principalement due aux phénomènes météorologiques. L'importance de ces agents climatiques varie largement avec le type de climat, la localisation géographique, l'exposition et l'architecture de la construction. Les agents climatiques sont difficiles à quantifier et à reproduire au laboratoire pour étudier les effets sur le matériau. [Masters \(1986\)](#) a établi une liste complète des phénomènes météorologiques qui favorisent l'érosion des matériaux de construction : l'eau (sous ses différents états), la radiation solaire, la température, les constituants de l'air, le cycle de gel-dégel, le cycle séchage-humidification, le vent

A ces phénomènes s'ajoutent des facteurs biologiques (micro-organismes, bactéries) qui ont des effets complexes et couplés ([Brunet *et al.*, 1997](#)).

De tous ces phénomènes, le plus déterminant est l'action de l'eau. La norme [ASTM E-241-77 \(1977\)](#), indique que 90% des causes de l'altération dans les constructions sont dues à l'eau sous toutes ses formes. En effet, l'humidité est l'un des principaux facteurs favorisant l'altération des matériaux soit par voie chimique, physique ou biologique, soit par contact direct ou indirect. Il existe plusieurs sources ou plusieurs types d'humidité, aux conséquences très différentes, et il est important de les distinguer et de déterminer leurs origines pour pouvoir établir un diagnostic correct qui permettra soit de prendre des mesures nécessaires à la prévention, soit de proposer les moyens efficaces pour la réparation.

[Ezzdine \(1999\)](#) a distingué les différentes formes d'humidité qui favorisent certaines dégradations des pierres naturelles : humidité naturelle de la carrière, humidité liée à la pluie, humidité par ascension capillaire, humidité due à des défauts constructifs (rupture des gouttières ou des drains) ou des dysfonctionnements (condensation à cause d'un mauvais isolant).

Laurent, dans [Delage et Schrefler \(2001\)](#) définit les origines et les conséquences des apports d'eau, des remontées capillaires, de la pluie et de la condensation dans les constructions :

- L'eau contenue dans le sol, éventuellement enrichie par des sels solubles, monte par capillarité par l'intermédiaire de fondations non isolées jusqu'à une certaine hauteur. Après évaporation de l'eau, les sels solubles s'accumulent et cristallisent dans les parties les plus hautes de la zone d'imprégnation. La pression de cristallisation ainsi développée va faire apparaître des fissurations sur ces parties de la zone d'imprégnation.
- L'action de l'eau de pluie sur les parements dépend de plusieurs paramètres : sa composi-

tion (pollution, poussières), sa durée de contact, son intensité, sa quantité (concentration par unité de surface). La pluie fouettante, le ruissellement, le rejaillissement, l'infiltration par les joints etc. auront des effets différents selon la vitesse d'absorption capillaire (fonction de la porosité, dimension des vides, interconnexion entre les capillaires, etc.). La profondeur de pénétration de l'eau dans la frange capillaire, sa durée de maintien dans les pores avant l'évaporation, (pouvoir de rétention de la structure poreuse), sont les paramètres qui contribuent à des combinaisons physico-chimiques (dissolution de certains minéraux ou des matières humides, réactions chimiques, départ de l'eau, coloration de des dépôts au contact de l'air (oxygène, CO_2 , SO_4 , ...))

- La condensation est liée au changement de phase quand l'eau à l'état vapeur devient liquide. Son action est fortement liée aux effets thermiques et peut conduire à des pertes de performances mécaniques du matériau. Les cycles d'humidification-sechage que subissent les matériaux pendant les saisons de l'année favorise aussi ces pertes de résistance. En janvier 1961, la première version du DTU impose des coupures de capillarité dans les ouvrages en maçonnerie traditionnelle.

4.2.2.2 Les types d'altération fréquemment rencontrée

En se référant à quelques bibliographies sur les maladies des pierres naturelles (Bourcart *et al.*, 1949; Beck, 2006; Delage et Schrefler, 2001; Bromblet et Association MEDISTONE, 2010; Martinet et Quénéé, 2014; Benavente *et al.*, 2004), les altérations observées sur le terrain sont diverses. Elles sont illustrées et regroupées dans le Tableau 4.1.

L'orientation des façades est un facteur essentiel favorisant ces réactions, car la vitesse de ces réactions dépend de l'exposition aux vents, à la pluie et à l'ensoleillement. La nature et la porosité de la pierre de taille y joue aussi un rôle important.

- a) Exfoliation :** L'exfoliation se caractérise par un détachement du calcin en feuilles sur les bords de la pierre et le gonflement des parties sous-jacentes qui deviennent pulvérulentes. Des études réalisées sur cette maladie par Bourcart *et al.* (1949), ont permis de conclure que la dégradation est causée par un apport important de chaux ou de gypse attribué en premier lieu à l'action microbienne.
- b) Efflorescence :** La formation d'efflorescence est due à une circulation d'eau chargée en sels dans la pierre. On la rencontre souvent sur les parties basses des murs dont les fondations ne sont pas bien isolées des formations ou des apports salins. Elle se développe à travers les remontées par capillarité. La morphologie de ces sels varie avec la nature et la morphologie de la pierre, le type de sel rencontré et l'environnement du bâtiment. Lorsque les efflorescences se développent à la surface, elles sont beaucoup moins dommageables que dans le cas où la cristallisation se produit à l'intérieur de la pierre.

Plusieurs types de sels existent dans le sol mais la plupart d'entre eux sont des sulfates. Doté d'une hygroscopie particulière, le sulfate de magnésium est le plus dangereux. On le rencontre dans les efflorescences des murs humides et on confond presque toujours avec le salpêtre. Ces sels cristallisants provoquent une accélération du développement des croûtes.

- c) **Alvéolisation et désagrégation sableuse** : Cette pathologie se présente sous forme d'une accumulation poudreuse de résidus de roche suite au dessertissage des grains provoqué par la dissolution du ciment de calcite. Elle se produit dans les endroits humides mais non lessivés. Le dessertissage des grains provoque des désagrégations sableuses et il apparaît alors une surface érodée sur une certaine épaisseur (Tableau 4.1, fig. a et fig. b). Le produit de cette érosion tombe en fine poudre sous le simple effet de la pesanteur sur les éléments désagrégés ou d'une façon accélérée sous l'effet du vent. Cette érosion se manifeste d'une façon homogène avec une perte d'épaisseur du matériau ou d'une façon différentielle avec formation des alvéoles Beck (2006).
- d) **Salissure et souillure** : Elles peuvent être constituées par des matières étrangères issues de la pollution atmosphérique, par exemple la suie ou le goudron, et qui pénètrent plus ou moins profondément dans la microstructure des roches en modifiant l'aspect. Elles peuvent être aussi le résultat de dégradations biologiques. Par exemple, les salissures vertes résultent de la présence des différents types d'algues (Chlorococccées ou cyanobactéries), les salissures noires des cyanobactéries et les salissures rouges des chlorophycées 4.1, fig. c).
- e) **Biodégradation** : La biodégradation est plus ou moins importante suivant la nature des roches, le milieu et les conditions environnementales. Dans cette catégorie entrent les désordres provoqués par les organismes microscopiques mais aussi ceux engendrés par les insectes et la croissance des plantes. Les spécialistes de l'altération de la pierre pensent que les effets de micro-organismes comme les sulfobactéries, les nitrobactéries ou les halobactéries, se produisent après la dégradation physico-chimique. Sous une croûte qui s'exfolie, si le milieu est humide et la température est suffisante, les bactéries trouvent un terrain favorable à leur développement. La structure poreuse de la pierre, les fissures et les pores qui débouchent en surface, constituent un support favorable à la germination et au développement de plusieurs familles de micro-organismes tels que les champignons, les mousses, les algues, les végétaux, etc (Tableau 4.1, fig. e).

Tableau 4.1 – Types de dégradations sur les maçonneries en latérite

N fig	Illustration	Type de dégradation
Fig a.		Alvéolation : battance des pluies et action du vent
Fig b.		Désagrégation et alvéolisation
Fig c.		Souillure et biodégradation
Fig d.		Détachement des joints dû à l'humidité et au ruissellement
Fig e.		Fissuration mécanique et biodégradation avec le développement des racines

4.2.3 Dimensionnement des ouvrages en maçonnerie

Pour prouver la conformité des bâtiments (privés ou publics), il y a lieu de respecter les exigences essentielles de stabilité et de résistance mécanique. Il faut rappeler que l'objectif de l'analyse structurale d'un ouvrage est de :

- déterminer la distribution, soit des sollicitations, soit des contraintes, soit de déformations et déplacements imposés à l'ensemble ou à une partie de la structure ;
- identifier les sollicitations aux divers états limites dans les éléments ou les sections de la structure.

Le calcul doit prendre en considération la géométrie, les propriétés de la structure et son comportement à chaque stade de sa construction. Les éléments d'une structure sont classés, selon leur nature et leur fonction, en poutres, poteaux, dalles, murs, semelles, plaques, voutes, ...

Les modèles de comportement couramment utilisés pour l'analyse structurale sont l'élasticité linéaire et la plasticité parfaite. Ces modèles fondamentaux peuvent être couplés en élastoplasticité, avec écrouissage ou endommagement dans le cas de matériau fragile comme le BLT.

La connaissance des propriétés des matériaux constitutifs de la maçonnerie (blocs et mortiers) n'est pas suffisante pour déterminer le comportement de la maçonnerie elle-même. Il faut en effet tenir compte de la micro-structure, des proportions des constituants ou du comportement des interfaces. Ainsi, la forte hétérogénéité et la grande diversité des matériaux constitutifs et de leur arrangement ont conduit à plusieurs méthodes de calcul, dont les plus répandues sont celles aux états limites avec l'Eurocode 6 et les méthodes numériques par éléments finis ou par éléments discrets.

4.2.3.1 Principe et règles de l'Eurocode 6

Avant les Eurocodes, les règles de conception des maçonneries en France avec le DTU 20.1 étaient principalement axées sur la mise en œuvre, le choix des matériaux et le respect de règles très simples de dimensionnement. Afin d'harmoniser les règles de conception et de mise en œuvre des ouvrages de maçonnerie entre les états membres de l'Union européenne, les règles de calcul ont été unifiées avec l'Eurocode 6. En adoptant le modèle semi-probabiliste, l'Eurocode 6, sépare l'analyse des sollicitations et l'analyse des résistances, affectant un facteur partiel à chacune de ces grandeurs. Cette méthode de calcul peut aussi prendre en compte la durée de vie probable de l'ouvrage.

Le dimensionnement des structures selon les Eurocodes est donc basé sur un calcul aux états limites, états au-delà desquels la structure ne satisfait plus à l'usage prévu (Hurez *et al.*, 2011).

On distingue deux types d'états limites :

- les états limites ultimes (ELU) directement liés à la sécurité des personnes, par exemple l'effondrement d'une structure ;
- les états limites de service (ELS) pour lesquels les désordres constatés risquent de limiter l'aptitude à l'usage du bâtiment pendant sa durée de vie escomptée (50 ans par exemple pour un bâtiment courant).

Le dimensionnement aux états limites est basé sur une approche semi-probabiliste de calcul des structures, dans laquelle les actions, les résistances et la mise en œuvre des matériaux sont considérées comme des variables aléatoires. Ces sollicitations et résistances, du fait de leur caractère variable, peuvent donc être considérées comme des variables aléatoires indépendantes et l'on aura recours à l'analyse statistique pour estimer le risque de ruine de la structure ainsi calculée.

Dans le cas d'une maçonnerie, le principe de dimensionnement à l'ELU consiste à vérifier que la charge de calcul appliquée C_{Ed} est inférieure ou égale à la résistance de calcul de la maçonnerie C_{Rd} . Cette condition devra être vérifiée pour les murs soumis à des charges de compression, de cisaillement, de flexion ou à une combinaison de ces trois chargements.

Pour les murs chargés verticalement comme la maçonnerie de BLT dans notre cas, les Eurocodes considèrent que la vérification à l'ELS est satisfaisante si celle à l'ELU l'est aussi. Dans le cas d'un chargement latéral, le mur ne doit pas présenter une flèche en fonction de l'élançement h/t et l/t et des conditions d'appuis, avec h , t et l , respectivement la hauteur, l'épaisseur et longueur du mur (Hurez *et al.*, 2011)(P 173/174).

Le tableau 4.2 ci-dessous présente les principales vérifications à faire selon les deux états limites et les types de maçonnerie.

En parallèle de ces règles de dimensionnement harmonisées, se sont mis en place des méthodes de calcul aux éléments finis, qui permettent de considérer des lois de comportement particulièrement élaborées.

Tableau 4.2 – Les principes de vérification de dimensionnement des murs selon l’Eurocode 6

Etats limites	Type de sollicitation	Vérification
ELU	Murs de maçonnerie non armée soumis principalement à un chargement vertical	La valeur de calcul de la charge verticale appliquée à un mur de maçonnerie, N_{Ed} , doit être inférieure ou égale à la valeur de calcul de la résistance aux charges verticales du mur, N_{Rd}
	Murs soumis à des charges concentrées	La valeur de calcul d’une charge verticale concentrée, N_{Edc} , appliquée sur un mur de maçonnerie, doit être inférieure ou égale à la valeur de calcul de la résistance à la charge verticale concentrée du mur, N_{Rdc}
	Murs de maçonnerie non armée soumis à un cisaillement	La valeur de calcul du cisaillement appliqué au mur de maçonnerie, V_{Ed} , doit être inférieure ou égale à la résistance au cisaillement du mur, V_{Rd}
	Murs de maçonnerie non armée soumis à un chargement latéral	La valeur de calcul du moment appliqué au mur de maçonnerie, M_{Ed} , doit être inférieure ou égale à la valeur de calcul du moment résistant du mur, M_{Rd} .
	Murs de maçonnerie non armée soumis à une combinaison de charges verticales et latérales	Peuvent faire l’objet d’une vérification en utilisant la méthode utilisant la résistance apparente à la flexion ou la méthode utilisant des coefficients de moments fléchissants équivalents.
ELS	Murs de maçonnerie soumis à des charges latérales dues au vent	Les murs ne doivent pas présenter de flèches préjudiciables sous l’action de telles charges, ou du fait d’un contact accidentel avec des personnes, ni même répondre de manière disproportionnée à des impacts de nature accidentelle.
	Murs soumis à des charges latérales	La vérification effectuée à l’ELU peut être considérée comme satisfaisante.

4.2.3.2 Modélisation numérique des maçonneries

La modélisation est un outil complémentaire pour l’étude expérimentale, lourde en général, menée dans des conditions précises. Si le modèle répond correctement à la confrontation des résultats expérimentaux, son utilisation avec de nombreuses autres conditions aux limites est pertinente.

Différentes approches ont été utilisées pour modéliser les murs en maçonnerie. Grâce au développement des codes aux éléments finis, de nombreux travaux numériques ont été entrepris pour tous les types d’ouvrages de génie civil. Pour les maçonneries, *Prat et al. (1997)* présentent dans un ouvrage collectif les différentes approches de la modélisation par éléments finis. La méthode des éléments finis permet non seulement de décrire des modèles structurants détaillés mais aussi

de définir des conditions aux limites proches de la réalité. La notion d'échelle de modélisation qui est essentielle dans le cas d'un matériau composite et anisotrope comme un assemblage constitué de blocs et de joint de mortier qui eux-même ont un comportement non linéaire anisotrope.

Dans cette partie, nous nous sommes aussi appuyés sur les travaux d'Acary (2001) et de Colas (2009) qui proposent une revue exhaustive des différentes modélisations des structures maçonnées.

La maçonnerie peut ainsi être traitée à deux échelles différentes :

- l'échelle macroscopique, c'est-à-dire celle de la structure, où l'on peut considérer la maçonnerie comme homogène et continue ;
- l'échelle microscopique, c'est-à-dire celle des éléments (blocs ou joints), où la maçonnerie est hétérogène.

En considérant l'échelle macroscopique, microscopique ou les deux à la fois, la littérature a été dominée par trois grandes approches de modélisation des structures maçonnées.

a) Approche macro-mécanique des structures maçonnées

Dans ce type de modélisation, on considère la maçonnerie comme un matériau homogène et continu auquel on peut appliquer les principes de la mécanique des milieux continus. Différentes hypothèses de comportement sont alors possibles en fonction des phénomènes que l'on veut modéliser et des données expérimentales à disposition.

a.1) Modélisation en plasticité parfaite : Les notions de plasticité parfaite permettent de mettre au point des modèles de structures maçonnées en faisant intervenir un minimum de paramètres caractéristiques du matériau.

On peut évaluer simplement la stabilité de la maçonnerie par la théorie du calcul à la rupture. Le calcul à la rupture permet de déterminer le domaine de chargement potentiellement supportable par la structure en se basant sur la seule connaissance des efforts qui lui sont imposés et de la capacité de résistance du matériau. La difficulté reste la caractérisation de cette capacité de résistance : on s'appuie généralement sur une résistance limite en compression, une résistance faible en traction et un critère de frottement de Coulomb. C'est à Coulomb (1773) que l'on doit les travaux précurseurs sur le sujet, qui seront ensuite développés par Méry (1840) puis Delbecq (1983). L'analyse limite et les travaux de Heyman (1966) introduisent de nouvelles hypothèses qui vont permettre de qualifier la relation contraintes-déformations et de définir ainsi une nouvelle classe de matériau adapté au cas de la maçonnerie que sont les "Non-Tension Materials", des matériaux qui ont une résistance illimitée en compression, une résistance nulle à la traction et dans lesquels aucun glissement n'est autorisé.

a.2) Modélisation en élasticité linéaire : La méthode des éléments finis en élasticité linéaire a été abondamment utilisée pour modéliser des édifices monumentaux en maçonnerie,

comme la Basilique St Marc à Venise (Mola et Vitaliani, 1997) ou la façade de la Basilique St Pierre de Rome (Macchi, 2001). Ce type de calcul permet de montrer l'influence de la géométrie sur le comportement de la structure : il pointe ainsi les zones sensibles, c'est-à-dire celles susceptibles d'être sollicitées en traction. La difficulté réside dans la caractérisation des différents paramètres élastiques du matériau et dans l'impossibilité de déterminer la rupture de la structure.

a.3) Prise en compte des phénomènes inélastiques : La maçonnerie peut être considérée comme un géomatériau quasi-fragile. A ce titre, il peut être intéressant de prendre en compte les phénomènes inélastiques propres à ces matériaux que sont la plasticité non associée et l'endommagement fragile. Lourenço et Rots (1997) proposent un modèle de maçonnerie en plasticité non associée en s'appuyant sur les travaux réalisés pour le béton, permettant de simuler les comportements inélastiques du matériau en compression comme en traction. Oñate *et al.* (1997) ont adapté les modèles numériques de calcul en endommagement du béton au cas de la maçonnerie. Or, les géomatériaux sont en réalité soumis au couplage de ces deux phénomènes. Lotfi et Shing (1991) ont proposé un modèle d'endommagement fragile et de plasticité couplés appliqué au cas particulier des maçonneries chaînées et armées.

Les modèles macro-mécaniques permettent de donner une première appréciation du comportement des structures maçonnées qui fournit des résultats cohérents avec les données expérimentales ; ils peuvent séduire par leur relative simplicité de mise en oeuvre. Néanmoins, ces modélisations n'autorisent pas la localisation des déformations au sein de la structure et ne permettent donc pas de rendre compte de la fragilité avérée de la maçonnerie au niveau des joints.

b) Approche micro-mécanique des structures maçonnées

L'approche micro-mécanique consiste à se placer à une échelle permettant la prise en compte de l'hétérogénéité du matériau. La maçonnerie est alors considérée comme un milieu polyphasé dont chaque composant est intégré dans la modélisation. On distingue les modélisations micro-mécaniques selon qu'elles considèrent le matériau comme continu ou discret.

b.1) Modèles micro-mécaniques discrets : Dans les modèles micro-mécaniques discrets, la maçonnerie est considérée comme un ensemble d'éléments reliés entre eux par des lois de contact simulant l'action du joint. Le modèle discret le plus employé dans l'étude des maçonneries est la méthode des éléments distincts (MED). Cette méthode, initiée et développée par Cundall en 1971 pour l'analyse des massifs rocheux fissurés, a été utilisée par de nombreux chercheurs pour modéliser les structures maçonnées (Lemos, 1997; Idris *et al.*, 2008). Ici, les blocs sont modélisés par des solides rigides ou déformables liés entre eux par des lois de contact régulières et dont le mouvement est décrit par les équations de Newton-Euler ; le problème est ensuite résolu par des

schémas explicites.

On peut également introduire des lois de contact non-régulières type conditions de Signorini ou frottement sec de Coulomb ; la résolution passe alors nécessairement par l'emploi de schémas implicites, ce qui rend les temps de calcul plus longs. On citera parmi ces méthodes non-régulières la méthode Non-Smooth Contact Dynamics (NSCD) initiée par Moreau (1988) et Jean (1999) qui a été utilisée pour modéliser des structures maçonnées (Acary, 2001; Chetouane *et al.*, 2002; Rafiee *et al.*, 2008).

Ces modèles permettent de simuler les mécanismes de ruine par grande déformation qui interviennent dans la maçonnerie pour un coût de calcul qui reste raisonnable. Elles demandent un grand nombre de paramètres, notamment au niveau des lois de contact, qu'il n'est pas toujours facile de mesurer.

b.2) Modèles micro-mécaniques continus : Les modèles micro-mécaniques continus ont été introduits pour rendre compte des phénomènes de plasticité et d'endommagement de la maçonnerie. Le milieu est considéré comme hétérogène mais continu ; on exclut donc les possibilités de désolidarisation d'une partie de la structure. Les premiers travaux remontent à Page (1978) ; on pourra plus récemment se reporter aux travaux de Lotfi et Shing (1994), Lourenço *et al.* (1997) ou Shieh-Beygi et Pietruszczak (2008).

Ces modélisations permettent une évaluation précise des phénomènes non-linéaires qui interviennent dans la maçonnerie mais leur résolution numérique est souvent complexe et l'évaluation des paramètres nécessaires à leur mise en œuvre souvent difficile. Ces modèles micro-mécaniques permettent de rendre compte précisément des phénomènes qui interviennent dans la maçonnerie, notamment au niveau des joints, faisant ainsi apparaître une faible résistance du matériau à la traction ainsi qu'un mécanisme de frottement sec. Le problème tient ici au coût de calcul de telles modélisations ainsi qu'à la caractérisation des différents paramètres nécessaires au modèle.

c) Approche multi-échelle des structures maçonnées

La modélisation multi-échelle fournit une alternative aux deux approches présentées précédemment en construisant des modèles macro-mécaniques basés sur des considérations micro-mécaniques.

Le milieu hétérogène est ainsi remplacé par un milieu homogène équivalent, c'est-à-dire un milieu homogène qui aura les mêmes caractéristiques mécaniques que le milieu hétérogène de départ. On distingue deux types de méthode d'homogénéisation :

- les méthodes de bornes, bien adaptées aux maçonneries de blocage ;
- l'homogénéisation périodique, à privilégier pour les maçonneries régulières.

Ensuite, on étudie le milieu homogénéisé en faisant recours à des modèles similaires à ceux décrits dans la modélisation macro-mécanique. Pande *et al.* (1989) ont été les premiers à développer cette

méthode pour déterminer les propriétés élastiques d'une maçonnerie périodique ; cette méthode a ensuite été formalisée par [Anthoine \(1995\)](#). [De Buhan et De Felice \(1997\)](#) ont appliqué la théorie de l'homogénéisation périodique au calcul à la rupture. Les recherches portent désormais sur la modélisation en plasticité ([Zucchini et Lourenço, 2007](#); [Lopez *et al.*, 1999](#)) et en endommagement ([Luciano et Sacco, 1997](#); [Calderini et Lagomarsino, 2006](#); [Zucchini et Lourenço, 2004](#)). Ces méthodes permettent d'intégrer le caractère hétérogène de la structure tout en conservant la simplicité des calculs sur milieux homogènes. Elles donnent des résultats intéressants dans la modélisation des phénomènes linéaires ; la modélisation des comportements non-linéaires est encore en cours de recherche.

4.3 Étude de cas de la maçonnerie en BLT de Dano

4.3.1 Présentation de la ville de Dano et des carrières d'extraction du BLT

La présentation géographique de Dano est décrite dans le chapitre précédent au à la section 2.3. La ville a une superficie de 669 km^2 et est composée de :

- une zone urbaine décomposée en 7 secteurs avec une population de 17968 habitants ;
- une zone rurale (22 villages) avec une population de 29489 habitants.

La planification urbaine de la ville a été réalisée en trois phases importantes :

- le centre ville urbanisé en 1972 autour du vieux village de Dano ;
- la zone péri-urbaine viabilisée en 1996 ;
- le quartier Marigot loti en 2008.

Cinq carrières de BLT approvisionnent les constructions à Dano. De la plus ancienne (période coloniale) à la plus récente, on distingue :

- la carrière de la cathédrale ;
- la carrière de Dakolé ouverte pour la construction de l'école maternelle
- la carrière de Dazoupoua près du haut commissariat, utilisé par la population ;
- la carrière de Mebbar, la seule mécanisée, ouverte par l'entreprise Pierres Naturelles pour la construction du siège de la fondation Drayer ;
- la carrière de Bagane dans le quartier Est (quartier marigot).

4.3.2 Description de la méthodologie

L'étude a pour objectifs d'évaluer la répartition spatiale de différents types d'habitation de la ville de Dano et de les décrire en fonction de l'architecture, des techniques de construction

et des matériaux utilisés. L'étude a été essentiellement faite à partir des observations directes sur le terrain et des enquêtes auprès de la population et des représentants de l'administration publique présents à Dano.

L'enquête a été réalisée dans trois secteurs de la ville représentés par la vue aérienne de la figure 4.3 :

- le secteur centre-est de la ville, partie la plus ancienne, et ayant une densité d'habitats la plus forte ;
- le secteur centre-ouest de la ville, construit après l'indépendance (1972) qui compte les administrations publiques, l'ancienne et la nouvelle cathédrale, les écoles publiques ;
- le quartier péri-urbain de Dakolé, le plus récent (1996), qui compte une école maternelle construite essentiellement en latérite par une fondation allemande (Fondation Drayer).

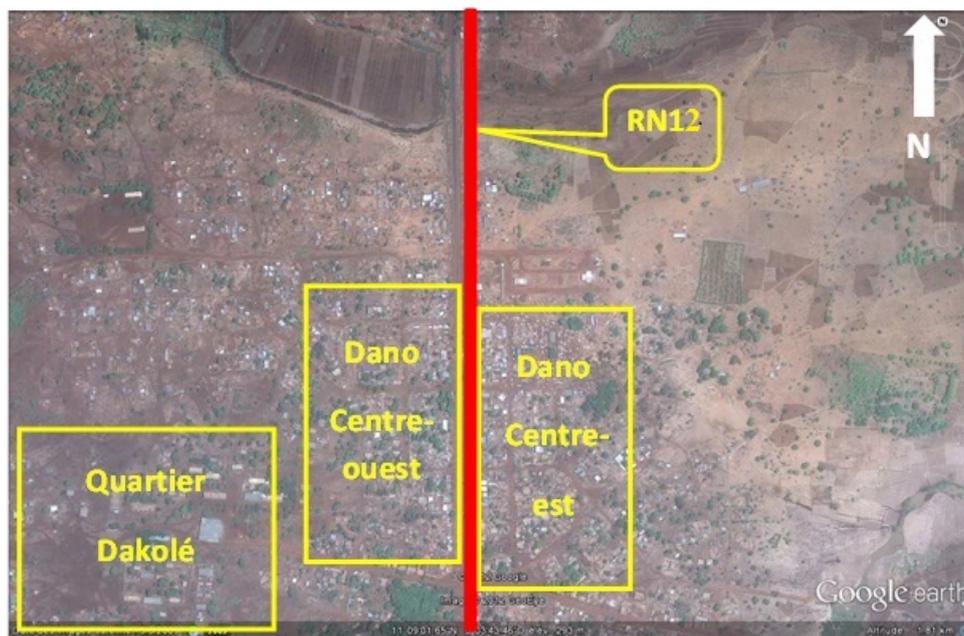


FIGURE 4.3 – Vue aérienne des secteurs enquêtés

Les observations directes ont permis de classer les habitations par types, en fonction de la technique et des matériaux utilisés et de décrire leur architecture. Par la suite, deux monuments de la période coloniale ont été décrits. Les différentes pathologies observées sur les murs des maisons en BLT ont été également décrites à la fin de cette partie.

4.3.3 Les types d'habitation de la zone enquêtée

Le Plan Communal de Développement de Dano (PCD, 2011) a fait ressortir trois types d'habitation à partir de critères structurels ou liés aux matériaux utilisés :

- les habitats modernes en parpaings de ciment qui représentent 5% des ménages ;
- les habitats semi-modernes en maçonnerie de BLT renforcées par des structure en ciment (poteau, poutre, dalle,...) qui représentent 15 % des ménages ;
- les habitats traditionnels en maçonnerie de BLT ou de banco qui représentent 80% des ménages.

La toiture de ces habitations sont en terre battues (70%), en tôle ondulée (29%), exceptionnellement en tuile ou en chaume (moins de 1%). Le choix d'un type d'habitat et de la toiture est fortement conditionné par le niveau de vie des occupants.

En se basant sur la structure des habitations et les matériaux utilisés, l'enquête a permis de faire ressortir cinq différents types de construction dans les trois quartiers couverts par celle-ci (Dano centre-est, Dano centre-ouest et Dakolé) :

- les habitats uniquement en maçonnerie de BLT ;
- les habitats en béton et maçonnerie en parpaings de ciment ;
- les habitats en maçonnerie de banco ;
- les habitats en maçonnerie mixtes de BLT et de banco ;
- les habitats mixtes en maçonnerie de BLT et structure en béton.

La zone enquêtée compte au total 761 habitats dont 424 habitats à Dano centre-est, 197 habitats à Dano centre-ouest et 140 habitats à Dakolé. Les diagrammes de la figure 4.4 ci-dessous donnent le pourcentage des 5 types d'habitat identifiés par quartier.

Nous remarquons sur ces diagrammes que la proportion d'habitations en latérite est assez faible dans l'ancienne ville (Dano centre-ouest et Dano centre-est). Dans ces zones proches de la route principale, les habitations sont principalement en banco et quelquefois en parpaings pour certains commerces. La zone la plus riche en constructions latéritiques est la plus récente (Dakolé). Les constructions de cette zone sont en bon état et très peu endommagées contrairement à celles de deux autres zones.

Globalement le nombre des constructions utilisant les latérites (44%) tend à approcher celles en banco (47%). Ceci est certainement dû à la prise de conscience par la population des potentialités du matériau grâce à l'ouverture de la carrière mécanisée de Pierres Naturelles, aux actions de

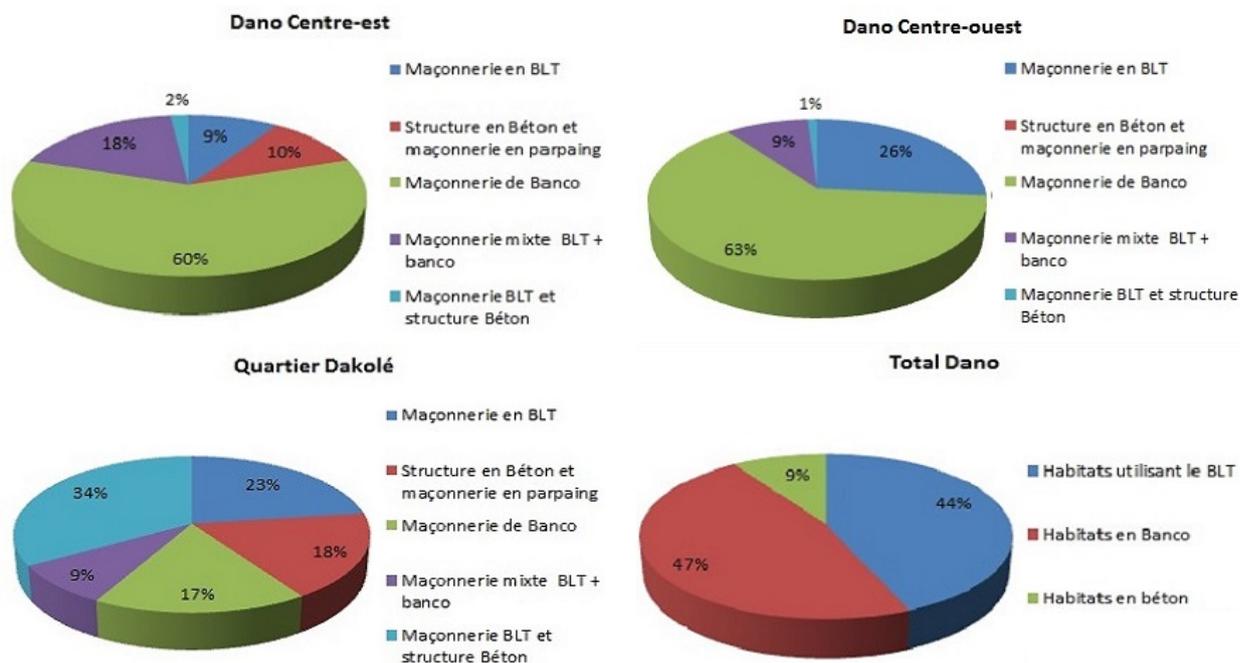


FIGURE 4.4 – Répartition des modes de construction par secteur

la mairie et d'une ONG allemande qui tentent de valoriser le matériau. En effet, depuis la construction de la mairie par la collectivité, de l'école maternelle et le siège de la fondation Drayer par ce dernier (Figure 4.5), le pourcentage des habitats en BLT dans les nouveaux lotissement a fortement augmenté.

Aussi, dans le quartier récent de Dakolé, les constructions en banco cèdent la place à celles en latérites (Dakolé 23% en BLT seul et 43% en BLT + ciment ou Banco).

Dans la suite, nous nous intéresserons à la description des habitats actuels utilisant le BLT (seul ou en association avec le béton et de mortier de pose en banco, en latérite ou en ciment) et des anciennes infrastructures de la période coloniale.



(a) Mairie de Dano



(b) Monastère Notre Dame de Bafor



(c) Chantier Siège de la Fondation Drayer



(d) Chantier Ecole maternelle de Dano

FIGURE 4.5 – Réalisations récentes en BLT à Dano

4.3.4 Description des maçonneries utilisant le BLT

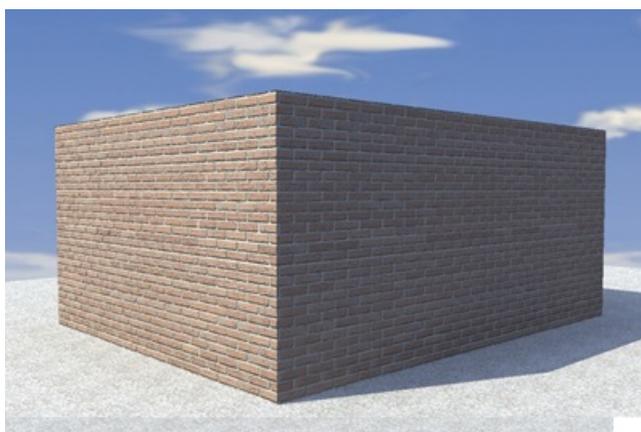
Sur le site de Dano, on peut identifier trois principaux modes de construction en maçonnerie utilisant le BLT :

- les bâtiments en maçonnerie traditionnelle, construits entièrement en BLT ou avec un mélange de BLT et des briques en banco.
- les bâtiments à structure béton armé (poteau-poteaux, ou dalles) et un remplissage avec des blocs de latérite ;
- les infrastructures de l'administration coloniale laissées en ruine.

Nous décrirons tour à tour ces trois types d'ouvrage.

4.3.4.1 Les bâtiments en maçonnerie traditionnelles : Type 1

L'habitat de type 1 est entièrement en BLT (modèle Figure 4.6 (a)) . Il ne possède ni poteau ni poutre dans toute la structure (Figure 4.10 (b)). Les blocs sont de dimensions 15 cm x 15 cm x 30 cm ou 20 cm x 20 cm x 30 cm, taillés de façon artisanale par les propriétaires dans les carrières proches du lieu de la construction. Les joints de pose sont en mortier de latérite ou de banco apparent (4.10 (c)), ou protégés avec un mortier de ciment (Figure 4.10 (d)). Ils ont une épaisseur comprise entre 2 et 3 cm.



(a) Modèle Type 1



(b) Exemple Type 1



(c) Joint en mortier de latérite apparent



(d) Joint en latérite protégé avec du ciment

FIGURE 4.6 – Maçonnerie en BLT traditionnelle : Type 1

Ces constructions sont faites en "plein pied" et les murs portent le plus souvent une toiture en tôle ondulée ou en terre battue. Elles ne comportent généralement qu'une seule pièce ("entrercoucher"), rarement deux pièces ("chambre-salon"). Leur superficie varie entre 25 et 50 m^2 et la hauteur est inférieure à 4 m.

Les maçons qui réalisent ces ouvrages n'ont aucune qualification et les techniques de construction

sont les mêmes. Les appareillages sont en boutisse et les angles sont soignés par des croisements boutisse-double panerese.

L'état de ce type d'habitat devient moyen dès la première année, voire médiocre si des travaux d'entretien régulier ne sont pas effectués. En effet, les BLT utilisés ne sont pas souvent de bonne qualité et les joints en latérite non protégés avec le ciment se détachent sous l'effet de l'intensité de la pluie ou de l'érosion éolienne. Un entretien régulier est nécessaire.

Ce type d'habitat est généralement la concession des familles pauvres ou des magasins de dépôt des produits agricoles.

4.3.4.2 Les bâtiments en maçonnerie de BLT et structure en béton : Type 2 et 3

On distingue deux types de construction en maçonnerie de BLT et structure en béton :

Type 2 : C'est un système avec poutre de chaînage en béton armé après les ouvertures et parfois en soubassement et des poteaux en béton armé uniquement aux arrêtes et un remplissage en BLT (Figure 4.7 (a) et (c)). Les dimensions des poutres et des poteaux sont de l'ordre de 15 cm x 15 cm x 15 cm. Les BLT, également taillés par les artisans, ont des dimensions variables (15 cm x 15 cm x 30 cm ou 20 cm x 20 cm x 30 cm). Les joints sont en mortier de ciment ou de latérite, protégés en surface par un mortier de ciment. Les épaisseurs des joints, comme pour les types 1, sont variables (3-5 cm). La toiture en tôle ondulée sur charpente en bois le plus souvent, est directement posée sur le mur en BLT ou après un chaînage en béton, sans débordement de protection. La fondation est en bloc plein de ciment ou en gros béton de moellon de latérite.

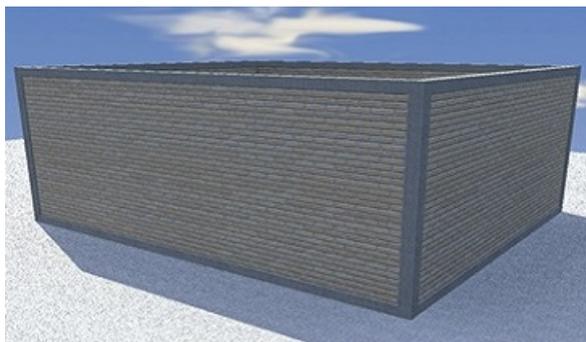
La construction est faite par des maçons non qualifiés mais ayant une certaine expérience dans les travaux de construction modernes en béton armé. Ce type de bâtiment en RDC simple est construit en deux pièces par des familles de revenu moyen demandant des pièces plus spacieuses (60-80 m^2).

Type 3 Le bâtiment de Type 3 est utilisé pour des constructions plus spacieuses (plus de 10 m de côté) demandant des poteaux intermédiaires (Figure 4.7 (b) et (d)). La construction est plus soignée que les précédentes et demande une main d'œuvre qualifiée. Les joints sont en mortier de ciment d'épaisseur constante (moins de 2 cm). La toiture est en dalle de béton, en tuile ou en tôle ondulée débordante pour protéger les parements contre les rayonnements solaires et la pluie. La fondation est entièrement en béton armé. Le bâtiment de type 3 est construit en RDC simple ou en R+1, au maximum R+2 quand les charges sont entièrement portées par l'ossature en béton.

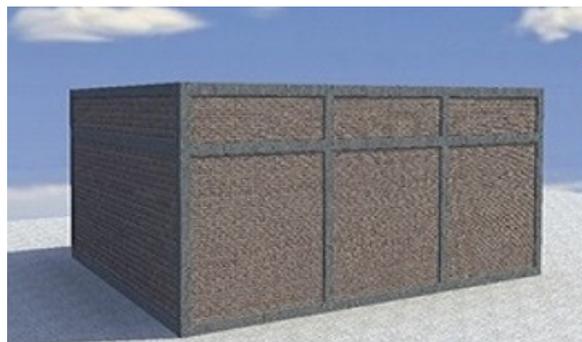
Les BLT utilisés sont de bonne qualité, et les dimensions sont imposées par les projeteurs aux artisan-tailleurs. Pour certains bâtiments administratifs, les BLT ont été fournis par

l'entreprise mécanisée PN, donc bénéficient de ce fait d'une bonne régularité de forme.

Ce type de bâtiments, généralement en bon état et demandant moins de travaux d'entretien, représente les actions des projets de développement, des ONG, de l'administration publique ou des familles à fort revenu.



(a) Modèle Type 2



(b) Modèle Type 3



(c) Exemple Type 2



(d) Exemple Type 3

FIGURE 4.7 – Maçonnerie en BLT avec structure en béton Type 2 et Type 3

4.3.4.3 Les bâtiments en maçonnerie mixte : Type 4

La maçonnerie de type 4 est l'œuvre des ONG et de l'administration publique. Les BLT sont utilisés en façade extérieure comme un mur en doublon de la maçonnerie en parpaings. Les objectifs visés avec cette technique sont de trois ordres :

- le double mur en parpaings et en BLT permet de fournir un meilleur confort thermique à l'intérieur des bâtiments de ce type. Les deux murs sont séparés par une lame d'air (plus isolant que les deux matériaux) de 2 à 5 cm d'épaisseur pour ainsi amortir considérablement le transfert thermique vers l'intérieur du bâtiment.

- la maçonnerie de BLT en façade extérieure joue également le rôle de pierre ornementale. Sa couleur naturelle, identique à celle des paysages des zones latéritiques, permet une intégration parfaite de la maçonnerie dans le milieu.
- le double mur permet aussi de supporter la charge de la toiture qui est souvent en béton armé (si le bâtiment est construit sans ossature).

Dans la ville de Dano, le siège de la Fondation Drayer, les locaux de l'école maternelle et de la mairie de Dano, illustrent ce type de maçonnerie (Figure 4.8).



(a) Chantier Siège de la fondation Drayer

(b) Chantier Ecole maternelle de Dano

FIGURE 4.8 – Maçonnerie en double mur de parpaing et de BLT : Type 4.

4.3.4.4 Les infrastructures de l'administration coloniale

L'étude de la durabilité de la maçonnerie en latérite sur trois années n'est pas réaliste et les moyens dont nous disposons ne nous permettent pas de simuler cette durabilité. Pour ces raisons, nous nous sommes intéressés à décrire deux bâtiments datant de la période coloniale qui témoignent encore la durabilité de la maçonnerie en BLT :

- l'ancienne cathédrale de Dano construite en 1933 ;
- les salles de classe de l'ancienne école de Dano construites en 1939.

Ces bâtiments dont les murs sont encore "débout" sont malheureusement abandonnés au profit des nouvelles infrastructures modernes. Cette description vient en complément de l'étude de la stabilité mécanique qui sera abordée dans la section 4.4.

a) L'ancienne cathédrale de Dano

L'ancienne cathédrale de Dano, aujourd'hui vieille de 81 ans, est en maçonnerie en *opus incertum* : avec des murs à parois simple. C'est une construction mixte de Blocs en Latérite Taillés (BLT) et des Briques en latérite stabilisées au ciment. Ses dimensions au sol sont de

39,40 m x 10,60 m et sa hauteur de 6,25 m. De la base au sommet, les murs sont en BLT sur une hauteur de 1 m, puis en briques de latérite stabilisée sur une hauteur de 3,50 m et se terminent par une ceinture en BLT de 0,50 m d'épaisseur. Les joints sont en mortier de ciment et la toiture est en tôle.

La superstructure du bâtiment est constituée de (Figure 4.9) :

- la fondation du bâtiment qui est une sorte de gros béton en moellons de latérite. c'est une fondation semi-filante d'épaisseur 0,50 m constituée par un mélange de ciment et de la cuirasse de latérite très dure à forte teneur en oxyde de fer ;
- les poteaux de dimensions 0,40 m x 0,20 m x 0,20 m sont des montages en pile de briques de latérite grossière stabilisée au ciment ;
- les linteaux de dimensions 1,00 m x 0,15 m x 0,20 m sont en béton armé ;
- l'allège de hauteur 1,00 m, est construit en BLT monté avec des joints en mortier de maçonnerie. Les BLT utilisés sont très résistants et ont des dimensions de 0,40 m x 0,20 m x 0,20 m.
- l'élévation après l'allège est construite en brique de latérite grossière, stabilisée au ciment sur une hauteur de 3,50 m. Elle est ceinturée sur une hauteur de 0,50 en BLT qui joue ici le rôle de chaînage haut.
- la toiture est faite en charpente métallique(cornières soudées) couverte de tôle ondulée. Les pannes sablières, intermédiaires et faitières sont en bois



FIGURE 4.9 – L'ancienne cathédrale de Dano

b) L'ancienne école primaire de Dano

Le bâtiment de l'ancienne école de Dano, vieille de 75 ans, a été réalisé par l'administration de l'église catholique. Ses dimensions au sol sont 40,50 m x 10,30 m et sa hauteur maximale sous la poutre faitière est de 6,25 m. C'est un ouvrage en matériaux mixtes (banco, BLT, joint

en mortier de ciment et enduit en banco par endroit, charpente mixte en métal et en bois, toiture en tôle ondulée). Les ouvertures sont surmontées par des arcs en BLT très résistants. Le bâtiment abandonné au profit des nouvelles salles en parpaing de ciment, connaît aujourd'hui une légère dégradation mais les murs de façades restent encore sur pied sur toute la hauteur.

Le bâtiment dont certaines façades se sont désolidarisées, est composé de quatre parties différenciables de par les techniques de construction et les types de matériau utilisés :

- la partie centrale qui comprend une enfilade de salles. La présence d'anciens tableaux noirs sur les murs, au nombre de quatre, nous indique que cela devait être les salles de cours de l'époque ;
- deux parties latérales (une de chaque côté de la partie centrale) faisant penser à des nefs et qui étaient probablement les couloirs donnant accès aux salles de cours.
- un rajout de pièces, désolidarisées du bâtiment principal, probablement postérieures à la partie centrale qui pourraient certainement faire office de bureaux d'enseignants ou d'entrepôt.

La figure 4.10 présente l'architecture de ce bâtiment reconstituée avec le logiciel ArchiCad.



FIGURE 4.10 – Architecture reconstituée de l'ancienne école de Dano

Les photographies de la figure 4.11 présentent les murs de façades et la toiture qui ont résisté aux intempéries malgré l'arrachement de la toiture par la population après l'abandon de l'école au profit des infrastructures nouvellement construites.

Les panneaux restants de murs sur les quatre côtés du bâtiment nous indiquent que :

- les matériaux de la maçonnerie sont principalement des blocs de latérite taillés dans des



(a) Façade Nord (mur supérieur en BLT-inférieur en brique de banco)



(b) Façade Sud (poteaux et arcs de BLT)



(c) Façade Est (entièrement en BLT)



(d) Façade ouest (BLT + joint en mortier ciment)



(e) Toiture partie centrale (charpente métallique + tôle ondulée)



(f) Toiture partie rajoutée (charpente en bois)

FIGURE 4.11 – Etat actuel de l'ancienne école de Dano

carrières cuirassées très dures, témoignant de la pratique des travaux forcés. Ce type de blocs ne peut aujourd'hui être taillé par les artisan-tailleurs compte tenu de la débauche d'énergie importante que demande cette taille. La résistance à la compression peut avoisiner celle des granites ;

- les murs de cloison intérieurs sont souvent en banco, mais systématiquement chaînés par une bande d'environ 0,5 à 1,0 m en BLT sur la partie supérieure ;
- tout comme pour le bâtiment de l'ancienne église, la fondation est en béton (moellon de

- latérite + ciment) surmontée par une à deux rangées de BLT ;
- l’élévation des murs est réalisée avec un mixage de BLT et de briques de banco encore résistantes ;
- la toiture constituée d’une charpente en bois local et de tôle ondulée, est posée sur deux rangées de BLT de meilleure qualité qui ceignent tout le bâtiment, servant ainsi de chaînage ;
- tous les linteaux d’ouverture sont réalisés en forme d’arc de cercle avec des BLT de meilleure qualité ;
- les joints de montage de la maçonnerie sont en mortier de ciment et de la latérite meuble grossier ;
- les parties du mur en banco sont protégées contrairement aux parties en BLT qui restent apparents ;
- le bâtiment ne comporte pas de poteaux mais les angles sont systématiquement réalisés en BLT superposés en piles d’épaisseur supérieure à celle des murs d’élévation.

4.4 Modélisation mécanique d’un bâtiment en BLT selon l’Eurocode 6

Cette partie a pour objet de répertorier les paramètres nécessaires au dimensionnement d’un bâtiment en BLT selon l’Eurocode 6 (PR XP ENV 1996-3, 2001) et d’utiliser ces paramètres pour vérifier la faisabilité d’une construction de bâtiment classique à niveau en maçonnerie.

4.4.1 Méthodologie

La méthode consiste à simuler le comportement mécanique (déformations et distribution des contraintes) d’un bâtiment à niveau variable en maçonnerie de BLT sous l’effet de son poids propre, de la charge d’exploitation et de la charge du vent sur une des façades.

La simulation est faite selon deux techniques différentes de constructions (construction à joint de montage mince ou à joint épais) en utilisant le logiciel Robot Structural Analysis Professional 2012. La norme de calcul utilisée pour le dimensionnement des éléments est celle développée dans l’Eurocode 6 (PR XP ENV 1996-3, 2001).

4.4.1.1 Présentation du logiciel Robot

Le logiciel Robot Structural Analysis Professional est un produit de la maison Autodesk. Il permet de modéliser, d’analyser et de dimensionner de nombreux types de structures, qu’il s’agisse de bâtiments, d’ouvrages d’art ou de structures spéciales. Son mode de calcul est basé sur les éléments finis. Ainsi, il est capable de calculer les modèles les plus complexes grâce à un maillage automatique d’une puissance exceptionnelle, des algorithmes non linéaires, ainsi qu’un

jeu complet de normes de conception pour des résultats quasiment instantanés.

Robot Structural Analysis Professional 2012 propose deux méthodes de calculs par éléments finis : "Coons" et "Delaunay +Kang". Dans notre cas, nous avons utilisé la méthode "Delaunay + Kang" qui offre un maillage pouvant être utilisé sur des panneaux irréguliers et permettant un affinage sur certaines zones, sur le contour des ouvertures notamment, ce qui n'est pas possible avec la méthode de Coons. Au niveau surfacique nous avons utilisé un maillage par éléments finis de type Quadrangle (4 nœuds), avec triangulation de taille moyenne sur les bords de niveaux 2. Nous avons opté pour des divisions de 20 par 20 pour chaque panneau en ce qui concerne le maillage régulier.

4.4.1.2 Présentation du modèle simulé

Le modèle simulé est issu des plans de la structure utilisée dans une étude sismique réalisée par [Juhásová et al. \(2008\)](#). C'est un bâtiment simple de 3.58 sur 4.01 m ayant quatre ouvertures : une porte sur la façade Est, deux fenêtres au Nord et une fenêtre au Sud (figure 4.12).

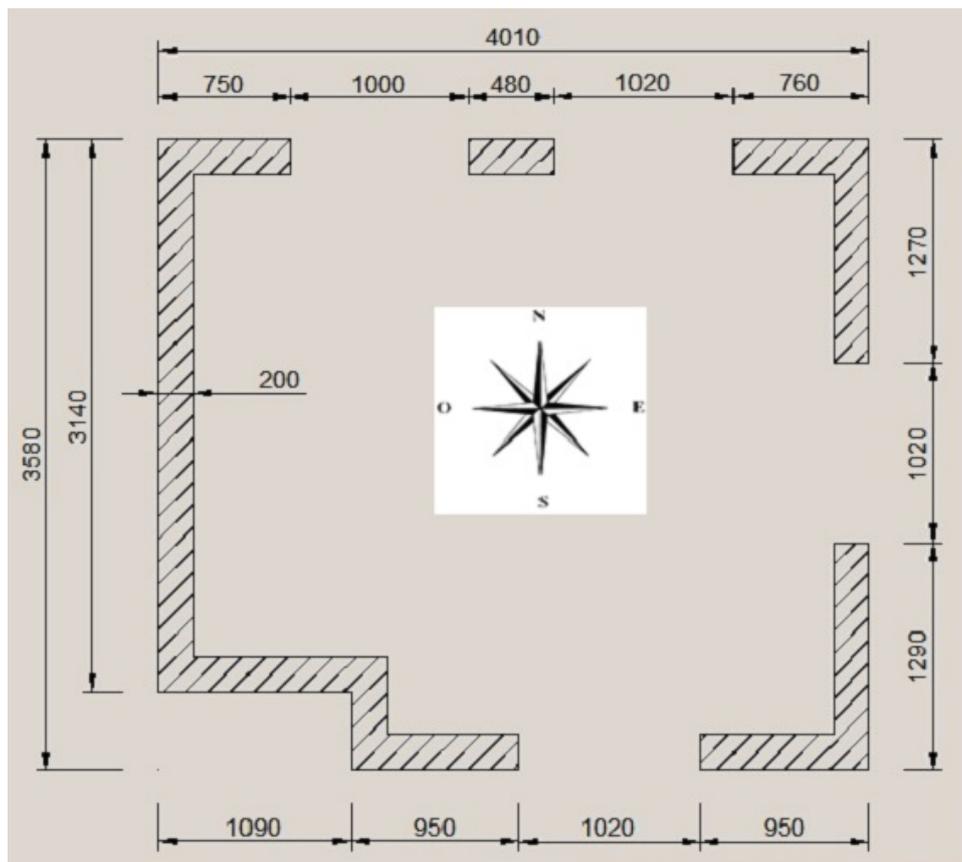


FIGURE 4.12 – Plan du modèle de bâtiment simulé

Ce type de bâtiment s'avère des plus basiques mais s'intègre parfaitement dans le style de maisons que l'on retrouve au Burkina Faso, et particulièrement dans l'architecture des bâtiments en BLT rencontrés dans la région de Dano (Bâtiment de Type 1 décrit dans la troisième section de ce chapitre).

Les murs du bâtiment ont une hauteur de 3 m et une épaisseur de 20 cm, et sont paramétrés comme des « voiles non armés » utilisant le modèle de calcul « coque ». La toiture est constituée par une dalle en béton armé de 30 cm d'épaisseur, calculée avec le modèle de calcul diaphragme rigide reposant sur les murs. Les liaisons sol/murs sont modélisées par des rotules.

Les techniques de construction utilisées sont celles de la maçonnerie avec joints (mince et épais) de montage en mortier de latérite meuble stabilisée avec ciment. Le modèle ne possède pas d'ossature (pas de système de poutres et poteaux).

Les simulations sont faites en faisant varier le niveau des bâtiments (Bâtiment plein pied, R+1, R+2...) jusqu'à la limite de contrainte admissible du matériau et de déplacement limité ici à 10 mm (hypothèse de calcul). Les plans des niveaux supérieurs (R+1, R+2) sont identiques à celui du rez de chaussée. La figure 4.13 est une illustration en trois dimensions des modèles simulés en RDC, et R+1. Cette modélisation de bâtiment à niveaux n'est que virtuelle et n'a aucun caractère réaliste.

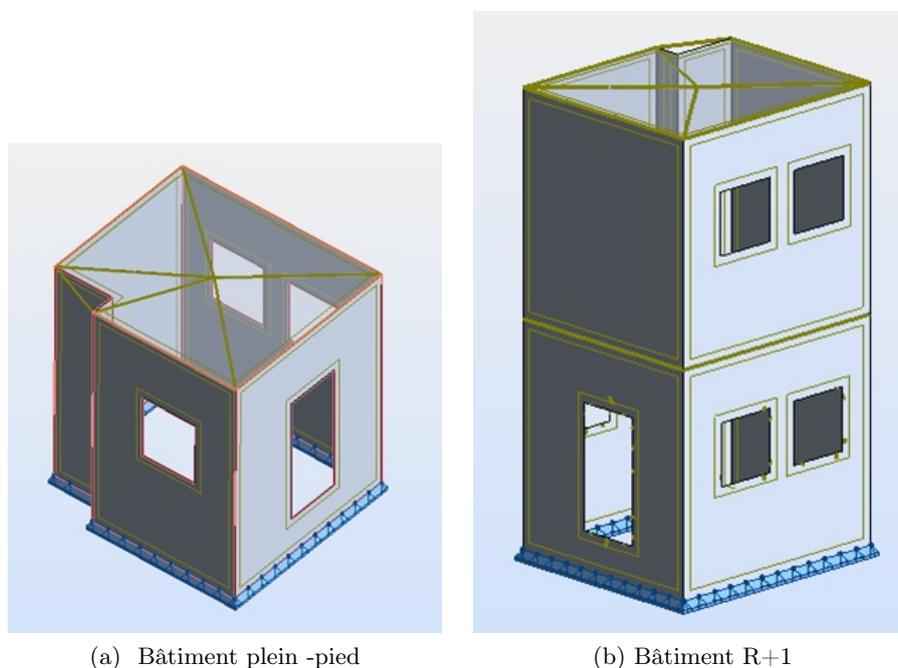


FIGURE 4.13 – Exemple du modèle simulé en RDC et R+1

4.4.2 Caractéristiques des éléments de maçonnerie

4.4.2.1 Propriétés des BLT utilisés et résistance de calcul

Les caractéristiques physiques et mécaniques des BLT utilisés pour la modélisation sont les valeurs moyennes de la carrière de Dano PN déterminées dans le chapitre 3. Les résultats des essais mécaniques réalisés sur cette carrière ont fait l'objet d'une publication dans le journal "Les annales BTP" ((Lawane *et al.*, 2011). Le tableau ci-dessous récapitule ces valeurs. Certains paramètres comme le coefficient de Poisson et le module de cisaillement n'ont pas pu être évalués dans ce travail. Le coefficient de poisson de calcul est pris égale à 0,3 en se référant aux données des roches tendres trouvées dans la littérature. Le module de cisaillement a été calculé avec la formule 4.1. L'ensemble des paramètres sont résumés dans le tableau 4.3.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4.1)$$

Tableau 4.3 – Caractéristiques du BLT utilisé dans la modélisation

Paramètres	Symbole	Unité	Valeurs moyennes
Poids volumique sec	γ_d	kN/m^3	21,7
Résistance moyenne à la compression	σ_c	MPa	3,81
Module de Young	E	MPa	250
Coefficient de Poisson	ν		0,3
Module de cisaillement	G	MPa	96,15

4.4.2.2 Propriétés du mortier de pose

Préparation des éprouvettes et dispositifs d'essais :

Le mortier de pose retenu pour la réalisation du modèle de la maçonnerie est un mélange de latérite meuble et de ciment. Une étude préalable au laboratoire de ce mortier de latérite à différents dosages de ciment (10%, 15% et 20% de ciment par rapport au poids de la latérite) a permis de déterminer les caractéristiques mécaniques de celui-ci telles que la résistance à la compression et la résistance de la traction par flexion. Les éprouvettes utilisées pour ces essais sont de dimensions 16 cm x 4 cm x 4 cm et la presse qui a servi à la réalisation des essais est celle du laboratoire LEMC de décrite dans le chapitre 3. Pour chaque dosage, des essais de compression et de traction par flexion 3 points ont été réalisés sur 12 éprouvettes immergées pendant 3 jours (essais normalisés) et sur 12 éprouvettes séchées à l'air libre (essais réalisés dans les conditions de chantier). La figure 4.14 présente le processus de réalisation des éprouvettes et de la réalisation de ces essais.



FIGURE 4.14 – Eprouvettes 4 x 4 x 16 cm de mortier de latérite-ciment et essais de compression-traction par flexion

Résultats des essais sur le mortier de pose :

Les résultats de ces essais sont consignés dans les tableaux 4.4 et 4.5. Ces résultats montrent que la résistance à la compression et la résistance la traction par flexion 3 points sont meilleures pour les éprouvettes immergées et croissent avec le dosage en ciment. Pour des raisons économiques, nous retiendrons les résultats mécaniques du mortier dosé à 15% de ciment pour la composition et l'étude du comportement mécanique du modèle de maçonnerie qui sera décrit ci-dessous.

Tableau 4.4 – Résultats moyens des essais de compression sur les mortiers

Proportion de ciment	Échantillons non immergés		Echantillons immergés	
	Moy. σ_c (MPa)	E-type	Moy. σ_c (MPa)	E-type
10%	0,77	0,13	1,80	0,20
15%	1,22	0,55	2,78	0,23
20%	1,83	0,17	3,30	0,43

Tableau 4.5 – Résultats moyens des essais de traction par flexion 3 points sur les mortiers

Proportion de ciment	Echantillons non immergés		Echantillons immergés	
	Moy. σ_t (MPa)	E-type	Moy. σ_t (MPa)	E-type
10%	0,50	0,01	0,71	0,04
15%	0,84	0,12	1,18	0,02
20%	0,89	0,09	1,32	0,07

4.4.3 Hypothèses de calcul

4.4.3.1 Résistance caractéristique de la maçonnerie et résistance de calcul

Deux types de maçonnerie ont été définis à partir des éléments de maçonnerie qui sont les BLT et le mortier de pose en latérite dosée à 15% de ciment dont les caractéristiques physiques et mécaniques ont été déterminées dans le paragraphe précédent :

- une maçonnerie de BLT avec joint mince de pose (1 à 3 mm) dont les caractéristiques mécaniques et physiques sont définies dans les tableaux 4.3, 4.4 et 4.5.
- une maçonnerie de BLT avec joint de pose en mortier de latérite dosée à 15% de ciment dont les caractéristiques mécaniques sont définies dans les tableaux 4.3, 4.4 et 4.5.

Nous nous baserons essentiellement sur l'Eurocode 6 (PR XP ENV 1996-3, 2001) et l'ouvrage "Dimensionner les ouvrages en maçonnerie" de Hurez *et al.* (2011) pour déterminer la résistance caractéristique de ces deux types de maçonnerie.

Selon l'Eurocode 6 (PR XP ENV 1996-3, 2001), la résistance caractéristique du couple "éléments + mortier" est utilisée pour établir la résistance caractéristique de la maçonnerie. Cette résistance est utilisée ensuite pour déterminer la résistance des murs ou plus généralement des ouvrages de maçonneries. La valeur de cette résistance notée f_k peut être obtenue, soit à partir d'essais réalisés selon la norme NF EN 1052-1 (1999), soit à partir des valeurs calculées.

Compte tenu de notre dispositif d'essai qui n'offre pas la première possibilité, nous avons opté pour la dernière méthode.

Selon l'Eurocode 6 (PR XP ENV 1996-3, 2001), la résistance caractéristique de la maçonnerie à joint mince d'épaisseur comprise entre 1 et 3 mm et de celle à joint épais (2 cm) sont données respectivement par les formules 4.2 et 4.3 :

- Maçonnerie à joint mince (1-3 mm) :

$$f_k = K \cdot f_b^{0,85} \quad (4.2)$$

– Maçonnerie à joint épais (2 cm) :

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,3} \quad (4.3)$$

avec :

- f_b , la résistance moyenne normalisée de l'élément qui est prise ici égale à la résistance à la compression moyenne du BLT de la carrière de Dano mentionnée dans le paragraphe précédent (3,81 MPa) ;
- f_m , la résistance à la compression du mortier de montage qui est ici la résistance du mortier de latérite dosé à 15% de ciment défini dans le tableau 4.3 (1,18 MPa) ;
- K un coefficient défini en fonction de l'ouvrage de maçonnerie ainsi que du groupe de la maçonnerie employée. Les BLT peuvent être assimilés à des pierres naturelles prétaillées. Selon l'Eurocode 6 (PR XP ENV 1996-3, 2001), la maçonnerie en BLT peut être classée dans le groupe 1. K peut donc être pris égale à 0.45 pour une pose avec mortier épais et 0,75 pour une avec mortier mince.

La résistance de calcul f_d est définie en appliquant un coefficient de sécurité γ_M qui tient compte de la forme variable des blocs.

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_M} \quad (4.4)$$

Pour tenir compte de la variabilité de la résistance en compression des BLT, ce coefficient de sécurité a été fixé à 1,80, valeur comparable à celle des produits sans certification avec joint de pose de toute catégorie, définie dans l'Eurocode 6 (PR XP ENV 1996-3, 2001). Le tableau 4.6 résume les valeurs numériques des résistances caractéristiques, de résistances de calcul et des autres paramètres prise en compte dans la modélisation sous Robot.

Tableau 4.6 – Paramètres mécaniques utilisés pour la définition de deux modèles de maçonnerie

Paramètres	Symb.	Unité	Joint mince	Joint épais
Poids volumique sec du BLT	γ_d	kN/m^3	21,7	
Résistance moyenne à la compression du BLT	σ_{cb}	MPa	3,81	
Résistance moyenne à la compression du mortier (10%)	σ_{cm}	MPa	1,80	
Module de Young du BLT	E	MPa	250	
Coefficient de Poisson	ν		0,3	
Module de cisaillement du BLT	G	MPa	96,15	
Résistance caractéristique du mur	f_k	MPa	2,33	1,21
Résistance de calcul	f_d	MPa	1,3	0,67

4.4.3.2 Géométrie des structures et combinaison de charges

Le calcul est mené selon la méthode simplifiée de l'Eurocode qui conditionne la modélisation par la vérification des hypothèses suivantes sur la géométrie de la structure et les charges appliquées :

- Tous les murs du bâtiment sont porteurs et leur hauteur ne doit pas dépasser 16 m ;
- La portée l_f [m] des planchers ne doit pas dépasser $l_f = \min(4, 5 + 10t; 6)$; avec t l'épaisseur des murs porteurs ;
- La hauteur libre d'un étage ne doit pas dépasser 3,2 m pour un rez de chaussée d'un bâtiment de hauteur supérieure à 7 m ;
- Les valeurs caractéristiques des actions variables sur les planchers et sur la toiture ne doivent pas dépasser 500 kg/m^2 (nous prendrons $1,5 \text{ kg/m}^2$, tel qu'il est spécifié dans l'Eurocode pour les bâtiments d'habitation) ;
- Les murs porteurs doivent être alignés verticalement en hauteur ;
- Pour les murs en rive de plancher soumis à des charges dues au vent, l'épaisseur t [m] doit vérifier l'inégalité :

$$t \geq \frac{C_1 \cdot q_{swd} \cdot l \cdot h^2}{N_{Ed}} + C_2 \cdot h \quad (4.5)$$

Avec :

h [m] : la hauteur libre d'un étage (ici 3m) ;

q_{swd} : la charge de calcul due au vent (ici 1 kN/m^2 tel qu'il est spécifié dans l'Eurocode) ;

N_{Ed} : la valeur de calcul de la charge verticale ;

l [m] : la longueur du mur ;

c_1 et c_2 sont des constantes dépendant de α , tel que $\alpha = \frac{N_{Ed}}{t \cdot l \cdot f_d}$. Ces constantes sont lues sur des graphiques définis dans l'Eurocode 6 (PR XP ENV 1996-3, 2001).

Toutes ces hypothèses ont été vérifiées et les calculs sont joints en annexe D.

La simulation a été faite sous deux angles à savoir :

- sous le poids propre de la structure ;
- sous l'application de charge du vent sur une des façades, de charges d'exploitation et du poids propre de la structure.

Les valeurs des charges appliquées ont été prises conformément à celles définies dans les Eurocodes. Ces normes proposent une charge d'exploitation des planchers comprises entre 1,5

et 2 kN/m^2 pour les bâtiments de catégorie A (habitation, résidentiel). Nous avons convenu de prendre la valeur maximale de 2 kN/m^2 . La charge du vent a été prise égale à 1 kN/m^2 . Elle est appliquée sur la façade sans baie des structures.

Les calculs ont été faits à l'état limite de service sous poids propre de la structure et à l'état limite ultime sous application de charges y compris le poids propre. L'état limite ultime est associé à la ruine de la structure. La combinaison d'actions à l'ELU est définie par la formule :

$$1,35.G + 1,5.Q + 1,5.\psi_{o,i}.W \quad (4.6)$$

avec G = charge permanente (poids propre de la structure), Q = charge d'exploitation appliquée sur le plancher, W = la charge du vent. $\psi_{o,i}$ = coefficient réducteur de la charge du vent, ici = 1 pour maximiser l'action du vent.

Un exemple de modélisation avec prise en compte de la charge du vent est illustré par la figure 4.15

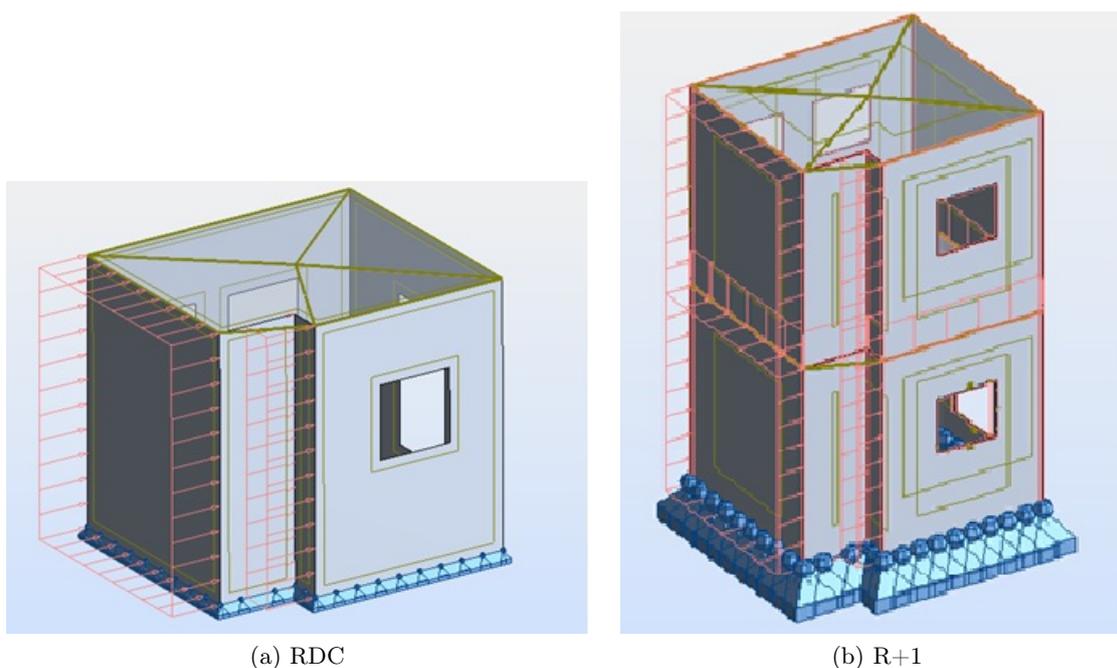


FIGURE 4.15 – Exemple de Modélisation avec prise en compte de la charge du vent

4.4.4 Résultats des modèles et discussions

On rappelle que la conception de ce type de construction ne s'intègre pas dans le cadre d'un projet réaliste. il s'agit d'une simulation d'un petit modèle de bâtiment en laboratoire pour vérifier le comportement mécanique suite à des hypothèses émises.

4.4.4.1 Contraintes et déformations sous l'action du poids propre

Sous l'action du poids propre de la structure et des charges d'exploitation, la déformée globale de la structure croît avec le niveau de la structure (RDC, le R+1, le R+2). Quelque soit le niveau du bâtiment, les déplacements suivant les axes X et Y de la structure sont négligeables. Les déplacements totaux sont donc confondus au déplacements suivant Z.

Pour la maçonnerie à joint mince, jusqu'au niveau R+2, les déplacements totaux maximaux observés restent inférieurs à la valeur de 10 mm considérée comme déformation préjudiciable dans les hypothèses de calcul (Tableau 4.7).

Par contre pour la maçonnerie à joint épais, à partir du niveau R+1 ces déplacements deviennent préjudiciables. On observe un déplacement total maximum de 10,5 mm pour le bâtiment simulé en R+1 et un déplacement de l'ordre 23 mm pour la simulation en R+2.

Ces déplacements suivant l'axe Z traduisent un tassement de l'édifice, c'est pourquoi on observe un déplacement croissant en remontant le long d'un mur. La figure 4.16 illustre la variation de ces déplacements en fonction du niveau des bâtiments simulés.

Tableau 4.7 – Déplacements et contraintes maximaux sous poids propre et charges d'exploitation

Nature de joint de pose	Joint mince			Joint épais		
	RDC	R+1	R+2	RDC	R+1	R+2
Type de Bâtiment						
Déplacements totaux maximaux (mm)	0,9	3,4	7,3	2,9	10,5	23,1
Contraintes maximales (MPa)	0,16	0,35	0,65	0,16	0,35	0,62

Les diagrammes de répartition des contraintes de la figure 4.17 montrent que pour les deux types de maçonnerie les contraintes maximales observées dans les murs restent inférieures aux deux valeurs de la résistance de calcul (1,3 MPa pour maçonnerie à joint mince et 0,67 MPa pour maçonnerie à joint épais). Le tableau 4.7 présente les valeurs maximales des contraintes observées selon le nombre d'étages du bâtiment et le type de joint de montagne. La valeur de 0,62 MPa observée à partir de R+2 pour la maçonnerie à joint épais est très proche de la contrainte de calcul (0,67 MPa). R+2 est donc un niveau à ne pas dépasser pour la maçonnerie à joint épais. Tout comme pour les déplacements totaux, les valeurs maximales de contrainte sont observées au niveau des ouvertures. Une sorte de bulle de concentration se forme au niveau de chaque ouverture (figure 4.17). Un deuxième niveau de concentration de contrainte à un moindre degré est également observé au niveau des angles de tous les types de bâtiment simulés.

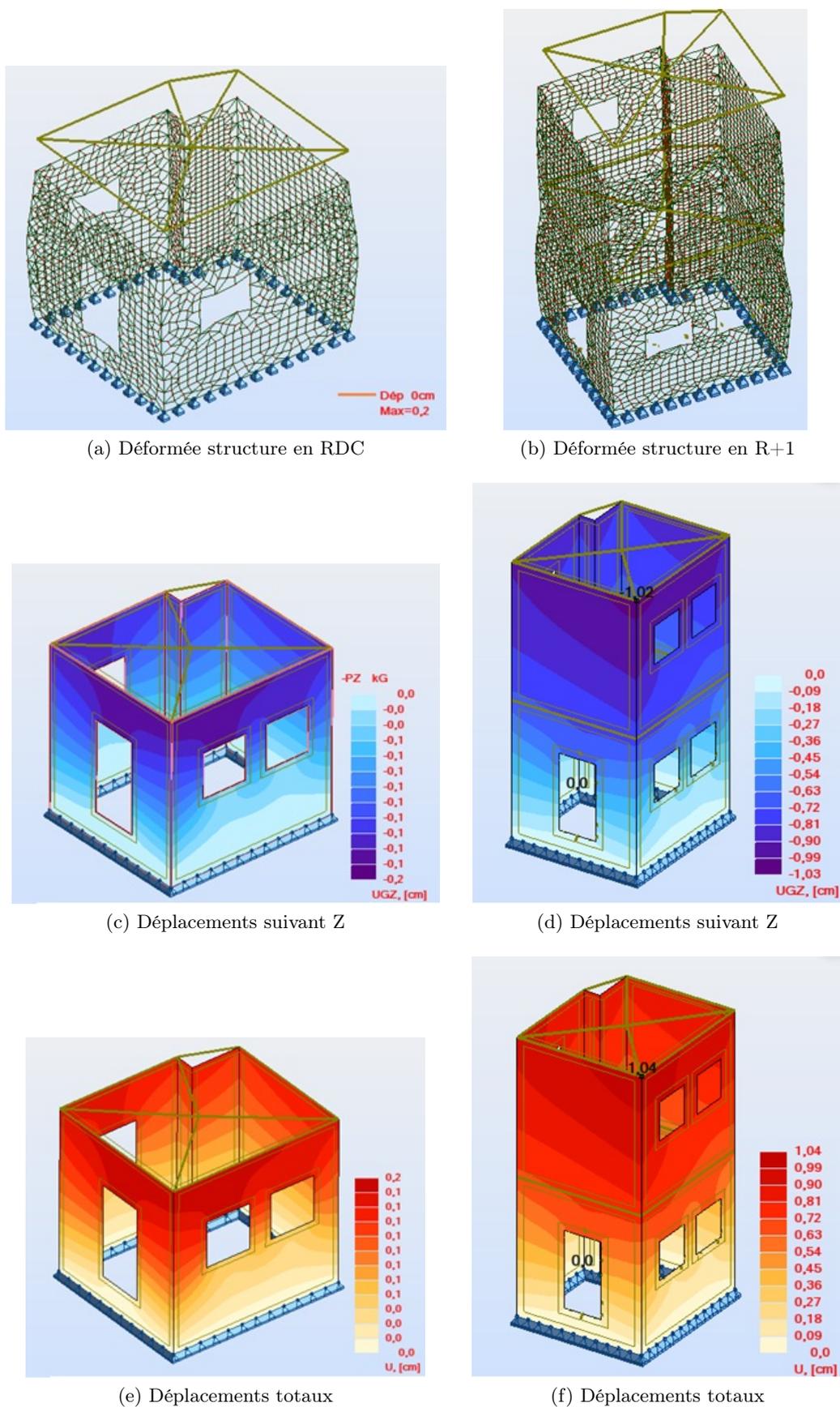
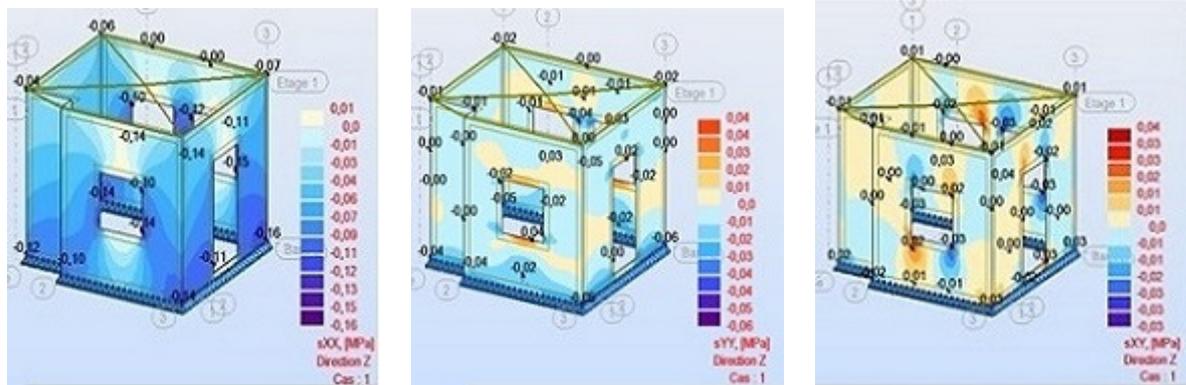


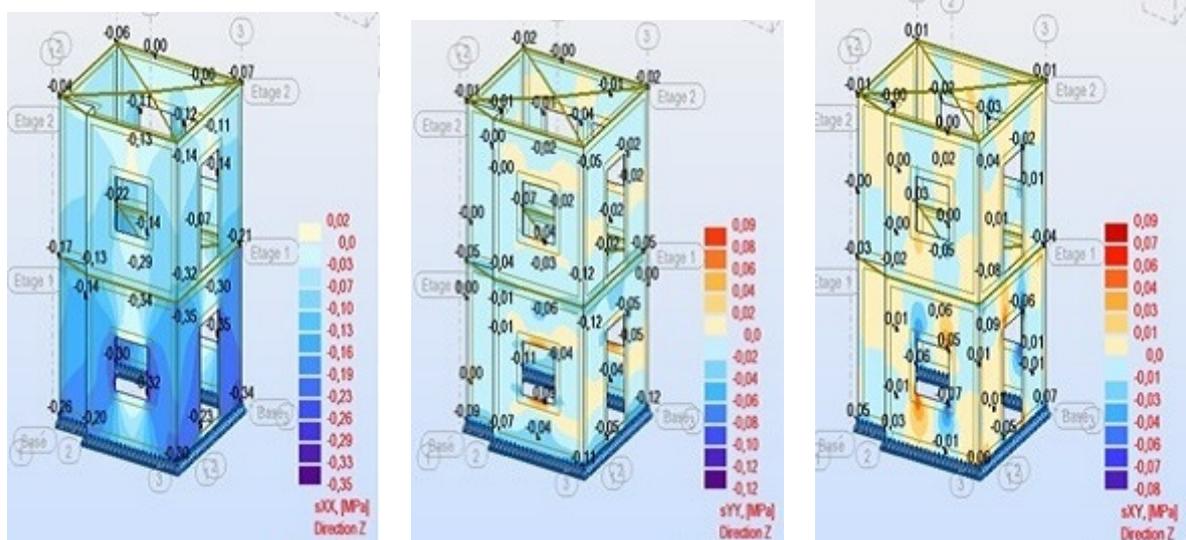
FIGURE 4.16 – Diagrammes de répartition des déplacements totaux dans la direction de Z



(a) RDC-contraintes suivant XZ

(b) RDC-contraintes suivant YZ

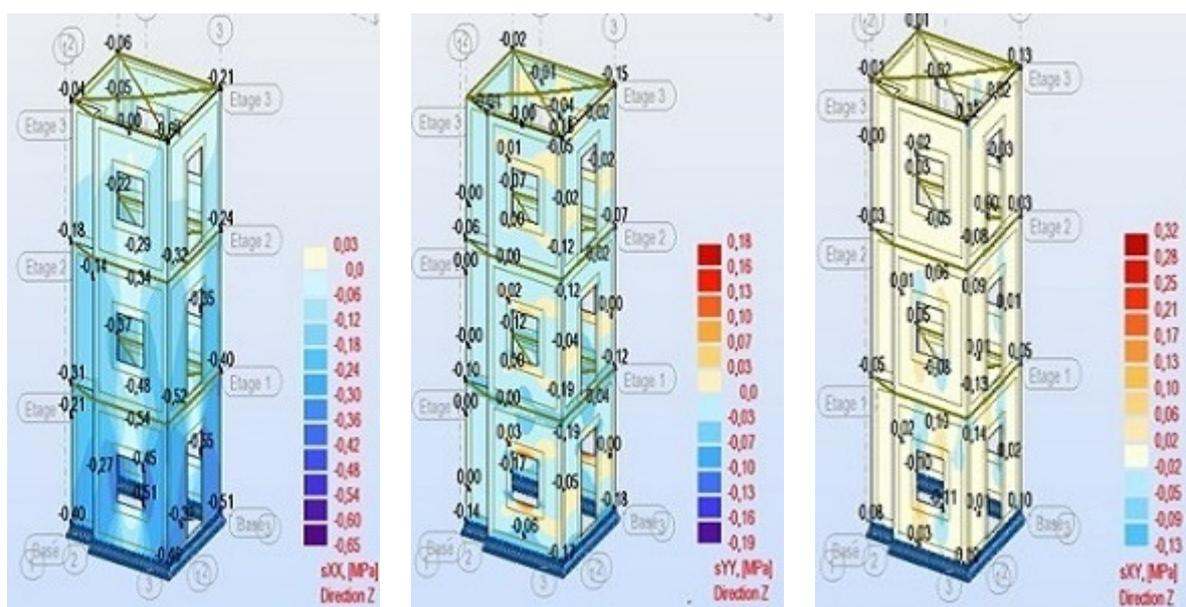
(c) RDC-contraintes suivant XY



(d) R+1-contraintes suivant XZ

(e) R+1-contraintes suivant YZ

(f) R+1-contraintes suivant XY



(g) R+2-contraintes suivant XZ

(h) R+2-contraintes suivant YZ

(i) R+2-contraintes suivant XY

FIGURE 4.17 – Diagramme de répartition des contraintes dans la direction de Z

4.4.4.2 Contraintes et déformations sous l'action du poids propre et des charges

Sous l'action des charges dues au vent, au poids propre et à l'exploitation, quels que soient le type de la maçonnerie et le nombre de niveaux du bâtiment simulé, seuls les déplacements dans la direction de Y sont négligeables. Les déplacements suivant X sont non nuls compte tenu de la charge du vent qui est dans cette direction. Les déplacements totaux ont donc des composantes non négligeables suivant les axes X et Z. Les diagrammes de déplacements totaux en fonction du nombre de niveaux du bâtiment et selon le type de maçonnerie (joint mince et épais) sont représentés sur la figure 4.18.

On observe également une concentration de déplacement sur la façade soumise au vent de chaque bâtiment. Le tableau 4.8 présente les valeurs maximales de déplacements totaux par nombre de niveaux du bâtiment et par type de maçonnerie. Ces déplacements commencent à être préjudiciables pour le bâtiment R+2 en maçonnerie mince (déplacement maximum observé de 14,9 mm) alors qu'ils le sont déjà à partir de R+1 pour la maçonnerie à joint épais (déplacement maximum observé de 19,3 mm).

Tableau 4.8 – Déplacements et contraintes maximaux sous l'effet du vent, du poids propre et des charges d'exploitation

Nature de joint de pose	Joint mince			Joint épais		
	RDC	R+1	R+2	RDC	R+1	R+2
Type de Bâtiment						
Déplacements totaux maximaux (mm)	1,9	6,1	14,9	6,1	19,3	46,3
Contraintes maximales (MPa)	0,26	0,64	1,03	0,26	0,64	1,02

Les répartitions des contraintes dans les murs de la structure en fonction de la combinaison de charges (poids propre, vent et charges d'exploitation) sont représentées sur la figure 4.19. On observe également une concentration de contraintes sur la façade soumise au vent de chaque modèle. Des bulbes de contraintes de valeurs élevées, plus ou moins proches de la valeur maximale de calcul sur l'échelle d'évolution des contraintes, sont aussi observées aux abords des ouvertures. Les valeurs maximales de contraintes révélées dans chaque type de bâtiment (Tableau 4.8) montrent que :

- les contraintes sur les murs deviennent préjudiciables à partir du niveau R+2 pour la maçonnerie à joint mince ;
- les contraintes sur les murs deviennent préjudiciables à partir du niveau R+1 pour la maçonnerie à joint épais ;

En conclusion, en tenant compte simultanément des hypothèses émises sur le déplacement maximum accepté (10 mm) et les contraintes de calcul (valeurs maximales tolérées) de chaque type

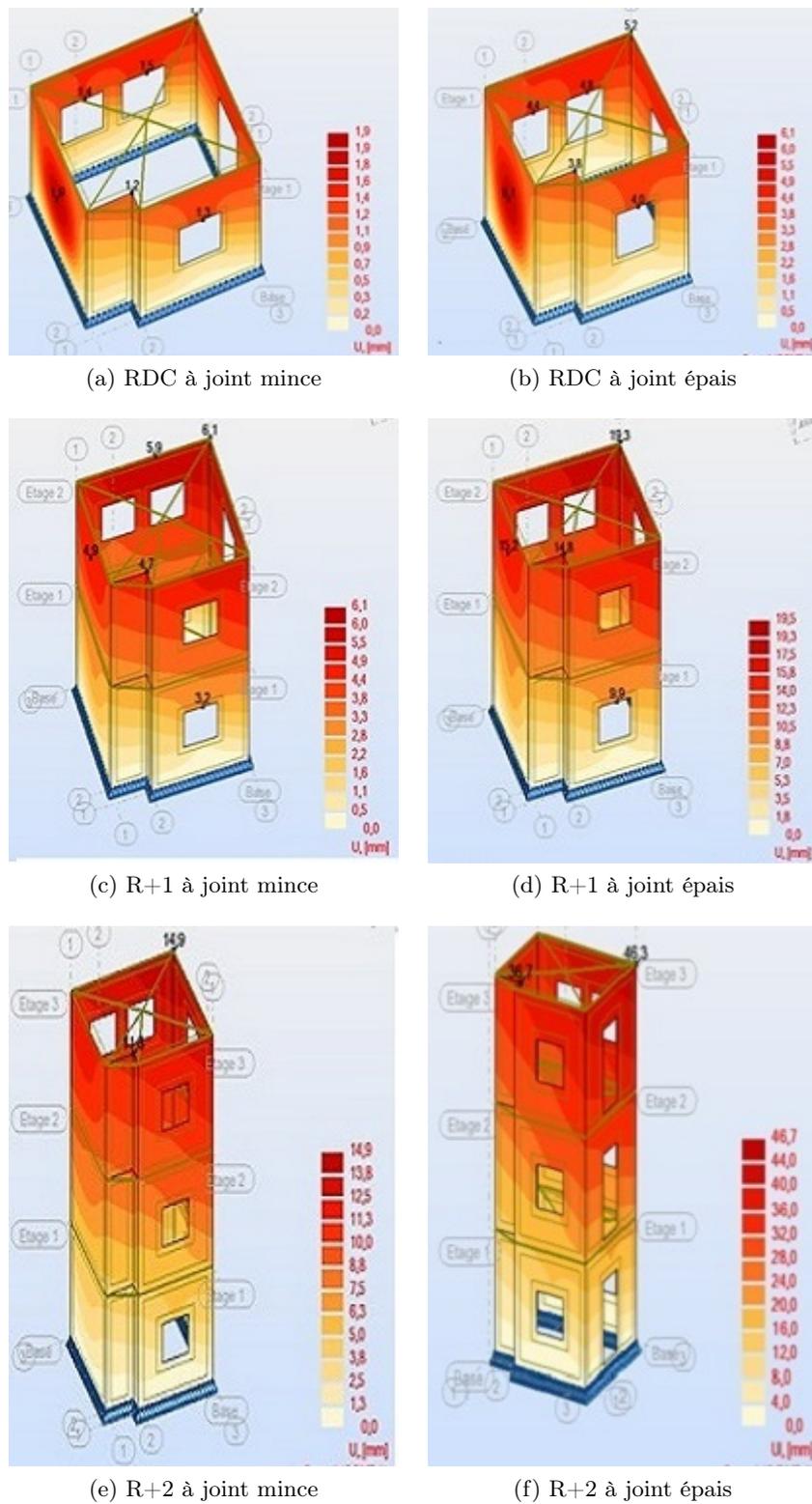


FIGURE 4.18 – Diagramme de répartition des déplacements totaux

de maçonnerie, sous l'effet du poids propre, de la charge du vent et des charges d'exploitation, on ne peut envisager de construire au delà de :

- R+1 pour la maçonnerie à joint mince ;
- RDC pour la maçonnerie à joint épais.

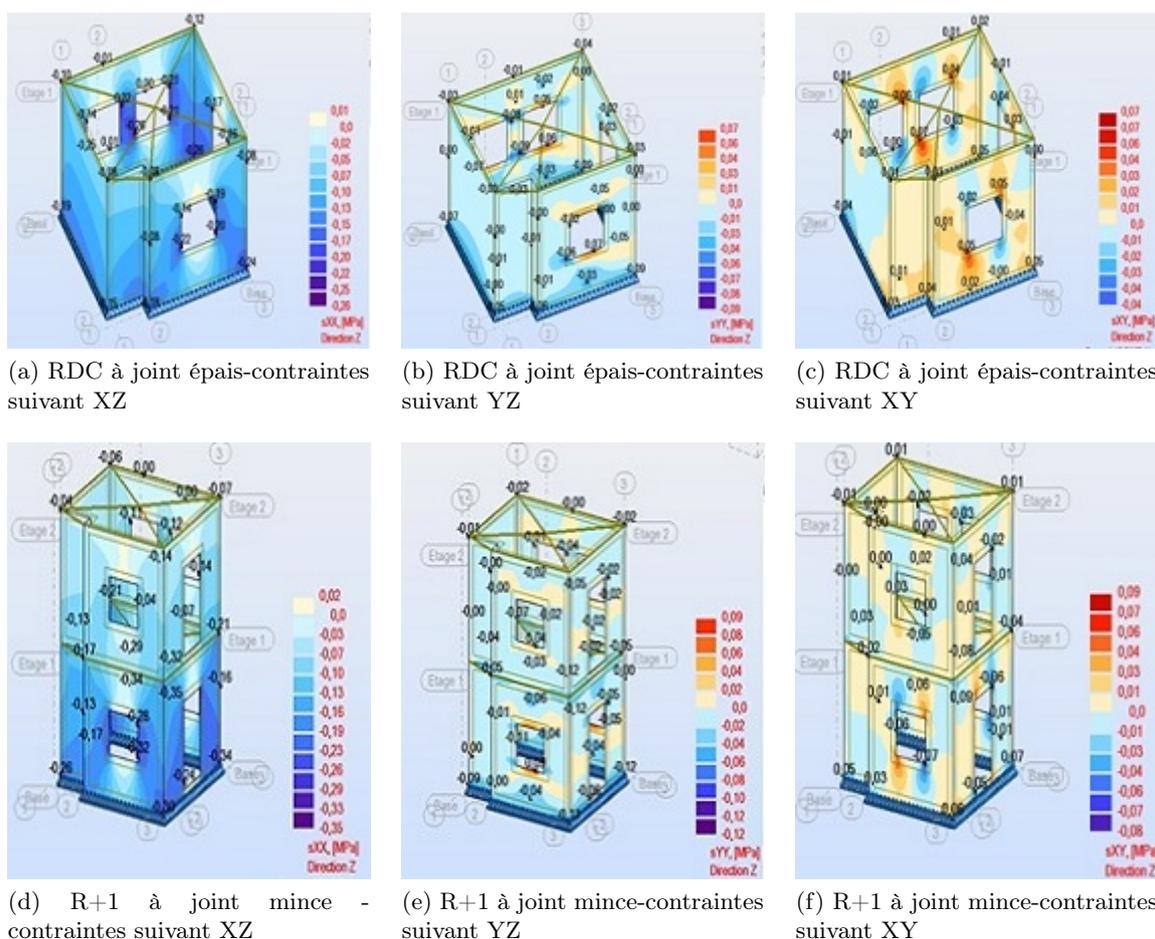


FIGURE 4.19 – Répartition des contraintes pour les RDC et R+1 dans la direction de Z

Les déformées globales des structures simulées représentées sur la figure 4.20 montrent que :

- il n'y a pas de grandes différences entre les structures déformées en fonction de type de maçonnerie ;
- sous l'effet du vent, les structures simulées s'inclinent dans la direction de celui-ci. Cette inclinaison croît avec le nombre d'étages des structures simulées. Elle est de l'ordre 2° à 3° pour les R+1 et R+2 mais ne varie pas en fonction du type de la maçonnerie.

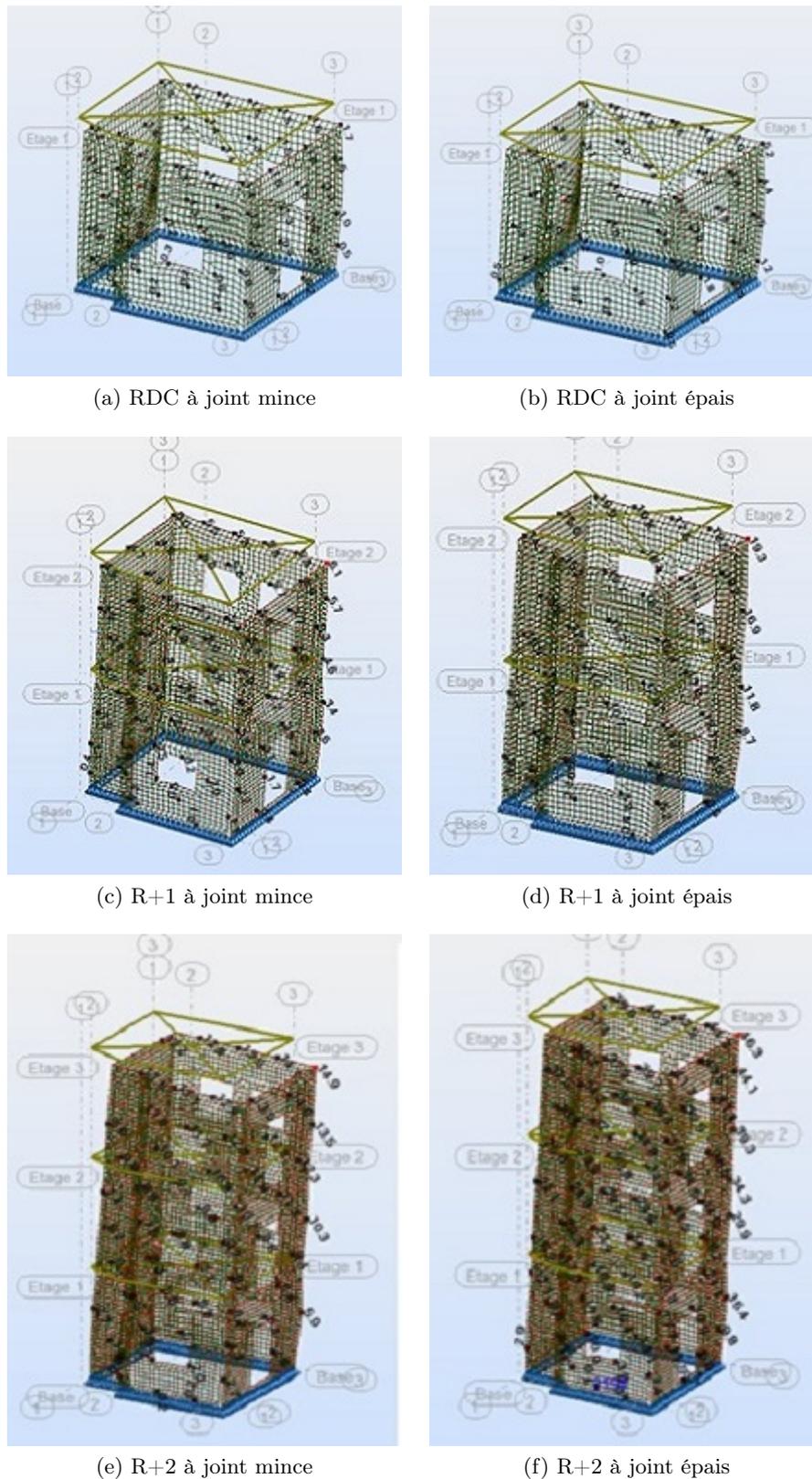


FIGURE 4.20 – Déformées des structures simulées sous l'effet de charges dues au vent, au poids propre et à l'exploitation

4.5 Suivi hygro-thermique d'un bâtiment en BLT

Cette partie a fait l'objet d'une publication dans le journal of Material and civil Engenieer (Lawane et al., 2014). C'est cet article qui sera présenté après une introduction qui explique la démarche.

Le suivi hygro-thermique a consisté en la mesure des températures et d'humidités intérieures et extérieures d'un bâtiment pilote en BLT dans la ville de Ouagadougou. Les résultats de mesures sont par la suite utilisés pour décrire le confort hygro-thermique dans un bâtiment en BLT.

Le bâtiment pilote instrumenté est de type F1, d'environ 40 m^2 de surface et 3,5 m de hauteur, comportant un séjour bien aéré, une chambre à coucher et un magasin externe mal aéré. Le séjour et la chambre à coucher sont habités tandis que le magasin est resté fermé durant la période de mesure. Le bâtiment est construit en BLT. Tous les murs sont porteurs, avec une épaisseur de 30 cm. La toiture est en tôle ondulée avec un faux-plafond en contreplaqué positionné 1.5 m en dessous.

Le dispositif de mesure est composé de sept thermopuces de marque Decagon (TG, précision $\pm 0,5^\circ\text{C}$) et de deux hygropuces (TH, précision $\pm 0,5\%$). Cet ensemble mesure la température (TG) et le couple température-humidité (TH) des parois internes et externes des murs ainsi que la température au milieu des pièces. La figure 4.21 présente l'architecture du bâtiment et la position des thermopuces.

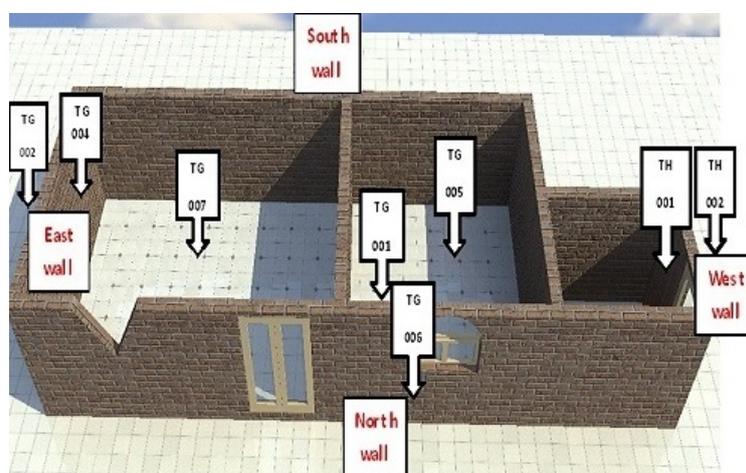


FIGURE 4.21 – Plan du bâtiment-pilote

Compte tenu du nombre limité des puces, seules les façades internes et externes des murs Nord, Est et Ouest et l'intérieur des trois pièces ont été suivis (Figure 4.21). La campagne de mesures (juillet-novembre 2012) comprend trois mois pluvieux et deux mois secs. Les puces enregistrent à un pas de 90 mm la température et l'humidité durant toute la période de la campagne.

A partir des courbes de variation des températures et d'humidités intérieures et extérieures, nous décrivons l'effet des murs en BLT. Tous les résultats des mesures sont à l'annexe C

Hygrothermal Features of Laterite Dimension Stones for Sub-Saharan Residential Building Construction

Abdou Lawane¹; Raffaele Vinai, Ph.D.²; Anne Pantet³; Jean-Hugues Thomassin⁴; and Adamah Messan, Ph.D.⁵

Abstract: The building sector is widely recognized as having a major impact on sustainable development. Both in developed and developing countries, sustainability in buildings approaches are growing. Laterite dimension stone (LDS) is a building material that was traditionally used in sub-Saharan Africa, but its technical features still need to be assessed. This article presents some results of a study focused on the characterization of LDS exploited in Burkina Faso for building purposes. The measured average thermal conductivity is 0.51 W/mK, which increases with water content and evolves with the specific gravity and with porosity. Rock mineral phases (quartz, goethite, hematite, magnetite) are cemented by kaolinite. The porosity of the material is high (30%), with macropores visible on the surface and found in the rock inner structure as well. Results from the hygrothermal monitoring of a pilot building are also presented. DOI: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001067](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001067). © 2014 American Society of Civil Engineers.

Author keywords: Construction materials; Laboratory tests; Thermal properties; Masonry; Rocks; Sustainable development.

Introduction

According to some estimates, the building sector contributes more than half of worldwide CO₂ gas emissions (Mazria 2007). Among the factors responsible for this issue, building materials production, construction activities, and building operation (mainly as far as hygrothermal comfort control is concerned) are the most critical. Their importance in terms of economic and environmental impact is nowadays widely recognized, leading to the development of ISO norms on sustainability in building construction [ISO 15392 (ISO 2008), ISO/TS 21929-1 (ISO 2006), ISO 21930 (ISO 2007), and ISO/TS 21931-1 (ISO 2010)] that give guidance on several aspects of the sustainability of building sector, ranging from general principles to the environmental product declaration of building products (Krigsvoll et al. 2010; ISO 2006, 2008, 2010). Moreover, several national technical bodies across the world have developed

frameworks for the assessment of building environmental quality [Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology (BREEAM), and Haute Qualité Environnementale (HQE) citing the most widely acknowledged] (Nguyen and Altan 2011; Vazquez et al. 2011) that combine indicators for building material features, global comfort for building users, building construction practices, and building energy management all through the building life cycle.

Increasingly, research is oriented towards the development of ecobuildings for which the combination of design, materials used, and utilization patterns should minimize their environmental impact during construction, operation, and deconstruction while ensuring a high level of comfort and safety to users. In Africa, one of the examples of ecobuildings is earth construction, which represents 30 to 50% of the housing demand of the continent.

Several studies have shown that these structures provide an acceptable level of thermal comfort without using air conditioning: Wyss and Sauret (2007) reported positive results for adobe houses with Nubian vaulted roof in the Sahel region, while an experimental study in Algeria on buildings made of compressed earth blocks (Bernouali et al. 2011) confirmed the thermal comfort of these constructions. In France, a study on earth buildings observed good thermal inertia of earth walls and stabilization of the inner temperature (Marmoret 2004).

Laterite dimension stone (LDS) was traditionally one of the most common earth building materials in tropical Africa, where laterite rock is abundant. However, a major problem in the use of this material lies in the lack of standard criteria for evaluating its technical performance. This situation not only has a negative influence on potential building owners and decision makers, but also hinders financial institutions investing in buildings for which there is no technical guarantee for a lifetime of more than half of the loan period. This sense of normative gap was understandable a few years ago, but it is no longer justified today. A number of countries in Asia and Latin America developed standards to validate the use of this material (Mazria 2007; Kasthurba and Santhanam 2005; Kasthurba et al. 2007; A. K. Kasthurba, unpublished data, 2006), but for African laterites, despite repeated attempts, this normalization

¹Ph.D. Student, LEMC, International Institute for Water and Environmental Engineering, Rue de la Science, 01 BP 594 Ouagadougou 01, Ouagadougou, Burkina Faso; and LOMC, Univ. of Le Havre, COREVA Building, 53 Rue de Prony, BP 540, 76058 Le Havre Cedex, France.

²LEMC, International Institute for Water and Environmental Engineering, Rue de la Science, 01 BP 594 Ouagadougou 01, Ouagadougou, Burkina Faso; and School of Planning, Architecture and Civil Engineering, Queen's Univ. Belfast, David Keir Building, 39 Stranmillis Rd., Belfast BT9 5AG, U.K. (corresponding author). E-mail: r.vinai@qub.ac.uk

³Professor, LEMC, International Institute for Water and Environmental Engineering, Rue de la Science, 01 BP 594 Ouagadougou 01, Ouagadougou, Burkina Faso; and LOMC, Univ. of Le Havre, COREVA Building, 53 Rue de Prony, BP 540, 76058 Le Havre Cedex, France.

⁴Professor, LEMC, International Institute for Water and Environmental Engineering, Rue de la Science, 01 BP 594 Ouagadougou 01, Ouagadougou, Burkina Faso.

⁵LEMC, International Institute for Water and Environmental Engineering, Rue de la Science, 01 BP 594 Ouagadougou 01, Ouagadougou, Burkina Faso.

Note. This manuscript was submitted on August 14, 2013; approved on February 17, 2014; published online on April 21, 2014. Discussion period open until September 21, 2014; separate discussions must be submitted for individual papers. This paper is part of the *Journal of Materials in Civil Engineering*, © ASCE, ISSN 0899-1561/05014002(8)/\$25.00.

does not exist yet. It is therefore necessary to define standards for its use in residential buildings.

This study follows the mechanical characterization of LDS from a quarry in Dano, a town in the southwest of Burkina Faso, located 60 km from the border of Ghana, where, although abundant, this material is still used in masonry or insulation only at artisanal level.

In earlier publications (Lawane et al. 2011, 2014) the physico-mechanical characterization of the material and its appropriateness to be used for masonry works in civil engineering was assessed. Results showed that LDS from Dano, Burkina Faso, has satisfactory compressive strength (1.5–5 MPa) and flexural strength (0.5–1.8 MPa) (Lawane et al. 2011), in line with the specifications issued by Indian technical norms (Kasthurba and Santhanam 2005). The Young's modulus of the material was found between 0.25 and 0.28 GPa, while the stress-strain curves showed that the rupture is reached quickly, ranking laterite from Dano, Burkina Faso, in the family of brittle rocks (Nougier 2000). Despite a high porosity (approximately 30% with a very complex pore distribution), Dano, Burkina Faso, LDS showed a good resistance to weathering processes, with a moderate degradation (mass loss) during the saturation phase (Lawane et al. 2011).

Inputting these values into a FEM model of a typical residential building, a stress-strain analysis was performed. The stress distribution computed under these loading conditions confirmed that LDSs are subjected to very low stresses (approximately 0.2 MPa), therefore fully acceptable safety factors were reached, even compared with the lowest resistance values obtained during the compression test campaign (1–2.5 MPa). Moreover, computed deformations were negligible (Lawane et al. 2014).

This study focuses on building thermal comfort in a wider approach. Building thermal features are affected not only by the thermal parameters of employed building materials, but also by other factors such as architectural features and climate conditions of the site. Field investigations showed that during the dry season, houses built with LDS provide good thermal comfort during the day; however, during the night they become uncomfortable. In order to understand the causes for this evidence, the study follows different approaches, considering thermal properties of the investigated materials, the monitoring of an existing building, and the features of Sahelian climate, which alternates a rainy season and dry season.

This article presents the results of the study on the mineralogical, chemical, and thermophysical characterization of the LDS and the results from a hygrothermal measurement campaign of these parameters carried out in a pilot LDS building in Ouagadougou, Burkina Faso, built with laterite blocks from the Dano, Burkina Faso, quarry.

Materials and Methods

Mineralogical and Chemical Characterization

Mineralogical and chemical characterizations of laterite rock were carried out through X-ray diffraction (XRD) measurement and scanning electron microscope (SEM) analysis. In order to understand the rock mass composition, several samples have been collected in different positions in the quarry. SEM observations have been carried out on uncoated rock fragments lying on conductive carbon tape using a ZEISS SUPRA 55 scanning electron microscope equipped with back-scattered electrons detector, set at 26 kV accelerating voltage, 74,000 nA emission current, and 10 Pa vacuum, with a resolution of 1 nm.

XRD tests have been carried out using 28-mm back-loaded sample holders (PANalytical). X-ray diffraction patterns were recorded on a Bruker D8 Vario1 diffractometer, using pure copper-K-Alpha 1 radiation with wavelength 0.154060 nm and equipped with a Lynx Eye detector (detector opening 3.5°). The X-ray generator was set to 40 kV and 40 mA, the recorded angular range was 5 to 90° (2θ) with a step close to 0.014°. The quantitative analyses were performed using the Rietveld method with the *PANalytical X'Pert HighScore Plus* software.

Thermophysical Characterization

Twenty-one cylindrical specimens of LDS with diameter 50 mm and height 100 mm were sampled from various Dano, Burkina Faso, quarry levels and oven dried at 105°C in order to determine bulk density and water content in accordance with technical norms EN 1097-6 [Association française de normalisation (AFNOR) 2006] and NF P 94-050 (AFNOR 1995). Moreover, grain specific density has been determined through pycnometer according to the technical norm EN 1097-7 (AFNOR 2008). Eventually, the porosity was calculated using the relationship between the physical parameters already described. Thermal conductivity (λ), the volumetric heat capacity (C_v), the diffusivity (D), and thermal resistivity (R_h) were measured using a double-needle probe developed by Decagon (pro-KD2, see Fig. 1) (Decagon 2009). This device implements the model proposed by Carslaw and Jaeger (1986) for solving the heat transfer equation through the method of linear propagation from heat source transient in a semi-infinite medium, published in Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) standards (IEEE Standards Committee 1981) and ASTM (2010). The main advantages of this method are the ease of use of apparatus, quick measurement, and the ability to carry out the test in situ respecting the actual hygrothermal conditions of the testing environment. The first measurements were made on samples oven dried at 105°C for 48 h. Subsequently, the samples were saturated and air dried. During this drying phase, measurements were carried out to monitor the thermal parameters versus the water content.

Pilot Building Hygrothermal Experimental Study

As discussed in the introduction, thermal comfort is related not only to thermal parameters of building material but also to architectural schemes, construction techniques, and site climate. In order



Fig. 1. Experimental probe pro-KD2

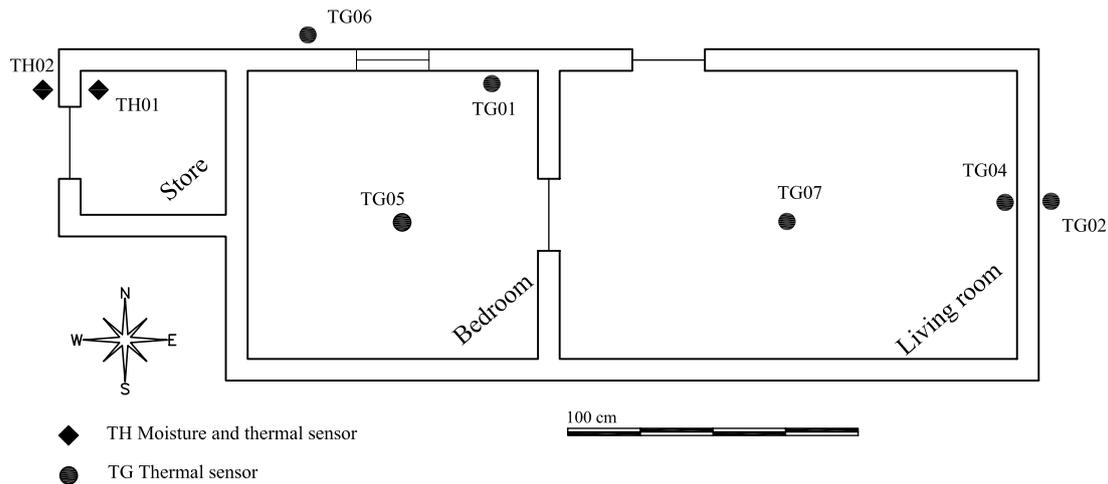


Fig. 2. Plan of the monitored pilot building with sensors positioning

to take into account the whole set of parameters that have an influence on the thermal comfort, an existing building constructed with LDS and subjected to the Sahelian climate has been monitored to establish temperature and humidity patterns during dry and rainy seasons. Findings from this exercise along with results from the thermophysical characterization allowed understanding of any potential issue and proposing reasonable technical solutions.

The monitored building has a volume of approximately 120 m³ with a surface area of about 40 m², with a well-ventilated living room, a bedroom, and a poorly ventilated external store. During the measurement period, the living room and bedroom were utilized, while the store was closed. Walls are load bearing with a thickness of 30 cm. The roof is made with corrugated iron sheets with a false ceiling positioned 1.5 m below the iron sheet level. The measuring system is composed of six thermal sensors (TG, accuracy $\pm 0.5^\circ\text{C}$) and two thermal and moisture sensor (TH, accuracy $\pm 0.5\%$ for humidity, $\pm 0.5^\circ\text{C}$ for temperature) in order to monitor both the temperature and the combination of temperature and humidity. The external sides of the northern, eastern, and western walls along with the inner rooms were monitored. Fig. 2 and Table 1 show, respectively, the building plan and the correspondence between sensor identification and localization. Wall sensors measured values on the surface of the walls, whereas sensors positioned in the middle of the room measured values in air. The measurement campaign (July to November 2012) involved three rainy months and two dry months. The sampling interval for temperature and humidity throughout the campaign period was 90 min.

Hygrothermal data were gathered through a commercial software (*Warito II*) developed by Waranet Solutions (2007). Time-temperature and humidity-time curves have been analyzed using

Table 1. Monitoring Sensor Identification and Localization

Sensor identification	Localization
TG01	North wall, inside
TG02	East wall, outside
TG04	East wall, inside
TG05	Bedroom, middle
TG06	North wall, outside
TG07	Living room, middle
TH01 (measures both temperature and moisture)	West wall, inside
TH02 (measures both temperature and moisture)	West wall, outside

a spreadsheet for interpretation purposes. Analyses focused on measurements obtained for a typical rainy day and a typical dry day over a 24-h period for observing the evolution of the system in extremely different weather conditions.

Results and Discussion

Mineralogy and Chemistry

XRD results (Table 2) show that the main observed minerals in the analyzed rock are kaolinite, quartz, and goethite. Kaolinite represents more than 50% of detected minerals, which explains the compactness (due to cementation processes) observed with SEM analysis. Hematite content is relatively low (4.8–7.3%), while magnetite and anatase are in traces. Morphologies observed with SEM analysis show that the microstructure of laterites is characterized by intergranular and intragranular spaces with irregularities in size and shape and communicating connections more or less wide. There is a fairly compact arrangement of the solid grains, resulting in voids that are not occupied by mineral elements, inducing a high porosity in the material. The presence of these voids [macropores, Fig. 3(a)] and of inadequate cementing places [cracks, micropores, Fig. 3(b)] between the grains are the main factors that could explain the variation in mechanical properties within samples coming from the same quarry.

Mineral shapes and arrangements are highly variable between different samples. SEM images point to pseudo-hexagonal arrangements with binders of visible plastic material that could be kaolinite. Poorly cemented quartzes are visible in places [Fig. 3(a)]. Some minerals constituting the material are identified by their shape and darker or lighter gray spots: quartz [Fig. 3(a)] and kaolinite [Fig. 3(b)] are easily identifiable.

Table 2. Mineralogical Composition of Laterite

Mineral phases	Composition (%) weight
Kaolinite [Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄]	51.4
Quartz (SiO ₂)	19.9
Goethite [FeO(OH)]	20.9
Hematite (Fe ₂ O ₃)	6.3
Magnetite (Fe ₃ O ₄)	0.1
Anatase (TiO ₂)	1.5

Note: Values given in percent by weight.

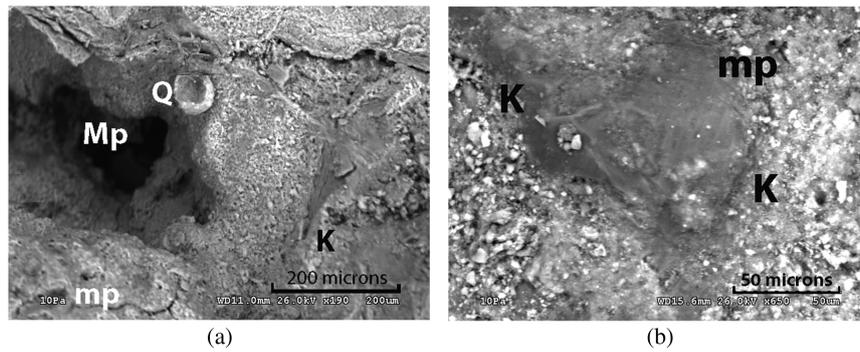


Fig. 3. SEM images of LDS; *K* = kaolinite, *Mp* = macropore, *mp* = micropore, *Q* = quartz: (a) x190 magnification; (b) x650 magnification

Thermophysical Properties

The thermophysical parameters measured on dry samples are shown in Table 3. In order to cope with the possible heterogeneity of the material associated with the geological variability, several samples have been collected from different points of the quarry, following vertical alignments denominated *profiles*. Data in Table 3 are reported according to the described sampling over four profiles (A to D).

For comparison purposes, thermal conductivities for common building materials have been gathered in technical literature and some values have been summarized in Table 4. Furthermore, a comparison index (I_λ) has been derived as the ratio between the thermal conductivity λ_i for each building material and the average thermal conductivity measured for Dano, Burkina Faso, LDS ($\lambda = 0.51$ W/mK as per Table 3). Comparison index > 1 indicates worst insulation properties for the material compared with the LDS.

According to the data reported in Table 4, it can be observed that commonly used dimension stones (like limestone, granites, and other massive volcanic rocks) show thermal conductivities that are 2.8 to 6.8 times greater than the thermal conductivity measured

for LDS. This can be explained by the different rock structure: as previously reported, LDS shows a very high porosity, which is responsible for an inefficient heat transmission, and, consequently, for a lower thermal conductivity. The same can be observed for other massive materials (like fired earth bricks, compressed earth bricks, concrete), while when the material structure is less dense (as in the case of lightweight concrete and of high-porosity compressed brick) the comparison index approaches 1 (i.e., the thermal conductivities are comparable).

According to Farouki (1981), an empirical linear trend exists between the thermal conductivity of a soil or its logarithm and the dry density or porosity of that soil. Increased dry density implies reduced porosity and leads to an increase in the thermal conductivity. On the basis of numerous tests, Kersten (1949) found that at constant moisture content the logarithm of the thermal conductivity increased linearly with the dry density. On empirical basis, Eq. (1) has therefore been derived, where λ is the thermal conductivity, A , B , A' , and B' are model parameters, ρ_d is the dry density, and n is the porosity

$$\lambda = A \cdot 10^{B\rho_d} \quad \text{or} \quad \lambda = A' \cdot 10^{B'n} \quad (1)$$

Table 3. Measurement Results for Thermophysical Parameters Assessment

Quarry profile and sample number	Dry density ρ_d (g/cm ³)	Porosity n (%)	Thermal conductivity λ (W/mK)	Volumetric heat capacity C_v (MJ/m ³ K)	Diffusivity D (mm ² /s)
Profile A A1	1.92	30.12	0.625	1.916	0.326
A2	1.90	30.76	0.577	1.395	0.414
A3	1.83	33.28	0.471	1.632	0.289
A4	1.93	29.98	0.552	1.922	0.287
A5	1.88	31.57	0.482	1.621	0.275
A6	1.83	33.38	0.432	1.625	0.266
Profile B B1	1.70	38.08	0.415	1.246	0.333
B2	1.69	38.39	0.435	1.252	0.339
B3	1.87	31.88	0.576	1.704	0.338
B4	1.87	31.88	0.638	1.092	0.585
B5	1.81	34.23	0.420	1.367	0.307
Profile C C1	1.72	37.51	0.483	1.158	0.422
C2	1.79	35.03	0.414	1.274	0.325
C3	1.80	34.51	0.510	1.248	0.409
C4	1.67	39.44	0.413	1.530	0.270
C5	1.83	33.47	0.601	1.667	0.360
Profile D D1	1.82	33.98	0.538	1.737	0.310
D2	1.78	35.28	0.441	1.175	0.375
D3	1.85	32.82	0.609	1.260	0.555
D4	1.88	31.81	0.507	1.253	0.405
D5	1.84	33.26	0.579	1.303	0.445
Average (standard deviation)	1.82 (0.07)	33.84 (2.69)	0.51 (0.08)	1.447 (0.25)	0.364 (0.09)

Table 4. Thermal Conductivity Values for Common Building Materials

Material	Thermal conductivity λ (W/mK)	Comparison index (I_λ)	Reference
Limestone (Turkey)	1.42	2.78	Turgut et al. (2008)
Dimension volcanic stones	3.50	6.86	Couasnet (2007)
Dimension limestone	1.70	3.33	Couasnet (2007)
Various rocks	0.60–2.90	1.18–5.69	Yaşar et al. (2008)
Cement stabilized compressed bricks	0.50–1.15	0.98–2.25	Meukam et al. (2004)
Fired earth brick	1.00–1.35	1.96–2.65	Recknagel et al. (1995)
Compressed earth brick	1.05	2.06	Recknagel et al. (1995)
Concrete	1.40–1.75	2.75–3.43	Couasnet (2007)
Light concrete	0.15–0.85	0.29–1.67	Couasnet (2007)

This model has been tested by other authors (Farouki 1981; Kluitenberg et al. 1993) for different soil types and gave satisfactory results. The measured thermal conductivities have therefore been related to the dry density ρ_d [Fig. 4(a)] as well as to the porosity [Fig. 4(b)] following exponential laws in compliance with the Kersten model.

For African compressed lateritic soil earth blocks (grain density equal to 3.1 g/cm³ and porosity between 15 and 45%), Laurent (1987) proposed the values of A , B , A' , and B' summarized in Table 5, which gave a good regression coefficient ($R = 0.978$). The values obtained for Dano, Burkina Faso, LDS are near to the model proposed for low-density values [Fig. 4(a)]. However, a considerable dispersion of results for thermal conductivity is noticeable for dry densities between 1.8 and 1.9 g/cm³. The same dispersion is observed for the tentative correlation between thermal conductivity and porosity [Fig. 4(b)]: when porosity is higher than 38%, data seem more consistent. This can be explained considering that for higher porosities (that correspond to lower dry density) the main responsibility for the heat conduction is the void space due to its insulating properties. On the other hand, when the pores are less (low porosity) and therefore the structure is more compact (high dry density), the thermal properties are driven by the mineralogical structure and by the conductivity parameters of the single mineralogical phase, whose sequence and respective position in the rock structure is quite random. It can therefore be confirmed that less-packed rock structures give lower thermal conductivity values, as proposed by Laurent (1987).

Table 5. Coefficients of Kersten Model for Compressed Earth Block (CEB) and Dano, Burkina Faso, Laterite Dimension Stone (LDS Dano)

Material	A	B	A'	B'	R
CEB	0.047	0.547	2.321	-1.697	0.978
LDS Dano	0.038	0.619	1.903	-0.017	0.700

Table 6. Thermal Conductivity λ and Water Content ω Measured on B Profile

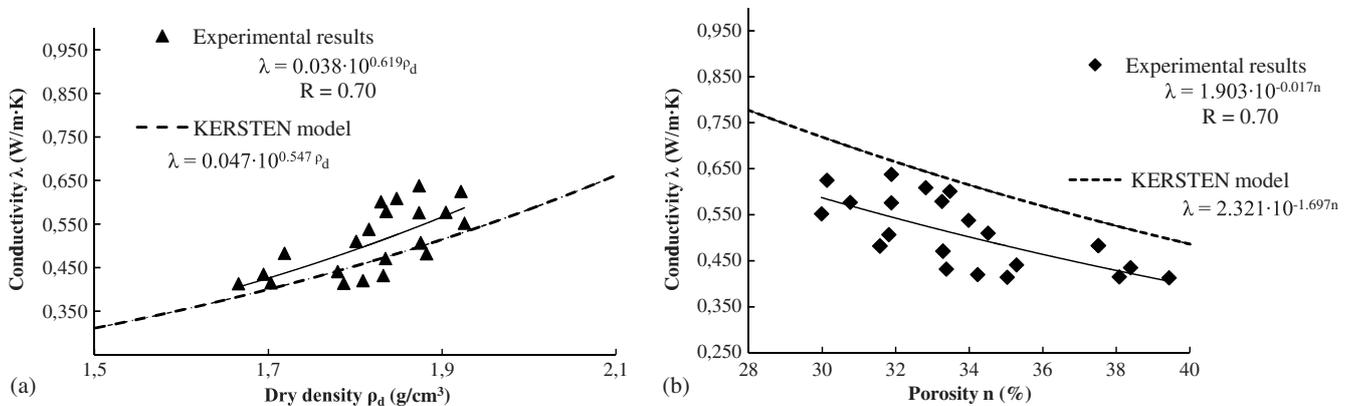
B1		B3		B4		B5	
ω (%)	λ (W/mK)						
12.6	1.664	16.8	1.542	13.7	1.309	12.0	1.71
10.5	1.371	14.3	1.437	11.1	1.206	10.0	1.568
5.3	0.837	8.7	1.013	6.0	0.848	5.7	1.114
2.1	0.751	3.1	0.764	2.5	0.758	2.1	0.885
0.8	0.63	1.4	0.476	1.4	0.709	1.3	0.772
0	0.561	0	0.425	0	0.576	0	0.638

The increase in water content for samples during saturation tests leads to an increase of the thermal conductivity. Data obtained for the samples gathered over one of the sampling profiles (profile B) are reported in Table 6. The linear correlation (Fig. 5) obtained is not comparable to the empirical function proposed by Campbell et al. (1994), which put in relationship the conductivity to the water content and to other coefficients depending on the mineralogical composition of the soil. At saturation point, all thermal conductivities observed are below 1.8 W/mK. However, this moisture level is unrealistic for blocks utilized in masonry applications because, even in case of extraordinary rainfall, walls are protected against severe water infiltrations.

Hygrothermal Parameters Evolution According to the Climate Conditions

Hygrothermal analysis focused on measures obtained during a rainy day (August 16, 2012) and a dry day (November 23, 2012) as case studies for two very different weather conditions. The extreme values and the average of the hygrothermal parameters recorded on these days in the store (which was not utilized) are reported in Table 7. The analysis of these data shows that:

- The differences between extremes temperatures (maximum versus minimum) are reduced for inside conditions (approximately 5°C for dry season and 4°C during rainy season), while they are

**Fig. 4.** (a) Thermal conductivity versus dry density; (b) thermal conductivity versus porosity

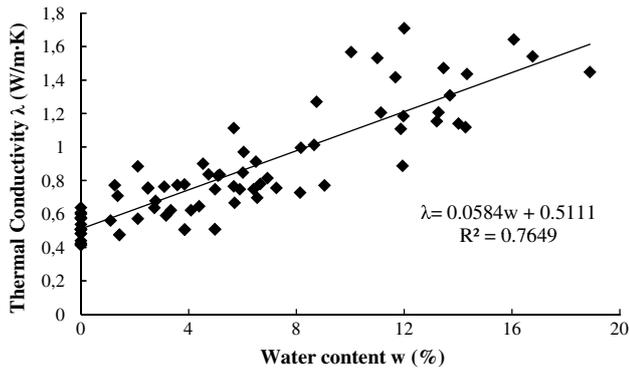


Fig. 5. Thermal conductivity versus water content

more pronounced outside the building (8.3°C for dry season and 5°C during rainy season). This means that the temperature tends to remain more constant inside the store, i.e., the walls act in the direction of smoothing temperature excursions. However, general weather thermal variations (outside) lie in a quite narrow range, and this influences the even more narrow range for the inside conditions;

- The differences between extreme humidity (maximum versus minimum) follow the same trend, with more pronounced ranges (internal approximately 15% for dry season and 5% during rainy season; external approximately 23% for dry season and 12% during rainy season). Again, this means that building walls soften external variations.
- Considering the differences between internal and external temperatures, it is worth observing that during the rainy season the reference temperatures (maximum and minimum) inside the store are higher than outside, although without huge differences. During the dry season, the maximal temperature is slightly lower inside the store, but average and minimal temperatures are higher inside than outside.
- As far as humidity variation for internal and external conditions is concerned, it can be noticed that inner humidity is lower than the outer conditions, in particular during the rainy season, where differences of 11–18% are observed. During the dry season, this difference is less pronounced and the humidity inside the store is averagely the same measured on the external walls, although with a reduced variation as discussed above.

Moreover, it is to be observed that thermal comfort is far from being reached because inside the house the temperature is almost always higher than the outside conditions and values are in the range of 30–35°C. However, this is mainly due to the modality of the roof construction: the sun radiation is concentrated on the iron sheets throughout the day and, without good ventilation in the false ceiling space, heats the underlying rooms. On the contrary, humidity in the store is lower than outside, and this reduces the perceived temperature (and therefore increases the hygrothermal comfort because it is a combination between temperature and

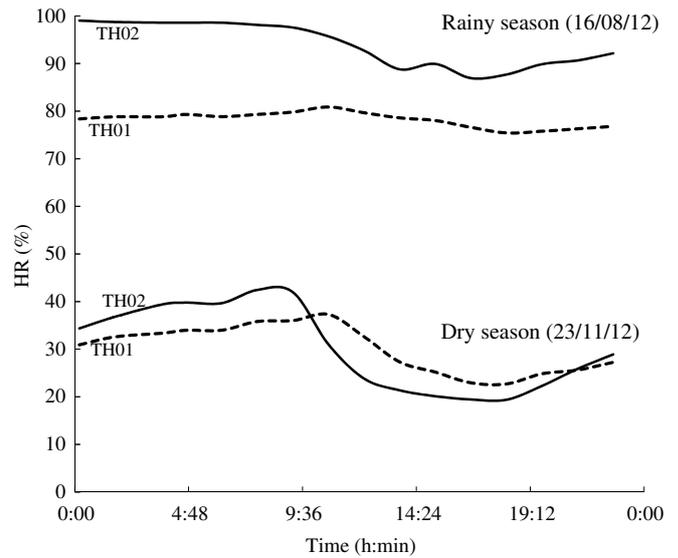


Fig. 6. Humidity trends for external (solid lines) and internal (dashed lines) measurements in the store during dry and rainy seasons

humidity). These observations are confirmed by the analysis of the full data set: moisture trends recorded during the test days (Fig. 6) show that during the rainy season, the store keeps a nearly constant relative humidity (80%) inside, 20% lower than the outside. In the dry season, between 10 a.m. and 8 p.m., moisture in the store is approximately 10% higher with respect to the outside humidity.

Fig. 7 shows the temperature trends measured both on dry [Fig. 7(a)] and on rainy [Fig. 7(b)] seasons. Solid lines refer to external walls (sensors TG02, TG06, and TH02), whereas dashed lines refer to the inner walls (sensors TG01, TG04, and TH01). Eventually, dotted lines refer to the middle of the bedroom and the living room (sensors TG05 and TG07). Sensor identifications and localizations were reported in Table 1.

During the dry season [Fig. 7(a)], it has been observed that the inner temperature is higher than the outside temperature between approximately 8 p.m. and 10 a.m. This means that while shielding the building from the sun irradiation during the day, the walls heat up, storing heat that is then released during the night time. This explains the discomfort of LDS house dwellers during the night. At room center the cyclic trend is less pronounced and the temperature is quite constant all over the 24 h (dotted lines for sensors TG05 and TG07).

It can be observed that for walls 30-cm thick, it takes approximately 9 h for the indoor temperatures to become higher than the outside temperature. Increasing the thickness of the walls would therefore result in an extension of the time necessary for the return of heat to the interior. This increase in thickness will also result in a reduction in the internal temperature for these quantities are related to the heat flux according to Eq. (2)

Table 7. Daily Average and Extreme Values of the Hygrothermal Parameters for Rainy and Dry Days

Parameters	Temperature external (°C)		Temperature internal (°C)		Relative humidity external (%)		Relative humidity internal (%)	
	Rainy (August 16, 2012)	Dry (November 23, 2012)	Rainy (August 16, 2012)	Dry (November 23, 2012)	Rainy (August 16, 2012)	Dry (November 23, 2012)	Rainy (August 16, 2012)	Dry (November 23, 2012)
Day								
Maximum	28.50	35.01	29.10	34.48	99.02	42.45	80.89	37.28
Minimum	23.50	26.70	25.17	29.5	86.95	19.39	75.44	22.70
Average	25.56	30.79	26.97	32.00	93.98	30.42	78.22	30.14

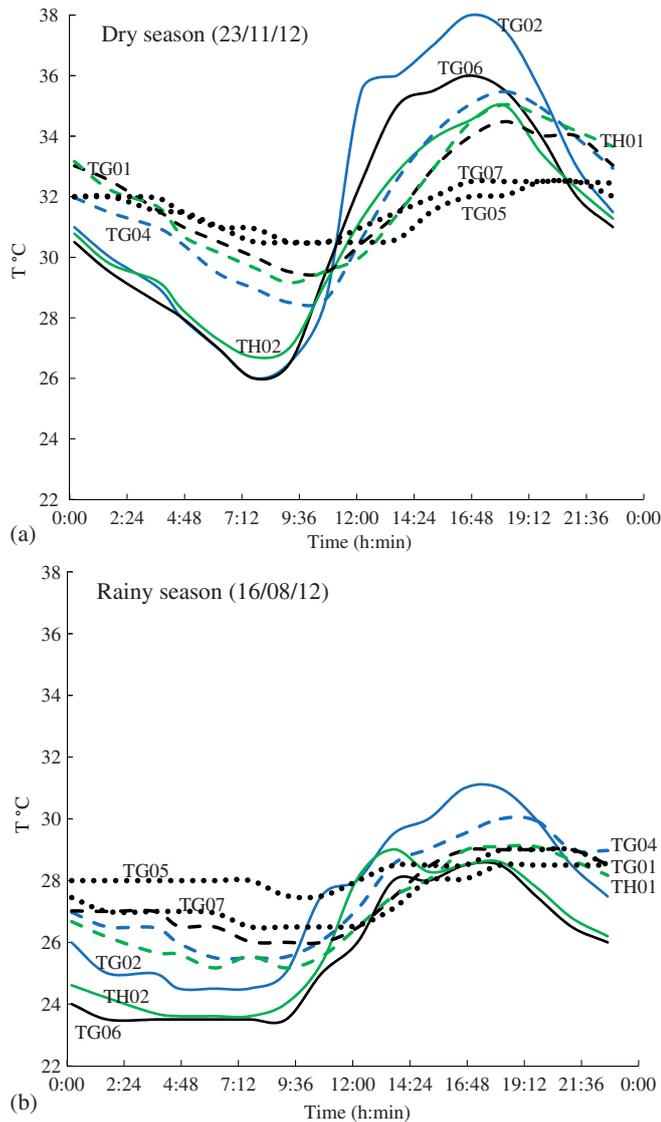


Fig. 7. Temperature trends of the pilot building: (a) dry season; (b) rainy season

$$\varphi = (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}) \cdot \lambda / e \quad (2)$$

where φ = heat flux; λ = thermal conductivity; e = wall thickness; T_{ext} = external temperature; and T_{int} = internal temperature.

For rainy season records [Fig. 7(b)], the same observations apply but with less pronounced trends. However, during the rainy season the wall exposure has a bigger impact on the temperature trends in the house: for the eastern wall, the external temperature exceeds the inner temperature at approximately 9:30 a.m. (TG02 and TG04) and the inner wall is cooler until approximately 7:30 p.m., whereas the inner northern wall is cooler than its external side only from approximately 12 a.m. to 1:30 p.m. (TG06 and TG01). Western walls show an intermediate behavior.

Conclusions and Perspectives

In Africa, despite its appropriateness for application in civil engineering, the use of LDS encounters unwillingness when proposed

in the building sector because of the uncertainty associated with its technical behavior. However, in Burkina Faso a certain number of ancient monuments such as the fortress of Loropeni (classified as Mankind Cultural Heritage by UNESCO), public buildings such as churches, schools, and clinics dating since the colonial period as well as sanitation and wastewater works are still operative despite hundreds of years of harsh environmental and weather conditions. In particular, LDS offers very promising features for the mitigation of the effects of a hot climate, mainly because of its thermal properties. Keeping in mind that thermal comfort is related to thermal parameters of building material as well as to architectural schemes, construction techniques, and site climate, this study focused on building thermal comfort in a wide approach, both assessing the thermal properties of LDS and analyzing the hygrothermal monitoring of an existing building over Sahelian rainy and dry seasons. Results from this study show that the laterite extracted in the Dano, Burkina Faso, quarry is a rock whose mineral phases (quartz, goethite, hematite, and magnetite) are cemented by kaolinite, which confers a satisfying mechanical resistance to the blocks. The high porosity of the material (30%), determined by macropores visible on the surface and observed also in the rock inner structure, confers to LDS a low thermal conductivity (0.51 W/mK) that, when compared with thermal conductivity of standard materials used in masonry, has been found to compare favorably, being approximately 2 to 7 times lower than massive materials and similar to lightweight materials. The conductivity increases with water content and evolves with the specific gravity and the porosity, although with a considerable data dispersion. Results from hygrothermal monitoring of an existing LDS building showed that while shielding the inner rooms from the sun irradiation during the day, the walls heat up, storing heat that is then released during the night time. This results in discomfort inside the building that is more evident during the dry season, when inner temperatures reach 32 to 34° C during sleeping hours. This effect could be mitigated by increasing the wall thickness or by building ventilated double walls on the façades more exposed to the sun radiation, or, alternatively, by shading exposed walls by roof overhangs. However, the thermal comfort is severely affected by the construction features, mainly as far as the roof ventilation and insulation is concerned. This study approach should be applied also to materials exploited in other quarries in order to appreciate the relationship between conductivity and other parameters based on mineralogical compositions, as well as with other physical and mechanical parameters. In order to confirm the results obtained for LDS porosity values, future research developments should consider the utilization of other experimental techniques, namely, the mercury intrusion porosimetry. A further study that will evaluate the thermal comfort parameters in buildings constructed with LDS from Dano, Burkina Faso, is currently being undertaken.

Acknowledgments

This research is carried out in the framework of the Ph.D. activities of Abdou Lawane at International Institute for Water and Environmental Engineering (2iE) and the University of Le Havre, Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC), with a financial sponsorship of West African Economic and Monetary Union (UEMOA) under PAES program. SEM and XRD analysis were performed at the laboratory CRISMAT (ENSI Caen), and the authors are grateful to Mr. Nicolas Barrier for his constant support. Furthermore, the authors wish to express their gratitude to the anonymous reviewers for their useful comments on the manuscript.

References

- Association française de normalisation (AFNOR). (1995). "Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux." *AFNOR, NF 94-050*, AFNOR Editions, Paris.
- Association française de normalisation (AFNOR). (2006). "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6: détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau." *AFNOR NF EN 1097-6/A1*, AFNOR Editions, Paris.
- Association française de normalisation (AFNOR). (2008). "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 7: détermination de la masse volumique absolue du filler - Méthode au pycnomètre." *AFNOR, EN 1097-7*, AFNOR Editions, Paris.
- ASTM. (2010). "Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass." *D2216-10*, West Conshohocken, PA.
- Bernouali, H., Brara, A., Mahdad, M., and Mokhtari, F. (2011). "Caractérisation thermophysique et suivi thermique de deux bâtisses réalisées en blocs de terre comprimée." *Annales du bâtiment et des travaux publics*, 86(16), 8–14.
- Campbell, G. S., Jungbauer, J. D. J., Bidlake, W. R., and Hungerford, R. D. (1994). "Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity." *J. Soil Sci.*, 158(5), 307–313.
- Carlsaw, H., and Jaeger, J. (1986). *Conduction of heat in solids*, Oxford Science Publications, Clarendon Press, Oxfordshire, U.K.
- Couasnet, Y. (2007). "Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction." *Le Moniteur*, Paris, France.
- Decagon. (2009). "KD2 pro compliance to ASTM and IEEE standards, application note." *Decagon devices* (<http://www.decagon.com/assets/Uploads/KD2-Pro-Compliance-to-ASTM-and-IEEE-Standards.pdf>) (Apr. 3, 2014).
- Farouki, O. (1981). "Thermal properties of soils." *Cold Region Research and Engineering Laboratory (CRREL)*, U.S. Army Corps of Engineers, Monograph 81–1, Washington, DC.
- IEEE Standards Committee. (1981). *IEEE guide for soil thermal resistivity measurements*, IEEE, Piscataway, NJ.
- ISO. (2006). "Building construction—Sustainability in building construction—Sustainability indicators—Part 1—Framework for development of indicators for buildings." *ISO/TS 21929-1:2006*, International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO. (2007). "Building construction—Sustainability in building construction—Environmental declaration of building products." *ISO 21930:2007*, International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO. (2008). "Building construction—Sustainability in building construction—General principles." *ISO 15392:2008*, International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO. (2010). "Building construction—Sustainability in building construction—Framework for methods of assessment for environmental performance of construction works—Part 1—Buildings." *ISO/TS 21931-1:2010*, International Organization for Standardization, Geneva.
- Kasthurba, A. K., and Santhanam, M. (2005). "A re-look into the code specifications for the strength evaluation of laterite stone blocks for masonry purposes." *J. Inst. Eng.*, 86(1–4), 1–6.
- Kasthurba, A. K., Santhanam, M., and Mathews, M. S. (2007). "Investigation of laterite stones for building purpose from Malabar region, Kerala state, SW India – Part 1: Field studies and profile characterisation." *Constr. Build. Mater.*, 21(1), 73–82.
- Kersten, S. (1949). "Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils, final report, June 1949." U.S. Dept. of Commerce, Office of Technical Services, Univ. of Minnesota. Engineering Experiment Station, Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information (U.S.).
- Kluitenberg, G. J., Ham, J. M., and Bristow, K. L. (1993). "Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57(6), 1444–1451.
- Krigsvoll, G., Fumo, M., and Morbiducci, R. (2010). "National and international standardization (International Organization for Standardization and European Committee for Standardization) relevant for sustainability in construction." *Sustainability*, 2(12), 3777–3791.
- Laurent, J. (1987). "Propriétés thermiques du matériau terre." *Cahiers du centre scientifique et technique du bâtiment*, 279(2156), 1–17.
- Lawane, A., Messan, A., Pantet, A., Vinai, R., and Thomassin, J. H. (2014). "Local materials for building houses: Laterite valorization in Africa." *Adv. Mater. Res.*, 875–877, 324–327.
- Lawane, A., Pantet, A., Vinai, R., and Thomassin, J. H. (2011). "Etude géologique et géomécanique des latérites de Dano (Burkina Faso) pour une utilisation dans l'habitat." *Les Annales BTP*, 86(16), 15–23.
- Marmoret, L. (2004). "Exemple de suivi thermique d'une maison expérimentale en bauge mécanisée." *Laboratoire des technologies innovantes*, Université Jules Verne de Picardie, Amiens, France.
- Mazria, E. (2007). "The 2010 Imperative: A Global Emergency Teach-in." (http://architecture2030.org/action/2010_imperative_global_emergency_teach_in) (Apr. 3, 2014).
- Meukam, P., Jannot, Y., Noumowe, A., and Kofane, T. C. (2004). "Thermo physical characteristics of economical building materials." *Constr. Build. Mater.*, 18(6), 437–443.
- Nguyen, B. K., and Altan, H. (2011). "Comparative review of five sustainable rating systems." *2011 Int. Conf. on Green Buildings and Sustainable Cities, Procedia Engineering*, Vol. 21, Elsevier, Kidlington, Oxford, U.K., 376–386.
- Nougier, P. (2000). "Déformation des roches et transformation de leurs minéraux, initiation à la tectonique." *Sciences de la vie et de la terre*, Ellipses, Paris, France.
- PANalytical X'Pert HighScore Plus [Computer software]. PANalytical BV, (<http://www.panalytical.com/Xray-diffraction-software/HighScore-Plus.htm>) (Mar. 31, 2014).
- Recknagel, H., Sprenger, E., Hönnmann, W., and Schramek, E.-R. (1995). *Manuel pratique de génie climatique, tome 1*, PYC Éditions, Paris, France.
- Turgut, P., Yesilnacar, M. I., and Bulut, H. (2008). "Physico-thermal and mechanical properties of Sanliurfa limestone, Turkey." *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 67(4), 485–490.
- Vazquez, E., Miguez, M., Alves, L., Valente, J., and Rossi, G. (2011). "Certifications in construction: A case study comparing LEED and HQE." *WIT Trans. Ecol. Environ.*, 144, 253–264.
- Waranet Solutions. (2007). "Enregistreurs autonomes." (http://www.waranet-solutions.com/page_logiciel_warito.htm) (Apr. 3, 2014).
- Wyss, U., and Sauret, H. (2007). "Indicateurs de confort dans la technique de la voûte nubienne." *EPFL – rapport intermédiaire*, Association La Voûte Nubienne (AVN), Ganges, France.
- Yaşar, E., Erdoğan, Y., and Güneçli, H. (2008). "Determination of the thermal conductivity from physico-mechanical properties." *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 67(2), 219–225.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre dédié à la maçonnerie, il était question de répertorier les types de maçonneries en BLT dans la zone d'étude de Dano, de simuler le comportement mécanique de la maçonnerie en BLT en fonction de leurs caractéristiques mécaniques et physiques, et de suivre le confort hygro-thermique des maçonneries en BLT.

L'enquête sur le terrain a permis de décrire quatre types d'habitat en maçonnerie :

- l'habitat de type 1 entièrement en BLT et ne possédant ni poutre ni poteau. Il est construit à un seul niveau (RDC) ;
- l'habitat de type 2 avec poutre de chaînage en béton armé après les ouvertures et parfois en soubassement et des poteaux en béton armé uniquement aux arrêtes et un remplissage en BLT. Il est également d'un seul niveau avec un acrotère éventuellement ;
- Le bâtiment de Type 3 construite avec des BLT de bonne qualité pour des habitations plus spacieuses (plus de 10 m de coté) demandant des poteaux intermédiaires, des chaînages. La fondation est entièrement en béton armé. Il est construit en RDC simple ou en R+1, au maximum R+2 quand les charges sont entièrement portées par l'ossature en béton ;
- Le bâtiment de Type 4, en double mur avec des BLT de qualité comme élément de maçonnerie du mur extérieur, jouant ainsi le rôle d'isolant thermique ou de décoration.

Des constructions de la période coloniale ont également été répertoriées. Les BLT utilisés sont de très bonne qualité comparés à ceux utilisés actuellement. L'obligation des ouvriers à exploiter ces matériaux sous la tutelle coloniale (travaux forcés) et la disponibilité de la cuirasse dure facilement accessible pourraient également expliquer ce choix. Les réserves de la carrière de la cathédrale qui a servi à la taille de ces Blocs pendant cette période sont aujourd'hui épuisées.

De cette analyse des ouvrages anciens, on peut dire que la construction en latérite sous réserve d'utiliser de BLT de qualité est pérenne. D'autres bâtiments au Burkina Faso, souvent des édifices religieux, et le mur de la forteresse de Loropeni confirme la qualité de cette maçonnerie assisée ou en *opus incertum*.

La simulation à l'aide du logiciel Robot de la maçonnerie, en considérant les coefficients partiels sur les caractéristiques mécaniques et les facteurs de pondération sur les charges à l'ELU, comme indiqué dans l'Eurocode 6 (PR XP ENV 1996-3, 2001), et certaines hypothèses de calcul sur le déplacement maximum (10 mm) et la contrainte maximale admissible considérée (1.3 MPa et 0.67 MPa), ont permis de montrer que sous l'effet du poids propre, de la charge du vent et des charges d'exploitation, il est possible de construire un bâtiment RDC+1, en privilégiant les joints minces avec l'ouvrage ici considéré. Ces hypothèses devront être reconsidérées si les ouvrages sont construits avec des BLT sélectionnés et optimisés. Des dispositifs constructifs intégrant piliers renforcées, voûtes de décharge, et de BLT de qualité supérieure pourraient

améliorer certainement notre simulation.

Le suivi de la température et de l'humidité d'un bâtiment en BLT équipé de thermopuces a montré que le confort à l'intérieur du bâtiment est meilleur dans la journée ; avec un gain de 1 à 4°C selon les saisons. La nuit, les murs du bâtiment en BLT ont tendance à restituer la chaleur qu'ils avaient emmagasinée dans la journée. Cet effet pourrait être atténué en construisant des murs plus épais ou doublés avec une lame d'air entre les deux parois.

Conclusions générales

Dans le cadre de cette recherche, nous avons entrepris **d'étudier les conditions d'utilisation de la latérite indurée afin de valoriser ce matériau naturel et local dans la construction de l'habitat en Afrique tropicale**, et particulièrement au Burkina Faso. La latérite indurée est utilisée sous la forme BLT ou BLS suivant les exploitations, soit artisanales avec des tailleurs de pierre, soit industrialisées avec des scies mécanisées. Le choix de ce travail de recherche résulte non seulement de la disponibilité en quantité suffisante de la latérite indurée, mais aussi de l'existence d'un patrimoine bâti ancien dans cette partie de l'Afrique. **De plus, reconsidérer l'usage de ce matériau, de sa production à sa mise en œuvre, s'intègre dans une démarche complète de développement durable** qui répond aux besoins de logement de la population, avec l'utilisation de matériaux naturels à faible empreinte écologique car produits localement.

Notre travail a essayé de **prendre en compte les caractéristiques essentielles pour argumenter l'emploi de ce matériau dans la construction**. Tout d'abord, une étude de terrain a permis de décrire quatre carrières et les conditions de gisement, dans les régions de Ouagadougou et de Dano. Les matériaux de ces carrières ont été caractérisés afin d'apprécier leur utilisation comme élément de maçonnerie (détermination des propriétés physiques, mécaniques, hydriques et thermiques). Puis, à l'échelle d'un bâtiment, ce sont les paramètres technologiques qui ont été envisagés : résistance des murs de la structure, stabilité mécanique d'ensemble, durabilité des BLT associée à la pérennité des constructions et leur confort thermique.

Pour définir le matériau latérite indurée en tant que matériau de construction, peu d'études scientifiques ont été réalisées jusqu'à ce jour. L'analyse bibliographique a indiqué que : de nombreux travaux portent sur le contexte géologique (roche-mère, formation, composition, développement spatial, ressources minérales contenues) ou sur l'utilisation, essentiellement celle de la latérite meuble pour des applications agronomiques ou constructives (routes par exemple). Il y a toujours des tentatives de définition de la latérite selon des critères variés (géologiques, chimiques, minéralogiques, structuraux ou texturaux), mais les divergences entre auteurs persistent et les définitions proposées restent ambiguës. En fait, il faudrait parler de famille de latérites, par analogie avec la famille des argiles.

Sur le plan de l'utilisation, les sols latéritiques ou latérites meubles ont bénéficié d'une attention particulière de la part des acteurs du génie civil du fait de leurs performances lorsqu'elles sont adjuvantées de liants hydrauliques (emploi en géotechnique pour construire des pistes, des routes, des remblais, des digues, ou en bâtiment pour la confection de BTC).

Par contre, **la latérite indurée, malgré sa prédisposition à être utilisée directement comme matériau de construction, n'a été reconsidérée que tardivement.** Cet usage, décrit précocement dans les travaux de Buchanan (qui a donné le nom de latérite au matériau) a retrouvé un regain d'intérêt grâce à des chercheurs indiens qui se sont le plus investis dans cette voie (Kasthurba, 2006). Ainsi, la latérite indurée utilisée pour la production de BLT n'a pas été aussi étudiée que la latérite meuble, et **les données sur ses caractéristiques physiques, mécaniques, hydriques et thermiques manquent cruellement en Afrique.**

Chaque latérite est donc un cas d'espèce, et c'est la raison pour laquelle nous avons étudié ce matériau à partir d'échantillons provenant de quatre carrières de BLT du Burkina Faso : carrières de Balkoin, Koubri et Tigaldégué dans la province du Kadiogo, et carrière de Dano dans la province d'Iloa.

Sur le plan géologique, deux contextes nettement différents ont été abordés :

- le triangle "Ouagadougou (incluant la localité de Balkoin) - Koubri - Tigaldégué" : il correspond à un vaste plateau de latérite marqué par des affleurements cuirassés par endroits, reposant en profondeur sur une saprolite riche en quartz et en kaolinite, renfermant souvent des terres rares. Les quelques roches identifiables dans cette zone sont des granodiorites.
- pour le site de Dano, les formations latéritiques reposent sur un substratum identifié comme des andésites schisteuses.

Les analyses minéralogiques et chimiques des échantillons provenant de ces carrières indiquent **que les compositions sont variables d'une carrière à l'autre, et au sein même d'une carrière en fonction de la profondeur du point de prélèvement.** Les phases minérales les plus abondantes sont la kaolinite, l'hématite, la goethite et la silice. Des phases secondaires (anatase, rutile, apatite, zircon, orthoclase, biotite, Mg-hornblende, ou minéraux contenant des terres rares) sont présentes de manière mineure. Dans la carrière de Balkoin, le suivi de la variation de la présence de certains de ces minéraux en fonction de la profondeur a montré que les proportions en hématite et en goethite diminuent au profit de celles de la kaolinite et de la silice. De plus, **l'étude des profils échantillonnés sur le terrain a montré également que la dureté des matériaux à l'affleurement diminue en fonction de la profondeur.**

L'acquisition des paramètres physiques et mécaniques, réalisée en début de thèse avec des moyens techniques simples, a pu évoluer progressivement grâce à des possibilités financières locales permettant la remise en état de certains équipements sur place. Malgré cette difficulté technique, la cohérence des données a été vérifiée en (1) les reproduisant systématiquement et en testant de nombreux blocs, (2) en testant quelques éprouvettes selon les normes opératoires validées (échantillon cylindrique d'élanement 2) dans un laboratoire de recherche certifié, et (3) en se confrontant aux quelques données de la littérature. Fort heureusement, les travaux

de Kasthurba ont représenté une référence importante sur la latérite indurée, de même que les données des travaux réalisés dans des conditions comparables sur des roches tendres.

La caractérisation physique réalisée dans les deux laboratoires de recherche (LEMC et LOMC) dans lesquels nous avons pu travailler a permis de montrer que :

- **la porosité** du matériau est variable d'une carrière à l'autre, et au sein même d'une carrière. Pour la carrière de Dano, la porosité déterminée à partir de la mesure de la masse volumique est de l'ordre de 30%, valeur inférieure à celles des autres carrières (proche de 40%).
- La porosité accessible à l'eau** (absorption maximale après immersion), de l'ordre de 14-16%, **indique l'existence d'une forte porosité occluse, voire l'existence de nombreux micropores peu accessibles à l'eau.** La présence d'argiles peut également expliquer ce résultat qui nous semble important pour la qualification du matériau vis à vis de normes d'utilisation. Le suivi de l'absorption en fonction du temps a révélé que les valeurs maximales étaient atteintes après 24 heures. Avec le porosimètre à mercure, la valeur de la porosité est de 20%. Compte tenu de la taille réduite de l'échantillon, cette dernière porosité ne caractérise certainement que la matrice rocheuse, alors que la porosité totale intègre la présence de macropores millimétriques à plurimillimétriques ;
- les valeurs moyennes du **pooids spécifique** des échantillons de toutes les carrières sont du même ordre de grandeur ($28-31 \text{ kN/m}^3$), avec des valeurs plus élevées pour la carrière de Dano ;
- **le pooids volumique apparent** est aussi du même ordre de grandeur ($19,7-21,7 \text{ kN/m}^3$). Des valeurs plus faibles ont cependant été déterminées dans le cas d'éprouvettes isolées, plus poreuses, utilisées dans les caractérisations mécaniques. Les valeurs les plus élevées sont trouvées pour les échantillons de la carrière de Dano.

Les études mécaniques (détermination de la résistance à la compression uniaxiale simple avec cycles de charge-décharge, détermination du module de déformation élastique en compression sur des échantillons parallélépipédiques ou cylindriques, mesure de la résistance à la traction par flexion 3 points et mesure de la vitesse de propagation des ultrasons) ont montré que :

- les BLT présentent globalement un **comportement élasto-fragile, avec une rupture brutale.** Pendant l'écrasement, ce matériau subit un endommagement avec apparition de microfissures, voire des écaillages ou des effritements en phase de post-rupture ;
- les **valeurs de la résistance à la compression uniaxiale varient au sein d'une même carrière, en fonction de l'état hydrique du matériau, de la profondeur, de la porosité et de la densité des éprouvettes.** Par ailleurs, **les éprouvettes sèches présentent une résistance à la compression deux fois supérieure à celles des éprouvettes à teneur en eau naturelle ou à l'état saturé :** supérieures à 9 MPa pour les éprouvettes séchées à 105°C pendant 24 heures, et inférieures à 5 MPa pour les éprouvettes à l'état naturel. Cette variabilité est également observée en fonction de la taille des blocs, mais à des échelles différentes. Pour Dano, les échantillons de la carrière mécanisée ont fourni des valeurs

de résistance à la compression uniaxiale plus élevées que celles déterminées sur les échantillons des carrières artisanales, ce qui corrobore l'influence du système d'exploitation différent des latérites indurées. Soulignons à nouveau **l'importance de l'état hydrique du matériau pour la mise au point d'une norme de qualification** ;

- pour **les modules de déformation**, les valeurs mesurées sont également variables entre les carrières. Celles obtenues sur les éprouvettes de **Dano** (178 -250 MPa) sont **3 à 5 fois plus élevées que celles déterminées sur les autres carrières** (30 -50 MPa). Cette variabilité pourrait également s'expliquer par les mêmes raisons que celles évoquées ci-dessus, mais également par une **modification du matériau due à l'augmentation du nombre de fissures créées par la technique d'exploitation** ;
- la **résistance à la traction déterminée par flexion 3 points est de l'ordre de 30 à 50% de la valeur de la résistance à la compression**, les valeurs les plus élevées étant observées sur la carrière de Dano PN ;
- la mesure de la **vitesse des ondes P** a révélé **une forte variabilité de leur propagation en fonction de la densité et de la porosité**. La valeur moyenne ($2,03 \text{ km/s}$) est tout à fait comparable à celle observée dans le cas des argiles (entre 1,8 et $2,4 \text{ km/s}$).

Si certains auteurs établissent un lien évident entre la roche-mère et la latérite (lien qui peut se révéler toutefois complexe), **il n'est pas possible d'établir une corrélation simple entre la nature du substrat et les propriétés mécaniques des latérites**. En effet, les matériaux de Dano sont de meilleure qualité bien que reposant sur un substrat constitué d'andésites schisteuses, alors que ceux étudiés dans la région de Ouagadougou reposant sur un socle granitique sont de moins bonne qualité. **Il faut donc envisager de prendre en compte d'autres paramètres tels que, par exemple, les conditions d'altération ou la géomorphologie qui vont impacter le développement du matériau latérite**.

Ainsi, face à l'hétérogénéité des BLT/BLS, à la fois d'un site d'étude à l'autre, mais aussi au sein d'un même site, il est nécessaire pour établir un indice de qualité de prendre en compte les caractéristiques pétrographiques (matériau compact ou granulaire), physiques (densité, porosité) et mécaniques.

Trois grades de qualité sont proposés : le terme BLT de grade 1 sera réservé exclusivement à la construction des éléments de structure les plus sollicités (parois autoporteuses, piliers, contours d'ouverture, ...), celui de grade 2 pour une utilisation dans des zones moins sollicitées (remplissage, éventuellement recouvertes d'un enduit, et enfin, celui de grade 3 en blocage comme petit appareil, voire à éliminer. Rappelons que dans la sélection du matériau pour son usage, il faudra prendre en compte son exposition à la pluie.

Les mesures thermiques effectuées selon trois méthodes différentes sur les éprouvettes de qualité différente (riches en oxydes de fer, ou riches en kaolinite) ont montré que la conductivité

thermique moyenne est comprise entre 0,51 et 0,875 W/(m. ° K) : ces bonnes valeurs de conductivité de la latérite indurée sont légèrement inférieures à celles de matériaux couramment utilisés dans les constructions, comme par exemple le béton ou le BTC. Elles sont très largement inférieures à celles d'autres roches denses utilisées en maçonnerie.

Des corrélations linéaires ont pu être établies entre la porosité des éprouvettes et la conductivité d'une part, et entre la teneur en eau des éprouvettes et la conductivité d'autre part. Cet ensemble d'arguments milite pour une utilisation dans la construction de ce matériau naturel à caractère isolant.

L'enquête sur le terrain a permis de décrire quatre types d'habitat en maçonnerie de BLT fournissant ainsi des critères architecturaux qualifiant le matériau :

- l'habitat de type 1, entièrement en BLT et ne possédant ni poutres ni poteaux. Il est construit à un seul niveau (RDC) ;
- un habitat de type 2 avec poutres de chaînage en béton armé après les ouvertures (parfois en soubassement) et poteaux en béton armé, uniquement aux arêtes, et un remplissage en BLT ;
- le bâtiment de type 3, construit avec des BLT de bonne qualité. Ce type correspond à des habitations plus spacieuses (plus de 10m de côté), nécessitant des poteaux intermédiaires et des chaînages. La fondation est en béton armé. Ce type est construit en RDC ou en R1, au maximum en R2 quand les charges sont entièrement portées par l'ossature en béton ;
- l'habitat de type 4 est construit en double mur (maçonnerie intérieure de parpaings et maçonnerie extérieure de BLT). Ce type correspond aux bâtiments de la fondation Drayer et de l'administration publique, et il allie esthétique et confort thermique.

Les constructions de la période coloniale ont également été répertoriées. Les BLT utilisés sont de très bonne qualité en comparaison de ceux utilisés actuellement. Ceci est certainement la conséquence de l'extraction par des ouvriers soumis aux travaux forcés dans des carrières demandant plus d'efforts physiques pour le travail de la roche.

La simulation sous le logiciel Robot, en intégrant les règles de l'Eurocode 6 définissant les propriétés mécaniques de la maçonnerie assimilée à un milieu continu, a permis de montrer que, sous l'effet du poids propre du matériau, de la poussée du vent et de charges d'exploitation envisagées pour l'usage du bâtiment, la construction "tout en BLT" est tout à fait pertinente en RDC, mais aussi avec un étage. Cette dernière hypothèse doit cependant prendre en compte impérativement la bonne qualité des blocs et un bon usage de la construction, en favorisant pour l'assemblage la technique de pose à joints minces. Selon les conditions de chargement et la géométrie de l'ouvrage, il faudra mettre en place éventuellement des chaînages verticaux et horizontaux. L'usage du BLT en maçonnerie mixte associée à une structure porteuse en béton armé est bien évidemment confirmé.

Les résultats de cette simulation indiquent également qu'il est possible d'envisager tout un ouvrage en latérite indurée, constitué d'une structure porteuse en maçonnerie de BLT (piliers, contreforts, voûtes de décharges, arcs), sous réserve d'utiliser des blocs de qualité dont la sélection rigoureuse, en fonction de leur positionnement dans la structure, doit être menée au cours du montage.

Sur le plan thermique, le suivi de la température et de l'humidité d'un bâtiment en BLT équipé de thermopuces a montré que **le confort à l'intérieur est meilleur dans la journée**, avec un gain de 1 à 4 ° C selon les saisons. La nuit, les murs en BLT ont tendance à restituer vers l'intérieur la chaleur qu'ils ont emmagasinée pendant la journée. Ce transfert pourrait être atténué en édifiant des murs plus épais, voire doubles, avec éventuellement intercalation d'isolants thermiques.

Les résultats présentés dans ce travail induisent à notre avis **plusieurs perspectives de développement des recherches sur le matériau latérite : technique d'extraction, durabilité du matériau, normalisation et valorisation des savoirs faire traditionnels.**

Sur le plan de l'extraction, il paraît pertinent de mieux définir les conditions nécessaires à une rentabilité de l'exploitation. Cela passe en premier lieu par une très bonne reconnaissance du gisement (épaisseur des couches, extension dans l'espace pour l'implantation de la mécanisation, qualité de la latérite indurée). Puis par la mise au point de techniques d'extraction moins consommatrices en énergie, soucieuses de l'environnement et de la sécurité des ouvriers : **la mécanisation avec des engins légers** pourrait constituer une solution industrielle à ce problème environnemental, mais permettrait aussi la maîtrise de la qualité du matériau (régularité des formes et des dimensions, contrôle des fissurations, exploitation des bonnes carrières).

Par ailleurs, compte tenu du doute persistant sur l'utilisation du matériau pour la construction de bâtiments de grande envergure, il faut **approfondir les études sur les comportements mécaniques et thermiques à long terme des maçonnerie en BLT**. A cet effet, des bâtiments pilotes, équipés de systèmes de suivi du confort et du vieillissement du matériau en fonction de son exposition aux intempéries, fourniront des données permettant d'améliorer les techniques constructives mais aussi de contrôler la maîtrise du cycle de vie du matériau mis en œuvre.

La démarche de normalisation doit constituer un objectif à moyen terme : il est donc important d'accumuler les données décrivant le matériau latérite indurée ainsi que celles relatives à ses performances. Compte tenu de la variabilité que nous avons soulignée au cours de ce travail, il faudra multiplier les études comme celle-ci dans plusieurs carrières afin de

constituer une base de données nationale.

Pour terminer cette présentation, nous soulignerons l'intérêt qu'il y aurait à étudier **l'amélioration de la qualité des blocs du matériau latérite**. En effet, **certaines techniques traditionnelles pratiquées depuis longtemps et donnant des résultats remarquables** n'ont pas encore été investies et il y aurait lieu de s'inspirer de ce savoir-faire pour valoriser encore ce matériau.

Liste des Abréviations

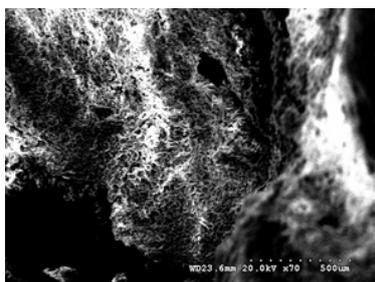
2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
ADAUA	Association pour le Développement naturel d'une Architecture et d'un Urbanisme Africain
ATD	Analyse Thermique Différentielle
BLS	Bloc de latérite sciée
BLT	Bloc de Latérite Taillée
BUMIGEB	Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina Faso
CRATerre	Centre international de la construction en terre
CRISMAT	Laboratoire de Cristallographie et Sciences des Matériaux de Caen
DRX	Diffraction de Rayons X
DTU	Document Technique Unifié
EDS	Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy
EIER	Ecole Inter-Etats des Ingénieurs de l'Equipement Rural
ELS	Etats Limites de Service
ELU	Etats Limites Ultimes
ENSAG	Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble
ENSICAEN	Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Caen
ENSIP	Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers
ETSHER	Ecole de Technicien Supérieur d'Hydraulique et de l'Equipement Rural
LEMC	Laboratoire Ecomatériaux de Construction de 2iE
LGCgE	Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement de l'université d'Artois
LOCOMAT	Projet de valorisation des matériaux locaux du Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisation
LOMC	Laboratoire Onde et Milieux Complexes de l'Université du Havre
MEB	Microscopie Electronique à Balayage
MET	Microscopie Electronique à Transmission
NF	Norme Française

PN	Entreprise Pierres Naturelles
R+1	Rez de chaussée + 1 étage
R+1	Rez de chaussée + 3 étages
R+2	Rez de chaussée + 2 étages
RDC	Rez de Chaussée
SYSMIN	Projet Système Minier et cartographie géologique du Burkina
UEMOA	Union Economique et Monétaire Ouest Africaine
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

Annexes

Images MEB - Profils d'observation

Carrière de Dano



(a) Couche cuirassée - Profil P1-a

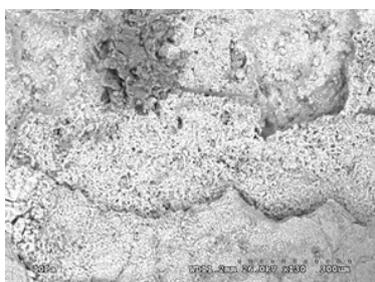


(b) Couche sous-jacente Profil P1-b

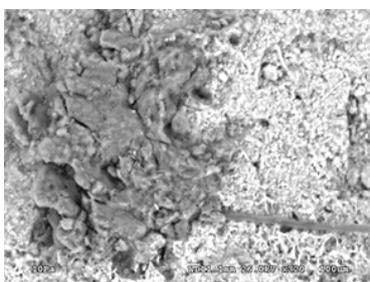


(c) Couche sous-jacente Profil P1-c

Carrière de Koubri



(d) Couche cuirassée Profil K1-a

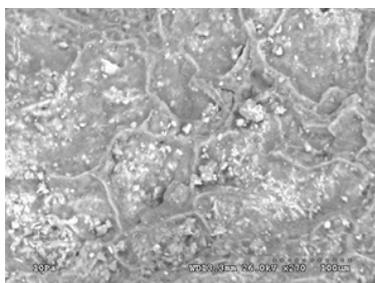


(e) Couche sous-jacente Profil K1-b

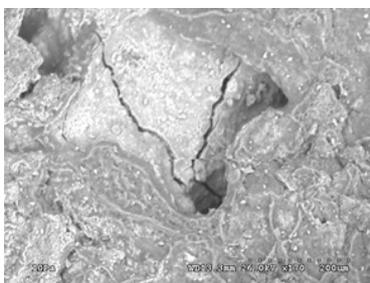


(f) Couche sous-jacente Profil K1-c

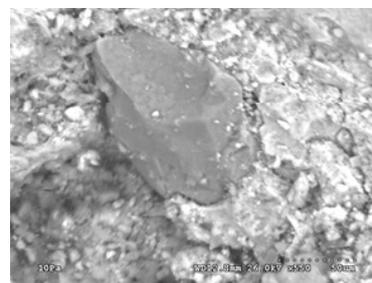
Carrière de Tigaldégué



(g) Couche cuirassée Profil T1-a



(h) Couche cuirassée Profil T1-b

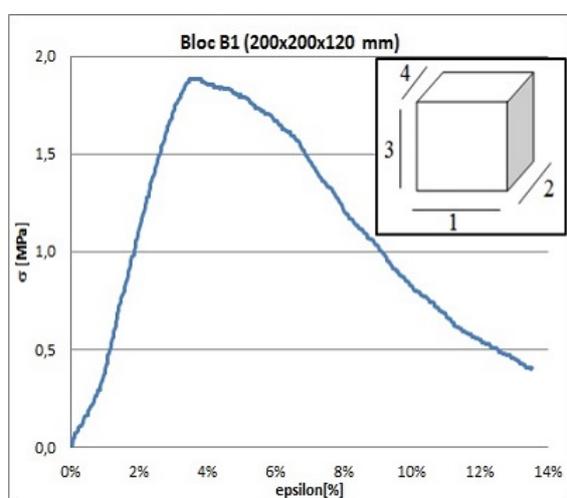


(i) Couche cuirassée Profil T1-c

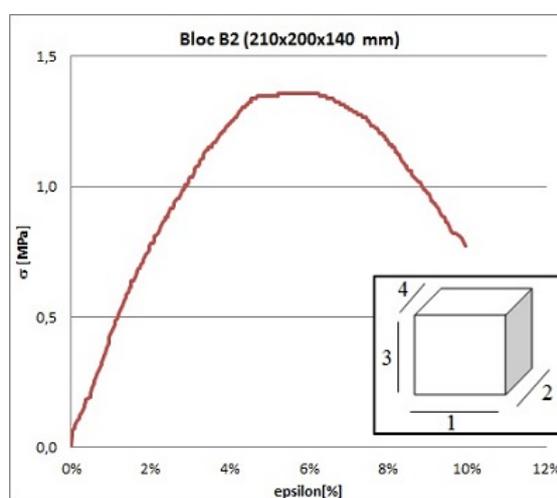
FIGURE A.1 – : Morphologie observée au MEB - Carrières de Dano, Koubri, Tigaldégué

Fiches d'essais de compression uniaxiale

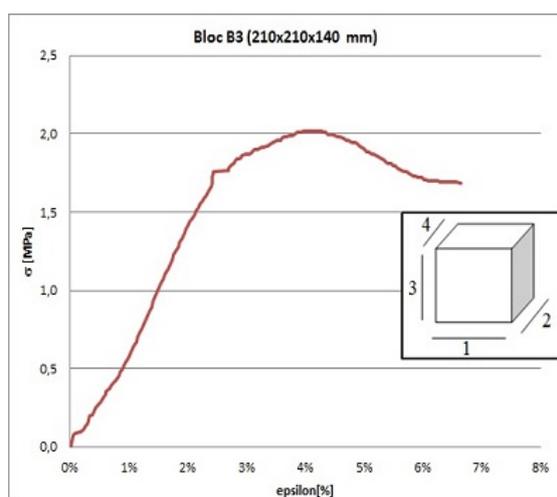
B.1 Courbes contrainte-déformation en compression simple



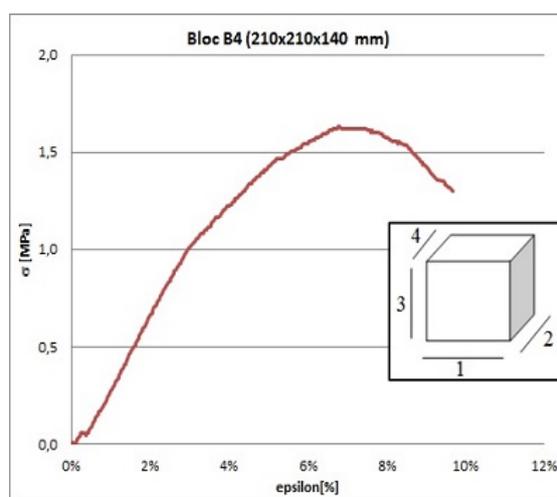
(a) Bloc-B1



(b) Bloc-B2



(c) Bloc-B3



(d) Bloc-B4

FIGURE B.1 – : Compression simple sur bloc parallélépipédique - Presse LEMC

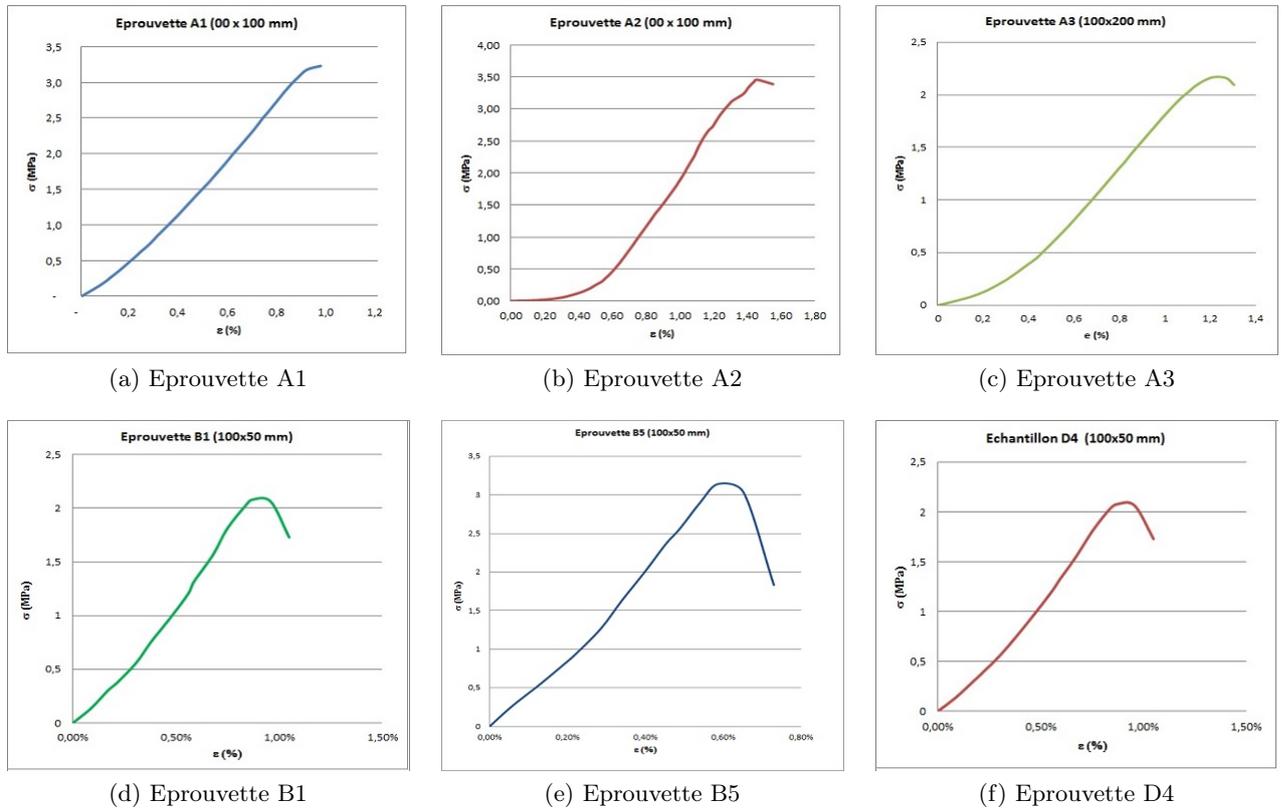


FIGURE B.2 – : Compression simple sur cylindre - Presse LOMC

B.2 Courbes contrainte-déformation en compression avec charge-décharge

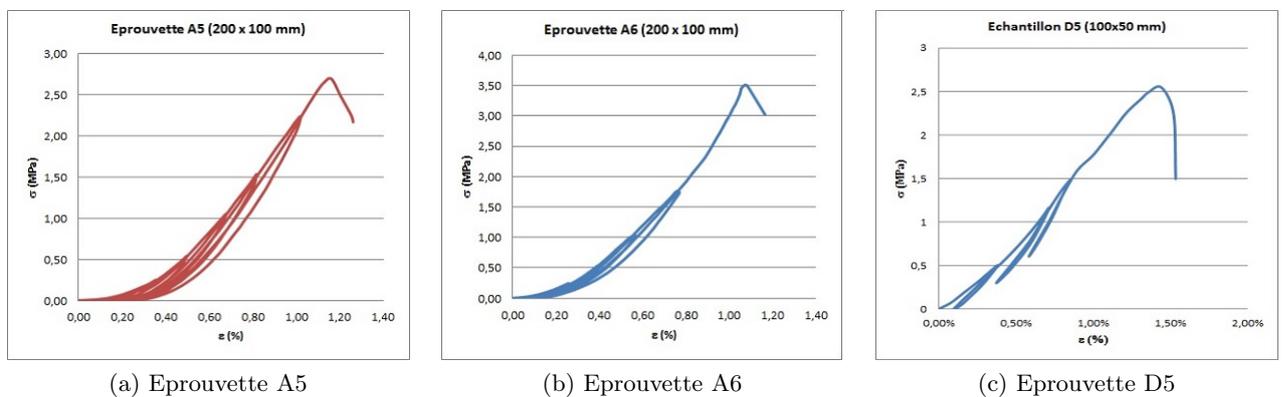


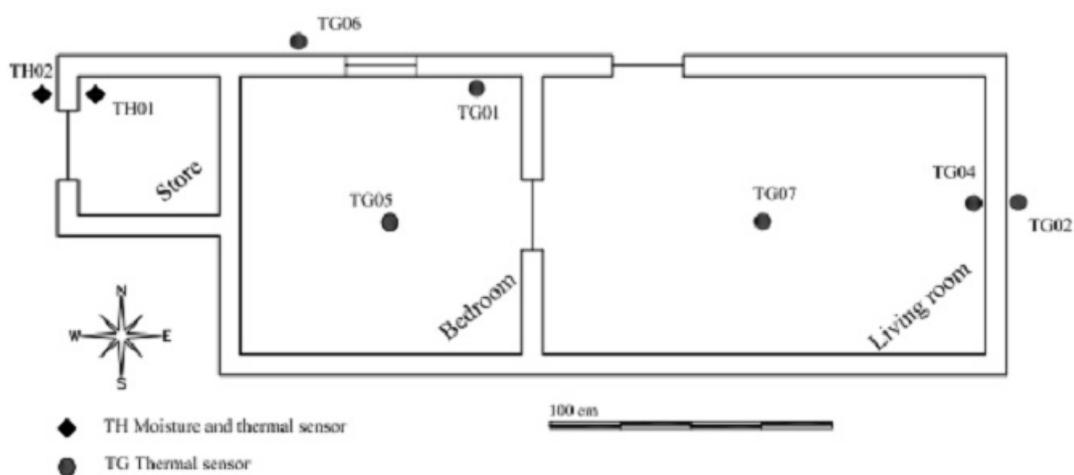
FIGURE B.3 – : Compression avec charge-décharge sur cylindre

Données suivi hydro-thermique

C.1 Plan du bâtiment et position des thermopuces



(a) Plan du bâtiment-pilote



(b) Répartition des thermopuces

FIGURE C.1 – Plan du bâtiment- répartition des thermopuces

C.2 Données enregistrées par les thermopuces



Analyse thermique d'un Batiment

1 - Paramètres de la Qualification

Id. Rapport :

Q CF 2248

Date du Contrôle : 22/07/2012 12:16:00

Opérateur Abdou LAWANE

Client ou Site : Bâtiment pilote SOTER

Id. Interne :

Procédure Normative :

Début Contrôle : 23/7/12 1:42

Nombre d'enregistrements :

Fin Contrôle : 27/11/12 3:12

Intervalle de mesure : 1:30:00

Nombre de mesures : 2034

Commentaires

Matériel utilisé:

- Ensemble de ThermoPuces, modèle L
- Interface USB
- Logiciel Warito II, version Expert V 5.056

2 - Instruments de Mesure Utilisés

	Id. Interne	Id. Unique Constructeur	Position	Remarque	Date Etalonnage	Modèle	Incertitude Instrument
1	TG006	0000002989AC21	Ouaga3-TG006	Maison SOTER	08/06/2012	DS1921G	0,37
2	TG002	000000298C8D21	Ouaga2-TG002	Maison SOTER	08/06/2012	DS1921G	0,37
3	TH002	00000017CF4241	Ouaga 8-TH002	Maison SOTER	14/05/2012	DS1923	0,12
4	TH001	00000017E0FA41	Ouaga 7-TH001	Maison SOTER	14/05/2012	DS1923	0,12
5	TG007	00000029982C21	Ouaga-TG007	Maison SOTER	08/06/2012	DS1921G	0,37
6	TG003	0000002994D121	Ouaga6-TG003	Maison SOTER	08/06/2012	DS1921G	0,37
7	TG004	00000029B17E21	Ouaga1-TG004	Maison SOTER	08/06/2012	DS1921G	0,37
8	TG005	00000029AF9E21	Ouaga4-TG005	Maison SOTER	08/06/2012	DS1921G	0,37
9	TG001	00000029AC7D21	Oauga5-TG001	Maison SOTER	08/06/2012	DS1921G	0,37
10							
11							
12							
13							
14							
15							

3 - Exploitation des Mesures

Saisir les paramètres et cliquer sur Mettre à Jour.

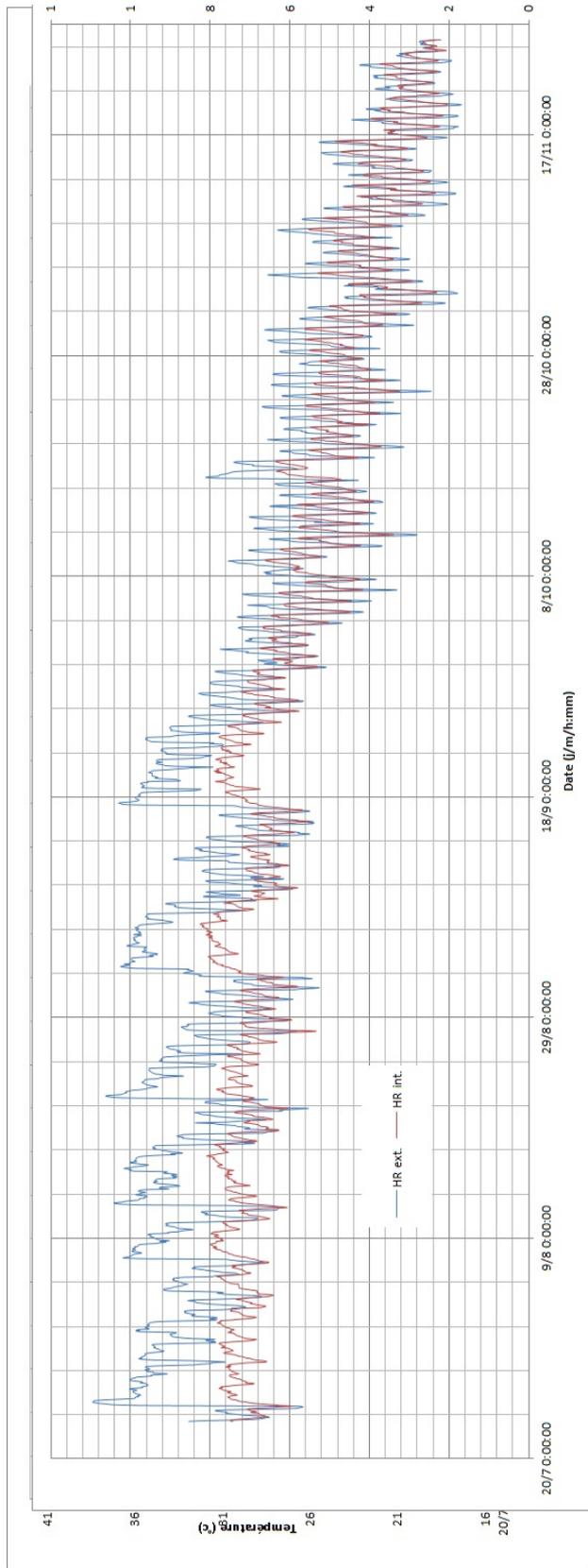
	Position	Remarque	Mesures relevées			Conditions à respecter			
			Moyenne	Mini	Maxi	Doit être	Et		
1	uaga3-TG006	Maison SOTER	29,48	21,50	37,50		18,0	>	21,0
2	uaga2-TG002	Maison SOTER	30,51	22,01	39,50				
3	uaga 8-TH002	Maison SOTER	29,24	22,10	36,00				
4	uaga 7-TH001	Maison SOTER	30,46	24,11	36,98		18,0		22,0
5	uaga-TG007	Maison SOTER	30,32	26,00	35,00		18,0		21,0
6	uaga6-TG003	Maison SOTER	30,95	24,04	37,88		22,0		
7	uaga1-TG004	Maison SOTER	30,76	24,50	36,97		22,0		
8	uaga4-TG005	Maison SOTER	30,56	25,53	35,89				
9	uaga5-TG001	Maison SOTER	30,57	25,02	35,50				

4 - Conclusion

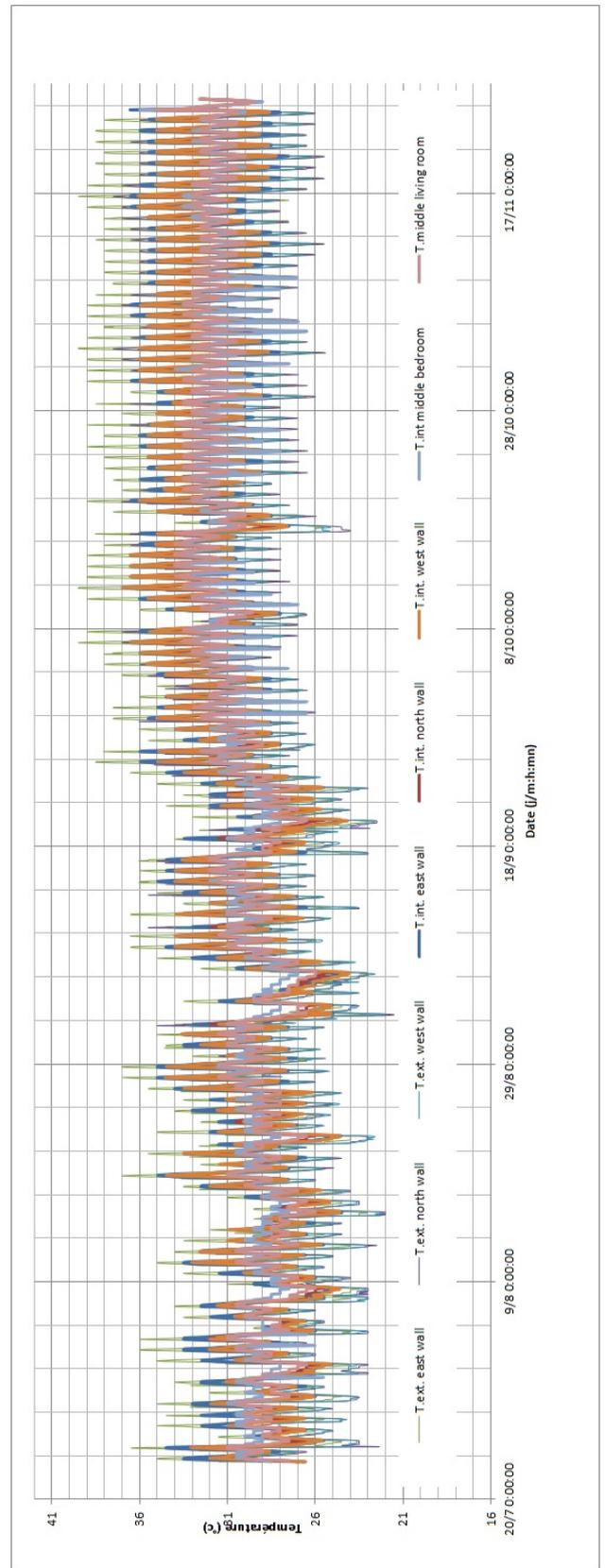
Pas d'anomalies constatées

Remarques

Signature



(a) Variation de l'humidité



(b) Variation des températures intérieure et extérieure

Vérification d'un mur avec la méthode simplifiée :

D.1 Vérification de la résistance à la compression de la structure en latérite à l'ELU

Le bâtiment composée d'un rez-de-chaussée et d'un étage. Le mur est soumis à un chargement vertical uniformément réparti et à l'action du vent. Le calcul est mené selon la méthode simplifiée selon les hypothèses suivantes :

- Tous les murs du bâtiment sont porteurs et leur hauteur ne doit pas dépasser 16 m ;
- La portée l_f des planchers ne doit pas dépasser $l_f = \min(4, 5 + 10t; 6)$; avec t l'épaisseur des murs porteurs ;
- La hauteur libre d'un étage ne doit pas dépasser 3,2 m pour un rez de chaussée d'un bâtiment de hauteur supérieure à 7 m ;
- Les valeurs caractéristiques des actions variables sur les planchers et sur la toiture ne doivent pas dépasser 500 kg/m^2 (nous prendrons $1,5 \text{ kg/m}^2$, tel qu'il est spécifié dans l'Eurocode pour les bâtiments d'habitation) ;
- Les murs porteurs doivent être alignés verticalement en hauteur ;
- Pour les murs en rive de plancher soumis à des charges dues au vent, l'épaisseur t doit vérifier l'inégalité :

$$t \geq \frac{C_1 q_{swd} l h^2}{N_{Ed}} + C_2 h \quad (\text{D.1})$$

Avec :

h : la hauteur libre d'un étage (ici 3m) ;

q_{swd} : la charge de calcul due au vent (ici 1 kN/m^2 tel qu'il est spécifié dans l'Eurocode) ;

N_{Ed} : la valeur de calcul de la charge verticale ;

l : la longueur du mur ;

c_1 et c_2 sont des constantes dépendant de α , tel que $\alpha = \frac{N_{Ed}}{t l f_d}$. Ces constantes sont lues sur des graphiques définis dans l'Eurocode 6 (PR XP ENV 1996-3, 2001).

Calcul du poids d'une dalle de béton : $0,3.5.5 \times 2500 = 18750kg$

Poids des murs d'un étage : $0,2.5.3.2800 \times 4 = 33600kg$

Charge d'exploitation : $150 \times 5 \times 5 = 3750kg$

Les quatre murs étant porteurs, les charges totales est divisé par quatre pour vérifier un mur.

$$N_{Ed} = 1,35.g + 1,5.q = 1,35 \times \frac{2.18750 + 33600}{4} + 1,5 \times \frac{3750}{4} = 25406kg = 254kN$$

$$\alpha = \frac{254060}{5 \times 0,2 \times 1,3 \times 10^6} = 0,163 \Rightarrow c_1 = 0,125 \text{ et } c_2 = 0,021$$

$$t_{min} = \frac{c_1 \cdot q_{swd} \cdot l \cdot h^2}{N_{Ed}} + C_2 \cdot h = 0.022 + 0.063 = 8.5cm$$

$t_{min} \leq 20cm \Rightarrow$ hypothèse vérifiée.

Le calcul de N_{Ed} , énoncé dans l'EUROCODE, est fait en prenant $h = h_{ef}$ et $t = t_{ef}$

$$\frac{h_{ef}}{t_{ef}} = 15, l_{ef} = 6$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,85 - 0,0011 \cdot \frac{h_{ef}^2}{t} = 0,6025 \\ 1,3 - \frac{l_{ef}}{8} = 0,55 \end{array} \right\} \Rightarrow \varphi_s = \min(0,55; 0,6025) = 0,55$$

$$N_{RD} = A \cdot \varphi_s \cdot f_d \text{ avec } A : \text{ la section du mur } A = 0,2.5 = 1m^2$$

$N_{RD} = 715kN$ $N_{RD} \succ N_{Ed}$ donc la résistance du mur à la compression est vérifiée.

On va chercher la valeur limite du nombre d'étages, qui vérifie les deux conditions :

$$t \geq \frac{C_1 q_{swd} l h^2}{N_{Ed}} + C_2 h \text{ et } N_{RD} \succ N_{Ed}$$

En considérant quatre étages, la deuxième inégalité n'est plus vérifiée. Ce type d'ouvrage élancé n'est pas rencontré dans l'architecture locale. Par ailleurs, il faudrait approfondir l'effet des charges latérales sur une telle structure. Ce calcul n'est qu'un indicateur.

D.2 Les autres vérifications

Lorsque le mur est soumis à des charges concentrées à cause d'ouvertures, il faut vérifier que la charge verticale concentrée N_{Edc} appliquée sur le mur doit être inférieure ou égale à la résistance sous charge concentrée $N_{Rdc} = \beta \cdot A_b \cdot f_d$.

Avec β un facteur de majoration pour les charges concentrées, $A_b = l_c(t - 2e)$, la surface soumise à la charge, et f_d la résistance à la compression en maçonnerie.

La vérification du mur doit être également assurée lorsqu'il est soumis à un effort de cisaillement V_{Ed} , qui doit être inférieure ou égale à V_{RD} . Les actions de reprise du vent sont des actions à considérer.

D.3 Les liaisons entre murs, planchers et toitures :

La liaison des murs avec les planchers et les toitures

Une telle liaison doit permettre le transfert des charges latérales de calcul. Elle est assurée par adhérence frottement ou par feuillards métalliques d'ancrage. La transmission des charges latérales aux éléments raidisseurs (murs de contreventement) s'effectue par les planchers et les toitures.

La liaison entre les murs Les murs porteurs concourants sont liés entre eux. La liaison doit transmettre les charges verticales et latérales. Elle est réalisée par harpage ou par des armatures d'ancrage pénétrant à l'intérieur de chaque mur. La durabilité de la maçonnerie doit être adoptée en fonction des conditions d'exposition de l'ouvrage, et notamment au mouillage ou à la pluie. On a examiné cet aspect, en considérant la géographie du Burkina Faso, éloigné de la mer.

D.4 Etude par élément fini - milieu continu équivalent

Cette approche mécanique reposant sur les principes généraux de la mécanique des milieux continus permet de calculer les déplacements en relation avec les charges appliquées et les déformations en relation avec les contraintes grâce à une loi de comportement. L'approche de type milieux continus consiste à intégrer les joints dans la loi de comportement globale du mur. Soit il faut faire appel à des techniques d'homogénéisation, ou des approches empiriques. Il convient de trouver le bon « VER » volume élémentaire représentatif. Ainsi utiliser les caractéristiques mécaniques des différents éléments du milieu discontinu pour trouver celles à utiliser pour assimiler le mur à un milieu continu. Une des difficultés est de rendre compte du comportement des joints. Pour faire l'étude et assimiler le système hétérogène à un milieu homogène équivalent, auquel on attribue une loi de comportement, il a été choisi d'utiliser le code pédagogique RDM6 pour faire l'étude du composite une cellule constituée de n rangées de m blocs, en assise régulière, afin de déterminer les propriétés du matériau homogène équivalent, qui seront

introduites dans le logiciel Robot pour la conception de l'ouvrage en 3D. L'introduction d'une loi d'interface est impossible dans ce logiciel.

D.5 Etude du VER : Pour représenter ce système hétérogène,

Cette étude est menée avec RDM 6 pour juger des conditions de fonctionnement d'un ensemble de blocs soumis à des charges verticales, et horizontales. L'adhérence est supposée parfaite entre les blocs

Etude d'un mur de 1,38 m . 3,40 m, d'une épaisseur de 0,20 m. Etude d'un mur en maçonnerie composite de 7 rangées de 8 blocs de dimensions unitaires 0,405.0,18.0,20 avec joints épais de 2 cm. Le calcul est mené en contraintes planes, les conditions aux limites sont des appuis simples à la base.

On a examiné plusieurs cas de charges : l'effet de la gravité , l'effet couplé gravité et pression verticale de 0,2 MPa et l'effet couplé gravité-pression verticale de 0,2 MPa et pression latérale de 0,1 MPa.

Les déplacements maximaux obtenus sont au sommet du mur dans le cas 1, et sont essentiellement verticaux. Avec le cas 2, le mur prend une forme trapézoïdale plus marqué avec des déplacements verticaux et horizontaux sur les cotés. Le déplacement maximal au centre du mur est de $1,92.10^{-1}$ cm.

Bibliographie

- V. ACARY : *Contribution à la modélisation mécanique et numérique des édifices maçonnés*. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille II, France, 2001. (Cité en pages 157 et 159.)
- R.I. AL-RAOUSH et C.S. WILLSON : Extraction of physically realistic pore network properties from three-dimensional synchrotron x-ray microtomography images of unconsolidated porous media systems. *Journal of Hydrology*, 300(1 - 4):44 – 64, 2005. ISSN 0022-1694. (Cité en page 85.)
- L.T. ALEXANDER et J.G. CADY : *Genesis and hardening of laterite in soils*. Technical bulletin (United States. Dept. of Agriculture). U.S. Dept. of Agriculture, 1962. (Cité en page 8.)
- J.P. AMBROSI : *Pétrologie et géochimie d'une séquence de profils latéritiques cuirassés ferrugineux de la région de Diouga, Burkina Faso*. Thèse de doctorat, U.E.R. Sciences Fondamentales et appliquées. Poitiers ANTUN ES., 1984. (Cité en page 15.)
- A. ANTHOINE : Derivation of the in-plane elastic characteristics of masonry through homogenization theory. *International Journal of Solids and Structures*, 32(2):137 – 163, 1995. (Cité en page 160.)
- M. ARNOULD : *Etude géologique des migmatites et des granites précambriens du Nord-Est de la Côte d'Ivoire et de la Haute-Volta méridionale : cadre géologique, classification, principaux types*. Mémoires du Bureau de recherches géologiques et minières. Ed. Technip, 1961. (Cité en page 33.)
- ASTM : *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water Content of Soil and Rock by Mass*. American Society for Testing and Materials, 2005. (Cité en page 96.)
- ASTM E-241-77 : *Recommended Practices for Increasing Durability of Building-Constructions Against Water-Induced Damage*. Annual book of ASTM standards. - Philadelphia, 1977. (Cité en page 150.)
- P. AUTRET : *Latérites et graveleux latéritiques*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1952. (Cité en page 21.)
- G. BEAUDET et R. COQUE : Les modelés cuirassés des savanes du Burkina Faso (Afrique occidentale). *Géol. dyn. Géogr. phys.*, 27(3,4):213–224, 1986. ISSN 0003-4010. (Cité en page 37.)
- K. BECK : *Etude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, Science des Matériaux, 2006. (Cité en pages 151 et 152.)

- K. BECK et M. AL-MUKHTAR : The mechanical resistance properties of two limestones from France, Tuffeau and Sébastopol. In *Dimension Stone 2004 - New Perspectives for a Traditional Building Material : Proceedings of the International Conference in Dimension Stone 2004, 14-17 June, Prague, Czech Republic*. Prikryl, R., Taylor & Francis, 2004. (Cité en pages xv et 86.)
- A. BELHAMRI : Characterization of the first falling rate period during drying of a porous material. *Drying Technology*, 21(7):1235–1252, 2003. (Cité en page 92.)
- D. BENAVENTE, M.A. GARCÍA DEL CURA, R. FORT et S. ORDÓNEZ : Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology*, 74(1-2):113–127, 2004. (Cité en pages 70 et 151.)
- H. BERNOUALI, A. BRARA, M. MAHDAD et F. MOKHTARI : Caractérisation thermophysique et suivi thermique de deux bâtisses réalisées en blocs de terre comprimée. *Annale du bâtiment et des travaux publics*, 86(16):8–14, 2011. (Cité en page 2.)
- J.G. BERRYMAN : Seismic waves in rocks with fluids and fractures. *Geophysical Journal International*, 171(2):954–974, 2007. ISSN 1365-246X. (Cité en page 84.)
- J. BERTHIER et Cl. TOURENQ : L'essai de compression simple pour les roches. *Bulletin de liaison-Laboratoire Centrale Pont et chaussées*, 20:2.1 – 2.12, 1966. (Cité en page 87.)
- Z.T. BIENIAWSKI et A.A. BALKEMA : Rock mechanics design in mining and tunneling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 22(3):193 – 194, 1984. (Cité en pages xv, 86 et 87.)
- Z.T. BIENIAWSKI, South African Council for SCIENTIFIC et Industrial Research. National Mechanical Engineering Research INSTITUTE : *Mechanism of brittle fracture of rock*. Numéro ptie. 2 in CSIR report. National Mechanical Engineering Research Institute, Council for Scientific and Industrial Research, 1967. (Cité en page 78.)
- A. BLOT : Caractérisation des chapeaux de fer en milieu latéritique cuirassé. *Comptes Rendus Géoscience*, 336(12):1473–1480, 7 2004. (Cité en pages ix, 9, 17 et 19.)
- J.L. BOEGLIN et D. MAZALTARIM : Géochimie, degrés d'évolution et lithodépendance des cuirasses ferrugineuses de la région de Gaoua au Burkina Faso. *Sci. Géol :Bull.*, 47(1):27–44, 1989. (Cité en pages 15 et 33.)
- L.F. BONNARD : *Aperçu sur la géologie de la Haute-Volta*. Direction de la géologie et des mines, 1965. (Cité en page 33.)
- R. BOULET : La géomorphologie et les principaux types de sols en Haute-Volta septentrionale. *Cah. ORSTOM, Série Péd.*, 8(3):245–271, 1970. (Cité en page 37.)

- R. BOULET : *Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta : Equilibre et déséquilibre pédobio-climatique*. Mémoires ORSTOM. ORSTOM, 1978. ISBN 2-7099-0448-9. (Cité en page 37.)
- J. BOURCART, J. NOETZLIN, G. POCHON et S. BERTHELIER : *Étude des détériorations des pierres des monuments historiques : deux rapports présentés à la Direction des monuments historiques de France par MM. J. Bourcart, J. Noetzelin, le Dr Pochon, Mlle S. Berthelieer*. impr. de Arrault, 1949. (Cité en page 151.)
- R.P. BOURMAN et Clifford D. OLLIER : A critique of the Schellmann definition and classification of "laterite". *Catena*, 47(2):117 – 131, 2002. (Cité en page 26.)
- P. BOUSQUIÉ : *Texture et porosité des roches calcaires*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI et Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 1979. (Cité en pages x et 71.)
- B.H.G. BRADY et E.T. BROWN : *Rock Mechanics : For Underground Mining*. Springer, 2004. ISBN 9781402020643. (Cité en pages 81 et 82.)
- D.L BRAMAO et L. PETEZVAL : Soil map of South America. *In 7th International congress of soil Sc.*, volume V1, pages 1–10. Madison, 1960. (Cité en page 11.)
- R. BRAUCHER, F. COLIN, E.T. BROWN, D.L. BOURLES, O. BAMBA, G.M. RAISBECK, F. YIOU et J.M. KOUD : African laterite dynamics using in situ-produced ¹⁰Be. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(9):1501 – 1507, 1998. ISSN 0016-7037. (Cité en page 16.)
- J.J. BRAUN : *Comportement géochimique et minéralogique des terres rares, du thorium et de l'uranium dans le profil latéritique d'Akongo (Sud-ouest Cameroun)*. Thèse de doctorat, Université de Nancy 1, France, 1991. (Cité en page 23.)
- P. BROMBLET et ASSOCIATION MEDISTONE : Guide "techniques de conservation de la pierre". <http://www.asso-medistone.org/uploaded/alta-rations-de-la-pierre-29sept10.pdf>, 2010. (Cité en page 151.)
- A. BRUNET, C. JATON et G. ORIAL : Les altérations biologiques de la pierre : le rôle des bactéries et des algues. *In La conservation de la pierre monumentale, J. Philippon, D. Jeanette et R.A. Lefebvre*, pages 89–94. Min. Culture et Presses du CNRS, 1997. (Cité en page 150.)
- F.H. BUCHANAN : *A journey from Madras through the Countries of Mysore, Kanara and Malabar*. v 1-3 East India Co- 2 vols London, 1807. (Cité en pages 6, 8 et 116.)
- C. CALDERINI et S. LAGOMARSINO : A micromechanical inelastic model for historical masonry. *Journal of Earthquake Engineering*, 10(4):453–479, 2006. (Cité en page 160.)

- G. S. CAMPBELL, J. D. JR. JUNGBAUER, W. R. BIDLAKE et R. D. HUNGERFORD : Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity. *J Soil Science*, 158(5):307–313, 1994. World Renewable Energy Congress Renewable Energy, Energy Efficiency and the Environment. (Cité en page 138.)
- G.S. CAMPBELL : Soil physics with basic : Transport models for soil-plant systems. *Elsevier*, 1985. (Cité en page 92.)
- H.S. CARSLAW et J.C. JAEGER : *Conduction of Heat in Solids*. Oxford Science Publications. Clarendon Press, 1986. ISBN 9780198533689. (Cité en page 96.)
- C. CASTAING et P. CHEVREMONT : *Notice explicative de la carte géologique au 1/200.000 :Feuille ND-30-V Houndé*. BRGM, 1ère édition, 2003. (Cité en pages ix, 34, 36, 39, 42 et 43.)
- B. CHETOUANE, F. DUBOIS, M. VINCHES, C. BOHATIER, P. DEVILLERS et M. NEMOZ-GAILLARD : Analyse comparée de différentes modélisations du comportement au séisme de monuments en pierres sèches. *In VIe rencontres du groupe APS*. Springer, Wien, Octobre, 2002. (Cité en page 159.)
- A.S. COLAS : *Mécanique des murs de soutènement en pierre sèche : modélisation par le calcul à la rupture et expérimentation échelle 1*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, 2009. (Cité en page 157.)
- S. COMTEC et A. P. : Reconnaissance et évolution des indices des bauxites de l'ouest voltaïque. 1975. (Cité en page 37.)
- Y. COUASNET et G. BLACHÈRE : *Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction : Référentiels normatifs, européens et internationaux, Critères de classement des performances*. Collection Mémento. Le Moniteur Editions, 2007. ISBN 9782281113648. (Cité en page 136.)
- C.A. COULOMB : *Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture*. 1773. (Cité en page 157.)
- P. CRAUSSE : *Étude fondamentale des transferts couplés de chaleur et d'humidité en milieu poreux non saturé*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 1983. (Cité en page 92.)
- CROIX DU SUD : Pays de nickel, où il n'y a pas que le nickel. <http://croixdu-sud.info/economie/mines.php>, Mise en ligne en 2012, consulter le 04 avril 2013. (Cité en page 22.)
- T. CROOK : On the use of the 'term laterite'. *Geological Magazine (Decade V)*, 6:524–526, 10 1909. ISSN 1469-5081. (Cité en page 18.)

- J.V.B. da COSTA : Characteristics and distribution of some soils groupe of angola. *bulletin, Angro. Congo Belge.*, pages 253–278, 1949. (Cité en page 8.)
- J. DAMAJ : *Auscultation et surveillance des perturbations hydromécaniques d'ouvrages souterrains par méthodes ultrasonores.* Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006. (Cité en page 83.)
- R. DAUPHIN : Constructions en Latérite au Burkina Faso. 2007. (Cité en page 25.)
- S. DAVEAU, M. LAMOTTE et G. ROUGERIE : Cuirasses et chaines birrimiennes en Haute-Volta. 71:460–482, 1962. (Cité en page 37.)
- D.M. DAWSON et A. BRIGGS : Prediction of the thermal conductivity of insulation materials. *Journal of Materials Science*, 16:3346–3356, 1981. ISSN 0022-2461. (Cité en page 135.)
- P. DE BUHAN et G. DE FELICE : A homogenization approach to the ultimate strength of brick masonry. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 45(7):1085 – 1104, 1997. ISSN 0022-5096. (Cité en page 160.)
- D. DECAGON : *KD2 Pro Compliance to ASTM and IEEE Standards.* Application Note. Decagon Devices, 2009. URL <http://www.decagon.com>. (Cité en page 108.)
- P. DELAGE et B.A. SCHREFLER : *Géomécanique environnementale, risques naturels et patrimoine.* Traité MIM : mécanique et ingénierie des matériaux. Géomatériaux. Hermes Science Publications, 2001. ISBN 9782746202283. (Cité en pages 150 et 151.)
- J.M. DELBECQ : *Analyse de la stabilité des ponts en maçonnerie par la théorie du calcul à la rupture.* Thèse de doctorat, ENPC, France, 1983. (Cité en page 157.)
- J. DELFOUR et M. JEAMBRUN : *Notice explicative de la carte géologique au 200.000 me Oudalan.* Edition BRGM, 1970. (Cité en page 33.)
- J.L. D'HOORE et LA COMMISSION DE COOPÉRATION TECHNIQUE EN AFRIQUE AU SUD DU SAHARA : *La carte des sols d'Afrique au 1/5.000.000 : mémoire explicatif.* Commission de coopération technique en Afrique. Publication. Commission de coopération technique en Afrique, 1964. (Cité en page 11.)
- İ. DİNÇER, A. ACAR et S. URAL : Estimation of strength and deformation properties of quaternary caliche deposits. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(3):353–366, 2008. ISSN 1435-9529. (Cité en page 115.)
- P. DOAT : *Construire en terre.* Collection AnArchitecture.  ditions Alternative, 1985. (Cité en page 135.)

- DREYFUS : Les latérites, généralités, leur utilisation en technique routière. *Revue générale des routes et des aérodromes : RGRA.*, (245), 1952. (Cité en page 20.)
- NF DTU 20.1 : (*DTU P10-202*) : *Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs*. AFNOR, 1985. (Cité en pages xi, 147 et 148.)
- NF DTU 20.1 P4 : (*DTU P10-202-4*) : *Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs- Partie 4 : Règles de calcul et dispositions constructives minimales*. AFNOR, 2008. (Cité en page 147.)
- J. DUCELLIER et LE BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES DE PARIS : *Contribution à l'étude des formations cristallines et métamorphiques du centre et du nord de la Haute-Volta : Text*. Numéro vol. 1 in Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Éd. Technip, 1963. (Cité en page 33.)
- V. ESCHENBRENNER et G. GRANDIN : La séquence de cuirasses et ses différenciations entre Agnibilékrou (Côte d'Ivoire) et Diébougou (Haute Volta). *Cahiers ORSTOM.Série Géologie*, 2:205–245, 1970. ISSN 0029-7232. (Cité en page 37.)
- J.W. EVANS : The meaning of the term 'laterite'. *Geological Magazine (Decade V)*, 7:189–190, 3 1910. ISSN 1469-5081. (Cité en page 18.)
- R. EZZDINE : *Endommagement des monuments historiques en maçonnerie*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, France, 1999. (Cité en pages 77, 127, 131 et 150.)
- M. FALL : *Identification et caractérisation mécanique de graveleux latéritiques du Sénégal : Application au domaine routier*. Thèse de doctorat, INPL-Nancy, France, 1993. (Cité en page 22.)
- M. FALL, J.P. TISOT et I.K. CISSE : Proposition pour une classification des graveleux latéritiques (application au cas du Sénégal). *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 50(1):17–35, 1994. ISSN 0074-1612. (Cité en page 22.)
- O. FAROUKI : *Thermal properties of soils*. Series on rock and soil mechanics. Trans Tech, 1986. ISBN 9780878490554. (Cité en page 138.)
- B. FEILDEN : *Conservation of Historic Buildings*. Technical studies in the arts, archeology and architecture. Taylor & Francis, 2003. ISBN 9780750658638. (Cité en page 72.)
- L.L. FERMOR : What is laterite? *Geological Magazine (Decade V)*, 8:454–462, 9 1911. ISSN 1469-5081. (Cité en pages 7, 18 et 20.)

- B. FITZNER : Porosity analysis-a method for the characterization of building stones in different weathering states. *Eng. Geol. of Ancient Works, Monuments and Historical Sites*, pages 2031–2037, 1990. (Cité en page 71.)
- B. FITZNER, K. HEINRICHS et D. LA BOUCHARDIERE : Damage index for stone monuments. *In Galan, E. and Zezza, F. (ed.) : Protection and Conservation of the Cultural Heritage of the Mediterranean Citi* *Proceedings of the 5th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Sevilla, Spain*. Swets and Zeitlinger, Lisse, The Netherlands, 2000. (Cité en page 70.)
- C.S. FOX : Buchanan's laterite of Malabar and Kanara. *Records of the Geological Survey of India*, LXIX(4):389–422, 1936. (Cité en page 21.)
- M. GIDIGASU : *Laterite Soil Engineering : Pedogenesis and Engineering Principles*. Developments in geotechnical engineering. Elsevier Science, 2012. ISBN 9780444601230. (Cité en page 18.)
- I. GIORGIS, S. BONETTO, R. GIUSTETTO, A. LAWANE, A. PANTET, P. ROSSETTI, J.H. THOMAS-SIN et R. VINAI : The lateritic profile of Balkouin, Burkina Faso : Geochemistry, mineralogy and genesis. *Journal of African Earth Sciences*, 90(0):31 – 48, 2014. (Cité en pages ix, 51, 53 et 55.)
- E. GLASSER : Rapport à Monsieur le Ministre des colonies sur les richesses de la nouvelle-calédonie. *Annales des Mines, France*, 4:299–392, 1903. (Cité en page 22.)
- R.E GOODMAN : *Introduction to Rock Mechanics*. Edition John WILEY and Sons, 1989. (Cité en page 81.)
- J GRANDET et B. THENOZ : Circulation de l'eau entre les pâtes de mortiers non durcies et un matériau poreux en contact. *Rev, Techn. industr Terre cuite*, 59:2–31, 1973. (Cité en page 74.)
- G. GRANDIN : La prospection en milieu latéritique, quelques aspects des matériaux. *In Fond documentaire ORSTOM*, volume 120 de *B 9478 ex 1*, pages 1–11. *Memoir of the Geological Survey India*, 1990. (Cité en page 22.)
- J. GROLIER, A. FERNANDEZ, M HUCHER et J. RISS : *Les propriétés physiques des roches - Théories et modèles*. Masson, Paris, 1991. Sommaire en anglais. (Cité en pages 83, 85 et 124.)
- C. GRUESCU, A. GIRAUD, F. HOMAND, D. KONDO et D.P. DO : Effective thermal conductivity of partially saturated porous rocks. *International Journal of Solids and Structures*, 44(3-4):811 – 833, 2007. (Cité en page 91.)
- Y. GUÉGUEN : *Introduction à la physique des roches*. Editions Hermann, 1992. ISBN 9782705661380. (Cité en page 131.)

- Y. GUÉGUEN et V. PALCIAUSKAS : *Introduction à la physique des roches*. Editions Hermann, 1997. ISBN 2-7056-6138-7. (Cité en pages xv, 83, 84, 130 et 131.)
- J.P. GUERASSIMOV : Latérites actuelles et sols latéritiques. *Bulletin d'Information AC. Sci. URSSS*, Ed. *Géographique Série-2*, 1962. (Cité en page 7.)
- R.J. GUMMERSON, C. HALL et W.D. HOFF : Water movement in porous building materials -ii. hydraulic suction and sorptivity of brick and other masonry materials. *Building and Environment*, 15(2):101 – 108, 1980. (Cité en page 74.)
- C. HALL : Water sorptivity of mortars and concretes : a review. *Magazine of Concrete Research*, 41:51–61(10), 1989. (Cité en page 74.)
- H.L.F. HARRASSOWITZ : *Laterit* : Fortschritte der geologie und palaeontologie : Band 4, Heft 14. Verlag von Gebrüder Borntraeger, 1926. (Cité en page 21.)
- H. HARRASSOWITZ : Laterite. *Forsch Geol Paleont. Berlin*, (245):253 –565, 1926. (Cité en page 20.)
- J. HEYMAN : The stone skeleton. *International Journal of Solids and Structures*, 2(5):249–279, 1966. (Cité en page 157.)
- A. HIBOUCHE : *Sols traités aux liants- Performances hydro-mécaniques et hygro-thermiques- Applications en BTP*. Thèse de doctorat, Université du Havre, France, 2013. (Cité en page 2.)
- G. HOTTIN et O.F. OUEDRAOGO : *Notice explicative de la carte géologique au 1.000.000 ème de la République de la Haute-Volta*. Edition BRGM, 1975. (Cité en pages ix, 30, 32 et 39.)
- J.A. HUDSON et J.P. HARRISON : *Engineering Rock Mechanics*. Pergamon, Oxford, 1997. (Cité en page 130.)
- J.L. HUMBAIRE : Technologie de la maçonnerie. *Techniques de l'ingénieur*, base documentaire, 1979. (Cité en page 146.)
- M. HUREZ, N. JURASZEK et M. PELCÉ : *Dimensionner les ouvrages en maçonnerie : Guide d'application*. Eurocode. Eyrolles, 2011. ISBN 9782212425482. (Cité en pages 154, 155 et 177.)
- J. IDRIS, T. VERDEL et M. AL-HEIB : Numerical modelling and mechanical behaviour analysis of ancient tunnel masonry structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(3):251 – 263, 2008. ISSN 0886-7798. (Cité en page 158.)
- IEEEI 442 : *Guide for Soil Thermal Resistivity Measurement*. the IEEE Standards Committee, 1981. (Cité en page 96.)

- IS :3620-1979 : (reaffirmed 1998). indian standard specification for laterite stone block for masonry. *Bureau of Indian Standards, New Delhi, Indian*, 86:1 – 8, 1998. (Cité en pages 113 et 115.)
- J.C. JAEGER et N.G.W COOK : *Fundamentals of rock mechanics*. Methuen and Co Ltd, Ed. Londre, 1969. (Cité en pages x et 75.)
- M. JEAN : The non-smooth contact dynamics method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 177(3-4):235–257, 1999. ISSN 0045-7825. (Cité en page 159.)
- P. JONQUET : *Remarques sur les formations sédimentaires ouest-voltaïques*. Rap. Miltg. BRGM Bobo-Dioulasso, 1963. (Cité en page 34.)
- E. JUHÁSOVÁ, R. SOFRONIE et R. BAIRRAO : Stone masonry in historical buildings â ways to increase their resistance and durability. *Engineering Structures*, 30(8):2194 – 2205, 2008. ISSN 0141-0296. Seismic reliability, analysis, and protection of historic buildings and heritage sites. (Cité en page 173.)
- A.K. KASTHURBA : *Characterization and Study of Weathering Mechanisms of Malabar Laterite for Building Purposes*. Thèse de doctorat, Indian Institute of Technology Madras, 2006. (Cité en pages ix, xv, 24, 27, 55, 86, 87, 113, 115, 116, 119, 127, 144 et 200.)
- A.K. KASTHURBA : Modification to relevant IS codes on laterite stone block for masonry. *Department of Architecture NIT Clicuta, Kerala, Indian*, 2012. (Cité en page 115.)
- A.K. KASTHURBA et M. SANTHANAM : A re-look into the code specifications for the strength evaluation of laterite stone blocks for masonry purposes. *Journal of The Institution of Engineers (India)*, 86:1 – 6, 2005. (Cité en pages 3 et 115.)
- A.K. KASTHURBA, M. SANTHANAM et H. ACHYUTHAN : Investigation of laterite stones for building purpose from Malabar region, Kerala, SW India - Chemical analysis and microstructure studies. *Construction and Building Materials*, 22(12):2400 – 2408, 2008. ISSN 0950-0618. (Cité en pages 27, 55 et 115.)
- S. KERSTEN, U.S. DEPT. OF COMMERCE. OFFICE OF TECHNICAL SERVICES et UNIVERSITY OF MINNESOTA. ENGINEERING EXPERIMENT STATION AND CLEARINGHOUSE FOR FEDERAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL INFORMATION (U.S.) : *Laboratory Research For the Determination of the Thermal Properties of Soils, Final Report, June 1949*. US Clearinghouse For Fed. Sc. & Tech. Inf. PB. 1966. (Cité en pages xv, 137 et 138.)
- A. KILIÇ et A. TEYMEN : Determination of mechanical properties of rocks using simple methods. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(2):237–244, 2008. ISSN 1435 - 9529. (Cité en page 115.)

- L.C. KING : On the ages of African land-surfaces. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 104(1-4):439–459, 1948. (Cité en page 16.)
- D. KLUITENBERG, K. L. BRISTOW et B. DAS : Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity. *Soil Sci. Soc.*, 50:719–726, 1993. ISSN Amj. (Cité en page 138.)
- A. LACROIX : *Les latérites de la Guinée et les produits d'altération qui leur sont associés*. Nouvelles archives du Museum d'histoire naturelle, 5th series. Masson et Cie, 1914. (Cité en pages 7, 18 et 20.)
- H. LADMIRANT, J.M. LEGRAND et HAUTE-VOLTA REPUBLIQUE PLAN, INDUSTRIE ET MINES (MINISTÈRE). GÉOLOGIE ET MINES (DIRECTION) : *Notice explicative de la carte géologique au 1/200.000 : Houndé*. Direction de la géologie et des mines, 1977. (Cité en pages ix, 39 et 40.)
- J. LAURENT : Propriétés thermiques du matériau terre. *Cahiers du centre scientifique et technique du bâtiment*, 279(2156):1 – 17, 1987. (Cité en page 138.)
- A. LAWANE, A. PANTET, R. VINAI et J.H. THOMASSIN : Etude géologique et géomécanique des latérites de dano (burkina faso) pour une utilisation dans l'habitat. *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, 6:1–10, 2011. ISSN 1270-9840. (Cité en page 175.)
- A. LAWANE, R. VINAI, A. PANTET, J.H. THOMASSIN et A. MESSAN : Hygrothermal features of laterite dimension stones for sub-saharan residential building construction. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, pages 05014002–1–05014002–8, 2014. ISSN 0899-1561. (Cité en page 188.)
- J.B. LEBLOND : *Mécanique de la rupture fragile et ductile*. Études en mécanique des matériaux et des structures. Hermes Science Publications, 2003. ISBN 9782746207516. (Cité en page 125.)
- J. LEMOS : Discrete element modelling of historical structures. *In Conference on New Technologies in Structural Engineering*, pages 1099–1106. Lisbonne (Portugal), 1997. (Cité en page 158.)
- J. C. LEPRUN et R. TROMPETTE : Subdivision du Voltaïen du massif de Gobnangou (République de Haute-Volta) en deux série discordantes séparées par une tillite d'âge éocambrien probable. *In C.R. Acad. Sc.. Paris C. R., Acad. Sc. Paris*, volume 269 D de LNCS, pages 2187–2190. Springer Verlag, 1969. (Cité en pages 34 et 37.)
- J.C. LEPRUN : *Les surfaces ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche. Genèse - Transformation - Dégradation*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg - Institut de Géologie, 1979. (Cité en pages ix, 9, 10, 16 et 37.)

- J. LOPEZ, S. OLLER, E. OÑATE et J. LUBLINER : A homogeneous constitutive model for masonry. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 46(10):1651–1671, 1999. ISSN 1097-0207. (Cité en page 160.)
- J. LORENTIN et J. L'HÉRITEAU : *Etudes bibliographiques des latérites*. BCEOM, Paris, 1962. (Cité en page 21.)
- H.R. LOTFI et P. SHING : Interface model applied to fracture of masonry structures. *Journal of Structural Engineering*, 120(1):63–80, 1994. (Cité en page 159.)
- H.R. LOTFI et P.B. SHING : An appraisal of smeared crack models for masonry shear wall analysis. *Computers & Structures*, 41(3):413 – 425, 1991. ISSN 0045-7949. (Cité en page 158.)
- P. LOURENÇO, R. DE BORST et J. ROTS : A plane stress softening plasticity model for orthotropic materials. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 40(21):4033–4057, 1997. (Cité en page 159.)
- P. LOURENÇO et J. ROTS : Multisurface interface model for analysis of masonry structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(7):660–668, 1997. (Cité en page 158.)
- R. LUCIANO et E. SACCO : Homogenization technique and damage model for old masonry material. *International Journal of Solids and Structures*, 34(24):3191 – 3208, 1997. ISSN 0020-7683. (Cité en page 160.)
- LYON ASSOCIATES : Laterite and lateritic soils. *An engineering study for A.I.D, Inc. BRRI Ghana*, 1971. (Cité en pages 16 et 21.)
- G. MACCHI : Diagnosis of the facade of St. Peter's Basilica in Rome. *In Seminar on Structural Analysis of Historical Construction, 7 - 9 Novembre 2001*, pages 309 – 318. Guimarães, Portugal, 2001. (Cité en page 158.)
- R. MAIGNIEN : *Compte rendu de recherches sur les latérites*. Recherches sur les ressources naturelles. Unesco, 1966a. (Cité en pages 6, 11, 15, 16 et 19.)
- R. MAIGNIEN : *Review of research on laterites*. Numéro 22 in Natural resources research. UNESCO, 1966b. (Cité en pages 6 et 9.)
- M. MAMILLAN : Methods for assessing the deterioration of stone monuments. *In C. Sabioni N.S. BAER et A.I. SORS, éditeurs : Science, Technology and European Cultural Heritage*, pages 90 – 99. Oxford, 1991. (Cité en page 82.)
- A.J. MANDIMBIHARISON, R. RANDRIANJA, E. RASOLOMANANA, H. RAKOTO et Andrianaivo L. : Evolution minéralogique et géochimique du profil latéritique nickélique d'Ambatovy. *Madamines*, 4:1 – 19, 2012. ISSN 2220-0681. (Cité en page 22.)

- J. MARCELIN et J. C. SERRE : *Notice explicative de la carte géologique au 1/200 000. Feuille de Gaoua-Batié*. Edition du BRGM, 31 p, 1971a. (Cité en pages 33 et 34.)
- J. MARCELIN et J.C. SERRE : *Notice explicative de la carte géologique au 1/200 000. Feuille de Banfora-Sindou-Mangodara*. Edition du BRGM, 34 p, 1971b. (Cité en pages 33 et 37.)
- L MARMORET : Exemple de suivi thermique d'une maison expérimentale en bauge mécanisée. *Laboratoire des technologies innovantes, Université Jules Verne de Picardie, Amiens, France*, 2004. (Cité en page 2.)
- J.F. MARTIN et J.C DYNE : Laterite and lateritic soils in Sierra Leone. *The Journal of Agricultural Science*, 17(04):530–547, 1927. (Cité en page 20.)
- G. MARTINET et B. QUÉNÉE : Pierres de construction utilisation, études et diagnostics. *Techniques de l'ingénieur Matériaux : résistance à la corrosion et au vieillissement*, base documentaire : TIB373DUO.(ref. article : cor404), 2014. (Cité en pages 146 et 151.)
- L. MASTERS : Prediction of service life of building materials and components. *Materials and Structures*, 19:417–422, 1986. (Cité en page 150.)
- E. MAZRIA : Resusitating a dying world. In *The 2010 imperative : A global emergency teach-in*. In Architecture 2030, 2007. (Cité en pages 1 et 89.)
- F.A. MCCLINTOCK et A.S. ARGON : *Mechanical behavior of materials*. Addison-Wesley series in metallurgy and materials. Addison-Wesley Pub. Co., 1966. (Cité en page 125.)
- J. MCFARLANE : *Laterite and Landscape*. Acad. Press, 1976. ISBN 9780124844506. (Cité en page 16.)
- K. MCINNES : *Thermal Conductivities of Soils from Dryland Wheat Regions of Eastern Washington*. Washington State University, 1981. (Cité en page 92.)
- J.D. MERLET : Maçonnerie : Conception des ouvrages. *Techniques de l'ingénieur : L'enveloppe du bâtiment*, base documentaire : TIB226DUO.(ref. article : c2102), 2014. (Cité en page 146.)
- E. MÉRY : Equilibre des voûtes en berceau. *Annales des Ponts et Chaussées.*, 1:50–70, 1840. (Cité en page 157.)
- P. MEUKAM, Y. JANNOT, A. NOUMOWE et T.C. KOFANE : Thermo physical characteristics of economical building materials. *Construction and Building Materials*, 18(6):437 – 443, 2004. ISSN 0950-0618. (Cité en page 136.)
- P. MICHEL : *L'Evolution géomorphologique des Bassins du Sénégal et de la Haute-Gambie : ses rapports avec la prospection minière*. Revue de géomorphologie dynamique. B.R.G.M., 1960. (Cité en page 15.)

- P. MICHEL : *Les bassins des Fleuves Sénégal et Gambie : étude géomorphologique*. Mémoire ORSTOM, 63. ORSTOM, 1973. (Cité en pages 15, 16 et 37.)
- P. MICHEL : *Cuirasses bauxitiques et ferrugineuses d'Afrique Occidentale : aperçu chronologique*. Travaux et documents de géographie tropicale, 33. CEGET, 1978. (Cité en page 37.)
- Y. MILLOGO, K. TRAORÉ, R. OUEDRAOGO, K. KABORÉ, P. BLANCHART et J.H. THOMASSIN : Geotechnical, mechanical, chemical and mineralogical characterization of a lateritic gravels of sapouy (burkina faso) used in road construction. *Construction and Building Materials*, 22 (2):70 – 76, 2008. ISSN 0950-0618. (Cité en page 20.)
- G. MILLOT : *Géologie des argiles : altérations, sédimentologie, géochimie*. Masson and Cie, 1964. (Cité en page 15.)
- F. MOLA et R. VITALIANI : Analysis, diagnosis and preservation of ancient monuments : the St Mark's Basilica in Venice. *In 1st International Seminar on Structural Analysis of Historical Construction*. Barcelone (Espagne), 1997. (Cité en page 158.)
- J.J. MOREAU : Cism international centre for mechanical sciences. *In Nonsmooth Mechanics and Applications*, volume 302, pages 1099–1106. Springer, Wien, 1988. (Cité en page 159.)
- E.D. MORGAN, J.F. CLASS et BUREAU OF RECLAMATION DENVER CO. AND UNITED STATES. BUREAU OF RECLAMATION : *Griffith's Theory of Rupture*. Report no. :. Defense Technical Information Center, 1965. (Cité en page 78.)
- E. MÜCKENHAUSEN : *Entstehung, Eigenschaften und Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland*. Frankfurt am Main : DLG Verlags, 1962. (Cité en page 12.)
- A. MUSY et M. SOUTTER : *Physique du sol*. Collection Gérer l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes, 1991. ISBN 9782880742119. (Cité en page 89.)
- D. NAHON : *Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal Occidental et en Mauritanie* :. Etudes géologiques ouest-africaines. Laboratoires des Sciences de la Terre, 1976. (Cité en page 16.)
- D. NAHON : Altérations dans la zone tropicale. signification à travers les mécanismes anciens et/ou encore actuels. *Comptes Rendus Geoscience*, 335(16):1109 – 1119, 2003. ISSN 1631-0713. (Cité en pages ix et 12.)
- D. NAHON et G. MILLOT : Géochimie de la surface et formes du relief. v enfoncement géochimique des cuirasses ferrugineuses par épigénie du manteau d'altération des roches mères gréseuses. influence sur le paysage. *Sci. Géol. Bull.*, 30(4):275–282, 1977. (Cité en page 15.)
- NF EN 1052-1 : *Méthodes d'essai de la maçonnerie - Partie 1 : détermination de la résistance à la compression*. AFNOR, Octobre 1999. (Cité en page 177.)

- NF EN 1097-7 : *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 7 : détermination de la masse volumique absolue du filler - Méthode au pycnomètre* -. AFNOR, Juin 2008. (Cité en page 98.)
- NF EN 12372 : *Méthodes d'essai pour pierres naturelles - Détermination de la résistance à la flexion sous charge centrée*. AFNOR, Mai 2007. (Cité en page 102.)
- NF EN 14617-15 : *Pierre agglomérée - Méthodes d'essai - Partie 15 : détermination de la résistance en compression*. AFNOR, Décembre 2005. (Cité en page 102.)
- NF EN 1936 : *Méthodes d'essai pour pierres naturelles - Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouvertes et totale*. AFNOR, Mai 2007. (Cité en page 97.)
- NF EN 1996 1-1 A1 : *Eurocode 6 - Calcul des ouvrages en maçonnerie - Partie 1-1 : Règles générales pour ouvrages en maçonnerie armée et non armée*. AFNOR, Mars 2013. (Cité en page 146.)
- P. NOUGIER : *Déformation des roches et transformation de leurs minéraux : initiation à la tectonique*. Sciences de la Vie et de la Terre. Ellipses Marketing, 2000. ISBN 9782729849924. (Cité en page 124.)
- O. OJO et N. BROOK : The effect of moisture on some mechanical properties of rock. *Mining Science and Technology*, 10(2):145 – 156, 1990. (Cité en page 86.)
- A. ONAISI : *Mécanismes de rupture d'un bloc percé en mécanique des roches : en relation avec la rupture en parois d'un forage pétrolier*. Institut français du pétrole, 1989. (Cité en page 125.)
- E. OÑATE, A. HANGANU, A. BARBAT, S. OLLER, R. VITALIANI, A. SAETTA et R. SCOTTA. : Structural analysis and durability assessment of historical construction using a finite element damage model. *In Structural Analysis of Historical Construction*, pages 189–224, 1997. (Cité en page 158.)
- F. ÖNER, S. TÜRKMEN, A. ÖZBEK et T. KARAKAYA : Engineering properties of hınıs ignimbrites and their usability as a building stone (Erzurum, Turkey). *Environmental Geology*, 50(2):275–284, 2006. ISSN 0943-0105. (Cité en page 115.)
- M.F OUEDRAOGO et A.E. PROST : Mise en évidence des relations entre schistosités et plissements dans la ceinture volcanique brrimienne de Yako-Batié (Burkina Faso). *In C.R. Acad. Sci.. - Paris*, volume 303 II, pages 1713–1716. C.R. Acad. Sci, 1986. (Cité en page 33.)
- A. OULAHNA : *Etude du comportement du grés rouge de Wildmoor. Application à l'analyse de stabilité d'un forage pétrolier en cours de creusement et de production*. Thèse de doctorat, ENPC, France, 1996. (Cité en page 81.)

- A.W. PAGE : Finite element model for masonry. *Journal of the Structural Division*, 104(8):1267–1285, 1978. (Cité en page 159.)
- G.N. PANDE, J.X. LIANG et J. MIDDLETON : Equivalent elastic moduli for brick masonry. *Computers and Geotechnics*, 8(3):243 – 265, 1989. ISSN 0266-352X. (Cité en page 159.)
- M. PANET, D. FOURMAINTRAUX, B. GAUDIN et ASSOCIATION AMICALE DES INGÉNIEURS ANCIENS ÉLÈVES DE L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES : *La Mécanique des roches appliquée aux ouvrages du génie civil*. Documents de formation continue de l'École Nationale des Ponts et Chaussées. Association amicale des ingénieurs anciens élèves de l'École nationale des ponts et chaussées, 1976. ISBN 9782859780012. (Cité en pages x, 66, 75, 77 et 81.)
- PCD : Plan Communal de Développement de Dano. Rapport technique Rapport N° 4, Mairie de Dano, 2011. (Cité en page 162.)
- J.A. PERSCOTT et P.L. PENDLETON : *Laterite and lateritic soils*. Commonwealth Agricultural Bureaux, 1952. (Cité en pages 7 et 11.)
- B. S. PERSONS : *Laterite : genesis, location, use*. Monographs in geoscience. New York : Plenum Press, 1970. (Cité en pages ix, 11 et 12.)
- J.c. PION : Altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale sèche. étude de quelques toposéquences en haute volta. (57), 1979. (Cité en page 15.)
- PR XP ENV 1996-3 : *Eurocode 6 : calcul des ouvrages en maçonnerie - Partie 3 : méthodes de calcul simplifiées et règles de base pour les ouvrages en maçonnerie (P10-630PR)*. AFNOR, Janvier 2001. (Cité en pages 146, 148, 172, 177, 178, 179, 197 et 222.)
- M. PRAT, ASSOCIATION FRANÇAISE POUR LA CONSTRUCTION et P. BISCH : *La maîtrise de la modélisation des ouvrages : Calcul des ouvrages généraux de construction*. Numéro vol. 1 in AFPC-Emploi des éléments finis en génie civil. Hermès, 1997. ISBN 9782866015817. (Cité en page 156.)
- A. RAFIEE, M. VINCHES et C. BOHATIER : Application of the NSCD method to analyse the dynamic behaviour of stone arched structures. *International Journal of Solids and Structures*, 45(25-26):6269–6283, 2008. (Cité en page 159.)
- J.K. RAJ et R.H. TAYIB : Ultrasonic pulse velocities and elastic moduli of marble cores from the Kuala Lumpur limestone. *Warta Geologi*, 20(6):377–386, 1994. (Cité en page 83.)
- S.P RAYCHAUDHURI : Soil Map of India, outline of soil classification legends. *In First Soil correl. seminairy.*, volume 269 D, pages 60–63. FAO Tashkent, 1962. (Cité en page 11.)

- H. RECKNAGEL, E. SPRENGER-HONMANN et E-R. SCHRAMEK : *Manuel pratique de génie climatique, tome 1*. PYC Editions Livres, 1995. (Cité en page 136.)
- P. RENAULT : Theoretical studies of mercury intrusion in some networks : Testing the applicability of mercury intrusion in the size characterisation of the lacunar pore space of soil samples. *Transport in Porous Media*, 3(6):529–547, 1988. ISSN 0169-3913. (Cité en page 71.)
- G. W. ROBINSON : Some considerations on soil classification. *Journal of Soil Science*, 1(2):150–155, 1950. ISSN 1365-2389. (Cité en page 7.)
- G. ROCCI : Essai d'interprétation des mesures géochronologiques. la structure de l'ouest africain. *In Colloque International de Géochronologie absolue*, volume 10, pages 461–479. Sci. Terre, Nancy, 1965. (Cité en pages ix, 30 et 31.)
- P. ROUTHIER : *Les gisements métallifères : géologie et principes de recherche*. Numéro vol. 1 in Les gisements métallifères : géologie et principes de recherche. Masson, 1963. (Cité en pages 17 et 22.)
- R A SACK : Extension of Griffith's theory of rupture to three dimensions. *Proceedings of the Physical Society*, 58(6):729, 1946. (Cité en page 78.)
- W. SCHELLMANN : A new definition of laterite. *In Banerji P.K (Ed)laterisation processes*, volume 120 de *LNCS*, pages 1–7. Memoir of the Geological Survey India, 1986. (Cité en page 8.)
- W. SCHELLMANN : Discussion of “a critique of the schellmann definition and classification of laterite”. *Catena*, 47(2):479–482, 2003. (Cité en pages 8 et 26.)
- J.B. SCRIVENOR : Laterites. *Géologie Magazine*, pages 24–28, 1930. (Cité en page 7.)
- G. SERET : La notion de pénéplaine à la lumière d'une stratigraphie paléoclimatique du quaternaire intertropical africain et des cuirasses latéritiques. *Acta Geologica Hispanica*, 13(05):145–147, 1978. (Cité en page 34.)
- A. SHAKOOR et C.L. BROWN : Development of a quantitative relationship between unconfined compressive strength and Los Angeles abrasion loss for carbonate rocks. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 53(1):97–103, 1996. ISSN 0074-1612. (Cité en page 77.)
- B. SHIEH-BEYGI et S. PIETRUSZCZAK : Numerical analysis of structural masonry : mesoscale approach. *Computers & Structures*, 86(21-22):1958 – 1973, 2008. (Cité en page 159.)
- K SHONLIN et H. K HILSDORF : The potential durability of concrete. *In The Norway to concrete, Stavanger, Oslo*. the European Rendy mixed concrete Organisation Congress ERMCO 89, 1989. (Cité en page 74.)

- J. SIGG : *Les produits en terre cuites*. Editions Septima, 1991. (Cité en page 50.)
- L. STARKEL : *The role of the inherited forms in the present-day relief of the Polish Carpathians*. V. Gardiner (Ed.), International Geomorphology, Wiley, London, 1986. (Cité en page 150.)
- C.G. STEPHENS : *A Manual of Australian Soils*. Commonwealth Scientific & Industrial Research Organization, 1953. (Cité en page 11.)
- J. SULEM, I. VARDOULAKIS, E. PAPAMICHOS, A. OULAHNA et J. TRONVOLL : Elasto-plastic modelling of Red Wildmoor sandstone. *Mechanics of Cohesive- Frictional Materials*, 4:215–246, 1998. (Cité en page 82.)
- P. SYLVESTRE : *Reconnaissance des bauxites blanches dans la région de Kaya-Kongoussi*. Miltigr. PNUD, 1970. (Cité en page 37.)
- Y. TARDY et C. ROQUIN : Geochemistry and evolution of lateritic landscapes. *In Weathering, soils and paleosols*, Developments in Earth Surface Processes, pages 407–443. Elsevier, 1992. (Cité en page 37.)
- C.L TOURENQ et A. DENIS : La résistance à la traction des roches. Rapport technique Rapport N ° 4, Laboratoires des Points et Chaussées, Ministère de l'équipement et de logement, France, Février 1970. (Cité en page 79.)
- P. TURGUT, M. YESILNACAR et H. BULUT : Physico-thermal and mechanical properties of Sanliurfa limestone, Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(4):485–490, 2008. ISSN 1435-9529. (Cité en page 136.)
- H. VAN EYK : *Recherches dans la région de Kaya. I- Géologie de la région de Kaya-Kongoussi-Yako*. mitigr. Bobo-Dioulasso ; Edition BRGM, 1964. (Cité en page 33.)
- H. VINE : Nigerian soils in relation to parent materials. *Comm. Bur. Soil Science. Tech. comm.*, 42(05):22–29, 1949. (Cité en page 7.)
- R. VYAIN : *Notice explicative de la carte géologique au 1/200000 (feuille Diapaga - Kantachi)*. MPTP BRGM, 1967. (Cité en page 34.)
- J. WATHER : Bericht Über die Resultate einer Reisenache Ostindien in Winter. *Verh. Gesellsch. Erdk.*, pages 318–328, 1989. (Cité en page 7.)
- S. WHITAKER : Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media : A theory of drying. volume 13 de *Advances in Heat Transfer*, pages 119 – 203. Elsevier, 1977. (Cité en page 92.)
- U. WYSS : La construction en “matériaux locaux” : Etat d'un secteur à potentiel multiple. Rapport technique, ICI, Ouagadougou, 2005. (Cité en pages ix, 13, 14 et 23.)

- U. WYSS et H. SAURET : Indicateurs de confort dans la technique de la voûte nubienne. Rapport technique, EPFL, 2007. (Cité en pages ix, 2 et 24.)
- E. YASAR, Y. ERDOGAN et H. GUNEYLI : Determination of the thermal conductivity from physico-mechanical properties. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(2): 219–225, 2008. ISSN 1435-9529. (Cité en page 136.)
- A. ZUCCHINI et P.B. LOURENÇO : A coupled homogenisation-damage model for masonry cracking. *Computers & Structures*, 82(11-12):917–929, 2004. ISSN 0045-7949. (Cité en page 160.)
- A. ZUCCHINI et P.B. LOURENÇO : Mechanics of masonry in compression : Results from a homogenisation approach. *Computers & Structures*, 85(3-4):193 – 204, 2007. ISSN 0045-7949. (Cité en page 160.)

Caractérisation des matériaux latéritiques indurés pour une meilleure utilisation dans l'habitat en Afrique

Résumé : Le bloc de latérite taillée (BLT) est l'un des matériaux en terre les plus utilisés parmi tant d'autres dans les constructions traditionnelles de l'Afrique tropicale où la roche latéritique est en abondance. La demande grandissante du public et des acteurs locaux concernant ces matériaux de construction va actuellement vers un habitat traditionnel à rénover ou contemporain à concevoir pour demain. Cependant, les caractéristiques et les performances de ce matériau sont encore peu connues, ce qui limite son utilisation dans la maçonnerie.

L'objectif de ce travail de thèse est donc de contribuer à la valorisation dans l'habitat de ce matériau traditionnel, universel, économique, à fort potentiel constructif, recyclable, mais considéré aujourd'hui comme un sous produit, voire déchet de carrière pour la terre.

Cette étude réalisée sur les sites d'exploitation de BLT et aux laboratoires est conduite en trois phases. La phase d'étude *in-situ* a permis de décrire la géologie des sites, les profils des quatre carrières d'étude, les techniques d'exploitations locales du matériau et les différents types d'habitat construits avec le BLT. La phase d'études au laboratoire a permis de déterminer la composition chimique et minéralogique, les propriétés physiques et hydriques (masses volumiques, porosité, absorption d'eau), les performances mécaniques (résistance à la compression, à la flexion, module de Young) et thermiques (conductivité thermique, diffusivité). La troisième phase a consisté au suivi du confort thermique (variation d'humidité et de température) dans un bâtiment pilote construite avec le BLT et à l'utilisation des paramètres obtenues dans les essais du laboratoire pour modéliser une maçonnerie en BLT et étudier la faisabilité de construction d'habitations à plusieurs niveaux.

Mots clés : Bloc de latérite taillée, maçonnerie, porosité, vitesse ultrasonore, minéralogie, masses volumiques, résistance à la compression, résistance à la flexion, module de Young, conductivité thermique, suivi hygro-thermique, Eurocode 6.

Characterization of laterite materials for a better utilisation in the African habitat

Abstract : Laterite Dimension Stone (LDS) is one of the most used earth materials for traditional constructions in tropical Africa, where the laterite rock is abundant. There is a growing interest about these materials among local stakeholders, for the maintenance and renovation of existent traditional buildings as well as for the conception and design of future constructions. However, little knowledge exists concerning technical characteristics and performances of this material and this hinder its use in masonry.

The objective of this work is to give a contribution for the fostering of the utilisation of such material, which is traditional, universal, cheap, with high utilisation potential, recyclable, but currently considered as a by-product or waste from quarries.

This study has been carried out in three phases, both at field level (in selected quarries) and at laboratory level. The first phase (in-situ study) allowed the description of (a) the local geology, (b) the geological profiles of four selected quarries, (c) the local utilisation patterns for this material, and (d) the local construction schemes for buildings where LDS are used. The laboratory phase allowed the assessment of the chemical and mineralogical composition of rocks, their physical and hydraulic properties (densities, porosity, water absorption), their mechanical performances (compressive strength, flexural strength, Young's modulus) and their thermal features (thermal conductivity, diffusivity). The third phase consisted in the monitoring of thermal parameters (temperature and humidity) in a pilot LDS building and in the numerical modelling of a masonry building, using the results from phase no. 2 as input parameters, with the aim of investigating the feasibility of the construction of a multi-storey house.

Keywords : Laterite Dimension Stones (LDS), masonry, porosity, ultrasonic velocity, mineralogy, density, compressive strength, flexural strength, Young's modulus, thermal conductivity, hygrothermal features, Eurocode 6.
