



Académie Universitaire Louvain
Ecole Polytechnique de Louvain
Institute of Mechanics, Materials and
Civil Engineering

**Caractérisation et mise en oeuvre des sols argileux
destinés aux matériaux de construction cuits**
Cas de la province du Kasai oriental en République
Démocratique du Congo

Jean SHIMATU Mbuyi

Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de
"Docteur en Sciences de l'Ingénieur"

Membres du jury :

Grégoire Winckelmans (Président iMMC/UCL), Président
Jean-François Thimus (GCE/UCL), Promoteur
Maurice Tshishimbi Buashi (Mines/UM/RDC), Co-Promoteur
Jean-Pierre Tshibangu K. (Génie Minier/UMONS), Membre
Christian Schroeder (LGM-Batir/ULB), Membre
Philippe Sonnet (AGRO/UCL), Secrétaire

Louvain-la-Neuve, Octobre 2012

Dédicace

A mes parents, Ngoie Kibambe et Muisange Kinyama
A Evelyne, Espérant, Franklin, Ruben et Christella Shimatu ;
je vous dédie ce travail pour votre longue patience

Remerciements

Alors que le temps de mettre un terme à cette thèse s’approchait, mes pensées se sont tournées vers ceux qui, de près ou de loin, ont apporté leurs pierres à cet édifice.

Mes remerciements s’adressent à la Coopération Technique Belge qui a mis à notre disposition les moyens nécessaires pour mener cette recherche et particulièrement à tous les gestionnaires de bourses : Sarah Stijnen, Aurélie Vandecruys, Charlotte Standaert, Steven Konkel, Françoise Scyeur, Kasende, Jean-Claude Kakudji, Mowa Kapundu et Patrick Kakwata.

Notre thèse ne serait jamais arrivée à son terme sans un encadrement efficace. Que Jean-François Thimus, promoteur principal, accepte mes remerciements pour ses conseils, sa confiance et sa présence permanente tout au long de ce parcours. Au-delà de ses qualités scientifiques indiscutables, j’ai été particulièrement touché par ses qualités humaines et pour tout cela je dis : merci JFT.

Je remercie également le professeur Maurice Tshishimbi Buashi, copromoteur de cette thèse pour le temps qu’il a accordé à l’avancement de la recherche. Aux côtés des deux promoteurs, je tiens à remercier ceux qui ont vu ma carrière de chercheur grandir depuis le diplôme d’études complémentaires en 2005 jusqu’à la thèse, sept ans après. Il s’agit de Jean-Pierre Tshibangu Katshidikaya et Christian Schroeder, tous deux membres du comité d’accompagnement.

Ce travail a bénéficié des améliorations de fond et de forme, grâce à la dextérité de tous les membres du jury. C’est à ce titre que j’adresse mes remerciements à Grégoire Winckelmans et Philippe Sonnet, respectivement président et secrétaire du jury.

Pour avoir évolué au sein du pôle Génie Civil et Environnemental de l’UCL, il

est temps que j'exprime ma reconnaissance à tout son personnel tant administratif, académique, scientifique que technique. Merci au professeur Alain Holeyman pour le partage de ses connaissances à travers le cours de Géonumérique ainsi que d'autres échanges liés à cette thèse. Je dois ma reconnaissance à Guy Henriët, responsable du LEMSC, pour sa disponibilité et pour m'avoir donné le goût d'explorer les mesures ultrasoniques qui constituent un des chapitres de ce travail. Un remerciement particulier s'adresse à Francis Goffin et Stéphane Gorski, les deux techniciens du laboratoire de mécanique des sols et des roches, pour les différentes manipulations réalisées dans le cadre de ce travail et pour tant de conseils et "trucs" techniques. Je ne saurais oublier de saluer l'apport du secrétariat du pôle, tenu par Viviane Delmarcelle et Marie-Rose Decelle.

J'ai partagé le bureau de l'UCL avec des amis doctorants, tous formidables, avec qui plusieurs échanges ont apporté un plus à ce travail. Je pense à Gustave Mukoko de la RDC, Bertoumieux Jean et Kelly Guerrier, deux collègues haïtiens.

Les résultats de cette thèse viennent également d'analyses réalisées dans différents laboratoires de l'UCL, je tiens à remercier tous les responsables et techniciens de ces différents laboratoires et particulièrement :

- Philippe Sonnet et Anne Iserantant de la plate-forme Analyse Chimique des Matériaux de l'environnement (ACME) pour les analyses chimiques et la diffraction des rayons X ;
- Laurence Ryelandt du laboratoire d'Analyse, caractérisation et mises en oeuvre (LACAMI) pour la microscopie électronique à balayage ;
- L'institut de la matière condensée et des nanosciences (IMCN) pour les analyses thermogravimétriques et thermodifférentielles.

Je remercie également monsieur Bjorn Rasking, responsable des ventes et expéditions à la briqueterie Vandersanden pour m'avoir offert une visite de cette briqueterie, qui m'a permis d'associer la théorie et les réalités du laboratoire à celles de l'industrie. Je pense également et à juste titre, à Jacques Tirlocq de l'Institut interuniversitaire des Silicates, Sols et Matériaux pour les échanges et une visite du laboratoire de l'INISMA.

Ma marque de reconnaissance au promoteur belge du projet interuniversité ciblé "matériaux de construction pour le Kasāï", Jean-Pierre Tshibangu et son ges-

tionnaire local, Sylvain Luboya qui m'ont soutenu matériellement, moralement et financièrement. Je pense également aux jeunes ingénieurs des mines de l'Université de Mbujimayi qui ont accepté, pour leurs travaux de fin d'études, d'aborder un des aspects de ce travail. J'espère qu'ils se retrouveront dans les pages qui suivent.

Que tout le personnel de l'Université de Mbujimayi, ma "maison mère" soit remercié pour les conseils et soutiens dans les moments difficiles de ce parcours. Je pense à Monseigneur Bernard Kasanda, président du conseil d'administration et son comité, le recteur Ghislain Disashi Tumba et le Professeur Tshula Kabongo, secrétaire général. Je n'oublie pas celles qui m'ont documenté à Mbujimayi, maman Nicole et maman Alice, les deux formidables dames de la bibliothèque de l'UM.

J'adresse mes remerciements à Thérèse-Marie Vantuycom qui, en dépit de ces occupations, a accepté de lire ce travail et d'y apporter des améliorations de forme.

Merci à "mon fils" Jean-Pierre Moritz et à Michel Haubert qui, par leur générosité, ont fait de moi un ingénieur.

Enfin, je ne saurais terminer ces remerciements sans une pensée pieuse à celle qui, à mes côtés, a vu ce travail débiter mais qui n'aura pas la chance de le toucher : à toi feu Sidonie Buteka Busambu.

Table des matières

Dédicace	ii
Remerciements	vi
Table des matières	xiii
Liste des figures	xx
Liste des tableaux	xxiv
Résumé	xxvii
Abstract	xxix
1 Objectifs de l'étude	1
1.1 Cadre de l'étude	1
1.2 Contexte de l'étude	2
1.2.1 Sols étudiés	2
1.2.2 Traitement utilisé	2
1.3 Problématique	3
1.4 Approche méthodologique et limites de l'étude	4
1.5 Pourquoi la brique cuite ?	6
1.5.1 Excellent équilibre hydrique	6
1.5.2 Longue longévité	6
1.5.3 Des produits du terroir	7
1.5.4 Meilleur confort thermique et acoustique	7

1.5.5	Meilleure résistance au feu	7
1.5.6	La brique, un matériau écologique	8
2	Géographie, Géologie et Échantillonnage	9
2.1	Géographie	9
2.1.1	Localisation géographique	9
2.1.2	Climat, précipitations	11
2.1.3	Sols	11
2.1.4	Végétation	12
2.1.5	Hydrographie	12
2.2	Géologie	12
2.2.1	Situation générale de la province	12
2.2.2	Formations géologiques du degré carré de Mbujimayi . . .	13
2.3	Echantillonnage	15
2.3.1	Carrière à côté de l'aéroport de BIPEMBA à Mbujimayi .	15
2.3.2	Carrière du polygone de la société MIBA à Mbujimayi . .	15
2.3.3	Carrière de Matshitshi à Muene-Ditu	16
2.3.4	Carrière de Sanguluja à Muene-Ditu	16
2.3.5	Carrières de Kamabue à Muene-Ditu	17
3	Caractérisation minéralogique des sols	19
3.1	Introduction	20
3.2	Les argiles	21
3.2.1	Définition	21
3.2.2	Conditions de formation et stabilité des argiles	22
3.2.3	Nomenclature et classification	23
3.3	Propriétés des argiles	29
3.3.1	Forme et surface spécifique des argiles	29
3.3.2	Capacité d'adsorption d'eau et de gonflement	30
3.3.3	Possibilité d'échange ionique	30
3.4	Analyse des minéraux argileux du Kasaï oriental	34
3.4.1	Introduction	34
3.4.2	Mesure de la Capacité d'Echange Cationique	35

3.4.3	Analyse par diffraction des rayons X	39
3.4.4	Analyses thermiques	52
3.4.5	Microscopie électronique à balayage	60
3.5	Latérites et sols latéritiques	64
3.5.1	Introduction	64
3.5.2	Historique et tentatives de définition	65
3.5.3	Classifications des latérites	67
3.5.4	Répartition des latérites dans le monde	68
3.5.5	Comportement et propriétés des latérites et sols latéritiques	69
3.5.6	Utilisation des latérites	70
3.5.7	Latérites et argiles	70
3.5.8	Rapport Ki et Kr des sols du Kasai oriental	71
3.6	Conclusion	72
4	Caractérisation physico-chimique des sols	75
4.1	Introduction	76
4.2	Analyse granulométrique	77
4.2.1	Introduction	77
4.2.2	Tamissage des sols	78
4.2.3	Sédimentation ou Lévigation	80
4.2.4	Courbes granulométriques des sols	83
4.3	Les limites d'Atterberg	87
4.3.1	Introduction	87
4.3.2	Indice de plasticité et activité	88
4.3.3	Principe de mesure des limites d'Atterberg	89
4.3.4	Limites d'Atterberg des sols du Kasai oriental	90
4.4	Classification des sols	92
4.4.1	Introduction	92
4.4.2	Classification visuelle et par des tests simples	92
4.4.3	Classification unifiée de l'USBR	93
4.4.4	Diagramme de plasticité de Casagrande	94
4.5	Caractéristiques de compactage	95

4.5.1	Introduction	95
4.5.2	Objectifs du compactage	96
4.5.3	Phénomènes observés lors du compactage	96
4.5.4	Essai Proctor	99
4.5.5	Estimation des propriétés de compactage à partir des caractéristiques physiques des sols argileux.	100
4.6	Analyses chimiques de la matière première	103
4.6.1	Introduction	103
4.6.2	Teneur en matières organiques et teneur en chaux	104
4.6.3	Acidité des sols	106
4.6.4	Analyse chimique des éléments	106
4.6.5	Déferriification de l'argile	111
4.7	L'analyse en composantes principales	114
4.7.1	Introduction	114
4.7.2	Principe de l'ACP	114
4.7.3	Données et résultats	116
4.7.4	Interprétation	119
4.7.5	Caractéristiques chimiques	120
4.8	Conclusion	121
5	Comportement hydromécanique des sols	123
5.1	Introduction	125
5.2	Essai de consolidation oedométrique	126
5.2.1	Principe et appareillage	126
5.2.2	Mode opératoire et choix des paramètres	128
5.2.3	Quelques relations importantes	129
5.2.4	Expression des résultats et observations	131
5.3	Essais de perméabilité à l'oedomètre	138
5.3.1	Principe et mode opératoire	138
5.3.2	Calculs et expressions des résultats	139
5.3.3	Observations et interprétations	139
5.4	Essais de compression triaxiale	141

5.4.1	Introduction	141
5.4.2	Principe et appareillage	141
5.4.3	Mode opératoire et choix des paramètres	143
5.4.4	Expression des résultats	145
5.5	Conclusion	153
6	Caractérisation physico-mécanique des briques	155
6.1	Introduction	157
6.2	Préparation de la matière première	158
6.2.1	Broyage et séchage du sol	158
6.2.2	Dosage et mélange	159
6.2.3	Exécution du compactage des sols du Kasai oriental	159
6.3	Séchage des briquettes	162
6.3.1	Théorie du séchage des terres compactées	162
6.3.2	Mode opératoire	165
6.3.3	Caractéristiques physiques après séchage	166
6.4	Cuisson des produits	170
6.4.1	Objectifs de la cuisson	170
6.4.2	Détermination de la température de cuisson des briques en argiles	172
6.4.3	Programme de cuisson	175
6.4.4	Conduite de la cuisson	177
6.4.5	Caractéristiques physiques après cuisson	178
6.5	Caractéristiques mécaniques des briques cuites	183
6.5.1	Introduction	183
6.5.2	Résistance en compression simple	183
6.5.3	Absorption d'eau après 24h	193
6.5.4	Analyse de la sensibilité des caractéristiques mécaniques des briques	196
6.6	Conclusion	201
7	Essais non-destructifs	205
7.1	Introduction	206

7.2	Eléments de propagation d'ondes dans les roches	206
7.2.1	Introduction	206
7.2.2	Notions d'acoustoélasticité	207
7.2.3	Paramètres qui influencent les vitesses ultrasoniques	211
7.3	Matériel et méthodes	213
7.3.1	Matériel	213
7.3.2	Méthodes	214
7.4	Résultats et discussions	214
7.4.1	Valeurs des vitesses ultrasoniques	214
7.4.2	Relations entre les vitesses longitudinales et transversales	217
7.4.3	Relation entre les vitesses avant et après cuisson	218
7.4.4	Relation entre les vitesses ultrasoniques et les résistances entre compression simple	219
7.4.5	Relation entre module statique ou linéaire et modules dy- namiques	220
7.4.6	Influence du choix des transducteurs	223
7.5	Conclusion	226
8	Conclusion et Perspectives d'Avenir	229
8.1	Conclusion Générale	229
8.2	Perspectives d'Avenir	233
	Annexes	235
A	Caractéristiques des sols	237
A.1	Caractéristiques minéralogiques	237
A.1.1	Mode opératoire de mesure de la CEC et des bases échan- geables	237
A.1.2	Mode opératoire de mesure de l'acidité totale	239
A.1.3	Autres diffractogrammes d'argiles du Kasaï oriental	242
A.2	Caractéristiques hydromécaniques	243
B	Caractéristiques des briques	247
B.1	Caractéristiques physiques avant cuisson	247

TABLE DES MATIÈRES	xiii
--------------------	------

B.2	Caractéristiques physiques après cuisson	250
C	Mesures ultrasoniques	257
	Index	264
	Références bibliographiques	279

Table des figures

1.1	Incuits après une cuisson artisanale des briques à Muene-Ditu . . .	4
1.2	Eglise Saint-Jacques Tielen de Tshilomba au Kasai oriental	7
1.3	Bois destiné à la cuisson artisanale des briques	8
2.1	Carte géographique du Kasai oriental (partie Sud)	10
2.2	Carte géologique du degré carré de Mbujimayi	14
2.3	Echantillonnage dans la carrière du polygone Miba à Mbujimayi .	16
2.4	Echantillonnage dans la carrière de Matshitshi à Muene-Ditu . . .	16
2.5	Moule de compactage semi-artisanal dans la carrière de Sanguluja	17
2.6	Echantillonnage dans les carrières de Kamabue	17
3.1	Conditions de formation et de stabilité des minéraux argileux . . .	22
3.2	Structure générale des phyllosilicates	24
3.3	Structure tétraédrique (T) et octaédrique (O)	24
3.4	Agencement des tétraèdres et des octaèdres en feuillet	25
3.5	Classification des minéraux argileux 1/1	27
3.6	Les polytypes 1/1	27
3.7	Classification des minéraux argileux 2/1 dioctaédriques	28
3.8	Forme des particules argileuses	29
3.9	Surfaces externe et interne des particules argileuses	31
3.10	Classification des argiles selon leurs propriétés de gonflement : espèce argileuse, cation dominant, espace basal en condition gly- colées et sèches	31
3.11	Charge de surface des argiles	32

3.12	Modèle de double couche électrique de Helmholtz	33
3.13	Modèle de double couche électrique de Gouy-Chapman	34
3.14	Modèle de triple couche électrique de Leroy et Revil	34
3.15	Principe de mesure de la CEC	36
3.16	Percolation du sol (a) et distillation (b) pour la mesure de la CEC (labo ACME)	37
3.17	Valeurs des CEC des minéraux argileux	38
3.18	Principe de diffraction et illustration de la loi de Bragg	40
3.19	Production des rayons X et exemple de spectre	41
3.20	Ensemble de diffraction	42
3.21	Préparation d'un sol brut pour l'analyse par DRX (labo ACME)	43
3.22	Séchage et analyse DRX des plaquettes orientées d'argile (labo ACME)	44
3.23	Spectre de diffraction : minéraux individuels et mélanges argileux	45
3.24	Diffractogrammes des sols de Mbujimayi	46
3.25	Diffractogrammes des sols de Muene-Ditu	47
3.26	Diffractogrammes de deux argiles du Kasai oriental : Cas de M2 et D2	50
3.27	Diffractogrammes d'argiles saturées au magnésium, solvatées et non-solvatées : cas de l'échantillon M2	50
3.28	Diffractogrammes de l'argile et de l'argile déferriée d'un sol de Mbujimayi : cas de M2	51
3.29	Localisation de l'eau dans les argiles	53
3.30	Variations de température lors d'une analyse thermique différentielle	54
3.31	Courbe de perte de poids lors d'une analyse thermogravimétrique	54
3.32	Schéma de principe et appareil d'analyses thermiques	56
3.33	Analyse thermogravimétrique des échantillons M1, M2, D5 et D6	56
3.34	Analyse thermodifférentielle des échantillons M1, M2, D5 et D6	57
3.35	Relation entre la perte de masse et la fraction argileuse	58
3.36	Dérivée de la masse en fonction du temps	59
3.37	Schéma de principe (a) et appareillage (b) de MEB	60
3.38	Grains de quartz recouverts d'argiles ou non. Échantillon M1	62

3.39	Détail d'une couche d'argile entourant un grain de quartz (a) et agrégats d'argile sous forme de plaquettes (b)	62
3.40	Grains de quartz + plaquettes d'argiles	62
3.41	Micro-analyse électronique (échantillon M1). (a) et (b) : Zone avec Si majoritaire. (c) et (d) : agrégats terreux avec présence de Si, Al, Fe.	63
3.42	Répartition des latérites dans le monde	68
4.1	Tamissage manuel et pesée	79
4.2	Présence de gros grains dans un échantillon de Muene-Ditu	80
4.3	Agitation de la solution défloculée (a) et sédimentation (b) des sols (photos LEMSC)	82
4.4	Courbes granulométriques des sols du Kasai oriental	83
4.5	Relation entre la fraction argileuse et la fraction fine	86
4.6	Evolution de l'état d'un sol en fonction de la teneur en eau. Les limites d'Atterberg [39]	87
4.7	Détermination des limites d'Atterberg (photos LEMSC)	90
4.8	Classification unifiée de l'U.S.B.R	93
4.9	Représentation des sols du Kasai oriental sur le diagramme de Casagrande	94
4.10	Phases du compactage oedométrique	96
4.11	Remontée capillaire dans un tube	98
4.12	Courbe Proctor standard de l'échantillon M2 de Mbujimayi.	100
4.13	Caractéristiques de compactage en fonction de la limite de liquidité	102
4.14	Procédure de filtration (a) et décoloration du sol (b) après attaque à l'HCl (photos LEMSC)	105
4.15	Classification en fonction des matières organiques et de la teneur en chaux	106
4.16	Vue d'un appareil de spectrométrie ICP (photo SOLS)	108
4.17	Déferriification des sols (photo SOLS)	113
4.18	Boxplots des six variables	117
4.19	Variances expliquées par les composantes principales	118

4.20	Représentation des échantillons et essais dans le plan principal . .	118
4.21	Composition chimique des échantillons du Kasai oriental dans le plan principal	120
5.1	Principe de l'oedomètre	126
5.2	Pesée de la bague avec l'échantillon (a) et banc oedométrique (b) (photos LEMSC)	128
5.3	Définition des coefficients de compressibilité et de gonflement . .	130
5.4	Courbe de compressibilité des sols de Mbujimayi	131
5.5	Courbe de compressibilité de deux échantillons de sols de Muene- Ditu	133
5.6	Courbes de compressibilité d'un échantillon de sol de Muene-Ditu	134
5.7	Courbe de consolidation de l'échantillon de l'aéroport de Mbujimayi (Palier 1)	135
5.8	Courbe de gonflement primaire et secondaire des sols de Muene- Ditu	136
5.9	Perméamètre à charge variable dans un oedomètre	139
5.10	Evolution de la perméabilité d'un sol en fonction de sa teneur en eau	141
5.11	Appareillage triaxial - Schéma général et dispositif de chargement	143
5.12	Cercles de Mohr de six échantillons de sols du Kasai oriental . . .	146
5.13	Rapport contrainte effective en fonction du déplacement vertical : cas de l'échantillon D4 de Muene-Ditu	147
5.14	Courbes déviateur de contrainte en fonction de la déformation axiale (Sols de Mbujimayi)	148
5.15	Déviateur en fonction de la déformation axiale : cas des sols de Muene-Ditu	149
5.16	Evolution de la pression interstitielle en fonction de la déforma- tion axiale	150
5.17	Chemin de contraintes et enveloppe des résistances de pics	151
6.1	Etapes d'analyse physico-mécanique des briques	157
6.2	Broyage d'un échantillon de sol	158

6.3	Succession des couches lors du compactage (a) et extracteur (b)	160
6.4	Schéma de mesure des dimensions sur les échantillons cylindriques	160
6.5	Les phases de dessèchement d'après Hillel	163
6.6	Programme de séchage des briquettes compactées	166
6.7	Corrélation entre porosité ouverte après séchage et teneur en eau de fabrication (programme initial)	170
6.8	Exemple de courbe dilatométrique	173
6.9	Programme initial de cuisson des briquettes	177
6.10	Relation entre la variation de la masse volumique après cuisson et la perte au feu à 900°C	182
6.11	Courbe classique contrainte-déformation en compression simple	184
6.12	Schéma de la presse de compression uniaxiale	186
6.13	Affichage de la courbe effort-déplacement lors de l'essai de compression	187
6.14	Courbes $\sigma_1 - \epsilon$ des briques à base de quatre sols du Kasai oriental (programme initial)	188
6.15	Influence de l'immersion dans l'eau suivie d'un séchage (programme initial)	190
6.16	Relations résistance en compression-masse volumique et comparaison aux normes (programme initial)	190
6.17	Relation entre la résistance en compression et le module linéaire	193
6.18	Module sécant et contrainte en fonction de la déformation (programme initial)	194
6.19	Module tangent et contrainte en fonction de la déformation (programme initial)	194
6.20	Influence de la température sur la résistance en compression simple (a) et sur la capacité d'absorption d'eau (b)	197
6.21	Influence du mode de séchage (cas d'une cuisson à 550°C)	198
6.22	Influence du temps de cuisson (cuisson à 900°C)	199
6.23	Influence de la saturation sur les briques cuites à 550°C et 700°C	200
6.24	Influence de la saturation sur les briques cuites à 900°C	200

7.1	Gammes de fréquence des mesures de propagation d'ondes	207
7.2	Représentation des ondes P et S	210
7.3	Dispositif ultrasonique avec mesure diamétrale (a) et longitudi- nale (b)	213
7.4	Relation entre les vitesses transversales et longitudinales	218
7.5	Relation entre vitesses avant et après cuisson à 900°C	219
7.6	Relation vitesse et résistance en compression simple (cuisson à 900°C)	220
7.7	Relation entre les différents modules pour une cuisson à 900°C	223
7.8	Mesures ultrasoniques avec transducteurs en formes de disques sur le cylindre étalon	224
7.9	Corrélation entre les vitesses obtenues avec différents transducteurs	225
A.1	Percolation du sol : succession des couches	238
A.2	Colonne de percolation pour acidité totale échangeable	240
A.3	Autres diffractogrammes d'argiles de Muene-Ditu	242
A.4	Courbes de compressibilité des sols de Kamabue Ouest	243
A.5	Courbes de compressibilité des sols D5 et D6	244
A.6	Suivi de la consolidation de l'échantillon D1 de Muene-Ditu	245
B.1	Caractéristiques des briques à base d'argile alluviale	252
B.2	Caractéristiques des briques cuites à base de limons éoliens	253
B.3	Module sécant et contrainte en fonction de la déformation (pro- gramme initial-suite)	254
B.4	Module tangent et contrainte en fonction de la déformation (pro- gramme initial-suite)	255

Liste des tableaux

3.1	Surface spécifique des particules argileuses	30
3.2	CEC des sols du Kasai oriental (en meq/100g)	38
3.3	Acides et bases échangeables des sols de Mbujimayi	39
3.4	Paramètres du diffractomètre	43
3.5	Composition minéralogique semi-quantitative des échantillons . .	52
3.6	Relation perte de masse à l'ATG et fraction argileuse	58
3.7	Ki et Kr des sols de Mbujimayi et de Muene-Ditu	71
4.1	Pourcentage des passants aux différents tamis pour les 8 échan- tillons du Kasai oriental	79
4.2	Résultats de sédimentation sur l'échantillon D1 de Muene-Ditu . .	82
4.3	Caractéristiques granulométriques de 9 échantillons de sols du Kasai oriental	84
4.4	Caractéristiques granulométriques de 6 échantillons par la mé- thode de la résine	85
4.5	Limites d'Atterberg et activités de 9 sols du Kasai oriental. NP : non-plastique	91
4.6	Plages des limites d'Atterberg pour les briques de terre cuite . . .	91
4.7	Classification unifiée des sols du Kasai oriental	94
4.8	Caractéristiques des principaux essais Proctor	99
4.9	Caractéristiques Proctor modifié de huit échantillons de sols du Kasai oriental	103
4.10	Composition en matières organiques et en chaux	104
4.11	Acidité des sols de Mbujimayi	106

4.12	Composition chimique en oxydes, en pourcentage poids	110
4.13	Analyse chimique de la solution après DCB	113
4.14	Caractéristiques d'identification des sols du Kasaï oriental	116
5.1	Caractéristiques initiales à l'oedomètre	128
5.2	Paramètres de compressibilité de trois échantillons de sols du Kasaï oriental	136
5.3	Paramètres de gonflement des échantillons de Muene-Ditu	138
5.4	Valeurs des potentiels et pressions de gonflement	138
5.5	Caractéristiques hydrauliques de 9 échantillons de sols du Kasaï oriental	140
5.6	Paramètres des essais triaxiaux des échantillons du Kasaï oriental	144
5.7	Angles de frottement et cohésion des sols du Kasaï oriental	147
5.8	Paramètres de la droite intrinsèque de Lambe pour 9 échantillons de sols du Kasaï oriental	152
6.1	Teneurs en eau de façonnage des briquettes (programme initial)	159
6.2	Densités et poids volumiques secs après compactage (programme initial)	161
6.3	Densités des éprouvettes après compactage, regroupées par sites (programme initial)	161
6.4	Retraits volumiques des échantillons après séchage à l'étuve (programme initial)	167
6.5	Densités, poids volumiques et variations de la densité apparente après séchage (programme initial)	168
6.6	Variations de la densité apparente après séchage, regroupées par sites (programme initial)	168
6.7	Estimation de la porosité ouverte après séchage (programme initial)	169
6.8	Porosités ouvertes après séchage, regroupées par sites (programme initial)	169
6.9	Variations volumiques après cuisson à 900°C	178
6.10	Variations volumiques après cuisson à 900°C, regroupées par sites	178
6.11	Variations volumiques totales	179

6.12	Variations volumiques totales après cuisson à 900°C, regroupées par sites	179
6.13	Pertes au feu des échantillons du Kasai oriental, cuits à 550, 700 et 900 °C	180
6.14	Pertes au feu à 900°C des échantillons du Kasai oriental, regroupés par sites	180
6.15	Densités, poids volumiques et variations de densité apparente après cuisson à 900°C	181
6.16	Variations de densité apparente après cuisson à 900°C, regroupées par sites	182
6.17	Résistances en compression simple et modules linéaires des briquettes (programme initial)	189
6.18	Valeurs d'absorption des briques cuites après 24 h (programme initial)	195
7.1	Valeurs usuelles de vitesses ultrasoniques suivant les plages de densité	212
7.2	Vitesse ultrasonique avant et après cuisson à 900°C	215
7.3	Vitesses ultrasoniques avant et après cuisson à 900°C, regroupées par sites	216
7.4	Résistances en compression simple et modules de briques cuites à 550°C	221
7.5	Résistances en compression simple et modules de briques cuites à 700°C	222
7.6	Résistances en compression simple et modules de briques cuites 900°	222
7.7	Valeurs des vitesses ultrasoniques avec transducteurs différents	224
B.1	Teneurs en eau de compactage des briques (autres cuissons)	247
B.2	Densités et poids volumiques secs après compactage des briques (autres cuissons)	247
B.3	Retraits volumiques après séchage à l'étuve (autres cuissons)	248
B.4	Densités et poids volumiques après séchage (autres cuissons)	248

B.5	Variations de la densité apparente après séchage (autres cuissons) .	249
B.6	Estimation de la porosité ouverte après séchage (autres cuissons) .	249
B.7	Variations volumiques après cuisson (autres cuissons)	250
B.8	Densités et poids volumiques après cuisson (autres cuissons) . . .	250
B.9	Variations de la masse volumique apparente après cuisson (autres cuissons)	251
C.1	Vitesses ultrasoniques avant et après cuisson à 550°C	257
C.2	Vitesses ultrasoniques avant et après cuisson à 700°C	258

Résumé

L'objet de cette thèse est d'analyser et de comprendre la nature et le comportement de quelques sols du Kasai oriental, afin de proposer des solutions pour leur utilisation comme terre à briques. L'étude s'est limitée à la plage des températures comprises entre 550° et 900°C. Dans cette plage, la cuisson à 900°C serait la plus adaptée aux réalités climatiques de la province.

Huit échantillons de sols ont été prélevés à Mbujimayi et Muene-Ditu, deux grandes villes de la province du Kasai oriental. Ces échantillons sont répartis en trois sites : Mbujimayi, Luetet et Nduba. Les analyses minéralogiques, chimiques, géotechniques et mécaniques ont été conduites dans plusieurs laboratoires de l'Université catholique de Louvain en Belgique.

Les résultats de ces analyses ont montré que tous les trois sites contiennent des sols susceptibles d'être utilisés en briqueterie avec une nécessité d'amélioration pour quelques sols. Un sol de Mbujimayi et un autre de Muene-Ditu présentent des caractéristiques totalement inadaptées à la production de briques de qualité acceptable.

Ce travail fournit également des caractéristiques hydromécaniques des sols, indispensables aux études de leur comportement pendant les phases d'exploitation des carrières à briques et de construction d'ouvrages de génie civil.

Des mesures ultrasoniques ont également été réalisées afin d'ausculter le degré de fissuration des briques pendant les différentes étapes de leur élaboration. En plus de l'influence de la microfissuration, elles révèlent la bonne corrélation entre les propriétés acoustiques des briques et leurs résistances en compression simple.

Abstract

This thesis focuses on the analysis and good understanding of the nature and behavior of Kasai oriental soils (DRC), and aims to propose solutions to their use in clay bricks manufacturing. The study is limited to the temperatures from 550°C up to 900°C. In this range, firing at 900°C would be suitable to kasaien climate realities.

Eight soil samples were collected at Mbujimayi and Muene-Ditu, two major cities of the province. All samples are divided into three sites : Mbujimayi, Luetet and Nduba. Geotechnical, chemical, mineralogical and mechanical analyses were conducted at the Université catholique de Louvain in Belgium.

They showed that all sites contain suitable soils for clay bricks manufacturing. Nevertheless, some soils need to be improved for their brick quality by additives. Two soils (one for Mbujimayi and another for Muene-Ditu) are completely unsuitable for producing acceptable quality bricks.

Our studies also provide hydromechanical characteristics of soils which are important to understand their behavior during mining processes and other civil engineering works.

Ultrasonic tests were also conducted in this work to auscultate the degree of cracking of bricks during the different stages of development. In addition to the influence of microcracking, they show a good correlation between acoustic properties of bricks and their uniaxial compressive strengths.

Chapitre 1

Objectifs de l'étude

1.1 Cadre de l'étude

La volonté de construction d'une ville conduit au développement des infrastructures telles que les routes, les bâtiments et les ouvrages d'art dont l'implantation requiert l'utilisation des géomatériaux. Ces matériaux doivent répondre aux besoins économiques de la population tout en satisfaisant certains critères techniques.

Compte tenu de la nature des terrains rencontrés au Kasai Oriental, ces structures sont souvent réalisées à partir des sols qui nécessitent un traitement particulier pour répondre aux caractéristiques mécaniques demandées. L'obtention de ces caractéristiques dépend d'une part de la nature ou du type du sol utilisé et d'autre part des agents stabilisants. Les techniques de traitement des sols en vue d'améliorer leurs caractéristiques sont multiples et leur application nécessite toujours une connaissance approfondie des propriétés des matériaux de base. Cependant certaines de ces méthodes peuvent rencontrer des difficultés de réalisation dans des contextes socio-économiques particuliers.

L'Université de Mbuji-Mayi, la Faculté Polytechnique de l'Université de Mons, l'Université catholique de Louvain et l'Université de Liège ont initié un projet interuniversitaire ciblé (PIC) dans la province du Kasai oriental en RDC sur les matériaux de construction dont les objectifs principaux sont :

1. L'analyse des potentialités de la province en matériaux de construction

2. L'acquisition des équipements et l'installation d'un laboratoire d'expertise dans le domaine de la mécanique des matériaux
3. La faisabilité de quelques installations pilotes.

L'un des volets de ce projet concernait les produits de cuisson. Il constitue l'objet du présent travail.

1.2 Contexte de l'étude

1.2.1 Sols étudiés

Les sols auxquels nous nous intéressons dans ce travail sont des sols argileux. Ceux-ci présentent en effet certaines propriétés (rétention, plasticité, gonflement, retrait, durcissement à la cuisson,...) qui font d'eux une cible pour l'utilisation comme matériaux de construction tant cuits que non-cuits. Nous allons pour se faire nous intéresser à certaines zones de la province du Kasaï oriental où ce type de sol est présent. Cependant, l'histoire géologique de cette province signale une très faible proportion de sol argileux, ce qui rend la tâche ardue. Pour cette raison, nous comptons également étendre l'étude aux sols latéritiques dont la différence avec les argiles réside au niveau de l'histoire géologique et de la granulométrie plutôt qu'au niveau des constituants minéralogiques. En effet, la modification de la structure de certaines latérites non-argileuses par des procédés mécaniques, afin de les rendre plus fines et cohésives, leur confère des propriétés voisines de celles des argiles [101].

1.2.2 Traitement utilisé

Nous nous proposons d'analyser dans ce travail les effets d'un traitement thermique. Il s'agit d'étudier l'évolution des caractéristiques physico-mécaniques des produits après cuisson à différentes températures. L'influence d'autres paramètres tels que le temps de cuisson et la saturation sera également analysée.

En matière d'électrification, la province du Kasaï oriental est l'une des moins avancées du pays. Il résulte de ce constat que la production des produits de cuisson économiquement rentables passe également par un bon choix de la source

d'énergie à utiliser.

L'objet de ce travail est donc de comprendre les différents processus mis en jeu lors des étapes conduisant à la cuisson, ainsi que les réponses des matériaux utilisés afin d'aboutir à un choix de la matière première, des moyens et méthodes de production des matériaux associant au mieux les contraintes économiques, techniques et environnementales. Une connaissance approfondie du matériau de base s'avère indispensable pour atteindre cet objet.

1.3 Problématique

Le Kasai est parmi les provinces de la RDC où le prix des matériaux de construction est le plus élevé. Un sac de ciment, par exemple, coûte quatre à cinq fois plus cher que dans la province du Katanga, au Sud du pays. Il en est de même des autres matériaux de construction (tuiles, tôles ondulées,...). La cause principale est la dépendance de cette province ; aucun de ces matériaux de construction n'est produit localement. La solution la plus efficace à ce problème serait de se tourner vers les matériaux de construction produits localement et l'un d'eux est la brique de terre cuite.

Comme souligné plus haut, les sols argileux et/ou latéritiques sont utilisables comme matière première dans la production de briques de terres cuites. Certaines villes et cités de la province les utilisent déjà après une production artisanale ou semi-artisanale. Le constat est le suivant :

- Le choix du type de sol paraît très arbitraire. Il en est de même des différents mélanges sol-sol ou sol-eau ;
- Les sources de matière première (termitières en général) sont insuffisantes pour une exploitation à grande échelle afin de satisfaire les besoins de la province ;
- Après cuisson, le pourcentage d'incuits est non négligeable ce qui conduit à un gaspillage de temps, d'énergie et d'argent (Figure 1.1) ;
- Une résistance faible des produits cuits qui se manifeste par la quantité élevée de casses lors des opérations de manutention ;
- Une pollution atmosphérique et un danger de désertification de la province

suite à la source d'énergie utilisée, le charbon de bois.

Les terres à briques existent au Kasai oriental et ont déjà été utilisées pour les besoins locaux et proviennent soit de la terre de termitières, soit du limon d'altération des roches granitiques aux flancs de vallées [127].



FIGURE 1.1 – Incuits après une cuisson artisanale des briques à Muene-Ditu

La brique de terre cuite apparaît donc comme une solution au problème du coût élevé de la construction au Kasai oriental mais sa production, surtout sur le plan industriel, nécessite une connaissance très approfondie des caractéristiques de la matière première à utiliser, caractéristiques non clairement connues à ce jour.

1.4 Approche méthodologique et limites de l'étude

Ce travail entre dans le cadre de la compréhension et de la caractérisation des mécanismes conduisant à la cuisson des sols argileux. Notre étude se veut de prolonger les travaux dans le domaine de la cuisson des sols argileux en offrant le cas de la province du Kasai oriental en RDC, particulièrement les villes de Mbujimayi et Muene-Ditu.

Nous avons choisi de travailler sur des sols naturels plutôt que des sols reconstitués. Ce choix introduit directement des difficultés car un sol naturel est un milieu complexe, il y a donc nécessité d'une caractérisation approfondie de ces sols avant leur traitement. Le projet devant avoir un impact social, nous avons choisi de travailler d'abord sur les sols déjà utilisés par la population pour étendre ensuite l'étude aux sols potentiellement utilisables.

Pour bien comprendre les différents mécanismes, nous avons opté pour une approche multi-échelle [36]. Cette approche consiste à déterminer les caractéristiques mécaniques, structurales et physico-chimiques des sols avant et après traitement. Des études géotechniques devront être menées selon les recommandations et normes internationales en la matière ou selon des protocoles expérimentaux spécifiques pour nous renseigner des propriétés à l'échelle macroscopique. Ces observations macroscopiques seront interprétées à la lumière d'observations chimiques, minéralogiques et microstructurales. Des outils de laboratoire tels que la microscopie électronique à balayage (MEB), la diffraction des rayons X (DRX), les analyses thermogravimétriques (ATG) et thermodifférentielles (ATD), ... nous permettront d'établir cette relation entre les échelles macroscopique et microscopique.

Pionnier dans la caractérisation des sols du Kasaï, ce travail sera complété par la connaissance d'autres paramètres non-directement associés à la cuisson des argiles à travers les essais mécaniques sur sols (oedomètres, perméamètres, essais triaxiaux). Ces paramètres, en plus de fournir un complément d'informations sur le comportement hydromécanique macroscopique des sols concernés, seront utiles dans les travaux futurs sur ces sols parmi lesquels le dimensionnement des fondations, le calcul de la stabilité des talus, etc.

Les sols traités devront être comparés entre eux. Cette condition impose de choisir un mode de prélèvement, de préparation et de traitement commun à tous les sols sélectionnés.

Cette démarche méthodologique pointue avec une base de données aussi élargie fera appel aux moyens et expertises des laboratoires universitaires. Elle vise principalement une production industrielle de la brique cuite bien qu'elle peut servir de guide aux exploitations artisanales et semi-artisanales.

Dans le cas des chantiers, en plus des essais classiques, nous envisageons également de développer des essais simples à mettre en oeuvre et à interpréter dans le but d'identifier rapidement les sols adaptés ou inadaptés au traitement.

1.5 Pourquoi la brique cuite ?

Cette question requiert une attention particulière dans un environnement international et régional à forte concurrence. Il y a plusieurs raisons qui militent en faveur des briques cuites, en voici les principales ¹ :

1.5.1 Excellent équilibre hydrique

Dans un climat tropical très humide, de par son caractère résistant à l'humidité, la brique est le matériau de construction par excellence. Aucun matériau ne résiste mieux à l'humidité. Les briques peuvent absorber l'eau et la dégager, sans que leur stabilité en soit affectée. Leur haute teneur tampon fait que moins d'humidité pénètre dans les pores, tandis que l'eau qu'absorbent les briques s'évapore très vite. Grâce à sa perméabilité à la vapeur et sa capacité tampon, la brique peut servir de régulateur d'humidité. Elle peut temporairement emmagasiner l'excès d'humidité (p.ex. par diffusion/condensation) pour le faire évaporer ultérieurement, sans risque d'affecter la force portative ou la durabilité.

1.5.2 Longue longévité

La brique résiste très bien aux influences climatiques et aux conditions atmosphériques. De nombreux bâtiments datant de l'Antiquité ou de l'époque romaine sont restés pratiquement intacts jusqu'à nos jours. Pour les façades d'avant 1900, il s'avère que 89% ont été construites en briques et que presque 49% se trouvent encore dans leur état original. Des études ont démontré également que les briques ont une longévité de plus de 150 ans. Sur toute la durée de vie des briques, leur stabilité reste quasiment constante et les maisons en briques nécessitent peu d'entretien, de réparation ou de remplacement. Ce qui fait de la brique un des matériaux les plus faciles à entretenir. La figure 1.2 montre une église construite en briques cuites et tuiles depuis 1848 dans un village à plus de 15 km de la ville de Muene-Ditu dans la province du Kasai oriental et qui se trouve encore en parfait état à l'heure actuelle.

1. <http://www.wienerberger.be>



FIGURE 1.2 – Eglise Saint-Jacques Tielen de Tshilomba au Kasai oriental

1.5.3 Des produits du terroir

Les produits en terre cuite sont fabriqués à base de matières premières qui sont présentes dans le sol kasaien. L'argile peut être exploitée localement, ce qui aura un effet positif sur l'économie par la réduction du coût de construction et du chômage dans la province sans oublier le renforcement de son autonomie.

1.5.4 Meilleur confort thermique et acoustique

Le confort thermique dans une maison en brique cuite est bien meilleur. Grâce au fonctionnement tampon, il existe moins de fluctuations de température. La masse d'une paroi en briques emmagasine la chaleur pendant la journée et la rend lentement pendant la nuit. En conséquence, des fluctuations extrêmes de température ne se manifestent pas, ni en saison froide, ni en saison chaude, évitant ainsi des risques de surchauffe.

Le caractère massif des produits en terre cuite contribue également à un bon confort acoustique. Des murs en briques de parement et blocs pour murs intérieurs ont d'excellentes caractéristiques d'insonorisation.

1.5.5 Meilleure résistance au feu

Ayant déjà été soumises à des hautes températures, les briques sont complètement ininflammables. Elles appartiennent à la classe de résistance au feu la plus

sévère, c'est-à-dire la classe A_0 (norme européenne A1). De plus, même en cas d'incendie la maçonnerie n'émet pas de gaz nocifs.

1.5.6 La brique, un matériau écologique

Pour une paroi en blocs céramiques pour murs intérieurs, la pression environnementale ne représente qu'une fraction de celle du mortier et du plâtre. De plus, les matériaux de l'industrie de la brique sont presque totalement recyclables pour leur réutilisation dans plusieurs autres secteurs. Beaucoup de matériaux de construction sont actuellement importés d'autres provinces et de l'extérieur du pays, alors que le transport et son rejet de CO_2 contribuent en effet largement à une mauvaise empreinte écologique.

Il convient de signaler que l'exploitation artisanale et semi-artisanale actuellement utilisée en République Démocratique du Congo et au Kasai oriental en particulier devrait significativement être améliorée. En effet, cette exploitation utilise le charbon de bois comme combustible (Figure 1.3), ce qui a pour conséquence d'accentuer la désertification dans une région déjà peu boisée et une forte émission de gaz à effet de serre lors de la cuisson. L'utilisation d'un combustible moins polluant s'impose.



FIGURE 1.3 – Bois destiné à la cuisson artisanale des briques

Chapitre 2

Géographie, Géologie et Échantillonnage

2.1 Géographie

2.1.1 Localisation géographique

La province du Kasai oriental a été créée par l'ordonnance n°66/205 du 6 avril 1966. Elle est située au centre de la République Démocratique du Congo entre les parallèles 1°43' et 8° de latitude Sud et entre les méridiens 21°47' et 26°17' de longitude Est. Elle est limitée au Nord par les provinces de l'Equateur et Orientale, à l'Est par la province du Maniema, au Sud par le Katanga et à l'Ouest par le Kasai occidental. Le Kasai oriental couvre une superficie de 173.110 km^2 , soit environ 7% de la superficie totale du pays. La majeure partie de la province est située à une altitude variant entre 450 et 900 m suivant une direction Nord-Ouest et Sud-Est [50].

Ce travail s'intéresse particulièrement à deux villes de la province, il s'agit de Mbuji-Mayi, le chef lieu de la province ainsi que la ville de Muene-Ditu (Figure 2.1).

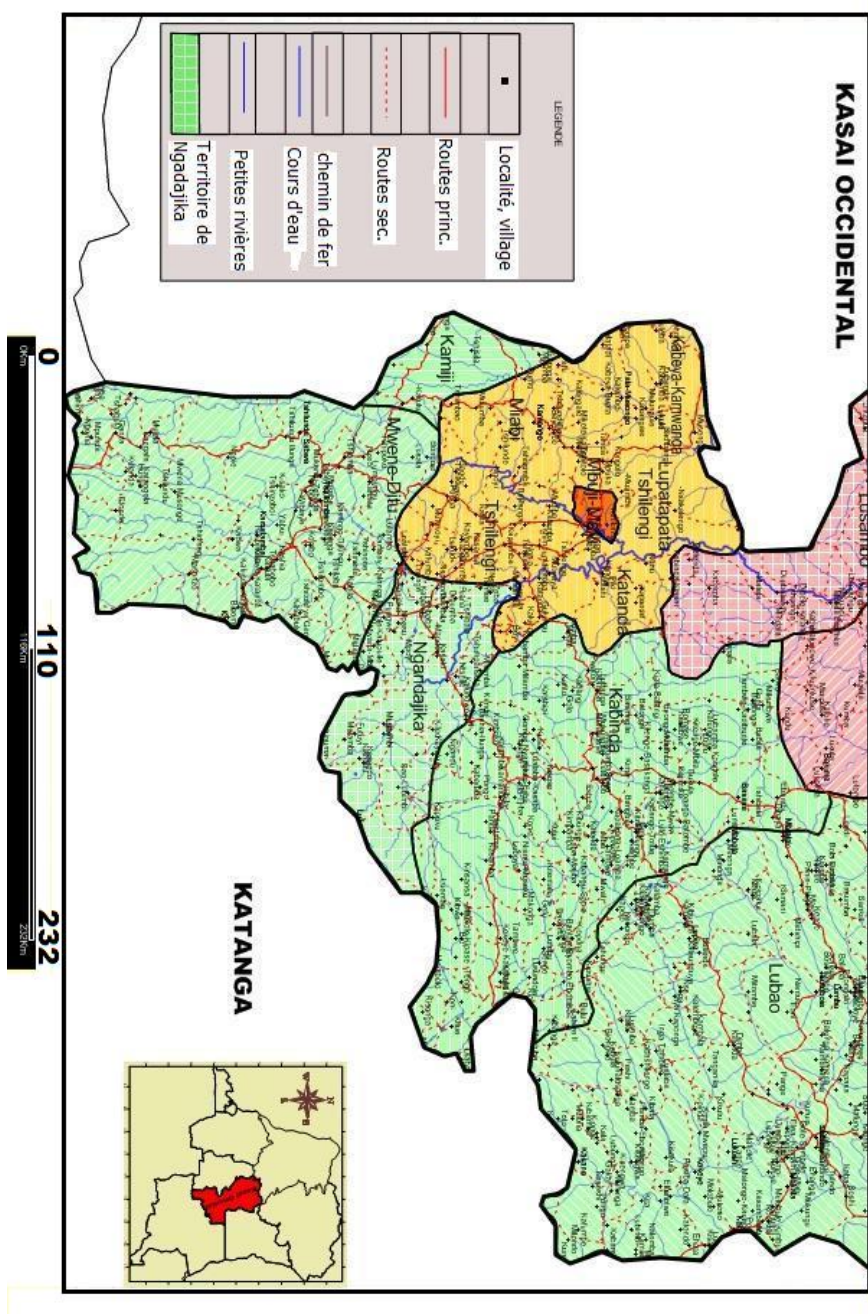


FIGURE 2.1 – Carte géographique du Kasai oriental (partie Sud) ^a

a. Extrait de <http://rdcmaps.centerblog.net/9-1a-province-du-kasai-oriental>

2.1.2 Climat, précipitations

Le climat de la province du Kasai oriental appartient au type A de la classification de KOPPEN. C'est un climat tropical humide à pluviosité accentuée où la température diurne du mois le plus froid est supérieure à 18°C. La température moyenne annuelle varie entre 25°C dans le Nord et 22,5°C dans le Sud de la province. Les différences entre les températures diurnes et nocturnes atteignent jusqu'à 18° en territoire de Muene-Ditu.

Les précipitations annuelles moyennes diminuent du Nord au Sud et passent de 2000 mm au Nord de Lomela à 1500 mm à Muene-Ditu avec environ 110 jours pluvieux par an. On rencontre d'une manière générale deux saisons de pluies bien marquées : de janvier-février à avril et de septembre à décembre. Dans le Nord de la province, un ralentissement des pluies apparaît au cours de la période de mai à juillet.

2.1.3 Sols

La province du Kasai oriental comprend trois grands groupes de sols appartenant à l'ordre des kaolisols selon la classification de l'INEAC¹ [50]. Les sols de la plus grande partie de la province appartiennent au groupe des Anéoferrals (sur sable du kalahari). Ce sont des sols avec des teneurs en argile inférieures à 20%, sans réserve minérale, à rapport limon/argile faible et profondément lessivés. Les ferrisols (sur roches Karoo) sont présents dans le Nord-Est (vallée de la Lomami). Ces sols ont un rapport limon/argile élevé en moyenne, une bonne structure et/ou une réserve minérale appréciable. Les sols du Sud de la province appartiennent au groupe des ferralsols (sur roches non-différenciées) avec des teneurs en argile de plus de 20%, sans ou avec une faible réserve minérale, sans structure et à faible rapport limon/argile. Les Rénoferalls (de la savane) du groupe des Arenoferrals se retrouvent en grande partie dans le district de Kabinda.

1. Institut national pour l'étude agronomique du Congo

2.1.4 Végétation

Du point de vue phytogéographique, la province est couverte par deux principales formations végétales : la forêt au Nord et la savane au Sud. La zone forestière comprend les forêts ombrophiles sempervirentes rencontrées dans le Nord du district du Sankuru et les forêts mésophiles semi-caducifoliées, formation de transition où les précipitations sont de l'ordre de 1600 à 1800 mm. Les savanes occupent le reste de la province où la hauteur des pluies varie entre 1400 et 1500 mm. La végétation varie suivant la nature du terrain, elle est dominée d'hyparrhénia sur sol sableux et d'imperata sur les sols lourds. Le taux de boisement est très faible.

2.1.5 Hydrographie

La province du Kasai oriental comprend deux principaux bassins hydrographiques : le Sankuru et la Lukenie. Le Sankuru (affluent du Kasai) est alimenté par les rivières orientées Sud-Nord : Mbujimayi, Lubi, Luilu, Lubilanji, Lubefu. La Lukenie est alimentée quant à elle par la Lomela, la Tshuapa, la Salonga et la Lomami [50].

Des auteurs ont émis l'hypothèse que le réseau hydrographique actuel se serait, en partie, ajusté à une topographie fossile précrétacique [72].

2.2 Géologie

2.2.1 Situation générale de la province

Quatre grandes formations géologiques sont à la base de la formation des sols de la province du Kasai oriental. A partir du socle ancien, plusieurs systèmes se superposent dans l'ordre suivant : le système de la Lulua, le système précambrien de la Mbujimayi, le système précambrien du Karroo secondaire et du Kalahari (tertiaire).

Le système du Kalahari et celui du Post-Karoo dominant nettement au Nord du parallèle 5°30'. Plus au Sud, affleurent les couches du Karroo, puis de Mbujimayi et de la Lulua. A partir du septième parallèle, c'est principalement le système

de la Lulua qui apparaît dans les vallées qui découpent le relief de la province. Les dépôts récents (Kalahari) sont des sables fins plus ou moins argileux couvrant une partie importante de la province du Kasai oriental et formant une couverture épaisse et continue au Nord du parallèle 5°30' [50].

Le présent travail s'intéresse principalement à la région géologique couverte par le degré carré de Mbujimayi qui est présenté à la Figure 2.2.

2.2.2 Formations géologiques du degré carré de Mbujimayi

2.2.2.1 Les formations de couverture

Les formations de couverture, en couches horizontales ou très faiblement inclinées sont constituées principalement d'alluvions holocènes de basses terrasses, des sables et graviers plio-pléistocènes occupant les aplanissements d'érosion, des sables ocres du néogène ainsi que des grès polymorphes. Dans les zones occupées par les formations carbonatées du supergroupe de Mbujimayi, l'argile (10 à 20%) est mélangée à des sables gris contenant des débris de roches dolomitiques ; les sols sont caillouteux et montrent souvent des grenailles latéritiques. Des roches kimberlitiques apparaissent entre les rivières Lubi et Mbujimayi et sont à l'origine de la grande minéralisation en diamants industriels de la région. La brèche kimberlitique contient une grande quantité de matériaux étrangers provenant des formations traversées par l'intrusion. Elle contient entre autre de nombreux fragments de la kimberlite primaire, ramenés des zones profondes [72].

2.2.2.2 Les formations du soubassement

Le soubassement comprend de haut en bas (Figure 2.2) : Le supergroupe de Mbujimayi (calcaires et dolomies variées), le complexe de Lulua (quartzites, roches vertes), le complexe de Luiza (micaschistes, quartzites micacés), le complexe de Dibaya (granites, migmatites) et le complexe de Kanda-Kanda (tonalites, granodiorites, granites, roches basiques). Le socle de la ville de Muene-Ditu repose sur des gneiss migmatitiques de composition granitique à tonalitique et de texture pyroclastique à hétéroblastique.

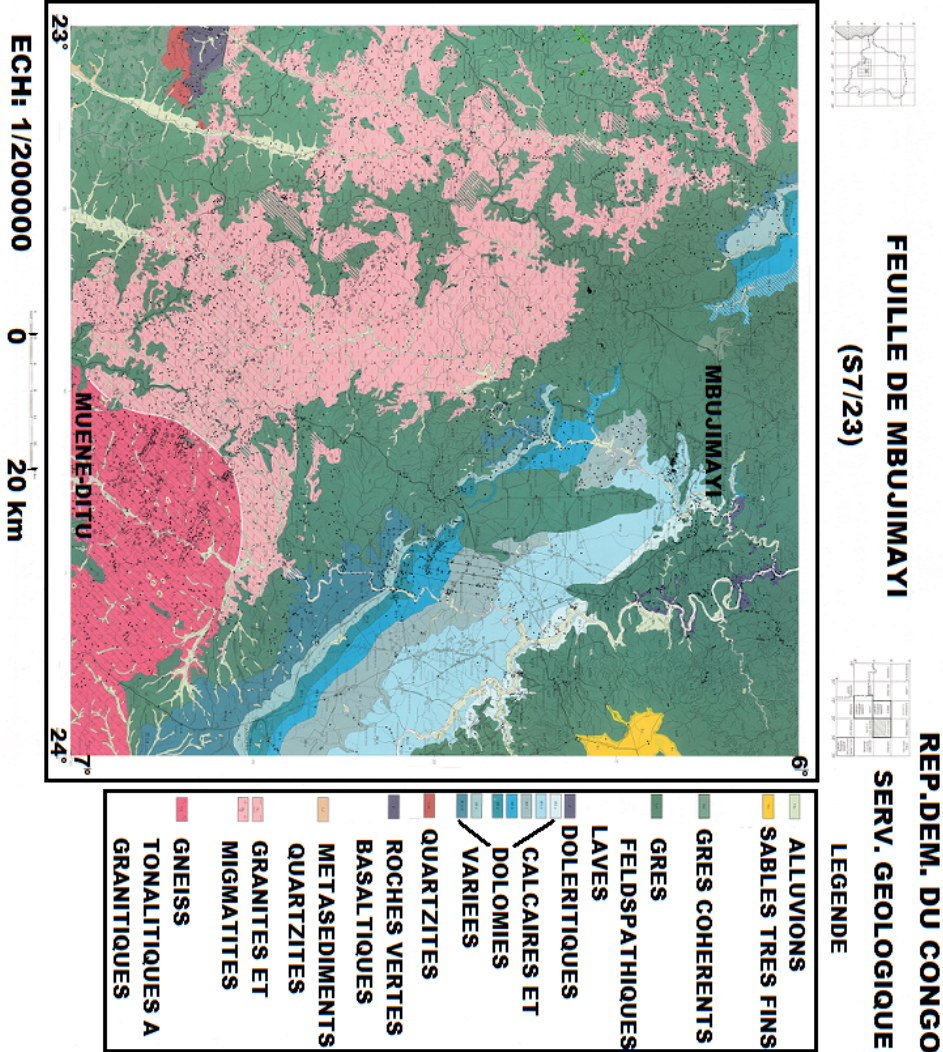


Figure 2.2 – Carte géologique du degré carré de Mbuji-Mayi [71]

2.3 Echantillonnage

Nous avons opté pour un échantillonnage aléatoire à deux degrés [100]. Au premier degré, les grandes unités primaires (carrières) ont été choisies en fonction des indices géologiques et/ou d'utilisation. Toutes les carrières sélectionnées sont ou ont été exploitées, soit pour les routes soit pour les briques artisanales. La présence de roches granitiques et gneissitiques a également été un indice important. Au second degré, à l'intérieur de chaque unité primaire, nous avons sélectionné les unités secondaires qui ont fait partie de l'échantillon.

Les sols concernés par ce travail ont été extraits à l'aide d'une pelle manuelle sur les talus des carrières à ciel ouvert suivantes :

2.3.1 Carrière à côté de l'aéroport de BIPEMBA à Mbujimayi

Coordonnées géographiques : 23°33'46"- 23°33'50"E et 6°06'43"- 6°06'50"S

Cette carrière avait été ouverte lors de la réhabilitation de la piste de l'aéroport de Bipemba par la société Swanepoel Miba Kasai (SMK). Le sol extrait était mélangé à du gravier du polygone Miba pour servir de couche de fondation.

Six échantillons ont été prélevés à différents fronts de cette carrière, à des profondeurs variant entre 3 et 8 m de la surface du sol. Ces six échantillons ont été mélangés et, par quartage, un échantillon représentatif a été extrait (M1).

2.3.2 Carrière du polygone de la société MIBA à Mbujimayi

Coordonnées géographiques : 23°36'17"- 23°36'21"E et 6°09'02"- 6°09'05"S

Tous les chantiers routiers de la ville de Mbujimayi utilisent un sol de fondation ou de sous-fondation extrait d'une carrière à l'entrée du polygone minier de la MIBA (Figure 2.3). Ce sol était ensuite mélangé aux graviers, rejets du processus de lavage dans le circuit de traitement du diamant.

Un échantillon représentatif y a également été tiré à partir de six échantillons de base prélevés entre 2 et 8 m de profondeur (M2).



FIGURE 2.3 – Echantillonnage dans la carrière du polygone Miba à Mbujimayi

2.3.3 Carrière de Matshitshi à Muene-Ditu

Coordonnées géographiques : 23°27'51"E et 6°57'44"S (Figure 2.4).

Une ancienne carrière d'exploitation artisanale de terre à briques cuites, abandonnée à la suite d'éboulements répétés et de qualité de brique non-satisfaisante. Un échantillon y a été prélevé sur un front à 11 m de profondeur (D1).



FIGURE 2.4 – Echantillonnage dans la carrière de Matshitshi à Muene-Ditu

2.3.4 Carrière de Sanguluja à Muene-Ditu

Coordonnées géographiques : 23°28'04"E et 6°58'59"S (Figure 2.5).

A proximité de la carrière de Matshitshi et actuellement en exploitation artisanale pour la production des briques de terre cuite. Deux échantillons ont été prélevés dans cette carrière, l'un à 1,5 m de profondeur (D6) et l'autre à 3,6 m de

profondeur (D7).



FIGURE 2.5 – Moule de compactage semi-artisanal dans la carrière de Sanguluja

2.3.5 Carrières de Kamabue à Muene-Ditu

Kamabue Est : 23°27'31"E et 7°01'27"S (Figure 2.6)

Kamabue Ouest : 23°27'25"E et 7°01'35"S.

Le site de Kamabue est le plus grand fournisseur de terre à briques dans la ville de Muene-Ditu. Les échantillons prélevés ont été subdivisés en deux zones, Kamabue Ouest (D2, D3) et Kamabue Est (D4, D5), respectivement à 1,4 m, 2,30 m, 1,28 m et 2,30 m de profondeur.

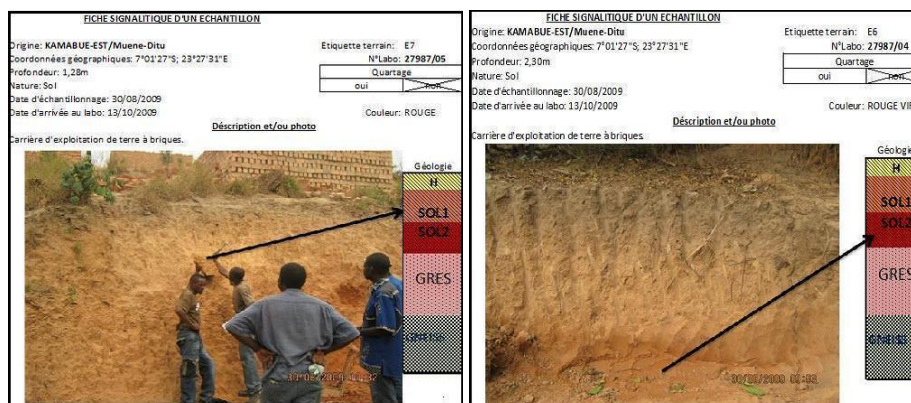


FIGURE 2.6 – Echantillonnage dans les carrières de Kamabue

Il sied de signaler que la décision de séparer les échantillons de Muene-Ditu en deux couches est due au fait que leur coloration était différente. Pour chaque

couche, six échantillons ont été prélevés pour en sortir un après mélange et quartage.

Le service des mines de la ville de Muene-Ditu classe les différentes carrières de cette ville en trois sites suivants :

1. Le site de Luetet
2. Le site de Nduba, et
3. Le site de Kamisangi

Selon cette classification, les carrières de Matshitshi et Sanguluja appartiennent au site de Luetet alors que les carrières de Kamabue font partie du site de Nduba. Vu le rapprochement géographique de ces carrières, il serait important, pour une étude à grande échelle, de les regrouper par site.

Chapitre 3

Caractérisation minéralogique des sols

Principaux symboles du chapitre

SYMBOLE	DESCRIPTION
ADD	Analyse dilatométrique différentielle
ATD	Analyse thermique différentielle
ATG	Analyse thermogravimétrique
CEC	Capacité d'échange cationique
d	distance inter-réticulaire
D1	Sol de Matshitshi
D2	Sol de Kamabue Ouest (Couche 1)
D3	Sol de Kamabue Ouest (Couche 2)
D4	Sol de Kamabue Est (Couche 1)
D5	Sol de Kamabue Est (Couche 2)
D6	Sol de Sanguluja (Couche 1)
D7	Sol de Sanguluja (Couche 2)

Principaux symboles du chapitre (suite)

SYMBOLE	DESCRIPTION
DRX	Diffraction des rayons X
EDX	Energy dispersive X-rays spectrometry
EG	Ethylène glycol
FA	Fraction argileuse
h, k, l	Indices de Miller
HRTEM	Microscope électronique à transmission à haute résolution
ICP	Inductively Coupled Plasma
IR	Infrarouge
λ	Longueur d'onde
M1	Sol de l'aéroport de Bipemba
M2	Sol du polygone Miba
MEB	Microscope électronique à balayage
MET	Microscope électronique à transmission
PM	Perte de masse
PMK	Perte de masse due à la kaolinite
θ	Angle de diffraction
ZPC	Point de charge zéro

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une connaissance minéralogique plus ou moins détaillée des sols du Kasai oriental qui concernent ce travail. Celle-ci est une étape importante dans la maîtrise des paramètres qui conduisent à l'obtention d'un produit cuit de qualité voulue.

Après un bref aperçu théorique sur la notion d'"argiles" ainsi que leurs propriétés, les sols sont caractérisés à différentes échelles et par différentes méthodes qui sont : la mesure de la capacité d'échange cationique, la diffraction des rayons X, l'analyse thermogravimétrique, l'analyse thermique différentielle et la microscopie électronique à balayage. Vu la possibilité d'accès à un public diversifié, la présentation et l'interprétation des résultats sont toujours précédées des principes et modes opératoires de chacune des méthodes utilisées.

Le chapitre se termine par une discussion sur les latérites et sols latéritiques avant une conclusion sur les caractéristiques minéralogiques eu égard aux objectifs de la thèse.

3.2 Les argiles

3.2.1 Définition

Il existe plusieurs définitions du terme "argile" selon les disciplines. Généralement, les minéraux argileux sont des phyllosilicates hydratés de petite taille. Nous parlerons dans ce travail de la "définition minéralogique du terme argile". Cependant, des minéraux comme les illites ou les chlorites sont fréquents dans la fraction silteuse des roches magmatiques et métamorphiques. De plus, tous les minéraux argileux ne sont pas des phyllosilicates (ex., quartz, feldspath) ni même des silicates (ex., oxydes). Une seconde définition, utilisée par les géologues ou les pédologues considère comme argile tout minéral de granulométrie inférieure à 2 ou 4 microns, il s'agit d'une "définition granulométrique" ; nous parlerons dès lors de la "fraction argileuse". Les ingénieurs civils s'intéressent aux propriétés des argiles en tant que matériel industriel (réfractaires, matériaux de construction) et s'attachent plus aux propriétés de plasticité, tandis que les céramistes regroupent les matériaux selon leur comportement au chauffage [58]. Dans notre contexte, le terme "argile" fera presque toujours référence aux phyllosilicates que l'on rencontre à peu près exclusivement dans la fraction argileuse ($< 2\mu\text{m}$).

Les phyllosilicates sont des minéraux extrêmement abondants à la surface de la terre. Constituants principaux des sols, ils sont présents dans toutes les zones climatiques favorisant l'altération des minéraux primaires et le développement des sols. Leur structure en feuillets est à l'origine de leur nom qui provient du mot grec "phyllos" qui veut dire feuilles [123]. Ces minéraux se rencontrent essentiellement dans des formations superficielles, issues notamment de l'altération des roches ignées par exemple. Souvent très hydratés, beaucoup de phyllosilicates sont déstabilisés lors de l'enfouissement diagénétique. Ces minéraux, abondants et très facilement accessibles, ont été de tous temps des minéraux privilégiés. Les argiles en particulier, ont été utilisées de façon très précoce dans l'histoire de

l'homme, par exemple par les céramistes. L'utilisation de ces matériaux a toujours été importante et a évolué au cours du temps jusqu'aujourd'hui : ils sont engagés dans des multiples applications, soit comme constituants entrant directement dans la composition des matériaux, soit comme éléments de procédés [23].

3.2.2 Conditions de formation et stabilité des argiles

Dans le cycle géologique, les argiles sont principalement restreintes aux couches externes. Elles sont formées à partir de minéraux préexistants, par réactions de la croûte terrestre au contact de l'hydrosphère ou de l'atmosphère. Les processus de dissolution et de recristallisation conduisent à la formation ou à la transformation des minéraux argileux. La proportion d'eau par rapport au solide détermine le degré, le type de réactions chimiques et le type de minéral formé. Sur la Figure 3.1, on constate que lorsque l'eau est abondante, le solide devient instable et la dissolution (dite congruente) constitue la première étape d'interaction eau/roche. Lorsque la proportion eau/roche avoisine 1, la dissolution est incongruente, certains éléments sont dissous tandis que d'autres restent en phase solide. Les minéraux argileux constituent généralement la phase solide car ils sont généralement hydratés, caractérisés par une structure physique différente du minéral préexistant. Sur cette même figure, la relation entre la proportion relative eau et roche est mise en parallèle avec les différents processus de formation des argiles (i.e., altération, dépôt ou sédimentation, enfouissement responsable de la diagénèse, altération hydrothermale).

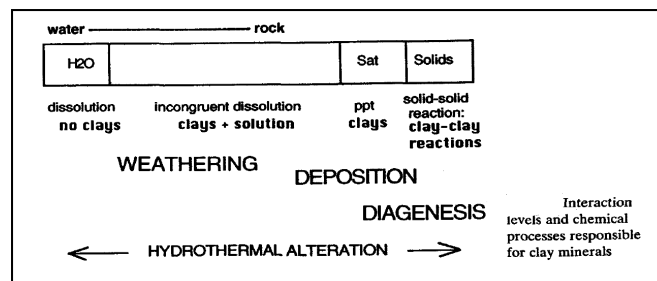


FIGURE 3.1 – Conditions de formation et de stabilité des minéraux argileux [58]

Les minéraux argileux sont en perpétuelle évolution minéralogique pour atteindre un état d'équilibre thermodynamique. J. Thorez[58] les appelle des "mutants". Les argiles ne sont présentes qu'à proximité de la surface terrestre, généralement aux quelques centaines de mètres supérieurs, et dans un environnement limité à une certaine gamme de température et de temps. Elles deviennent instables au-delà de 50 à 80°C donnant lieu à d'autres minéraux argileux ou non. **Il est à noter que dans la stabilité et l'évolution des argiles, la dimension temporelle est essentielle, au même plan que la température.**

Parmi les minéraux argileux, la kaolinite est abondante dans les sols des régions tropicales. La distribution océanique de la kaolinite reflète un contrôle climatique dominant. L'abondance de la kaolinite augmente vers l'équateur dans tous les bassins océaniques et montre un contrôle par l'intensité de l'hydrolyse [98].

3.2.3 Nomenclature et classification

3.2.3.1 Introduction

Comme nous l'avons déjà dit plus haut, les minéraux argileux font partie de la famille des phyllosilicates, c'est-à-dire qu'ils sont constitués par un empilement de feuillets de petites dimensions. La Figure 3.2 explicite la terminologie utilisée pour définir la structure des argiles. On y distingue quatre niveaux d'organisation :

- Les plans (planes) : constitués par les atomes
- Les feuillets (sheet) : tétraédriques ou octaédriques, sont formés par une combinaison de plans
- Les couches (Layer) correspondent à des combinaisons de feuillets
- Le cristal (crystal) résulte de l'empilement de plusieurs couches.

3.2.3.2 Eléments structuraux

La structure des minéraux argileux est composée de deux unités :

- Le feuillet tétraédrique (T) (SiO_4^-) dans lequel un atome de silicium est entouré par quatre atomes d'oxygène (Figure 3.3 gauche), et
- Le feuillet octaédrique (O) composé d'un cation central et de six OH^- si

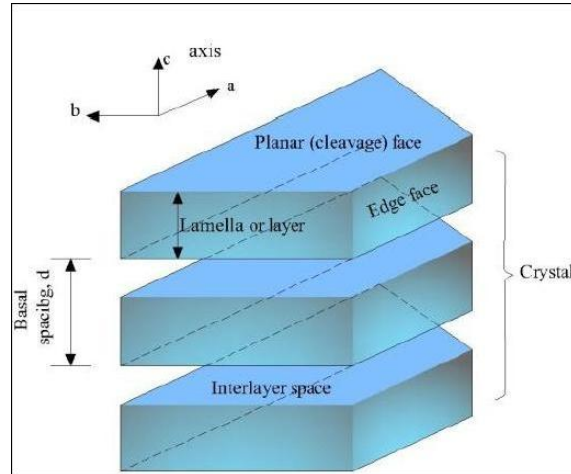


FIGURE 3.2 – Structure générale des phyllosilicates
[56]

le feuillet octaédrique est isolé (Figure 3.3 droite). En présence de feuillets tétraédriques, certains OH^- sont remplacés par des oxygènes apicaux.

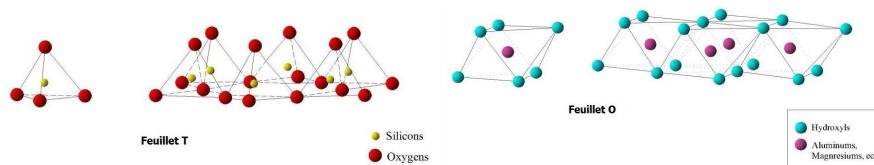


FIGURE 3.3 – Structure tétraédrique (T) et octaédrique (O)
[56]

Les différents groupes de minéraux argileux se différencient par l'arrangement de ces deux feuillets (Figure 3.4). Dans les cavités des unités structurales élémentaires viennent se loger des cations de taille variable (Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+}) en position tétraédrique ou octaédrique. Ces éléments s'organisent planairement pour constituer des couches. L'espace entre deux feuillets parallèles s'appelle **espace interfoliaire**. La charge de la couche dépend des substitutions de cations dans les feuillets T ou O.

Lorsque deux cavités sur trois du feuillet O sont occupées par un ion métallique trivalent, la structure est dénommée **dioctaédrique**. Si par contre la totalité des cavités octaédriques est occupée par des ions métalliques bivalents, la struc-

ture s'appelle **trioctaédrique**.

Il peut exister des substitutions dans les feuillets tétraédriques ($Si^{4+} \rightarrow Al^{3+}$), ($Si^{4+} \rightarrow Fe^{3+}$) ou octaédriques ($Al^{3+} \rightarrow Mg^{2+}, Fe^{2+}$ ou $Mg^{2+} \rightarrow Li^{+}$). Ces substitutions entraînent un déficit de charge qui est compensé, à l'extérieur du feuillet, par des cations compensateurs.

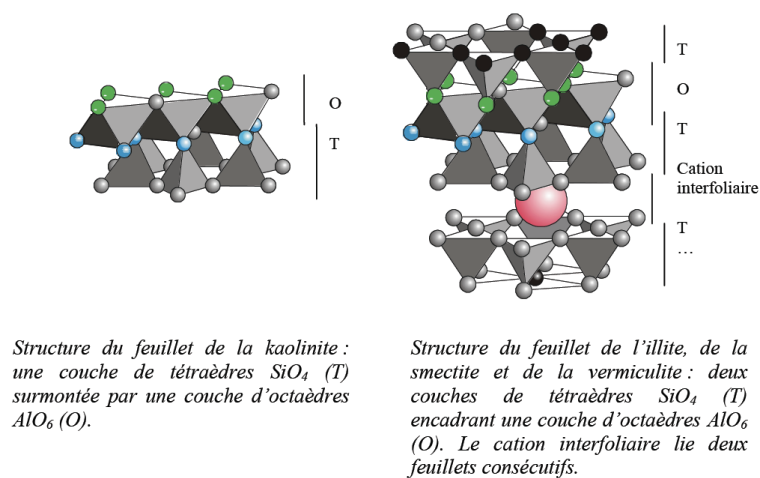


FIGURE 3.4 – Agencement des tétraèdres et des octaèdres en feuillet [36]

3.2.3.3 Critères de classification des argiles

Les travaux de l'AIPEA (Association Internationale pour l'Etude des Argiles) et ceux de Pédro ont abouti à une classification dont les critères fondamentaux sont [36] :

- C1) Le type de combinaison de feuillets : T/O ou 1/1 ; T/O/T ou 2/1, ... ;
- C2) Le type de cation contenu dans l'octaèdre (di ou trioctaédrique) ;
- C3) La charge globale de la couche ;
- C4) La nature et le type de remplissage interfoliaire

Des critères secondaires existent et sont basés sur le mode d'empilement, la composition chimique et le type d'espèces argileuses. La plus classique des classifications est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet. Quatre groupes sont alors distingués :

- Les minéraux à 7 Å : la couche est constituée d'un feuillet tétraédrique et d'un feuillet octaédrique. Elle est qualifiée T/O ou 1/1. Son espace basal est d'environ 7 Å (exemple : la kaolinite).
- Les minéraux à 10 Å : leur couche est constituée de deux feuillets tétraédriques et d'un feuillet octaédrique. Ils sont qualifiés de type T/O/T ou 2/1. L'espace basal est d'environ 10 Å (exemple : l'illite).
- Les minéraux à 14 Å : la couche est constituée de l'alternance de couche 2/1 et de feuillets octaédriques interfoliaires (exemple : chlorite).
- Les minéraux interstratifiés : l'épaisseur de la couche est variable. Ils se caractérisent par la superposition, selon un empilement vertical, de deux (ou plus) types de couches. Il ne s'agit pas d'un simple mélange physique mais d'un minéral à part entière (exemple : rectorite=muscovite-montmorillonite). Il semblerait que ces minéraux soient fréquents dans la nature mais sont souvent négligés car difficiles à détecter et à quantifier par diffraction des rayons X [58].

3.2.3.4 Le groupe de la kaolinite

Ce groupe nous intéresse plus car la kaolinite est le phyllosilicate le plus abondant dans les sols africains qui ont la particularité d'être très lessivés, et de plus, c'est la forme argileuse la plus recherchée comme matière première dans la fabrication des briques cuites.

Les minéraux de ce groupe sont du type 1/1 (Figure 3.5) et se caractérisent par peu de substitutions cationiques, à l'exception de Fe^{2+} . Dans la kaolinite, le feuillet est toujours neutre, dioctaédrique et alumineux. Sa composition chimique est $(Si_2)(Al_2)O_5(OH)_4$ par demi-maille. La faible capacité d'échange de la kaolinite est due à des sites de surface amphotères [82].

La kaolinite se distingue de la dickite et de la nacrite, deux polytypes qui se caractérisent par un mode d'empilement d'une même couche différent en fonction de la position de la charge vacante et dont la stabilité dépend de la température (Figure 3.6).

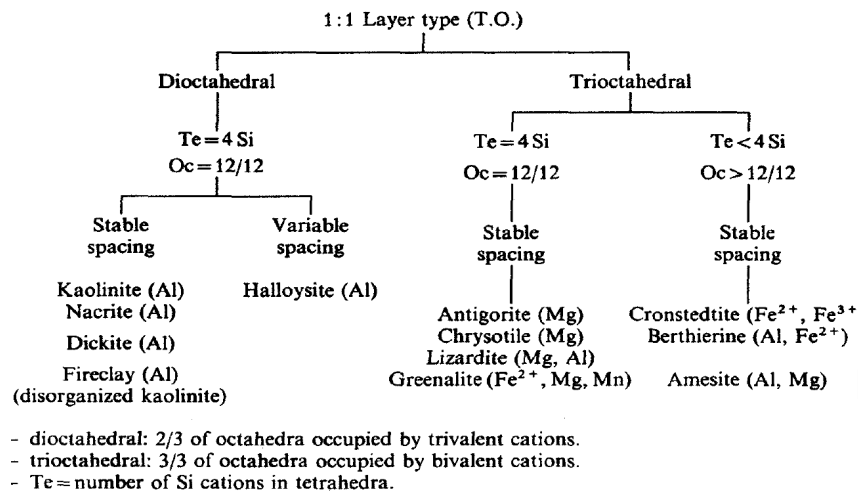


FIGURE 3.5 – Classification des minéraux argileux 1/1
[58]

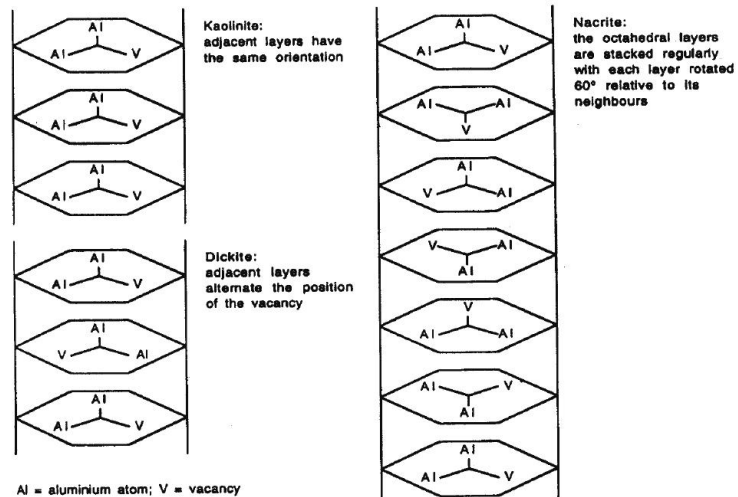


FIGURE 3.6 – Les polytypes 1/1
[58]

3.2.3.5 Les minéraux 2/1

Ces minéraux ont une structure composée de deux couches tétraédriques et une couche octaédrique, avec la seconde couche T renversée par rapport à la première (Figure 3.4). L'espace basal est de 10 Å. Le minéral représentatif de ce groupe est la muscovite qui s'apparente à la phlogopite mais présente des substitutions tétraédriques [56].

Les minéraux 2/1 de type dioctaédrique regroupent différentes séries : micas dioctaédriques, vermiculites et smectites. Leur classification est résumée sur la Figure 3.7.

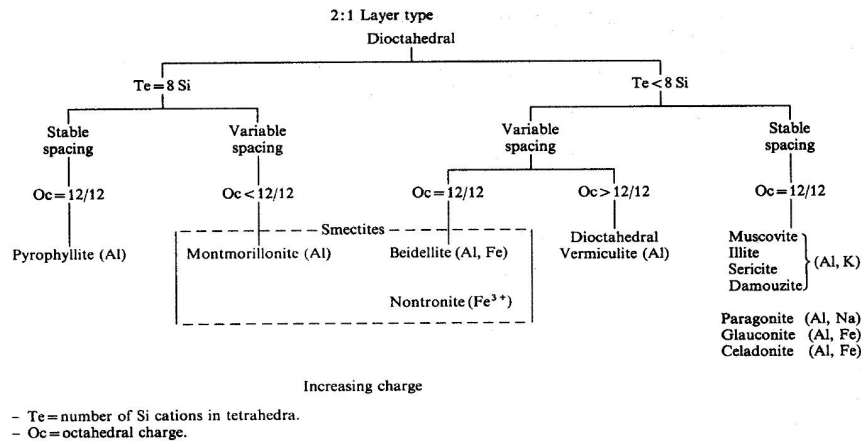


FIGURE 3.7 – Classification des minéraux argileux 2/1 dioctaédriques [58]

Les micas dioctaédriques ont leur couche octaédrique remplie aux 2/3 par des ions Al^{3+} (ou par un autre cation trivalent). La variabilité de ces micas se fait essentiellement sur le taux de substitution entre Si^{4+} et Al^{3+} dans les couches tétraédriques. Dans les tétraèdres, les taux de substitution varient de 1/4 à 1/8. Le taux de substitution de 1/4 donne une charge tétraédrique de 1. Dans le cas d'une muscovite, cette charge tétraédrique est compensée dans la couche interfoliaire par le remplissage de chaque cavité hexagonale par un ion K^+ ou un ion Na^+ . La muscovite a une formule structurale de type $(SiAl)^T(Al_2)^O(K, Na)^I O_{10}(OH)_2$ [23].

Les micas trioctaédriques sont reliés de par leur structure au talc. Ils incluent

des minéraux comme la phlogopite et la biotite et quelques espèces plus exotiques comprennent du Mn, Zn, Ni, Li dans l'octaèdre. Il s'agirait de minéraux peu importants en tant que minéraux argileux [58].

3.3 Propriétés des argiles

Les minéraux argileux sont caractérisés par trois propriétés principales : leur forme et leur surface spécifique, leur capacité d'adsorption d'eau et de gonflement, enfin leurs multiples possibilités d'échanges ioniques.

3.3.1 Forme et surface spécifique des argiles

Les argiles se présentent sous trois formes principales (Figure 3.8) :

- En flocons : avec une même dimension dans deux directions et une épaisseur d'environ le vingtième de la longueur ;
- En lattes : avec une dimension plus longue et toujours une épaisseur d'environ le vingtième de la longueur ;
- En aiguilles : avec deux dimensions identiques et la troisième beaucoup plus grande.

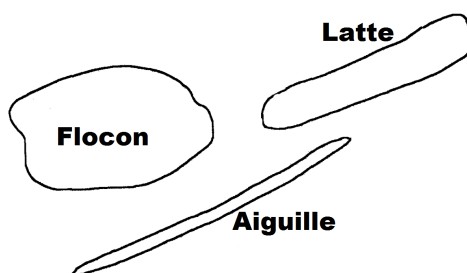


FIGURE 3.8 – Forme des particules argileuses

Les argiles sont des minéraux de petite taille qui leur confère une surface importante par rapport au volume des particules. La surface des argiles est supérieure à celle des minéraux de même taille mais de forme différente. Le rapport épaisseur/largeur est de l'ordre de $1/20$ pour les argiles. Ainsi, les propriétés des argiles sont principalement contrôlées par leur surface. Le Tableau 3.1 donne les valeurs caractéristiques des surfaces des grandes familles argileuses. La surface

totale comprend la surface externe et la surface interne correspondant à l'espace interfoliaire (Figure 3.9). Remarquons que la kaolinite n'a qu'une surface externe.

Argile	Surface (m^2/g)		
	Interne	Externe	Total
Smectite	750	50	800
vermiculite	750	<1	750
Chlorite	0	15	15
Kaolinite	0	15	15
Illite	5	25	30

Tableau 3.1 – Surface spécifique des particules argileuses [58]

3.3.2 Capacité d'adsorption d'eau et de gonflement

Certains minéraux argileux ont la capacité d'incorporer des molécules d'eau dans leur structure. Cette eau modifie la dimension de la couche en provoquant son gonflement. Ces argiles sont appelées **argiles gonflantes**. C'est le cas des argiles de la famille des smectites (Figure 3.10). L'incorporation d'eau est réversible à la pression atmosphérique et dépend de la température et de la pression de vapeur. Plus l'air est humide, plus l'argile pourra incorporer de l'eau. Cette hydratation conduit à une augmentation de volume qui peut atteindre 95%. Dans un climat à saison contrastée, la présence d'argiles gonflantes est souvent cause de destruction : en période humide le sol gonfle en déformant la surface tandis qu'en période sèche la déshydratation entraîne la formation de fissures. Signalons qu'il existe des minéraux ayant une grande capacité d'absorption d'eau mais qui n'ont pas de propriétés de gonflement, c'est le cas du groupe d'argiles fibreuses (ex : bentonite).

3.3.3 Possibilité d'échange ionique

3.3.3.1 Charge des surfaces argileuses

Les minéraux argileux se caractérisent par une surface électrique non-neutre. Il existe deux types de charge :

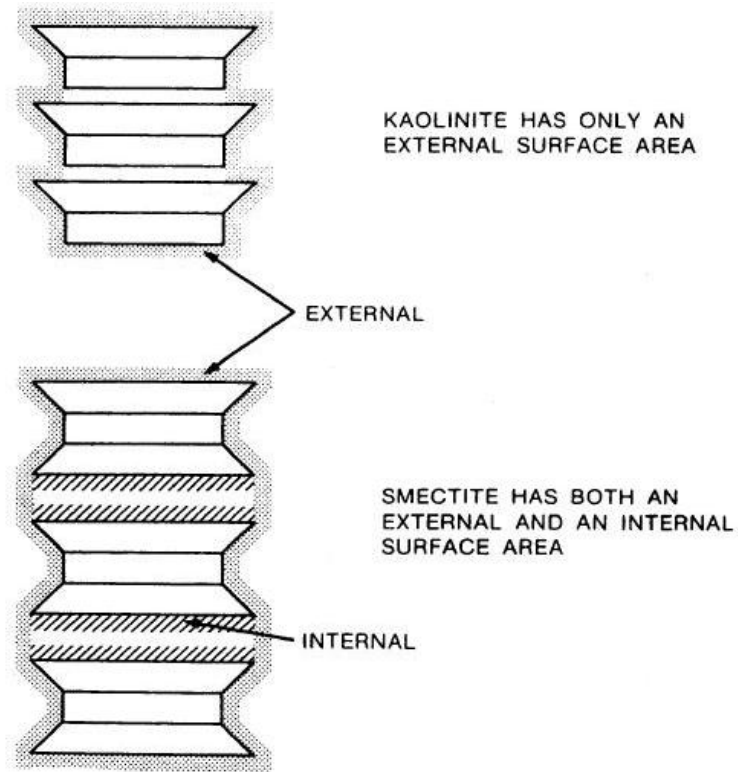


FIGURE 3.9 – Surfaces externe et interne des particules argileuses
[58]

ARGILES GONFLANTES			
Smectites			
Beidellite	Al	17	10
Montmorillonite	Al (Mg, Fe ²⁺ minor)	17	10
Nontronite	Fe ³⁺	17	10
Saponite	Mg, Al	17	10
Vermiculite	Mg, Fe ²⁺ , Al (Fe ³⁺ minor)	15.5	10-12
Mixed layer minerals*		10-17	<10
ARGILES NON GONFLANTES			
Illite	K, Al (Fe, Mg minor)	10	
Glauconite	K, Fe ²⁺ , Fe ³⁺	10	
Celadonite	K, Fe ²⁺ , Mg, Fe ³⁺ , Al ³⁺	10	
Chlorite	Mg, Fe, Al	14	
Berthiérine	Fe ²⁺ , Al ³⁺ (minor Mg)	7	
Kaolinite	Al	7	
Halloysite	Al	10.2	
Sepiolite	Mg, Al	12.4	
Palygorskite	Mg, Al	10.5	
Talc	Mg, Fe ²⁺	9.6	

FIGURE 3.10 – Classification des argiles selon leurs propriétés de gonflement :
espèce argileuse, cation dominant, espace basal en condition glycolées et sèches
[58]

- Une charge permanente ou structurelle liée aux substitutions ioniques (Al^{3+} pour Si^{4+} dans T, Mg^{2+} ou Fe^{2+} pour Al^{3+} dans O), de signe négatif.
- Une charge de surface liée à l'hydrolyse de liens Si-O et Al-OH rompus le long des surfaces. Cette charge est positive, négative ou nulle selon le pH du milieu comme le montre la Figure 3.11. A faible pH, l'argile se caractérise par une capacité d'échange anionique : H^+ se lie davantage par rapport à OH^- , une charge positive se développe. A fort pH, une capacité d'échange cationique (CEC) se développe : les OH^- se lient davantage que H^+ et une charge négative se développe. A l'équilibre ou "au point de charge zéro" (ZPC), il n'existe pas de capacité d'échange.

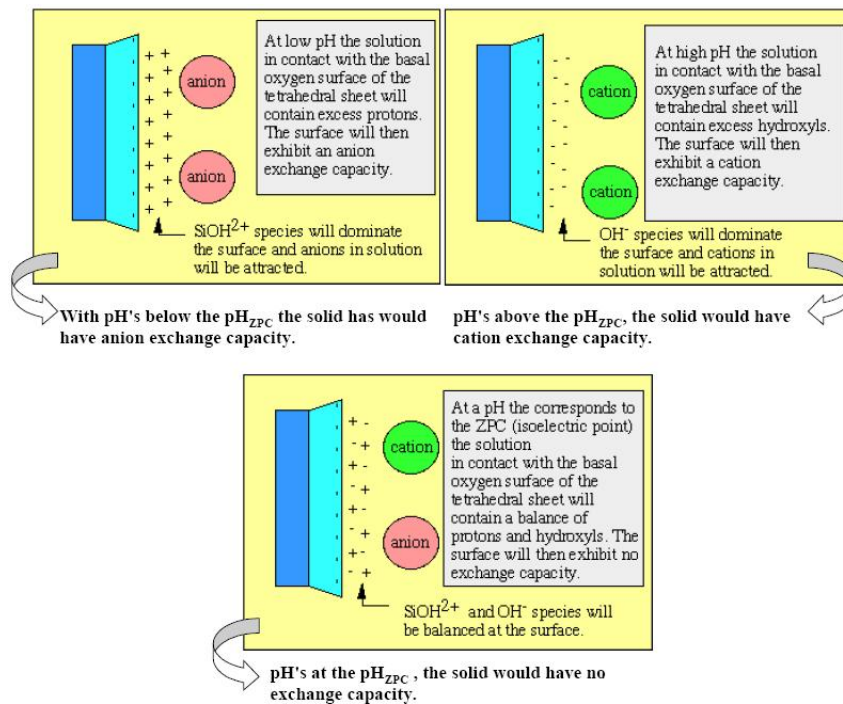


FIGURE 3.11 – Charge de surface des argiles
[58]

3.3.3.2 Modélisation de la distribution des cations à la surface

Différents modèles expliquent les interactions entre la surface des argiles, les cations interfoliaires, l'eau interfoliaire et les solutions environnantes. Nous pré-

sentons ci-dessous trois de ces modèles :

1. Modèle de la double couche de Helmholtz

Le premier et le plus simple modèle de double couche électrique est apparu avec le chimiste allemand Herman Von Helmholtz (1879). Dans ce modèle, la double couche électrique consiste en deux régions de charge opposée. Le modèle d'interface correspond à un condensateur moléculaire constitué par deux plans parallèles de charge contraire (Figure 3.12a). Les ions en solution non-hydratés et adsorbés forment une monocouche pour compenser l'excès de charges à la surface de la matrice solide. La variation de potentiel électrique est linéaire entre ces deux plans (Figure 3.12b).

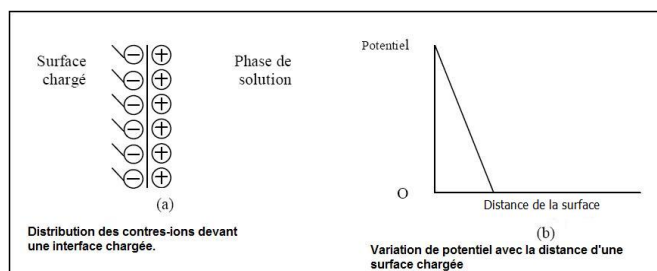


FIGURE 3.12 – Modèle de double couche électrique de Helmholtz
[67]

2. Le modèle de la double couche diffuse de Gouy-Chapman

Le modèle de Helmholtz n'a pas été jugé suffisant pour représenter l'interface minéral/solution et a été jugé incompatible avec le concept de l'agitation thermique [67]. A cet effet, le physicien français Georges Gouy (1910) et le chimiste anglais David Leonard Chapman (1913) élaborèrent la théorie de la double couche diffuse [92]. Ils considèrent que la distribution des contre-ions est totalement diffuse. Dans ce modèle, le potentiel décroît de façon exponentielle comme à la Figure 3.13.

3. Le modèle de la triple couche électrique

En 1924, le chimiste allemand Otto Stern a établi un modèle intermédiaire schématisé à la Figure 3.14. Ce modèle est basé sur l'hypothèse qu'une partie des contre-ions attachés à la surface par des forces de Van der Waals

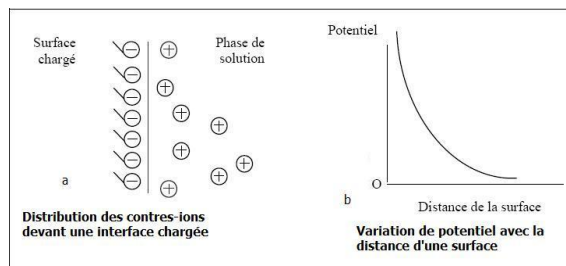


FIGURE 3.13 – Modèle de double couche électrique de Gouy-Chapman [67]

est suffisamment intense pour résister à l'agitation thermique. Cette couche compacte d'ions solvatés constitue la partie principale de l'interface côté solution. A l'intérieur de la solution se trouve la couche diffuse correspondante au modèle de Gouy-Chapman. Elle est solidaire de la solution et se déplace avec elle.

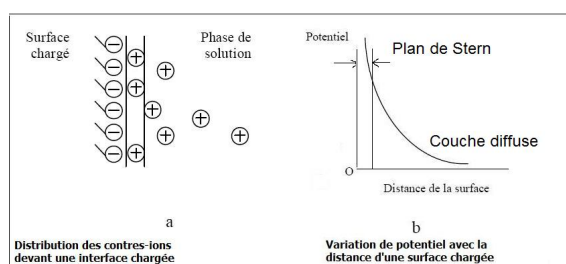


FIGURE 3.14 – Modèle de triple couche électrique de Leroy et Revil [67]

Leroy et Revil [120] ont développé une autre image de l'interface de Stern en imaginant deux parties de la région compacte appelées plan interne de Helmholtz et plan externe de Helmholtz.

3.4 Analyse des minéraux argileux du Kasai oriental

3.4.1 Introduction

Les minéraux argileux peuvent être étudiés à différentes échelles, de l'atome au paysage avec des méthodes appropriées. Nous les présentons suivant une échelle

d'observation décroissante.

La diffraction des rayons X (DRX) et la microscopie électronique à balayage (MEB) sont des méthodes utilisées pour étudier la forme et la structure des assemblages cristallins. Les distances inter-planaires moyennes et la composition des plans atomiques peuvent être obtenues par DRX alors que la morphologie des assemblages argileux est déterminée par MEB.

Les analyses thermogravimétriques et thermodifférentielles concernent le degré d'hydratation des argiles. Ces études se font sur des assemblages argileux.

La microscopie électronique à transmission (MET) étudie les formes des cristaux individuels ainsi que leurs compositions.

Les méthodes infrarouges (IR) analysent les relations entre les molécules individuelles dans les cristaux. Au même niveau que les méthodes IR ou en dessous se retrouvent les méthodes par microscopie électronique à transmission à haute résolution (HRTEM) où les couches atomiques ou les atomes sont eux-mêmes observés via un faisceau d'électrons.

La capacité d'échange cationique (CEC) est utilisée pour déterminer la quantité d'ions échangeables pouvant être fixés sur la structure argileuse.

3.4.2 Mesure de la Capacité d'Echange Cationique

3.4.2.1 Principe de mesure

La capacité d'échange cationique (CEC) mesure la capacité d'une argile à échanger des cations. Elle mesure la concentration en cations non-fixés dans la couche diffuse et dépend de la charge totale. Le principe de la mesure de la CEC est donné sur la Figure 3.15.

3.4.2.2 Problèmes généralement rencontrés

La mesure se heurte à deux problèmes majeurs : le pH auquel est effectué la mesure et le choix du cation à utiliser pour cette mesure [82].

1. Concernant le pH de la suspension, trois possibilités présentant chacune des inconvénients, sont envisageables :

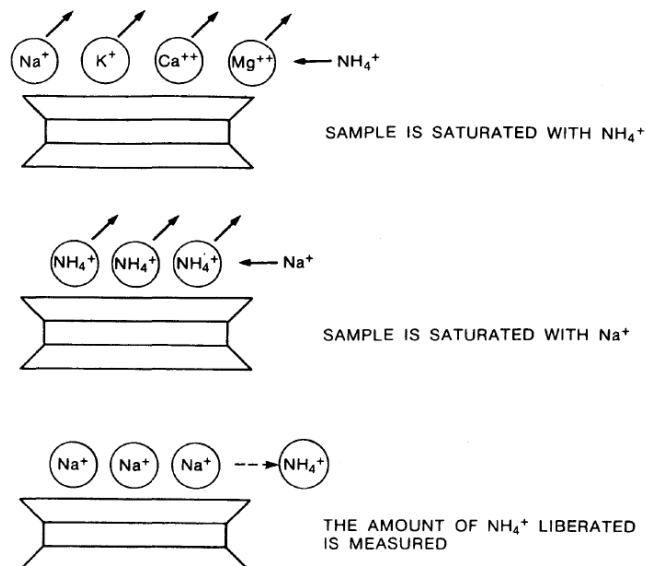


FIGURE 3.15 – Principe de mesure de la CEC
[58]

- Le pH peut être fixé à une valeur arbitraire, qui est généralement égale à 7
 - le pH est fixé à une valeur particulière correspondant soit au point de charge nulle, soit au point isoélectrique
 - le pH n'est pas imposé. Ce dernier dépendra de la solution utilisée pour la mesure et de l'argile étudiée.
2. Quant au choix du cation témoin, la littérature montre que ce choix est très vaste et qu'un grand nombre de cations ont déjà été proposés pour servir d'indicateur. Ces cations ont été utilisés sous forme non-complexée tel que le calcium, le sodium, le potassium, le magnésium, le baryum, l'ammonium, mais également sous forme de complexes organiques tels que l'acétate d'ammonium, l'argentthiourée, le cobaltihexamine,... Les CEC mesurées sur un même échantillon avec différents cations témoins peuvent varier de façon très significative.

Face à ces différents problèmes, il apparaît important de relativiser la notion de CEC qui se révèle être une grandeur conditionnelle.

3.4.2.3 Mode opératoire

Les mesures de CEC ont été réalisées au laboratoire de la plate forme d'Analyse Chimique des Matériaux de l'Environnement (ACME) de l'UCL (ex laboratoire SOLS). Le cation témoin utilisé est l'ammonium et le pH de la suspension a été fixé à 7 selon le mode opératoire en annexe A.1.1 et selon qu'il s'agit d'un sol brut ou de la partie argileuse. La quantité d'ions NH_4^+ libérés est déterminée par distillation et titrage à l'aide de HCl ou H_2SO_4 comme on le voit sur la Figure 3.16.

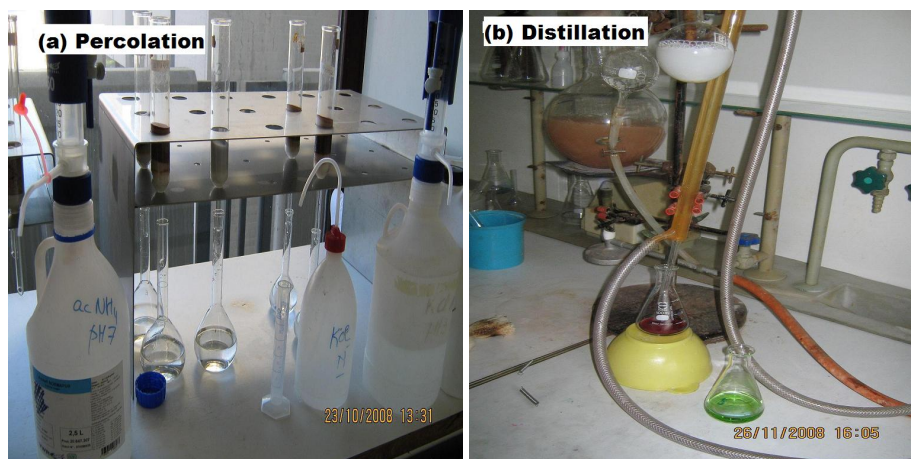


FIGURE 3.16 – Percolation du sol (a) et distillation (b) pour la mesure de la CEC (labo ACME)

En plus de la CEC, nous avons également cherché à connaître l'acidité totale des sols de Mbujimayi en mesurant l'aluminium et l'hydrogène échangeables selon la méthode de Bremer présentée en annexe A.1.2. La quantité de bases échangeables (Ca, K, Na et Mg) a été mesurée par spectroscopie d'émission (ICP) sur le percolât issu de la procédure de mesure de CEC présentée ci-dessus.

3.4.2.4 Résultats et interprétations

Le Tableau 3.2 présente les résultats des capacités d'échange cationique de six échantillons de sol du Kasai oriental, sur les sols bruts et/ou sur les fractions argileuses, déferriées ou non.

	BRUT	ARGILE	ARGILE DEFERRIFIEE
M1	9,54	-	7,5
M2	8,96	9,5	9,1
D1	-	3,2	-
D2	-	3,5	-
D5	-	4,8	-
D6	-	4,7	-

Tableau 3.2 – CEC des sols du Kasai oriental (en meq/100g)

On constate dans le Tableau 3.2 que les CEC de tous ces sols restent inférieurs à 10, valeurs caractéristiques des sols fortement lessivés et très peu gonflants. Les argiles dominantes de ces sols seraient de la famille de la kaolinite. En effet, la capacité d'échange cationique de la kaolinite est généralement comprise entre 1 et 10 meq/100g comme on peut le constater dans le tableau de la Figure 3.17.

Cation Exchange Capacities (meq/100 g) of Clay Minerals (from Drever, 1982, p. 82)		
smectites		80-150
vermiculites		120-200
illites		10- 40
kaolinite		1- 10
chlorite		<10
Cation exchange capacities and surface charge densities		
Clay mineral group	Cation exchange capacity (CEC) (cmol (+) kg ⁻¹)	Surface charge density (τ) (cmol (-) m ⁻²)
Kaolinites	3-20	2-6 × 10 ⁻⁴
Illites	10-40	1-2 × 10 ⁻⁴
Smectites	80-120	1-1.5 × 10 ⁻⁴
Vermiculites	100-150	3 × 10 ⁻⁴

FIGURE 3.17 – Valeurs des CEC des minéraux argileux
[58]

Les sols de Muene-Ditu (D1, D2, D5, D6) présentent des CEC très faibles par rapport à ceux de Mbujimayi (M1 et M2), conséquence d'une altération plus

poussée.

		M1	M2
Acides échangeables (meq/100 g)	Al	0,68	0,8
	H	1,64	1,52
Bases échangeables (meq/100 g)	Ca	0,058	0,11
	K	0,014	0,08
	Na	0,011	0,065
	Mg	0,02	0,392

Tableau 3.3 – Acides et bases échangeables des sols de Mbujimayi

Le Tableau 3.3 montre des valeurs très faibles d'acides et bases échangeables dans les sols de Mbujimayi. Ceci est une conséquence de leur forte altération ajoutée à leur faible pourcentage en argile. Les valeurs semblent être proportionnelles à l'argilosité car elles sont plus élevées (sauf H) pour l'échantillon M2 qui est plus argileux que M1, comme on le verra dans la suite de ce travail.

3.4.3 Analyse par diffraction des rayons X

3.4.3.1 Principe et production des rayons X

1. Principe

On utilise un rayonnement X monochromatique généré au moyen d'un tube à rayons X obtenus par le choc d'électrons sur une anticathode de cuivre portant une pastille métallique dont la nature détermine la longueur d'onde du rayonnement émis, et un échantillon polycristallin.

Il s'agit d'envoyer le rayonnement X primaire sur l'échantillon préparé et de mesurer les angles pour lesquels ce rayonnement est diffracté (Figure 3.18). Les mesures d'angles permettent de calculer les distances inter-réticulaires d (hkl) via la loi de Bragg ci-dessous :

$$2d.\sin\theta = n.\lambda \quad (3.1)$$

où : n est un nombre entier représentant l'ordre de la réflexion

θ est l'angle entre le rayon incident et la famille des plans (hkl)

λ est la longueur d'onde du rayon incident

d est l'équidistance des plans (hkl). Cette distance réticulaire est caractéristique d'un minéral donné.

h , k et l sont les indices de Miller qui permettent d'identifier les plans cristallographiques.

La réflexion de premier ordre ($n=1$) correspondant aux angles d'incidence les plus faibles est presque toujours accompagnée des réflexions d'ordre supérieur qui correspondent à des angles d'incidence plus grands.

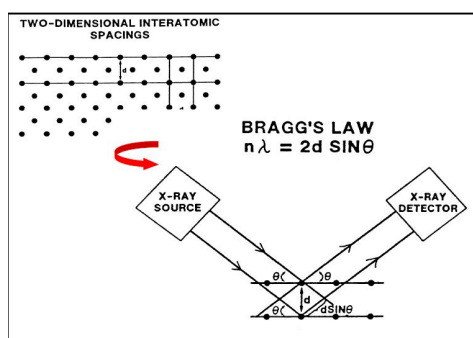


FIGURE 3.18 – Principe de diffraction et illustration de la loi de Bragg [58]

2. Production des rayons X

Le rayonnement X est émis par un tube à rayons X constitué d'une anode métallique (Co,Cu) bombardée par un faisceau d'électrons produit par un filament chauffé (Figure 3.19 (a)). La radiation émise sort par des fenêtres de Beryllium. Le spectre émis, par exemple par une anode de Cu, consiste en un fond continu produit suite à la collision d'électrons sur l'anode. Ces électrons convertissent leur énergie cinétique en rayonnement X. A ce spectre s'ajoute des pics (radiations caractéristiques) qui correspondent à l'énergie libérée suite aux réarrangements des électrons après éjection d'un ou plusieurs électrons lors de l'excitation. Les raies $K\alpha_1, \alpha_2$ correspondent à des transitions entre orbitales L et K, les raies caractéristiques $K\beta$ aux transitions de l'orbitale M à l'orbitale K (Figure 3.19 (b)).

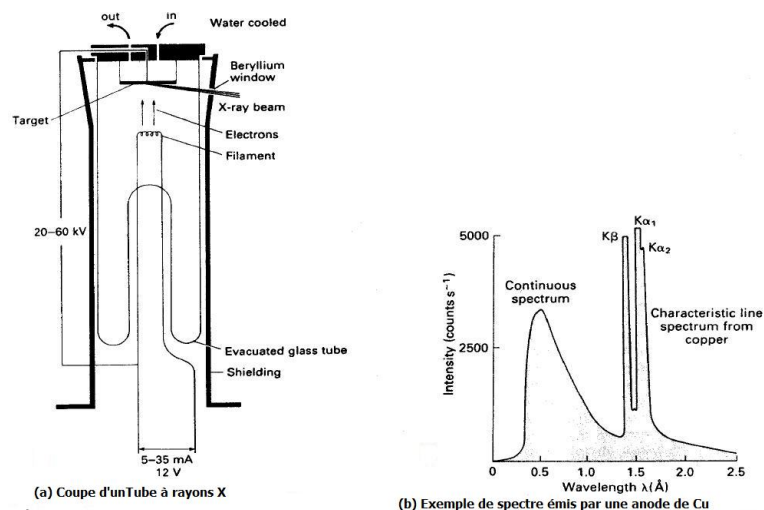


FIGURE 3.19 – Production des rayons X et exemple de spectre [58]

3.4.3.2 Caractéristiques de l'appareil

1. Appareillage de diffraction (Figure 3.20)

L'appareillage comporte un tube de rayons X refroidi par un système de circulation d'eau. Le rayonnement X est focalisé sur l'échantillon via un système de fentes. Le détecteur est positionné par rapport à l'échantillon et se déplace avec l'angle d'incidence θ . L'échantillon et le détecteur sont couplés. L'énergie du faisceau diffracté est enregistrée selon l'angle de diffraction. Ensuite les spectres de diffraction ou diffractogrammes sont interprétés manuellement ou via un logiciel de traitement.

2. Caractéristiques

Deux types de montages principaux sont utilisés en diffraction X des polycristaux : la caméra de Debye-Scherrer et le montage goniométrique. C'est ce dernier montage qui a été utilisé dans notre cas. Le spectre de diffraction est enregistré séquentiellement en déplaçant un détecteur d'un angle 2θ tandis que l'échantillon parcourt un angle θ . Ce montage permet de focaliser le rayonnement X sur le détecteur via l'échantillon. La source de rayons X est placée sur le cercle du diffractomètre, perpendiculairement à

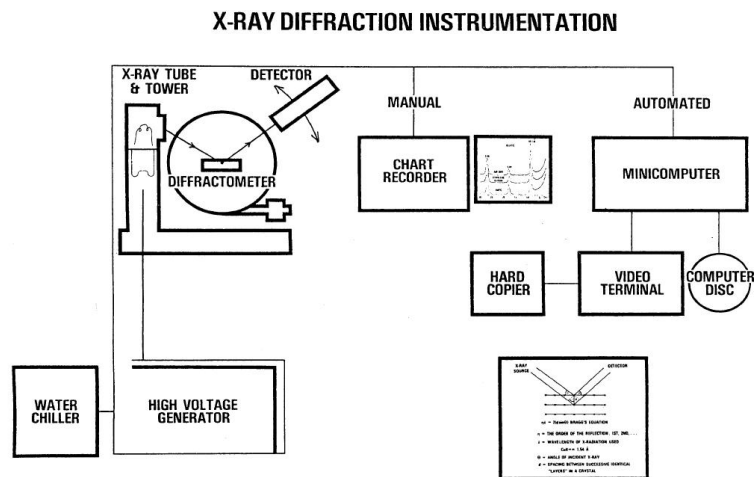


FIGURE 3.20 – Ensemble de diffraction
[58]

son plan. Le plan de référence de l'échantillon passe par l'axe du diffractomètre et peut tourner autour de cet axe à une vitesse constante et réglable ω . La fente d'entrée d'un compteur (divergence slit) se déplace sur le cercle à une vitesse double 2ω . Ci-dessous les caractéristiques du diffractomètre utilisé au laboratoire d'analyses chimiques des matériaux de l'environnement (ACME) de l'UCL :

- Diffractomètre D8 Advance (Bruker)
- Détecteur solide sol-X à discrimination d'énergie
- Goniomètre : cercle de 435 mm de diamètre ; montage Bragg-Brentano $\theta - \theta$
- Tube à anticathode de cuivre
- Conditions opératoires : 40kV, 30mA

Le Tableau 3.4 résume les paramètres qui ont été choisis pour l'analyse des argiles et celle des poudres¹.

Signalons que pour les argiles, on privilégie l'intensité des pics alors que c'est la forme et la position des pics qui sont privilégiées dans le cas des poudres.

1. Diffraction X sur poudre : diffraction des composés réduits en poudre, utilisée couramment pour la caractérisation des solides

	Argiles	Poudre
Divergence (mm)	6	1
Antiscatter (mm)	6	1
Receiving (mm)	0,2 ou 0,6	0,1

Tableau 3.4 – Paramètres du diffractomètre

3.4.3.3 Préparation des échantillons

Il existe plusieurs méthodes de préparation des échantillons. Les différentes méthodes visent à orienter au maximum les minéraux argileux de façon à renforcer leur réflexion principale liée aux plans (001) ou (00l). La confection d'un agrégat orienté par la méthode de la sédimentation sur lame de verre [58] a été appliquée lors des travaux en laboratoire pour l'étude de nos argiles. Ci-dessous les modes opératoires de préparation d'échantillons, utilisés au laboratoire ACME.

1. Sol brut : poudre non-orientée (Figure 3.21)

- Broyage de quelques grammes de sol (cru ou chauffé) dans un mortier en agate jusqu'à l'obtention d'une poudre suffisamment fine (Figure 3.21 a)
- La poudre est ensuite pressée manuellement dans un petit moule pour former des pastilles (Figure 3.21 b)
- Les pastilles sont portées au diffractomètre pour l'analyse.

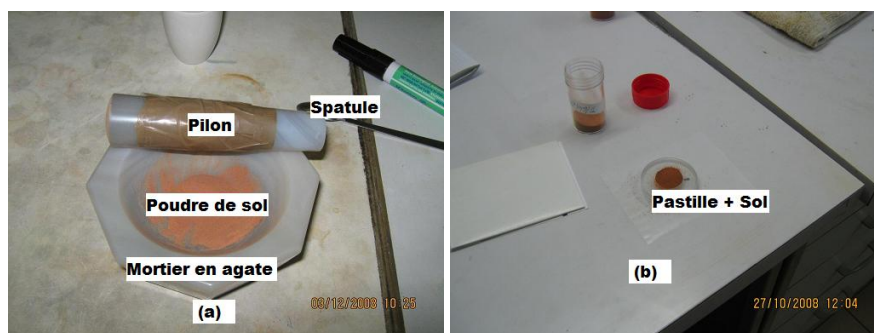


FIGURE 3.21 – Préparation d'un sol brut pour l'analyse par DRX (labo ACME)

2. Argile : pellicule orientée

- L'argile est préalablement saturée au potassium ou au magnésium
- On coupe des plaquettes en verre destinées à recevoir les solutions argileuses saturées (trois par échantillon saturé)

- A l'aide d'une pipette, on prélève une quantité de solution argileuse et on verse une partie sur la plaquette en verre. Les feuillets argileux tendent à se placer parallèlement à la surface de la lame
- Le reste est dilué puis reversé sur la même plaquette
- Les plaquettes sont séchées dans un dessiccateur (Figure 3.22 a)
- On traite ensuite les plaquettes soit par chauffage à 150°C, 350°C et 550°C pendant au moins 2h, soit chimiquement à l'Éthylène Glycol. Les températures sont choisies de telle sorte que les transformations principales des minéraux soient identifiées alors que le traitement à l'éthylène glycol sert à l'identification d'un potentiel gonflement.
- Les plaquettes ainsi traitées sont portées au diffractomètre (Figure 3.22 b).

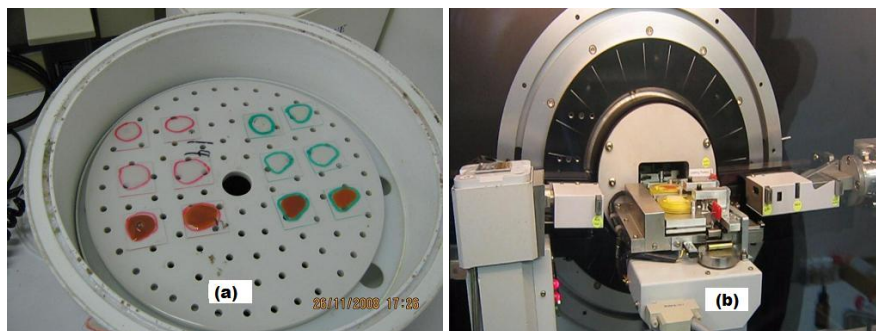


FIGURE 3.22 – Séchage et analyse DRX des plaquettes orientées d'argile (labo ACME)

3.4.3.4 Traitement des spectres

Après diffraction, on obtient un spectre d'énergie du faisceau diffracté en fonction de l'angle de diffraction 2θ . Dans ce spectre, les valeurs angulaires peuvent être en espace basal d (en angströms) en appliquant la loi de Bragg et en utilisant la longueur d'onde $K\alpha$ de l'anode utilisée pour produire le rayonnement X incident. Ainsi chaque famille argileuse se caractérise par une valeur de d pour les plans (001). Soit illite $d = 10\text{\AA}$; chlorite $d = 14\text{\AA}$; kaolinite $d = 7\text{\AA}$; smectite $d = 15\text{\AA}$.

Cependant, il faut aussi considérer les différents ordres de diffraction n . Une

même espèce argileuse aura donc plusieurs pics de diffraction correspondant à différentes valeurs de d : $d/1$ ($n=1$), $d/2$ ($n=2$), $d/3$ ($n=3$),... Soit illite $d/2 = 5\text{\AA}$; chlorite $d/2 = 7\text{\AA}$, $d/3 = 3.57$; kaolinite $d/2 = 3.54\text{\AA}$; smectite $d/2 = 7\text{\AA}$, $d/3 = 5\text{\AA}$. Dans un mélange argileux naturel, le spectre de diffraction enregistrera différents pics correspondants aux réflexions principales des différentes familles présentes, mais aussi les réflexions secondaires ou d'ordre 3. On constate que les mêmes valeurs de d peuvent correspondre à des réflexions d'ordres différents pour des minéraux différents. Par exemple, la réflexion (001) de la kaolinite à $7\text{\AA}$ coïncide avec la réflexion (002) de la chlorite.

Dans le cas d'un mélange, le spectre sera la résultante (somme pondérée par les abondances) des spectres individuels avec des superpositions éventuelles.

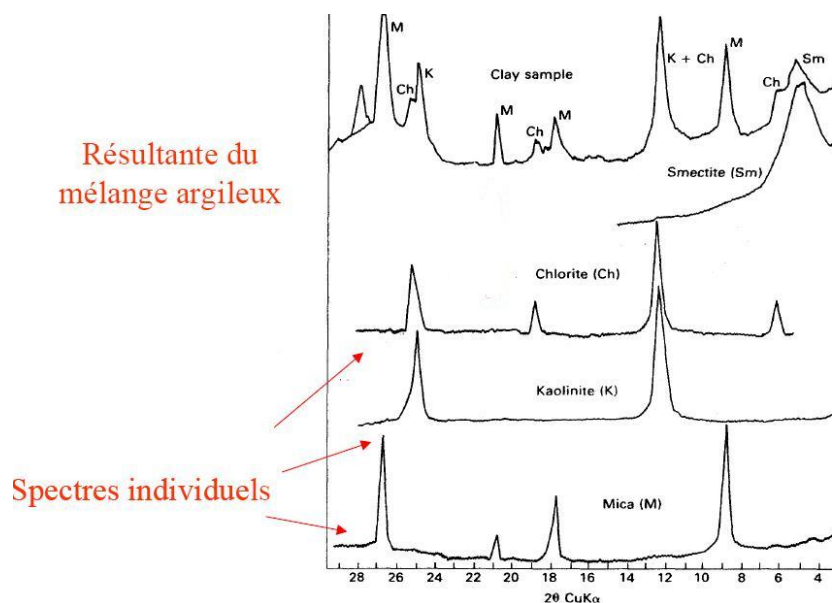


FIGURE 3.23 – Spectre de diffraction : minéraux individuels et mélanges argileux [58]

Dans notre cas, les diffractogrammes bruts étaient directement visibles sur un ordinateur connecté à l'appareil via un logiciel (Diffrac plus XRD Commander). Ils étaient ensuite importés dans un programme de traitement (EVA) afin d'identifier qualitativement les différentes phases minérales en comparant les spectres obtenus à ceux contenus dans la base de données du logiciel.

3.4.3.5 Identification des phases minérales dans les sols du Kasai oriental

La Figure 3.24 présente les spectres de diffraction des poudres non-orientées des sols de la ville de Mbujimayi. Ces sols ont été analysés respectivement à 20°C, portés à 350°C et à 650°C. Quant aux sols bruts de Muene-Ditu, ils n'ont été analysés qu'à 20°C et 700°C. La décision de ne pas analyser les sols de Muene-Ditu à 350°C est venue des résultats obtenus sur les premières analyses de Mbujimayi qui ont montré une absence de modifications notables à cette température. La Figure 3.25 est une représentation des diffractogrammes des sols de Muene-Ditu.

Sur ces spectres, l'échelle de l'intensité des pics (ordonnée) est une échelle relative car les différents diffractogrammes ont été superposés sans tenir compte de l'échelle d'intensité. Par conséquent les pics peuvent être comparés en intensité pour un même diffractogramme et non pour deux diffractogrammes différents.

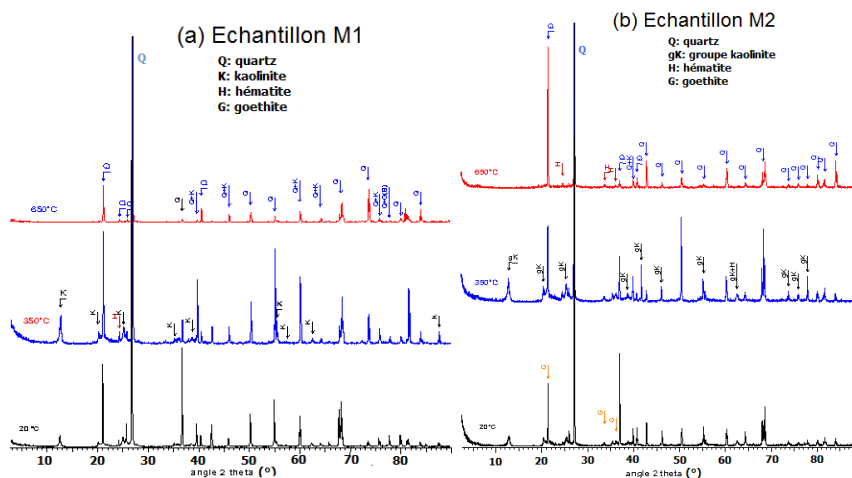


FIGURE 3.24 – Diffractogrammes des sols de Mbujimayi

Les sols étant des mélanges de plusieurs minéraux, les spectres sont la résultante de la somme des spectres individuels avec des superpositions éventuelles. Nous nous sommes uniquement intéressés aux superpositions facilement perceptibles.

Les principales phases minérales présentes dans ces sols sont :

- Pour les sols de Mbujimayi (Figure 3.24) : la kaolinite identifiée par les réflexions à 2θ égal 12,5° ; 25° et 38,5° ; le quartz identifié par les réflexions

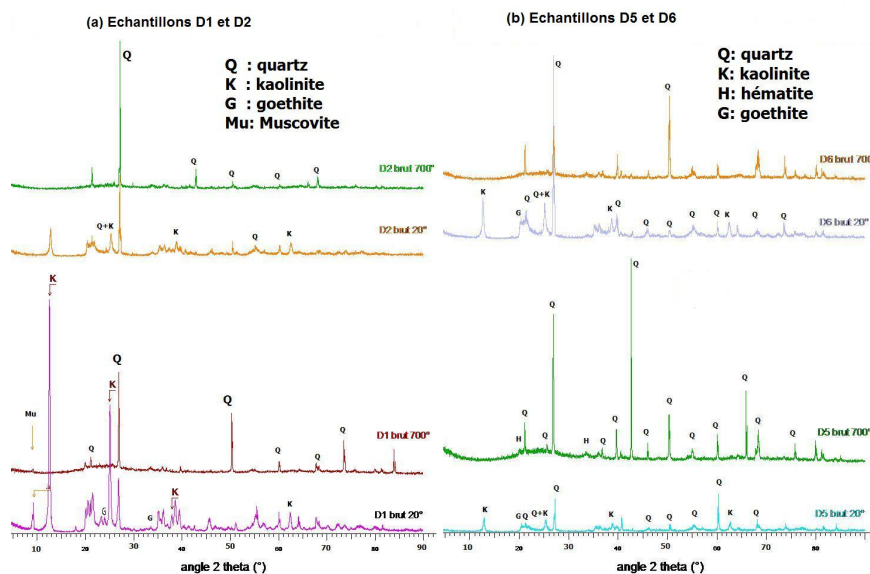


FIGURE 3.25 – Diffractogrammes des sols de Muene-Ditu

à 2θ égal $26,6^\circ$; $50,1^\circ$ et $20,9^\circ$; la goethite et/ou l'hématite identifiée(s) par les réflexions à 2θ égal $21,2^\circ$; 24° ; $33,6^\circ$ et $36,8^\circ$.

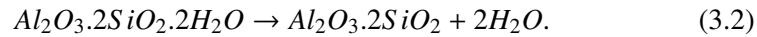
- Pour les sols de Muene-Ditu (Figure 3.25), les phases rencontrées sont les mêmes que celles des sols de Mbujimayi avec intensification des pics de la kaolinite par rapport aux pics de quartz.

Pour ces sols, signalons la présence d'un pic à $2\theta=8,9^\circ$, visible sur les diffractogrammes de l'échantillon D1 sur la Figure 3.25 (a), que nous identifions à un minéral du groupe des micas (muscovite ou biotite).

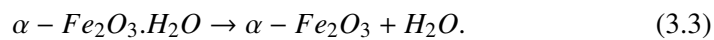
La nature plus sableuse des deux échantillons de Mbujimayi est visible par le grand nombre des pics de quartz tant sur les échantillons naturels que sur les échantillons chauffés. En effet, le quartz étant très réfractaire, il reste présent aux différentes températures de chauffe utilisées.

Sur la Figure 3.24, on constate l'absence de changements significatifs entre les diffractogrammes à 20°C et ceux à 350°C . Il n'y aurait donc pas de transformations minéralogiques importantes dans cette plage de température. Par contre, à 650°C et à 700°C , tous les pics correspondant au spectre de la kaolinite disparaissent. En effet, entre 450 et 600°C la kaolinite se déshydroxyle en donnant de

la métakaolinite, un minéral amorphe, suivant la réaction [101] :



On observe aussi une présence de faibles quantités de goethite ; celle-ci se transforme en hématite entre 280 et 350°C suivant la réaction :



La gibbsite est quasi-absente de ces sols. Tout l'aluminium présent se trouverait dans la kaolinite. En effet, pendant l'évolution du processus d'altération, les plagioclases se transformeraient en une masse abondante de substances ferrugineuses isotropes au sein desquelles il apparaît peu de gibbsite. Puis cette masse donnerait naissance à de la goethite et à de la kaolinite [98].

Certains pics de quartz s'amplifient avec la température alors que d'autres se réduisent. La diminution de l'intensité se justifie par le fait que ces pics correspondent à des mélanges avec des minéraux (tel que la kaolinite) qui se transforment avec la température. Par contre pour l'amplification, elle serait due à la silice venant de la transformation de certains composants en d'autres. Par exemple, la transformation de la kaolinite en métakaolinite conduirait à une libération de la silice qui va augmenter la quantité de silice libre dans le mélange [101].

3.4.3.6 Identification des phases minérales dans les argiles du Kasai oriental

Après la séparation avec les parties sableuses et limoneuses par la méthode des décantations successives, l'argile des différents sols a subi une saturation cationique au potassium (K) ou au magnésium (Mg). L'argile ainsi saturée a été analysée au diffractomètre dans des conditions différentes.

En ne considérant que le spectre normal (à 20°C), certains minéraux peuvent ne pas être dissociables. Nous avons donc analysé, pour un même échantillon saturé au potassium, quatre spectres obtenus dans des conditions expérimentales différentes, *i.e.*, un spectre à l'état naturel (K 20°) et les trois autres après un chauffage à 105°C (K105°), à 300°C (K300°) et à 550°C (K550°) respectivement.

Les résultats, présentés sur la Figure 3.26 pour deux des neuf argiles analy-

sées, montrent deux phases argileuses majeures :

- La kaolinite (K) : c'est le principal phyllosilicate présent. Elle est visible sur les diffractogrammes par son pic de diffraction (001) à $2\theta=12,5^\circ$ et la diffraction (002) à $2\theta=25^\circ$. Ces pics disparaissent sur le spectre à 550°C suite à la transformation de la kaolinite en métakaolinite.
- La muscovite (Mu) : elle est identifiée par la diffraction (001) à $2\theta=8,9^\circ$ et celle (002) à $2\theta=27^\circ$. Il s'agit d'une forme de mica blanc de formule chimique $K^I Al_2^O Si_3^T Al^T O_{10} (OH)_2$ ². Elle se rencontre souvent dans les roches plutoniques (granite, pegmatite) et métamorphiques (gneiss, micaschiste) mais peut aussi se retrouver dans les roches altérées comme minéral secondaire³, ce qui semble être le cas dans nos échantillons. La muscovite semble être très résistante à la température car ses pics se retrouvent jusqu'à 550°C . Elle est approximativement 10^6 fois plus résistante aux agents d'altérations que le mica trioctaédrique (biotite). Dans les sols ferralitiques profonds, on peut retrouver la muscovite jusque dans les horizons de surface. Il serait même possible, selon R. Maignien [98], que les illites que l'on retrouve fréquemment dans les sols africains fortement altérés soient de la muscovite cryptocristalline.

Signalons que la séparation sables-argiles a été très bonne car nous constatons une disparition totale des pics de quartz sur les diffractogrammes.

Pour compléter l'identification des espèces, certaines argiles saturées au magnésium ont subi une solvation à l'éthylène-glycol (EG). Cette molécule organique a la capacité d'être adsorbée dans les espaces interfoliaires de certaines argiles (ex. : smectites) qui gonflent. Sur le diffractogramme, la position des pics de diffraction change. La comparaison des diffractogrammes d'argiles traitées (Mg EG) à ceux d'argiles non-traitées (Mg 20°) montre l'absence de modification, donc l'absence d'argiles gonflantes (Figure 3.27).

Enfin, pour clôturer l'identification des argiles, nous avons analysé la possibilité d'une présence de fer dans la structure des phyllosilicates. Certaines argiles ont donc été déferriées après un traitement chimique à l'oxalate et au dithionite-

2. I : interfoliaire, O : Octaédrique, T : tétraédrique

3. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Muscovite>

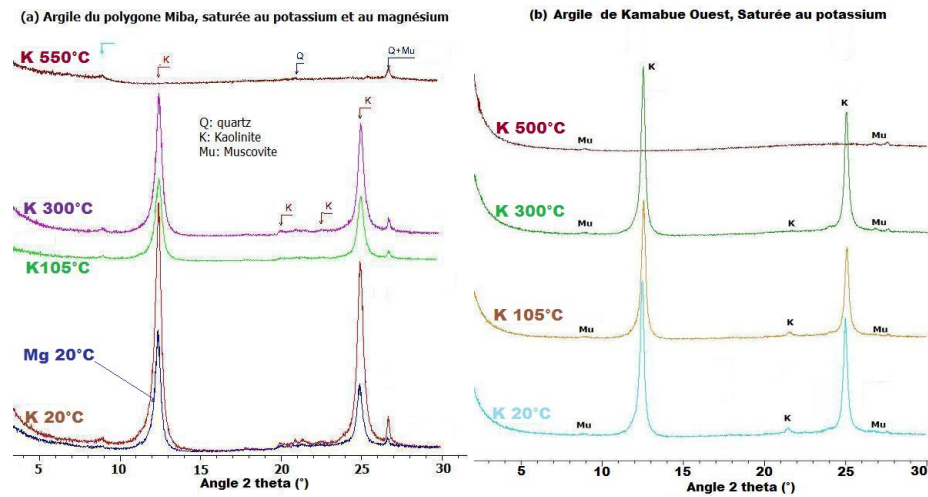


FIGURE 3.26 – Diffractogrammes de deux argiles du Kasai oriental : Cas de M2 et D2

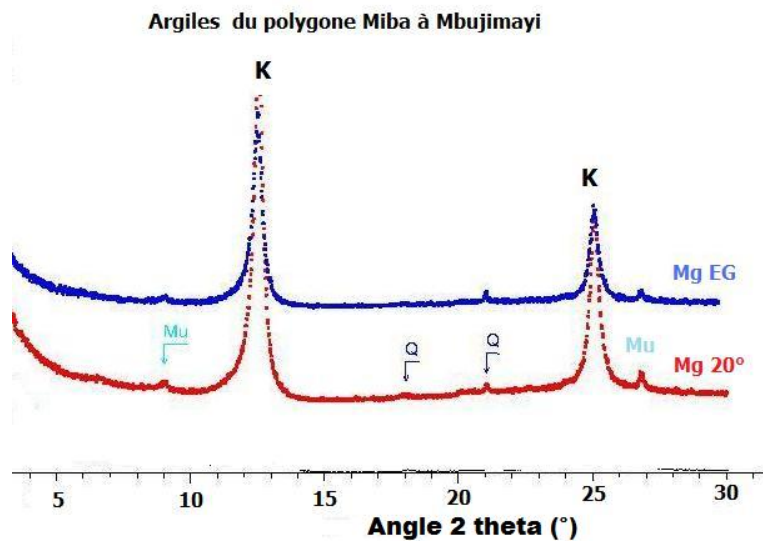


FIGURE 3.27 – Diffractogrammes d'argiles saturées au magnésium, solvatées et non-solvatées : cas de l'échantillon M2

citrate (DCB) dont nous reparlerons dans les analyses chimiques réalisées (section 4.6.5). En comparant les diffractogrammes de l'argile et de l'argile déferriée sur la Figure 3.28, aucune modification notable ne peut être signalée. Il est donc très probable que la quasi totalité du fer présent soit sous forme de goethite ou d'hématite et non dans la structure des phyllosilicates.

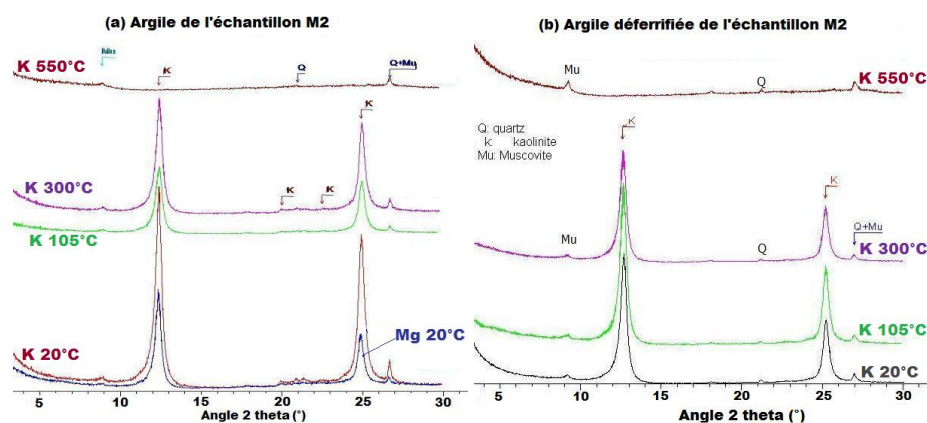


FIGURE 3.28 – Diffractogrammes de l'argile et de l'argile déferriée d'un sol de Mbujimayi : cas de M2

Les diffractogrammes d'argiles issues des échantillons D1, D5 et D6 dans la ville de Muene-Ditu, sont donnés en annexe A.1.3.

3.4.3.7 Composition minéralogique des différents sols

En se basant sur les formules suivantes : kaolinite ($2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 2H_2O$), quartz (SiO_2), hématite (Fe_2O_3), goethite ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$) et des résultats de l'analyse chimique élémentaire présentés dans le Tableau 4.12, nous avons réalisé un calcul de la composition minéralogique semi-quantitative. Le fer se trouve partagé entre l'hématite et la goethite, à des proportions non-déterminables par un calcul manuel. Néanmoins, l'observation des pics ferait penser à une plus grande quantité d'hématite que de goethite. L'aluminium est supposé se trouver totalement dans la kaolinite. La silice a été partagée entre la kaolinite et le quartz (silice libre). Le Tableau 3.5 présente les résultats.

Les résultats confirment la présence de plus de quartz dans les échantillons M1 et M2 qui sont plus sableux que ceux de Muene-Ditu. Inversement, on a plus de

	M1	M2	D1	D2	D5	D6
Quartz	82,7	72,9	44,0	45,4	41,7	56,0
Kaolinite	14,9	23,1	50,3	47,2	53,1	37,7
Hématite et Goethite	1,5	2,5	3,7	3,9	3,8	2,9
Autres	1,0	1,5	2,0	3,5	1,3	3,4
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tableau 3.5 – Composition minéralogique semi-quantitative des échantillons

kaolinite et d’oxydes de fer, donc plus de fractions argileuses dans les échantillons de Muene-Ditu. En comparant les échantillons par ville, on constate que pour la ville de Mbujimayi, l’échantillon M2 du polygone Miba est le plus argileux alors que pour la ville de Muene-Ditu, c’est l’échantillon D5 de Kamabue-Est. On peut aussi voir que le pourcentage des autres minéraux présents, dont la muscovite, est plus élevé pour les échantillons de Muene-Ditu, ce qui justifie les pics plus visibles de ce minéral sur les diffractogrammes.

Ces compositions minéralogiques seront chimiquement comparées à certaines recommandations des céramistes (cfr section 4.6.4.5).

3.4.4 Analyses thermiques

Le but des analyses thermiques est de préciser le comportement d’un matériau au cours du chauffage en se basant sur l’étude de la chaleur dégagée ou absorbée par ce matériau quand il subit des transformations physiques ou chimiques. Les principales techniques utilisées sont l’analyse thermique différentielle (ATD ou DTA), l’analyse thermogravimétrique (ATG ou TGA), l’analyse dilatométrique différentielle (ADD) et les spectroscopies d’adsorption et d’émission. Ce sont les deux premières méthodes qui ont été utilisées pour l’analyse de nos échantillons. Elles ont été réalisées au laboratoire de l’Unité de Chimie des Matériaux inorganiques et organiques de l’UCL (CMAT).

Les minéraux argileux comprennent différents types d’eau ou d’ions OH dans leur structure, caractérisés par leur énergie de liaison (Figure 3.29).

Les méthodes thermiques sont très utilisées dans le domaine des céramiques.

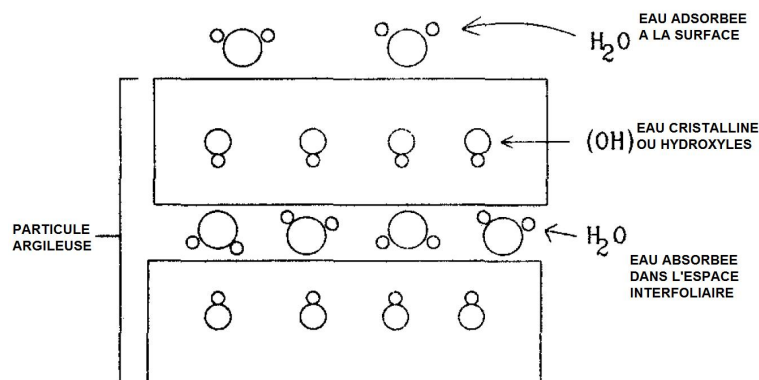


FIGURE 3.29 – Localisation de l'eau dans les argiles
[58]

3.4.4.1 Principes

- a) Analyse thermique différentielle (ATD) : il s'agit essentiellement de la mise en évidence et de la mesure des absorptions ou émissions de chaleur et des températures auxquelles elles se produisent au cours des changements d'états. Ce sont les températures qui servent de caractéristiques et les amplitudes des phénomènes enregistrés permettent d'évaluer des quantités de chaleur, ce qui conduit parfois à l'interprétation des processus et à la teneur en constituants.

Les variations de températures de l'échantillon sont reportées en fonction du temps et de la température du four. La courbe enregistre les pertes d'eau (réactions endothermiques généralement, - sur la Figure 3.30) mais aussi les recristallisations et les recombinaisons (réactions exothermiques, + sur la Figure 3.30).

- b) Analyse thermogravimétrique (ATG) : il s'agit cette fois d'évaluer les variations de poids correspondant aux transformations chimiques qui se manifestent à partir de certaines températures. Ces transformations et l'importance des phénomènes peuvent être comparées aux signaux enregistrés par ATD.

La courbe comporte différents paliers correspondant à la perte des différents types d'eau (Figure 3.31) :

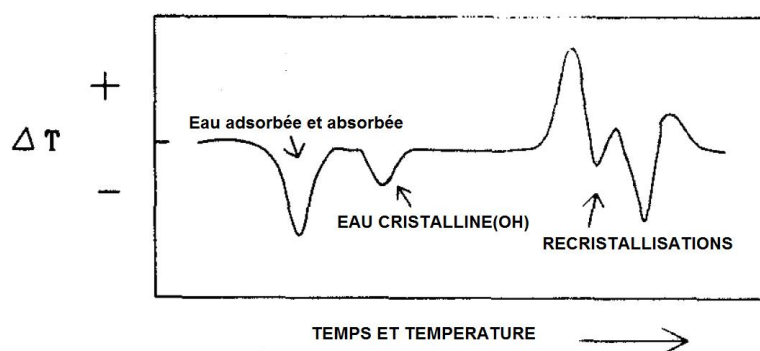


FIGURE 3.30 – Variations de température lors d’une analyse thermique différentielle

[58]

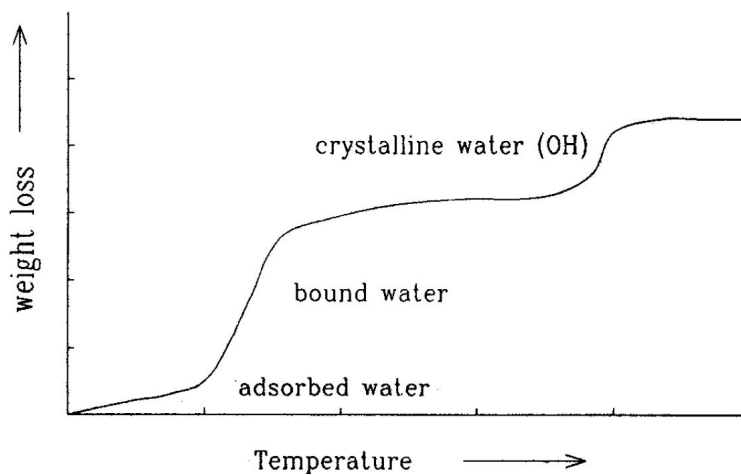


FIGURE 3.31 – Courbe de perte de poids lors d’une analyse thermogravimétrique

[58]

- perte de l'eau adsorbée, généralement vers 80-90°C, correspondant à une perte en poids de 1%
- perte de l'eau zéolitique, i.e. l'eau comprise dans les canaux des argiles fibreuses, il s'agit d'une quantité fixée et limitée se produisant entre 100-150°C
- perte de l'eau absorbée dans l'espace interfoliaire, disposée en 1 ou 2 couches, entre 100-200°C
- perte des ions OH de la structure (eau cristalline), débutant à partir de 500°C.

3.4.4.2 Appareillage

L'appareil qui a été utilisé est un *TMA/SDTA 851^e* qui combine les deux analyses. Ses caractéristiques principales sont (Figure 3.32) :

- Une balance enregistreuse de haute précision au 1/100^e de mg
- un creuset en platine contenant la matière à étudier, suspendu à l'extrémité d'un fléau de la balance
- un four électrique (four horizontal LF 1100°C) régulé suivant une loi linéaire de montée en température en fonction du temps : 10°C/min dans notre cas
- un thermocouple, placé dans le creuset de platine à proximité de l'échantillon, qui enregistre la température de l'échantillon
- Un système d'acquisition et de visualisation des données
- un logiciel de traitement des données (Mettler-Star version 2005).

3.4.4.3 Mode opératoire

Une certaine quantité d'échantillon est broyée dans un mortier. La poudre est ensuite versée dans un creuset en platine que l'on introduit dans le four. L'opération est effectuée sous contrôle de l'atmosphère par l'air sec. Une fois l'essai lancé, le déroulement, le contrôle et le suivi se font par un ordinateur couplé au système. En fin d'essai, on peut tracer les courbes $m = f(t^\circ)$, ainsi que sa courbe dérivée $\frac{dm}{dt} = f(t^\circ)$ et la courbe de variation de température en fonction du temps (SDTA). Signalons que le SDTA (single differential thermal analysis) est la diffé-

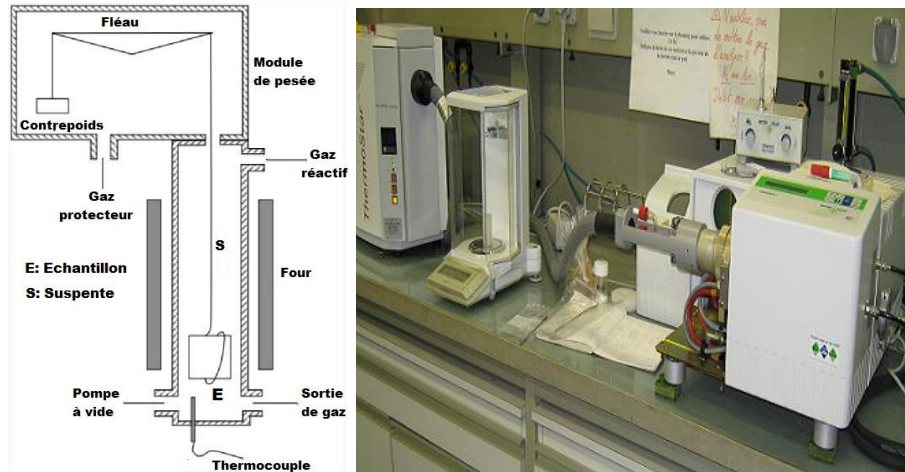


FIGURE 3.32 – Schéma de principe et appareil d'analyses thermiques

rence entre la température de référence calculée par un modèle et la température mesurée de l'échantillon.

3.4.4.4 Résultats et Observations

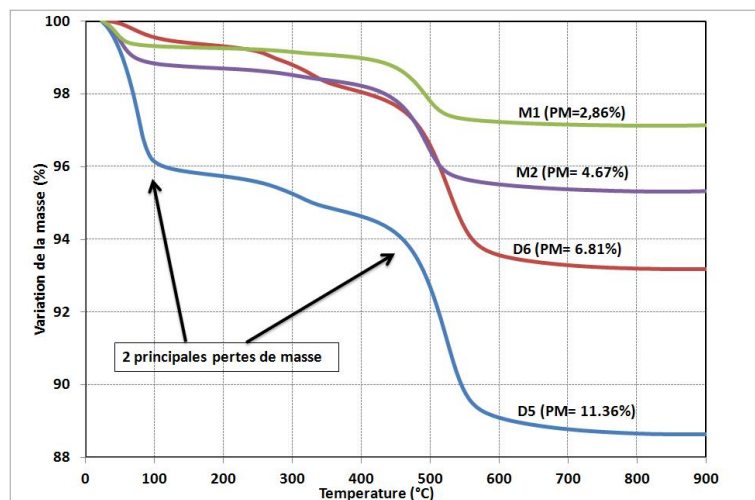


FIGURE 3.33 – Analyse thermogravimétrique des échantillons M1, M2, D5 et D6

- Entre 0 et 900°C, la perte de masse totale des échantillons de Muene-Ditu est supérieure à celle des échantillons de Mbujimayi avec en tête l'échan-

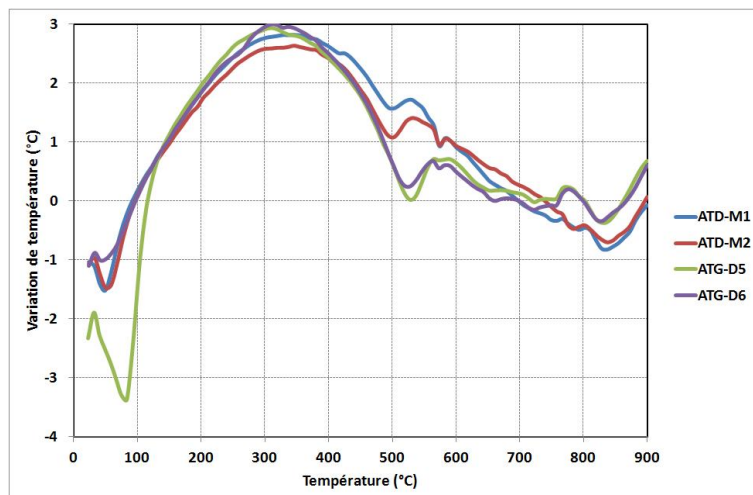


FIGURE 3.34 – Analyse thermodifférentielle des échantillons M1, M2, D5 et D6

tillon D5 du site de Kamabue-Est.

- Deux paliers importants sont à remarquer sur les courbes de l'ATG (Figure 3.33). Celui des températures inférieures à 150°C et un second palier pour des températures supérieures à 150°C. L'allure des courbes montre également que l'échantillon D6 a une faible perte de masse lors du premier palier que les deux échantillons de Mbujimayi mais avec une perte de masse totale plus élevée ;
- L'analyse thermodifférentielle (Figure 3.34) montre trois types de pics importants. Celui entre 50°C et 100°C, ceux compris entre 500 et 530°C et enfin les pics compris entre 770 et 850°C.

3.4.4.5 Interprétation et discussions

- Le caractère peu argileux des deux sols de Mbujimayi explique leur faible perte de masse. En effet, les pertes de masses dans l'ATG correspondent à la perte de différents types d'eau (adsorbée, absorbée et de constitution) dont les quantités sont faibles pour les sols sableux.
- Le calcul du rapport entre la fraction argileuse (FA) tirée du Tableau 4.3 et la perte de masse (PM) de la Figure 3.33 donne les résultats du Tableau 3.6.
- La perte de masse pour une kaolinite pure se situe autour de 14%. Avec

les fractions de kaolinite obtenue dans le Tableau 3.5, on peut calculer la perte de masse due uniquement à la kaolinite (PMK), donnée à la ligne 4 du Tableau 3.6.

	M1	M2	D5	D6
PM	2,9	4,7	11,4	6,8
FA	17,8	29,7	51,5	42,1
PMK	2,1	3,2	7,4	5,3
FA/PM	6	6	5	6

Tableau 3.6 – Relation perte de masse à l'ATG et fraction argileuse

Le Tableau 3.6 et la Figure 3.35 montrent que la perte de masse est directement proportionnelle à la quantité d'argile dans le sol, il en est de même de la perte de masse due à la kaolinite (PMK).

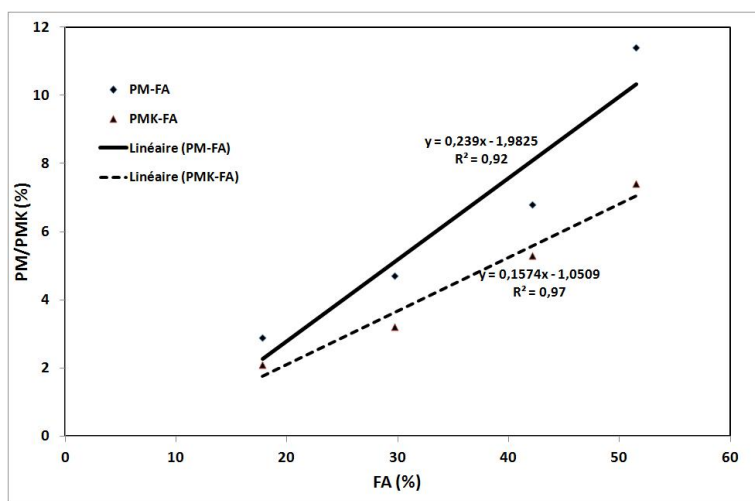


FIGURE 3.35 – Relation entre la perte de masse et la fraction argileuse

- La perte de masse lors du premier palier serait principalement due la perte d'eau adsorbée et interfoliaire. Celle du second palier serait quant à elle une conséquence de la déshydroxylation de la structure argileuse. Ces deux réactions se déroulent avec consommation de chaleur ou baisse de température et se manifestent sur les graphiques de l'ATD par deux pics endothermiques autour de 50°et 500°C.
- Les petits pics endothermiques entre 770 et 850°C seraient des indications

de la transformation de la muscovite détectée à la diffraction X. En effet, nous avons souligné que la muscovite est un type de mica blanc résistant jusqu'au environ de 700°C. La décomposition de la muscovite donne des feldspaths potassiques et la mullite de formule chimique $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, un cristal de forme très effilée se formant notamment dans les argiles vitrifiées à l'occasion de la cuisson et du refroidissement.

- Les deux transformations importantes seraient bien la perte d'eau adsorbée et interfoliaire à des températures inférieures à 150°C et la déshydroxylation de la kaolinite entre 400 et 600°C comme le montrent bien les deux pics de la courbe dérivée (Figure 3.36).
- La fraction de fer sous forme de goethite serait trop faible car le pic endothermique de la transformation de la goethite en hématite, généralement situé autour de 350°C n'est pas perceptible sur les courbes TGA et SDTA. On observe ce petit pic endothermique sur la courbe de la dérivée (Figure 3.36).
- Le pic endothermique autour de 573°C serait dû à la transformation du quartz. En effet, autour de cette température, il y a transformation du quartz α en quartz β , une zone très importante qui demandera une surveillance lors de la phase de cuisson des briques.

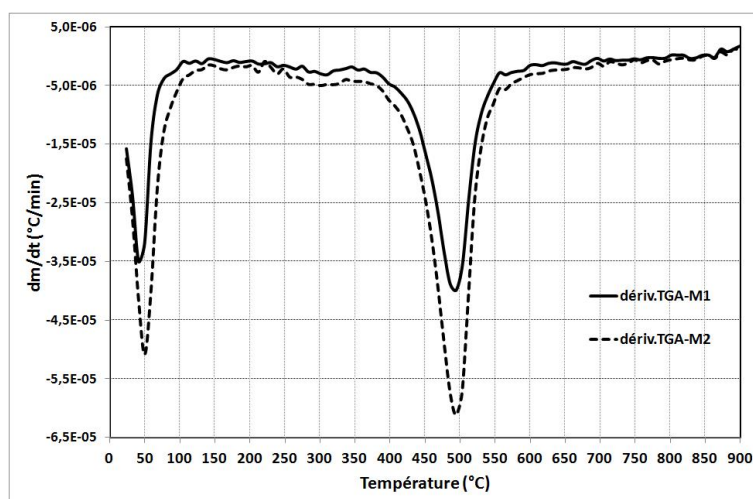


FIGURE 3.36 – Dérivée de la masse en fonction du temps

3.4.5 Microscopie électronique à balayage

3.4.5.1 Principe

Un faisceau d'électrons est projeté sur l'échantillon à analyser (Figure 3.37). L'interaction entre la sonde électronique et l'échantillon génère des électrons secondaires de basse énergie qui sont accélérés vers un détecteur d'électrons secondaires qui amplifie le signal. A chaque point d'impact correspond un signal électrique dont l'intensité dépend à la fois de la nature de l'échantillon au point d'impact qui détermine le rendement en électrons secondaires et de la topographie de l'échantillon au point considéré. Il est ainsi possible, en balayant le faisceau sur l'échantillon, d'obtenir une cartographie de la zone balayée.

Un microscope électronique à balayage (MEB) est essentiellement composé d'un canon à électron et d'une colonne électronique dont la fonction est essentiellement de produire le faisceau d'électrons sur l'échantillon, d'un porte-objet permettant de déplacer l'échantillon dans les trois directions et de détecteurs permettant de capter et d'analyser les rayonnements émis par l'échantillon. En outre, l'appareil doit nécessairement être équipé d'un système de pompes à vide [108].

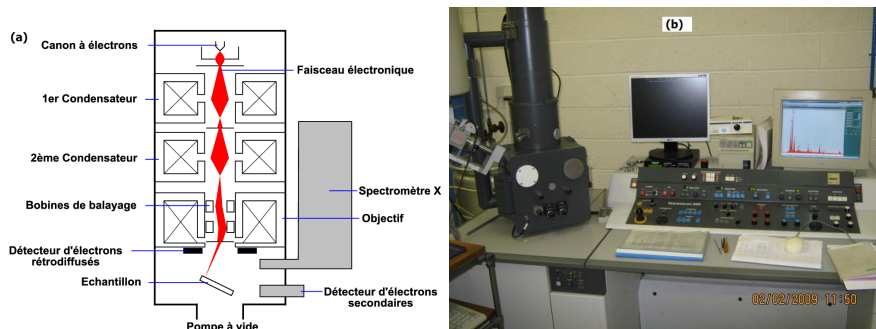


FIGURE 3.37 – Schéma de principe (a) et appareillage (b) de MEB

Remarque : L'interaction électron-matière conduit à des effets d'accumulation de charges à la surface ; ces charges sont évacuées vers la masse dans le cas d'un échantillon conducteur. Dans le cas d'un isolant, leur accumulation déforme le faisceau d'électrons et modifie son énergie effective : il faut donc déposer une couche-mince de métallisation à la surface (or, or-palladium, carbone).

3.4.5.2 Préparation des échantillons et mode opératoire

Une condition essentielle pour obtenir de bonnes images en MEB est que la surface de l'échantillon soit conductrice. Dans le cas contraire, la surface de l'échantillon est recouverte d'un revêtement conducteur constitué d'atomes de carbone ou des métaux lourds (l'or et le palladium dans notre cas) à l'aide d'un équipement de pulvérisation cathodique.

Dans le cas du carbone, la poudre d'échantillon sec est fixée à l'aide d'un papier adhésif recouvert de carbone sur un porte-échantillon. L'ensemble est ensuite introduit sur un support dans la chambre du microscope électronique à balayage. On effectue ensuite le vide dans la colonne reliée à la chambre, puis on dégèle l'image. On fixe la tension d'alimentation et on règle le courant passant dans la sonde. On procède enfin aux réglages et ajustements nécessaires à une bonne résolution.

Dans le cas de l'or et du palladium, après fixation sur le porte-échantillon, on sèche pendant environ deux heures et on métallise par recouvrement d'une couche d'or et de palladium afin de réaliser un pont électrique dans un pulvérisateur. Une fois la métallisation terminée, l'échantillon peut passer au microscope électronique comme décrit précédemment.

3.4.5.3 Résultats

Les Figures 3.38 à 3.41 présentent les résultats de microscopie électronique à balayage réalisée au Laboratoire d'analyse, caractérisation et mise en oeuvre (LACAMI) de l'UCL. Le microscope électronique est de type EDAX. La tension d'alimentation utilisée est de 20kV. Le grossissement variait entre 100 et 4000 fois. Les images ont été réalisées sur base de l'analyse des électrons secondaires. Une micro-analyse électronique par spectrométrie en énergie EDX (energy dispersive X-ray spectrometry) a été associée pour l'analyse semi-quantitative du contenu chimique.

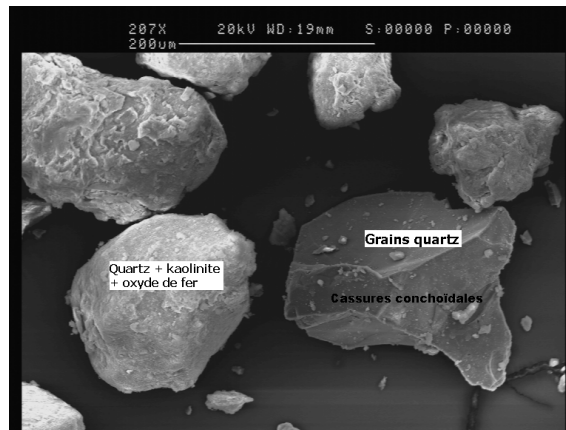


FIGURE 3.38 – Grains de quartz recouverts d’argiles ou non. Échantillon M1

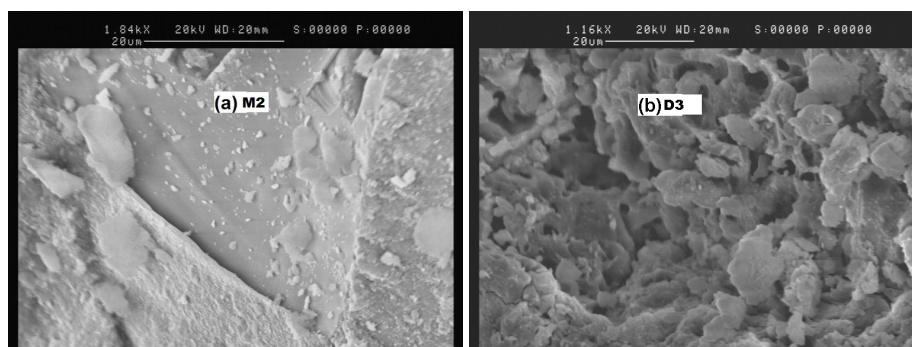


FIGURE 3.39 – Détail d’une couche d’argile entourant un grain de quartz (a) et agrégats d’argile sous forme de plaquettes (b)

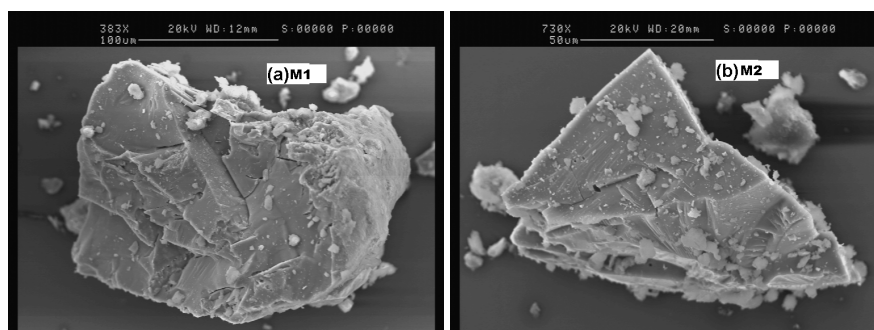


FIGURE 3.40 – Grains de quartz + plaquettes d’argiles

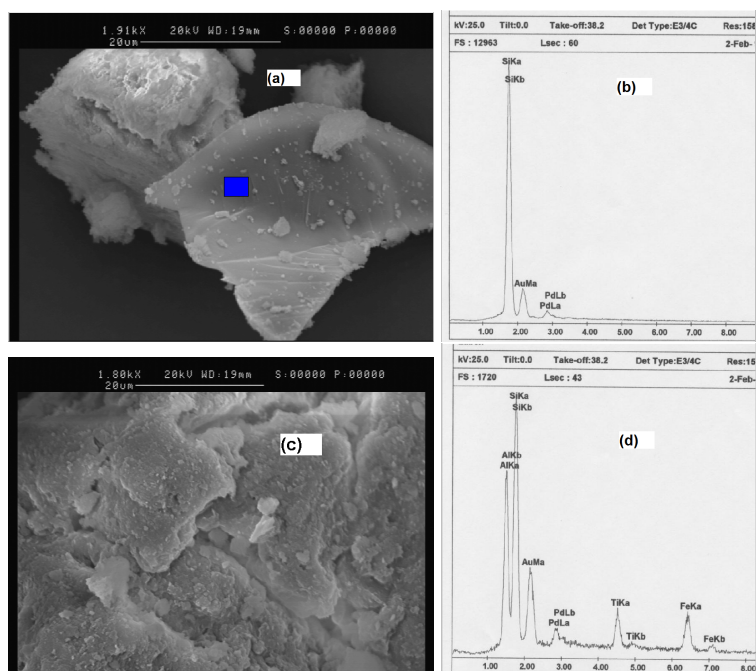


FIGURE 3.41 – Micro-analyse électronique (échantillon M1). (a) et (b) : Zone avec Si majoritaire. (c) et (d) : agrégats terreux avec présence de Si, Al, Fe.

3.4.5.4 Observations et interprétations

- Certaines matrices sont blanches et d’autres grises, avec des dimensions très variables (Figure 3.38). L’examen des faces des matrices grises nous fait penser que celles-ci auraient été mises à nues par des fractures. Tous les grains gris seraient au départ recouverts de la couche blanche (Figure 3.40 (a)). Par contre, les matrices blanches peuvent se retrouver isolées, surtout dans les échantillons de Muene-Ditu (cas de la Figure 3.39 (b))
- Les spectres de micro-analyse réalisée sur les grains gris montrent une quasi-totalité des raies de silicium en plus des raies d’or et de palladium (Figure 3.41 (a)). Ces grains seraient des agrégats de quartz. La micro-analyse faite sur les surfaces blanches révèle la présence de silicium, d’aluminium, de fer et de titane (Figure 3.41 c et d). En faisant le recoupement avec les autres analyses chimiques et minéralogiques, il apparaît qu’une fine couche de micro-agrégats de kaolinite enrobée d’oxyde de fer (goethite et/ou hématite) recouvre les grains de quartz. Signalons que la profondeur analysée ici est de l’ordre du micron.
- Cette fine couche d’argile enrobée d’oxydes de fer présente une hétérogénéité dans sa composition et son épaisseur. Plus elle est épaisse, moins le rapport Si/Al est élevé. Donc, lorsque la couche est moins épaisse, on détecte en plus de la kaolinite et des oxydes de fer, du quartz, ce qui augmente sensiblement la proportion de silicium dans le spectre.
- La topographie est très irrégulière avec une microporosité moyenne pour les échantillons de Mbujimayi et grande pour les échantillons de Muene-Ditu (Figure 3.39).

3.5 Latérites et sols latéritiques

3.5.1 Introduction

Les sols que nous analysons sont également appelés “latérites” ou “sols latéritiques” par tant bien les entreprises de construction qui en font usage que d’autres chercheurs [5].

Dans cette section, nous tenterons de définir le mot “latérite” après un bref rappel historique de son origine. Nous nous intéressons également aux processus de formation des latérites et à leurs classifications. Une discussion sur le comportement particulier de ces sols est présentée et nous terminons le paragraphe par les résultats de deux rapports (Ki et Kr), couramment utilisés pour la définition du caractère latéritique d’un sol et appliqués aux sols du Kasaï oriental.

3.5.2 Historique et tentatives de définition

Il y a plus de deux cent ans que le terme “latérite” a fait son apparition dans la littérature scientifique. Il vient de la racine “later” qui signifie brique en latin. Le mot a été suggéré par Buchanan en 1807 pour désigner un matériau de consistance molle lorsqu’il est en place, qui s’indure rapidement lorsqu’il est exposé à l’air et servant comme “terre à briques” dans les régions montagneuses de Malabar en Inde [98].

Buchanan, cité par Tockol [133], décrivait la latérite comme suit : “...C’est un des meilleurs matériaux de construction, rempli de cavités et de pores, possédant de grandes quantités de fer, de coloration rouge et jaune. L’intérieur du matériau, s’il est à l’abri de l’air, est si tendre que tout instrument métallique la coupe. Aussitôt taillée, à la forme voulue, la masse devient aussi dure qu’une brique et résiste à l’eau et à l’air, bien mieux que toute brique que j’ai vue aux Indes”.

Très tôt, le mot a eu un rapide succès dans le monde entier et plusieurs tentatives de définition ont été proposées. Les premières, comme celle de Buchanan, se basent sur les propriétés physiques de ces formations. Les difficultés d’emplois de cette définition ont amené les chercheurs à proposer des définitions basées sur des propriétés chimiques et minéralogiques. Cette approche s’intéresse particulièrement à la faible présence de silice combinée en regard de l’aluminium et des oxydes de fer.

Des controverses ont conduit certaines disciplines à abandonner le terme de Buchanan et à utiliser à la place des vocables tels que “sols ferrallitiques”, “kaolisols”, etc. Néanmoins, “latérites” reste encore largement employée et rattachée aux formations rouges ou jaunes, riches en sesquioxydes de fer, d’aluminium ou de manganèse, à morphologie variée, indurées ou non, qui semblent correspondre

spécifiquement aux milieux tropicaux [30].

Maignien [98] déclare ce qui suit : " ...le problème (des latérites) doit être pris dans le sens le plus large, sans s'illusionner sur les difficultés que pose un problème si mal défini ".

Bohi [30], faisant référence dans sa thèse au rapport technique des Journées Africaines de Géotechnique, tenues à Yamoussoukro (Côte d'Ivoire) du 3 au 7 octobre 1988, déclare qu'il n'est pas souhaitable de distinguer les latérites et les sols résiduels car les premières font partie intégrante des seconds. Il serait préférable de parler globalement de sols résiduels d'altération pour les sols profonds et superficiels. Le même rapport suggère de limiter l'usage du mot latérite à son emploi comme adjectif dans des expressions sans ambiguïté telles que :

- graveleux latéritiques
- argiles latéritiques
- carapace ou cuirasse latéritique

Le lecteur comprendra donc, face à cette confusion dans l'utilisation du terme "latérite", notre choix du vocable "sols argileux" dans le titre de la présente thèse à la place de "latérites" ou "sols latéritiques". Néanmoins, nous pouvons retenir que la latérite ou sol latéritique est un sol qui se forme dans les régions tropicales et qui résulte d'un processus d'altération particulier, la **latéritisation**.

S'agissant du phénomène de latéritisation, c'est un processus de formation des sols spécifiques aux régions tropicales chaudes et humides. Il s'agit d'une altération de la roche-mère dont la caractéristique essentielle réside dans la mise en solution puis le départ de la silice [30]. Ce phénomène de lessivage s'accompagne d'un enrichissement en fer et en alumine sous forme d'oxydes (Fe_2O_3 et Al_2O_3).

Certains facteurs ont une influence prépondérante sur l'altération des roches et la formation des sols latéritiques qui en découlent, ce sont :

- le climat (pluviométrie, température, bilan hydrique) ;
- la topographie (érosion et drainage) ;
- la végétation (matière organique, bactéries, acides humiques) ;
- la roche-mère.

3.5.3 Classifications des latérites

La classification des latérites a été au centre des recherches sur les sols inter-tropicaux. Les tentatives de classification ont cherché à préciser les relations entre latérites, horizons indurés et les sols [98]. Les critères retenus étaient soit morphologiques, chimiques parfois minéralogiques. Parmi les systèmes de classification, citons :

- Les classifications basées sur les facteurs génétiques : système U.R.S.S.
- Les classifications basées sur les facteurs pédogénétiques : système français et système portugais.
- Les classifications basées sur les propriétés des facteurs ou des processus pédogénétiques : système anglais et système australien.
- Les classifications analytiques basées sur des caractères morphologiques avec préoccupations pédogénétiques : système U.S.A. ; système belge ; système F.A.O
- Il existe également un système du service pédologique interafricain mais qui est plutôt une cartographie qu'une classification.

A propos de la classification belge, Maignien définit que c'est un système morphologique, qui s'appuie essentiellement sur la définition de l'horizon diagnostique, un horizon de sol tropical, présentant les caractéristiques suivantes :

- Réserve en minéraux altérables généralement basse ou inexistante
 - Fractions argileuses composées principalement de kaolinite et/ou d'oxydes
 - Présence de gibbsite mais pas toujours
 - Quelquefois, présence de gels alumino-silicatés
 - Rapport SiO_2/Al_2O_3 proche de 2 mais souvent inférieur à cette valeur
 - Intensités maximum des couleurs dans les rouges et les jaunes résultant d'une accumulation de fer
 - Teneur en argile due à un maximum d'altération et non à une accumulation.
- L'épaisseur peut atteindre 5 à 10m

Selon ce système, l'ensemble des sols latéritiques est groupé surtout dans l'ordre des kaolisols et quelques-uns dans l'ordre des kaolisols lessivés [98].

3.5.4 Répartition des latérites dans le monde

Les latérites sont largement répandues à travers le monde, mais plus particulièrement dans les régions intertropicales d'Afrique, d'Australie, de l'Inde, du sud-est asiatique et d'Amérique du sud (Figure 3.42). Toutefois la répartition de ces sols ne correspond pas nécessairement aux conditions actuelles de genèse. Beaucoup de ces formations sont subactuelles ou fossiles, même en régions intertropicales. Leur existence montre qu'à un moment ou un autre de l'histoire du globe, les conditions de formation ont pu se trouver réunies, conditions qui n'ont pas été nécessairement contemporaines en tous points de la terre.

Plusieurs auteurs, cités par Bohi [30], ont signalé la présence de sols ayant les caractéristiques latéritiques en Europe et aux Etats-Unis.

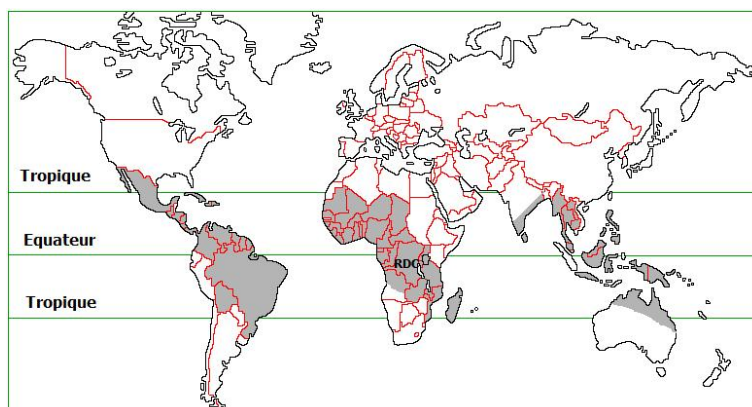


FIGURE 3.42 – Répartition des latérites dans le monde
[30]

Il est maintenant universellement admis que les sols latéritiques n'ont pu s'individualiser qu'à travers des périodes d'évolution extrêmement longues de l'ordre de dizaines et parfois même de centaines de milliers d'années [30]. De nombreuses études tendent à montrer que l'ère tertiaire a présenté des conditions particulièrement favorables à la latéritisation, aussi bien dans les régions intertropicales que dans le reste du monde.

L'abondance de ces formations sous les tropiques ne serait pas tributaire des seules conditions actuelles. Il est probable que ces différences soient liées à l'action des glaciers quaternaires qui, dans les régions boréales, ont arasé les croûtes

d'altération, effaçant les influences anciennes. Ces glaciations n'ayant pas joué dans les régions intertropicales, les formations latéritiques tertiaires viennent s'y ajouter aux formations quaternaires.

3.5.5 Comportement et propriétés des latérites et sols latéritiques

Le problème de la prévision des performances techniques des sols à partir de la compréhension de leurs caractéristiques est une préoccupation majeure en zone tropicale. Il a été longtemps discuté à Hammamet (en Tunisie) pendant l'ICGE⁴ 2010 lors de la rencontre du TC 107 sur les latérites [137].

Dans ces zones climatiques, les sols présentent des variations et inconsistances comportementales par rapport aux sols des zones tempérées qui généralement ont été utilisés dans les principales normes et littératures. Le phénomène de latéritisation serait à la base de ces déviations.

Le comportement des sols tropicaux n'ont pas été suffisamment étudiés et aucune classification unifiée n'existe pour ces sols. Le problème majeur étant la standardisation des comportements présentés par des sols sous des conditions variées. Plusieurs problèmes pratiques des zones tropicales sont résolus en utilisant des approches et modèles mis au point pour les sols des zones tempérées. Bien que ces approches donnent des résultats acceptables dans certains cas, le besoin d'adaptation est indispensable dans le cas des latérites et sols latéritiques. Cette adaptation devra tenir compte de l'hétérogénéité, de l'anisotropie, de l'influence du climat et des phénomènes associés tels que l'altération, la lixiviation et les changements de composition chimique et minéralogique, prononcés dans les régions tropicales et qui sont connus comme ayant une influence sur la résistance et les performances techniques des latérites.

Lors de l'évolution du processus de latéritisation, il y a accumulation d'oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium avec comme conséquence la diminution de l'indice des vides, de la perméabilité et d'une augmentation de la résistance du sol [137].

4. International Conference on Geotechnical Engineering

3.5.6 Utilisation des latérites

Nous avons souligné, au début de cette section, que le mot “latérite” vient de l’utilisation de ces formations comme terres à briques en Indes et en Thaïlande. Leur emploi y serait encore très généralisé.

En génie civil, les applications portent sur l’utilisation de ces matériaux en vue de la construction des routes et des barrages en terre.

Nous pouvons également souligner l’importance des latérites dans les études hydrologiques sous climats tropicaux.

Au Kasaï oriental en particulier, les latérites sont principalement utilisées en génie civil comme matériaux de construction des routes, des habitations (à l’état cru ou cuit) et pour la construction des digues en terre dans l’exploitation artisanale et industrielle du diamant. L’utilisation de ces formations intéresse également les agronomes du fait de leur présence dans les horizons superficiels de la province.

3.5.7 Latérites et argiles

Les données analytiques font apparaître la présence d’argiles dans tous les types de latérites, particulièrement entre la zone d’altération et le niveau d’accumulation des sesquioxydes.

Les argiles reconnues appartiennent principalement au groupe de la kaolinite (kaolinite et halloysites). Maignien [98] signale parfois la présence de vermiculite et de montmorillonite en milieu à drainage déficient lorsque les solutions-mères sont riches en alcalino-terreux.

Il est fréquent aussi de reconnaître des illites. En Afrique noire, elles sont reconnues en moyenne une fois sur deux. Ces minéraux sont soit des produits de transition de l’altération plus ou moins poussée des minéraux phylliteux primaires, soit des produits hérités du matériau d’origine en particulier sur roches sédimentaires, soit enfin des produits de contamination à partir de sources extérieures.

Les principaux facteurs qui déterminent la nature des minéraux d’altération, pour un type de roche donné, sont essentiellement les conditions du drainage et

le contenu ionique des eaux de percolation. Le rôle du matériel est de délimiter les possibilités de transformation. Sur roches acides l'influence de la roche se fait sentir par une individualisation plus poussée du fer que de l'alumine. Sur roches basiques, c'est généralement le contraire [98].

Dans le cas des sols du Kasai oriental analysés dans ce travail, ils viennent d'un processus d'altération des grès (cas de Mbujimayi) et des granites ou gneiss (cas de Muene-Ditu). Ces roches étant acides, on s'attend à une individualisation plus poussée du fer que de l'alumine, ce qui justifie l'absence de gibbsite lors des analyses minéralogiques. Par contre le fer est présent sous forme de goethite et/ou hématite.

3.5.8 Rapport K_i et K_r des sols du Kasai oriental

Plusieurs tentatives de classification des sols latéritiques ont fait recours à ces deux rapports ou à l'un d'entre-eux :

$$K_i = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad (3.4)$$

$$K_r = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (3.5)$$

Parmi les différents auteurs, certains utilisent la quantité totale de silice tandis que d'autres proposent d'éliminer la silice libre (quartz) et donc de ne prendre en compte que la silice qui proviendrait des minéraux argileux. En tenant compte de ces deux approches, on obtient le Tableau 3.7 à partir des résultats de la composition minéralogique semi-quantitative.

	Ki		Kr	
	Silice totale	silice argile	Silice totale	silice argile
M1	15,2	1,2	12,2	0,9
M2	9,2	1,2	7,2	0,9
D1	3,4	1,2	2,9	1,0
D2	3,6	1,2	3,0	1,0
D5	3,2	1,2	2,7	1,0
D6	4,9	1,2	4,1	1,0

Tableau 3.7 – K_i et K_r des sols de Mbujimayi et de Muene-Ditu

On constate qu'en éliminant la silice libre, les valeurs de K_i et K_r se réduisent sensiblement. Pour un sol latéritique, le rapport K_r (ou K_i) devrait être inférieur ou égal à 2, valeur encore très critiquée par certains chercheurs et qui ne serait qu'indicative [98]. Tous ces sols donnent quasiment les mêmes valeurs de K_i et de K_r si la silice libre est éliminée.

3.6 Conclusion

En fonction de la connaissance géologique et des analyses réalisées, il apparaît que les sols de Mbujimayi et Muene-Ditu analysés dans ce travail sont des argiles latéritiques. Elles proviendraient d'un processus de latéritisation (altération et cuirassement) des granites, gneiss et calcaires présents dans les degrés carrés de Mbujimayi, Muene-Ditu et Luiza.

Ces sols argileux sont majoritairement kaolinitiques. En effet, les faibles capacités d'échange cationique, les pics obtenus à la diffraction des rayons X et l'absence de gonflement sont des caractéristiques des argiles du groupe de la kaolinite. Ces observations corroborent celles d'autres chercheurs sur les sols tropicaux qui ont la particularité d'être fortement lessivés et altérés.

En plus de la kaolinite, les minéraux majeurs présents dans les sols analysés sont le quartz, la goethite (et/ou hématite) et la muscovite. L'aluminium est présent presque totalement dans la kaolinite car nous avons observé une absence de gibbsite. Cette absence confirme que le degré d'altération des sols de la région étudiée est très avancé. Dans les sols bruts, le fer se trouverait majoritairement dans la goethite et/ou l'hématite. La goethite se transforme généralement en hématite autour de 350°C. Quant à la muscovite, c'est un mica blanc dioctaédrique qui se rencontre souvent dans les roches plutoniques, mais qui peut aussi se retrouver dans les roches altérées. Elle est plus résistante à l'altération que la biotite, mica blanc trioctaédrique. Après observation au microscope électronique à balayage, nous pouvons affirmer que les grains de quartz sont finement recouverts de kaolinite et d'oxydes de fer.

Les pourcentages de kaolinite, hématite et goethite sont plus élevés dans les sols de la ville de Muene-Ditu que dans ceux de Mbujimayi. Le quartz est quant à

lui plus élevé dans les sols de Mbujimayi. Ceci montre que les sols de Muene-Ditu sont plus argileux que ceux de Mbujimayi et la carrière de Kamabue sur le site de Nduba présente l'argilosité la plus élevée.

L'analyse thermogravimétrique a montré que les pertes de masses sont proportionnelles à l'argilosité des sols. En effet, ces pertes de masses correspondent aux départs des différents types d'eau et, plus le sol est argileux plus la quantité d'eau adsorbée et absorbée est élevée.

Le comportement des sols lors d'une augmentation de température montre deux transformations importantes. La première correspond au départ d'eau adsorbée et interfoliaire à des températures inférieures à 150°C, et la seconde est due à la déshydroxylation de la kaolinite entre 400°et 600°C.

La transformation du quartz α en quartz β , observée autour de 573°C serait importante à surveiller lors de la cuisson des briques, car elle pourrait conduire à leur fissuration.

Entre 770°et 850°C, la muscovite se transforme en mullite, un cristal qui se forme dans les argiles vitrifiées. Ce début de vitrification serait un indice important pour le choix futur des températures de cuisson des briques.

Chapitre 4

Caractérisation physico-chimique des sols

Nouveaux symboles du chapitre

SYMBOLE	DESCRIPTION
ACME	Analyse chimique des matériaux de l'environnement
ASTM	American Society of Testing and Materials
η	Viscosité dynamique
γ_d	Poids volumique du sol sec
γ_L	Poids volumique du liquide
γ_s	Poids volumique des particules solides
w_{op}	Teneur en eau Optimum Proctor
A	Activité d'un sol
ACP	Analyse en composantes principales
D	Diamètre
DCB	Dithionite Citrate Buffered
Dm	Diamètre moyen
E	Energie
FF	Fraction fine (< 80 μm)
FL	Fraction limoneuse (10 - 60 μm)
FS	Fraction sableuse (60 μm - 2 mm)

Nouveaux symboles du chapitre (suite)

SYMBOLE	DESCRIPTION
g	Accélération de la pesanteur
Gs	Densité absolue
Ip	Indice de plasticité
LOI	Perte au feu
MG	Module granulométrie
MO	Teneur en matières organiques
MP	Proctor Modifié
P	Poids
RP	Proctor Réduit
s	Succion
SP	Proctor Standard
TC	Teneur en chaux
v	Vitesse
V	Volume
w_L	Limite de liquidité
w_P	Limite de plasticité
w_s	Limite de retrait

4.1 Introduction

En plus des caractéristiques minéralogiques obtenues au chapitre précédent, la matière première principale entrant dans la fabrication des briques cuites doit avoir des caractéristiques physiques et chimiques permettant de fournir des briques de qualité suffisante. Une propriété importante du matériau de base est la plasticité, afin de faciliter le moulage. L. Mbumbia [101] utilisant dans sa thèse des sols latéritiques ayant des teneurs en argile compris entre 10 et 39%, a proposé que ces valeurs fussent suffisantes pour assurer la plasticité et la cohésion de la pâte dans la fabrication des briques cuites à basse température. Plus le pourcentage en argile augmente, plus la résistance en compression de la brique fabriquée sera élevée. Par contre, une proportion très élevée en argile pourrait causer des retraits et craquages importants, indésirables dans la briqueterie.

Le choix de la matière première n'est pas simplement du ressort de l'expérience, mais les essais in situ et au laboratoire sont également d'une importance primordiale. In situ, ce sont des tests visuels qui peuvent se faire : le toucher,

l'odeur, la fabrication des barres, la sédimentation dans les bols. Au laboratoire, les essais indispensables sont : l'analyse granulométrique complète, la limite de retrait, les limites d'Atterberg, l'essai Proctor et les essais de compressibilité. Pour la fabrication de matériaux de qualité suffisante, 40% en argile serait un minimum alors que pour les tuiles, le minimum requis est de 60% [57].

Les critères granulométriques seuls ne suffisent pas dans le choix d'une matière première. Il est important de réaliser des analyses chimiques afin de s'assurer que la matière argileuse est capable de produire une action pouzzolanique suffisante lors de la cuisson. L'action pouzzolanique est définie comme étant la capacité d'une substance à reproduire la réaction de la chaux au contact de la pouzzolane, c'est-à-dire donner une grande consistance nécessaire à la solidité des édifices¹. Cette action pourrait être diminuée par la présence de composés chimiquement réactifs tels que SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 [128]. La norme ASTM Standard C618 (1980) spécifie les critères chimiques pour une bonne activité pouzzolanique. Cette norme recommande que la somme $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ soit supérieure à 70%, le SO_2 doit être inférieur à 4% et la perte au feu devra rester inférieure à 10%. La norme indienne quant à elle, limite la teneur en CaO à 10%, avec une somme $SiO_2 + Al_2O_3$ qui devra être supérieure à 50% [1].

Une analyse en composantes principales est réalisée en fin de ce chapitre. C'est une méthode statistique descriptive qui permet de visualiser globalement les relations entre les différentes analyses effectuées, ainsi que la situation de tous les échantillons entre eux et avec les analyses.

4.2 Analyse granulométrique

4.2.1 Introduction

L'analyse granulométrique est un élément très important dans l'étude des sols. Elle permet une prévision des caractéristiques. En effet, la granulométrie est corrélée à certaines propriétés physiques, chimiques, mécaniques ou hydrauliques des matériaux. Les sables et graviers (gros grains) forment le squelette résistant et déterminent les propriétés mécaniques alors que les argiles (grains fins) déterminent

1. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Pouzzolane>

les propriétés chimiques et physico-chimiques grâce à leurs grandes surfaces spécifiques.

Pour définir géométriquement un milieu granulaire, on classe les grains en catégories de dimensions peu différentes et on détermine la quantité (exprimée en pourcentage) de matériaux de chaque classe. Le plus souvent, on définit la masse de grains de dimensions inférieures à une dimension D par le pourcentage du passant, et la masse de grains de dimensions supérieures à D par le refus cumulé. La séparation en classes se fait par tamisage pour les éléments de dimensions supérieures à 74 ou 80 μm ou par sédimentation pour les éléments inférieurs à 1 mm ou 2,38 mm². Les résultats sont reportés sur des diagrammes semi-logarithmiques pour les sols dont les grains ont des dimensions souvent très différentes, et sur des diagrammes linéaires pour les graviers et pierrailles qui sont plus uniformes.

4.2.2 Tamisage des sols

En mécanique des sols, les analyses granulométriques s'effectuent à l'aide de tamis (toiles, treillis ou plaques perforées à mailles carrées). Le tamisage peut se réaliser à sec ou à l'eau. Le tamisage par voie sèche s'applique aux fractions supérieures à 50 μm et permet de conserver toutes les fractions. Le tamisage par voie humide quant à lui s'utilise pour les fractions inférieures à 50 μm , impossible à séparer par voie sèche. Etant donnée la présence de quantités non négligeables des deux fractions dans nos échantillons, nous avons utilisé une méthode mixte au Laboratoire d'essais mécaniques, structures et génie civil (LEMSC) de l'iMMC³ à l'UCL, dont le mode opératoire est le suivant :

- prélever environ 500 g de sol préalablement séché à 105°C et l'imbiber d'eau pendant 24h ;
- emboîter ensuite les tamis et soumettre l'ensemble à un jet d'eau sous robinet afin de séparer les particules fines collées sur les grosses ;
- récupérer les particules inférieures à 100 μm dans un bac, laisser décanter et sécher à l'étuve ;
- sécher également les différents tamis à l'étuve pendant au moins 24h ;

2. Selon la série de tamis utilisée et selon les pays

3. iMMC : Insitute of Mechanics, Materials and Civil Engineering

- peser les refus en les cumulant successivement pour éviter des sommations d'erreurs ;
- terminer par un tamisage par voie sèche manuellement (Figure 4.1).



FIGURE 4.1 – Tamisage manuel et pesée

Le Tableau 4.1 donne les différents pourcentages de passants obtenus après tamisage des 2 échantillons de Mbujimayi (M1 et M2) et des 6 échantillons de Muene-ditu (D2 à D7).

D (mm)	M1	M2	D2	D3	D4	D5	D6	D7
5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,5	100,0	100,0	96,1	91,7	100,0	100,0	100,0	99,6
2	100,0	100,0	91,6	87,2	100,0	100,0	100,0	98,2
1	100,0	99,0	84,1	80,3	97,2	97,7	94,0	93,6
0,5	98,9	94,3	78,6	75,8	90,0	89,7	86,8	87,7
0,25	83,7	85,0	73,5	72,9	80,5	80,8	74,6	75,7
0,125	43,4	56,6	66,9	69,3	68,7	69,6	58,5	58,3
0,063	20,8	35,8	61,5	65,8	58,9	59,5	48,4	47,5

Tableau 4.1 – Pourcentage des passants aux différents tamis pour les 8 échantillons du Kasai oriental

Nous constatons que, jusqu'à $250\ \mu\text{m}$, les sols de Mbujimayi présentent des pourcentages de passant supérieurs à ceux des échantillons de Muene-Ditu et que la tendance est inversée à partir du tamis de $125\ \mu\text{m}$. Ceci montre que les échantillons de Muene-Ditu sont constitués de plus de particules fines que ceux de Mbujimayi. Par contre, le pourcentage des grains de grande dimension ($> 2\text{mm}$) est plus élevé dans les échantillons de Muene-Ditu comme on peut le voir sur la Figure 4.2. La granulométrie des sols de Muene-Ditu est donc plus dispersée que

celle des sols de Mbujimayi.

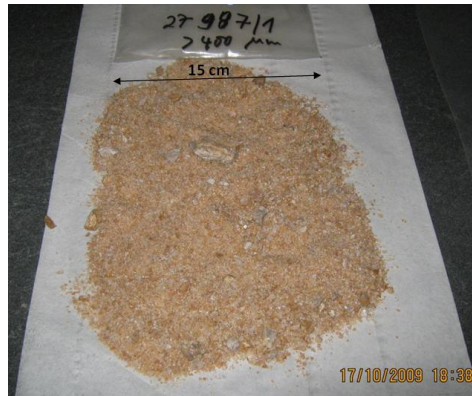


FIGURE 4.2 – Présence de gros grains dans un échantillon de Muene-Ditu

4.2.3 Sédimentation ou Lévigation

Une partie de la fraction passant à $100\ \mu\text{m}$ est prélevée pour l'analyse par sédimentation. La méthode est basée sur la loi de Stokes qui exprime la vitesse de décantation d'une particule sphérique dans un liquide visqueux en fonction du diamètre de la particule. Cette vitesse est constante dès que la résistance opposée par le liquide est égale au poids apparent de la particule, elle est donnée par :

$$v = \frac{D^2(\gamma_s - \gamma_L)}{18\eta} \quad (4.1)$$

avec :

v = vitesse de décantation en m/s

D = diamètre de la particule en m

γ_s = poids volumique des particules solides en N/m^3

γ_L = poids volumique du liquide en N/m^3

η = la viscosité dynamique du liquide en Pa.s.

L'application de la loi de Stokes au processus de sédimentation est basée sur les conditions et/ou hypothèses simplificatrices suivantes [83] :

1. La condition d'écoulement "rampant" c'est-à-dire un écoulement où les effets visqueux dominent sur les effets inertiels et qui correspond à un faible

nombre de Reynolds (beaucoup plus petit que 1) ;

2. La température du liquide reste constante ;
3. Les particules sont de forme sphérique ;
4. Toutes les particules ont la même densité ;
5. Une distribution des particules de toutes dimensions est formée à l'intérieur du liquide.

L'équation 4.1 peut être réécrite comme suit :

$$D = \left[\frac{18\eta}{g} \cdot \frac{v}{(\rho_s - \rho_L)} \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

Si la particule chute d'une distance H en un temps T et si le liquide est l'eau, l'équation 4.2 devient :

$$D = \left[\frac{18\eta}{g} \cdot \frac{H}{T(\rho_s - \rho_L)} \right]^{1/2} \quad (4.3)$$

Les particules plus grosses ont une vitesse de décantation plus élevée. A l'instant T et à la profondeur H, on ne trouve que des particules de dimensions égales ou inférieures à D.

Pratiquement, le mode opératoire de la sédimentation réalisée au LEMSC est le suivant :

- Verser environ 60 g de sol dans une éprouvette de 1 litre, y ajouter 125 ml de solution défloculante (hexamétaphosphate de sodium) et 300 ml d'eau déminéralisée
- Soumettre l'ensemble à une agitation mécanique pendant une nuit (Figure 4.3 a)
- Verser la suspension dans une éprouvette que l'on complète à 1 litre et placer l'ensemble dans un bain-marie à une température contrôlée (Figure 4.3 b)
- Agiter vigoureusement la suspension avec un agitateur manuel afin d'obtenir une concentration uniforme sur toute la hauteur de l'éprouvette
- Retirer rapidement l'agitateur et déclencher le chronomètre
- A l'aide du densimètre que l'on plonge lentement, effectuer les lectures à la

pointe (ménisque inférieur) et au plateau (tête du densimètre) à 30 secondes, 1, 2, 5, 10, 30 minutes, 1, 2, 3, 5 et 24 heures.

- Effectuer les calculs de diamètre de particules et de pourcentage de passants après corrections de ménisque, de température, d'agent dispersant et de densité d'eau.



FIGURE 4.3 – Agitation de la solution défloculée (a) et sédimentation (b) des sols (photos LEMSC)

Le Tableau 4.2 est un exemple de résultats pour le sol de Matshitshi à Muene-Ditu. Les valeurs obtenues permettent de tracer la seconde partie de la courbe granulométrique.

Temps (min)	Pointe (mm)	Plateau (mm)	Température (°C)	D (mm)	Passant (%)
0,25	187,27	163,7	25	0,090	59,44
0,5	187,27	162,27	25	0,064	57,66
1	187,27	161,59	25	0,046	56,82
2	187,27	160,89	25	0,032	55,95
5	187,23	160,6	25	0,020	55,64
10	187,11	159,74	25	0,015	54,72
20	187	157,32	25	0,010	51,86
40	186,94	152,35	25	0,007	45,77
80	186,91	147,66	25	0,005	39,99
120	186,9	144,04	25	0,004	35,52
240	186,9	137,94	25	0,003	27,95
480	186,44	132,59	25	0,002	21,89
1440	186,85	120,41	25	0,0014	6,28

Tableau 4.2 – Résultats de sédimentation sur l'échantillon D1 de Muene-Ditu

4.2.4 Courbes granulométriques des sols

4.2.4.1 Introduction

Les résultats de tamisage et de sédimentation sont souvent reportés sur des courbes granulométriques où les diamètres des grains sont indiqués en abscisses suivant une échelle logarithmique et en ordonnées sont reportés suivant une échelle arithmétique, soit les refus partiels soit les passants (ou leurs compléments, les refus cumulés), en pourcentage. Une correction peut être nécessaire pour raccorder les courbes granulométriques de tamisage et de sédimentation car les traitements des échantillons sont différents.

4.2.4.2 Caractéristiques des courbes granulométriques des sols étudiés

La Figure 4.4 présente les courbes granulométriques des sols du Kasai oriental étudiés dans ce travail.

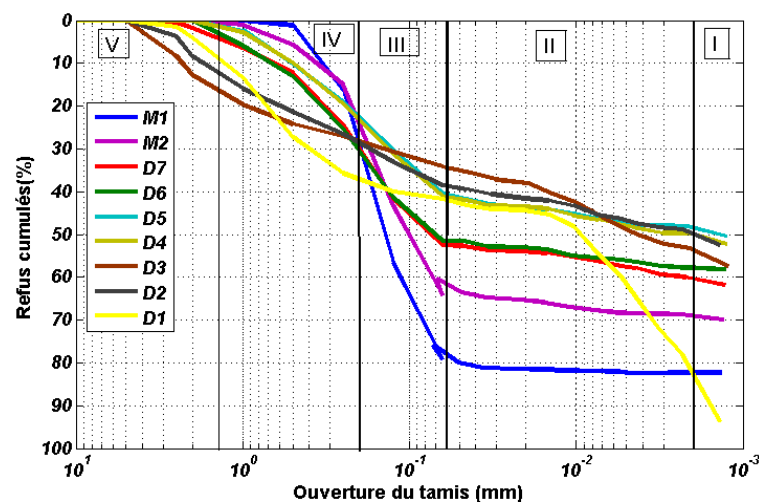


FIGURE 4.4 – Courbes granulométriques des sols du Kasai oriental

Nous constatons que les sols de Mbujimayi présentent une granulométrie plus uniforme ou serrée qui se manifeste par des courbes plus redressées alors que ceux de Muene-Ditu ont une granulométrie non uniforme (ou étendue) avec des courbes plus aplaties. Comme matière première dans la fabrication des briques, les sols de Muene-Ditu nécessiteront donc une attention particulière dans la phase

de broyage afin d'obtenir un produit plus uniforme. Des échantillons de Muene-Ditu, le site de Sanguluja (échantillons D6 et D7) montre une granulométrie plus uniforme que les deux sites de Kamabue (échantillons D2 à D5).

Les échantillons d'un même site, bien que présentant certaines différences dans la coloration, ont des courbes granulométriques quasi-similaires ; c'est le cas des échantillons D2 et D3, D4 et D5, D6 et D7, tous de Muene-Ditu. En effet, la granulométrie d'un échantillon ne représente pas exactement celle d'un massif de sol, qui est hétérogène et qui serait mieux représenté par un fuseau granulométrique [39]. Les échantillons d'un même site appartiennent logiquement au même fuseau granulométrique. Il s'agit des échantillons D2, D3, D4 et D5 du site de Nduba ; des échantillons D6 et D7 pour le site de Luetet.

Le Tableau 4.3 donne les caractéristiques principales des courbes granulométriques des sols du Kasai oriental qui nous concerne. Remarquons également

	M1	M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
FF (%)	26,6	42,2	55,4	60,4	63,9	60,6	60,7	49,4	49,4
FA(%)	17,8	29,7	16,8	50,7	46,4	49,9	51,5	42,1	39,5
FL (%)	4,1	8,6	40,7	10,9	19,2	9,6	8,5	7,3	9,0
FL/FA	0,2	0,3	2,4	0,2	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2
D_m^{-4} (μm)	146,0	105,0	9,5	1,8	4,3	2,0	1,4	66,9	78,0

Tableau 4.3 – Caractéristiques granulométriques de 9 échantillons de sols du Kasai oriental

que le rapport limon/argile⁵ est très faible pour ces sols, inférieur à 0,5 sauf pour l'échantillon D1 de la carrière de Matshitshi. En effet, nous avons déjà signalé que ce rapport est souvent inférieur à 10/15 pour les sols latéritiques [98].

Les sols de Mbuji mayi, bien que de granulométrie uniforme, ont des diamètres moyens très élevés par rapport à ceux de Muene-Ditu. Plus important pour notre étude, les fractions argileuses ($< 2\mu m$) des sols de Muene-Ditu sont au moins égales à 40%, ce qui, selon les observations rapportées à la section 4.1 les prédispose mieux comme matière première dans la fabrication des briques cuites.

La courbe de l'échantillon D1 de Muene-Ditu montre clairement une lacune (défaut) granulométrique. Cet échantillon présente un pourcentage très faible de

5. Limon et argile au sens granulométrique. La fraction limoneuse est celle comprise entre 2 et $60\mu m$

fraction argileuse alors que les observations visuelles et les analyses de plasticité ont confirmé son caractère plastique élevé. Rappelons que cet échantillon a été prélevé à une plus grande profondeur (11m) par rapport à tous les autres échantillons de Muene-Ditu. L'analyse de diffraction X de la section 3.4.3.5 a identifié plus de mica (muscovite) dans ce sol par rapport aux autres.

Afin d'identifier l'origine de cette anomalie, une seconde méthode granulométrique a été utilisée au laboratoire ACME. Il s'agit d'une méthode de décantations successives avec une résine sodique comme agent dispersant. Les résultats de la méthode de résine sur les échantillons M1, M2, D1, D2, D5 et D6, sont présentés dans le Tableau 4.4.

	M1	M2	D1	D2	D5	D6
FS (%)	83,6	70,5	36,5	27,1	39,3	52,9
FA (%)	14,6	25,9	38,4	55,0	50,4	40,8
FL (%)	1,8	3,6	25,1	17,9	10,3	6,3
FL/FA	0,12	0,14	0,65	0,32	0,20	0,15

Tableau 4.4 – Caractéristiques granulométriques de 6 échantillons par la méthode de la résine

Nous constatons, par rapport à la sédimentation à l'hexamétaphosphate comme dispersant, que les fractions argileuses sont très proches, sauf l'échantillon D1 pour lequel FA a plus que doublé au détriment de la fraction limoneuse (FL). Il se pourrait que la défloculation à l'hexamétaphosphate soit inadaptée à l'échantillon D1.

4.2.4.3 Relation entre les fractions argileuses et fines

L'un des objectifs de ce travail est de pouvoir mettre sur pieds des tests ou essais simples pouvant permettre le choix de la matière première. Comme dit plus haut, le choix de la matière est dicté par le pourcentage d'argile dans le sol et, pour obtenir ce pourcentage, une sédimentation est indispensable. Dans les conditions actuelles du Kasai oriental ou dans les circonstances générales de terrain, la sédimentation n'est pas réalisable. Il est donc utile d'examiner l'existence d'une corrélation entre le pourcentage de la fraction argileuse (< 2 microns), indispensable dans le choix de la matière première, et d'autres paramètres faciles à obtenir.

A partir des résultats du Tableau 4.3 et en éliminant l'échantillon D1 dont la lacune granulométrique a été signalée, nous obtenons la courbe présentée à la Figure 4.5 entre la fraction argileuse (< 2 microns) et la fraction fine (< 80 microns), pour les huit échantillons analysés. Signalons ici la très bonne corrélation entre ces deux fractions, avec un coefficient de corrélation de 97%. On voit donc qu'à partir de la quantité des passants au tamis de 80 microns, on peut avoir une idée de la fraction argileuse et décider sur la possibilité d'utilisation du sol considéré dans la fabrication des produits de cuisson.

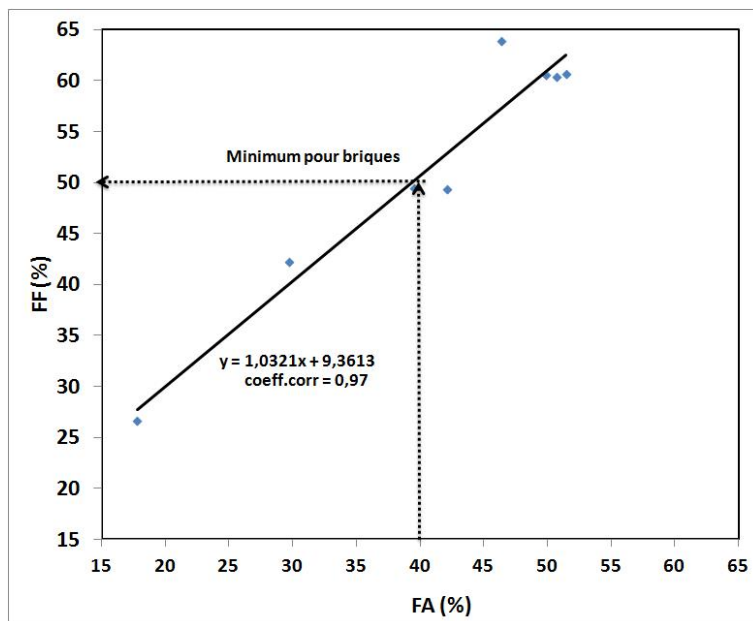


FIGURE 4.5 – Relation entre la fraction argileuse et la fraction fine

En considérant un minimum de fraction argileuse de 40% pour les briques cuites et 60% pour les tuiles (Cfr section 4.1), on arrive respectivement à environ 50% et 71% de fraction fine.

L'International Labour Office [75] propose que les teneurs en fractions argileuses, dans la briqueterie à petite échelle, soient comprises entre 10 et 50%, valeurs qui correspondent suivant la corrélation de la Figure 4.5 à des pourcentages en fines compris entre 20 et 61%.

Ceci pourrait constituer un test simple et rapide pour une première sélection

des sols, principalement sur le terrain. Néanmoins, la sédimentation reste indispensable pour une connaissance plus exacte de la fraction argileuse des sols.

4.3 Les limites d'Atterberg

4.3.1 Introduction

L'analyse granulométrique est insuffisante pour classer convenablement les sols fins. En effet, les matériaux argileux étant très sensibles à l'eau, leur comportement mécanique est très affecté par la teneur en eau ; il faut donc considérer son influence. L'un des moyens pour juger de cette sensibilité consiste à recourir aux limites d'Atterberg.

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau qui définissent les séparations entre les différents états par lesquels passe un sol fin lorsque il est mouillé (la teneur en eau augmente) ou séché (la teneur en eau diminue). Lorsque la teneur en eau augmente, l'état d'un sol fin passe d'un comportement solide à un comportement liquide par des états intermédiaires dits semi-solide (ou solide avec retrait) et plastique (Figure 4.6).

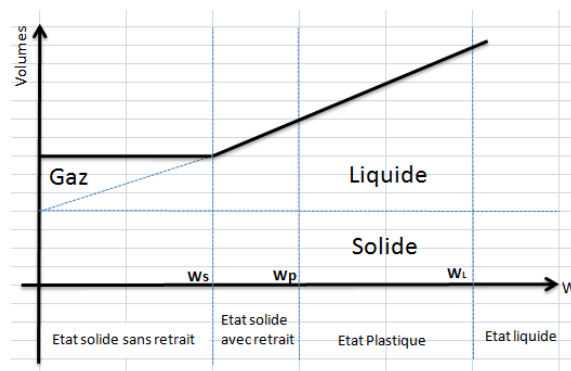


FIGURE 4.6 – Evolution de l'état d'un sol en fonction de la teneur en eau. Les limites d'Atterberg [39]

- L'état liquide est caractérisé par une très grande teneur en eau qui rend les particules solides quasi indépendantes, c'est presque une suspension, aucun contact entre solides n'a lieu, les couches d'eau adsorbée sont épaisses,

elles maintiennent les grains écartés. Le matériau ne présente pas ou très peu de résistance, c'est une vase ou une boue.

- L'état plastique est caractérisé par une teneur en eau élevée (sol saturé), les couches d'eau adsorbée sont mises en commun et les liaisons entre grains se font par elles. La résistance est faible et due à la viscosité des couches d'eau adsorbée. Le sol peut être pétri, sans changement de volume.
- L'état semi-solide (ou solide avec retrait) correspond à des teneurs en eau suffisamment faibles pour que les grains aient des contacts entre les particules solides même si le milieu est encore saturé ou quasi. Ces contacts augmentent la résistance et diminuent fortement la déformabilité, les retraits lors d'une dessiccation encore importants.
- L'état solide (ou solide sans retrait) est caractérisé par des teneurs en eau faibles, pour lesquelles le matériau ne se contracte plus lors d'une dessiccation. Le milieu n'est plus alors saturé, les contacts solides sont renforcés par des actions capillaires et la résistance est importante.

4.3.2 Indice de plasticité et activité

L'indice de plasticité I_p est la différence entre la limite de liquidité w_L et la limite de plasticité w_P :

$$I_p = w_L - w_P \quad (4.4)$$

Cet indice représente le domaine de variation de la teneur en eau correspondant à l'état plastique. Plus il est grand, plus l'attraction entre les particules de sol est grande et plus le sol est argileux.

Skempton (1953) a montré que l'indice de plasticité d'un sol dépendait de sa fraction argileuse et que le rapport $\frac{I_p}{\%Argile}$, appelé **Activité (A)**, était constant. L'Activité d'une argile détermine sa sensibilité au gonflement et trois classes sont habituellement considérées :

- Les argiles inactives : avec $A < 0,75$ (ex : kaolinite) ;
- Les argiles normalement actives : avec $0,75 < A < 1,25$ (ex : illite) ;
- Les argiles actives : avec $A > 1,25$ (ex : montmorillonite)⁶.

6. Illite et montmorillonite sont des phyllosilicates de type 2/1

4.3.3 Principe de mesure des limites d'Atterberg

Les mesures des limites d'Atterberg ont été réalisées au LEMSC sur la fraction de l'échantillon inférieure à 400 μm . La norme NF P 94-051 [18] a été utilisée pour la limite de liquidité et celle de plasticité.

Le principe de mesure de la limite de liquidité consiste à rechercher la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés. Dans le cas de la limite de plasticité, on recherche la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée, se fissure en petits morceaux.

La limite de retrait a été mesurée en suivant la procédure proposée par R. Peltier [117]. On part d'un échantillon de sol porté au voisinage de sa limite de liquidité, dont on mesure le volume V_i et le poids P_i . Après dessiccation complète de l'échantillon, on mesure à nouveau son volume V_f et son poids P_f . Le poids d'eau contenue dans l'échantillon à son état initial est :

$$E_i = P_i - P_f \quad (4.5)$$

Si l'on admet que l'échantillon initial est saturé, c'est-à-dire ne contient plus d'air dans ses pores, la perte d'eau de l'échantillon, quand il passe de l'état initial à sa limite de retrait, est approximativement égale à la diminution correspondante de son volume. V_f étant le volume de l'échantillon à la limite de retrait, il vient que le volume d'eau perdue est :

$$E_p = V_i - V_f \quad (4.6)$$

Ainsi, la teneur en eau de l'échantillon déterminée est sensiblement égale à la limite de retrait cherchée et est donnée par l'expression :

$$w_s = \frac{E_i - E_p}{P_f} \cdot 100 = \frac{(P_i - P_f) - (V_i - V_f)}{P_f} \cdot 100 \quad (4.7)$$

La Figure 4.7 montre quelques étapes importantes de la détermination des



FIGURE 4.7 – Détermination des limites d'Atterberg (photos LEMSC)

limites d'Atterberg.

4.3.4 Limites d'Atterberg des sols du Kasai oriental

Le Tableau 4.5 présente les caractéristiques obtenues pour les sols du Kasai oriental.

Il ressort des valeurs de limite de liquidité que les sols de Muene-Ditu (D1 à D7) peuvent contenir plus d'eau, jusqu'à 53% pour le sol de Kamabue ouest, sans couler sous leur propre poids. Ces sols se déforment de manière plastique pour des teneurs en eau comprises entre 17,4 et 32,4%. Ces valeurs sont plus faibles pour les sols de Mbujimayi (M2).

L'échantillon M1 de Mbujimayi ne présente pas de plasticité. En effet, cet échantillon est composé à plus de 70% de sable. Par rapport à l'indice de plasticité, les sols M2, D1, D6 et D7 sont de faible plasticité. Les sols D2, D3, D4 et D5 sont de plasticité moyenne. L'échantillon M2 de Mbujimayi présente logiquement une faible plasticité due à son caractère plus sableux. Parmi les sites de Muene-Ditu,

	M1	M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
w_L (%)	NP	24,1	44,1	52,9	52,2	41,2	40,5	35,9	34,8
w_p (%)	NP	13,7	31,5	29,2	32,4	21,8	22,7	21,8	17,4
w_s (%)	15,2	12,7	28,1	22,1	24,8	18,2	19,9	15,7	16,1
I_p (%)	NP	10,4	12,6	23,7	19,8	19,4	17,8	14,1	17,4
A	-	0,35	0,75	0,47	0,43	0,39	0,35	0,33	0,44

Tableau 4.5 – Limites d'Atterberg et activités de 9 sols du Kasai oriental. NP : non-plastique

celui de Kamabue Ouest (échantillons D2 et D3) est le plus plastique alors que le site de Sanguluja (échantillons D6 et D7) est le moins plastique. Ce dernier site se situe à la limite du complexe granitique de Dibaya et des gneiss du complexe de Kanda Kanda tandis que le premier se trouve complètement en pleine zone gneissique. Les gneiss seraient donc plus altérés et plus argileux que les granites.

Dans le processus de fabrication des briques, un sol à faible indice de plasticité sera difficile à manipuler lors du moulage. En effet, la brique aura tendance à une distortion au démoulage si elle contient un excès d'eau alors qu'elle sera trop raide si elle manque suffisamment d'eau. En outre, plus un sol est plastique, plus il nécessitera de l'eau pour former une pâte de consistance "normale", c'est-à-dire ne collant pas aux doigts et pouvant supporter des corps inertes (dégraissants) tout en conservant une aptitude au façonnage appréciable et une résistance mécanique à sec suffisante pour assurer la fabrication [116].

Les valeurs de limites d'Atterberg du Tableau 4.6 ont été proposées par l'International Labour Office pour la matière première entrant dans la fabrication des briques de terre cuite. Par rapport à ce tableau, les sols du site de Nduba (D2 à D5) sont trop plastiques et nécessiteraient des ajouts de corps inertes. Néanmoins, les mêmes auteurs soulignent qu'il est possible d'utiliser des matériaux ayant des limites d'Atterberg en dehors des plages proposées.

w_L	w_p	I_p
30-35 (%)	12-22	7-18

Tableau 4.6 – Plages des limites d'Atterberg pour les briques de terre cuite [75]

Les activités de ces sols sont toutes inférieures à 0,5, donc très faibles. C'est

une des caractéristiques des argiles non gonflantes (groupe de la kaolinite), ce qui confirme les résultats des analyses minéralogiques des mêmes sols. Le sol D1 présente une valeur de A plus élevée que les autres, dû à sa lacune granulométrique signalée plus haut.

Les valeurs de limite de retrait sont comprises entre 12,7 % et 28,1%. La valeur la plus élevée concerne le sol du polygone Miba à Mbujimayi alors que c'est l'échantillon de Matshitshi à Muene-Ditu qui présente la valeur la plus élevée. Dans le cadre d'une production de briques de terre cuite, le sol de Kamabue Ouest et celui de Matshitshi sont à surveiller lors de l'étape de séchage à cause de leurs retraits importants, surtout pour les briques "moulées mains" et les briques extrudées dont les teneurs en eau de fabrication sont souvent supérieures à la limite de plasticité.

4.4 Classification des sols

4.4.1 Introduction

A partir des caractéristiques granulométriques et des consistances définies, divers pays ont établi des classifications de sols. Notons qu'un examen visuel basé sur des tests simples est souvent utile pour une première classification nécessaire dans le choix de sites. Nous présentons ci-dessous les principes et résultats des classifications utilisées dans ce travail.

4.4.2 Classification visuelle et par des tests simples

Cette classification est basée sur les sept observations suivantes [39] :

1. Examen visuel de la fraction grosse (sables et graviers)
2. Essai de dilatance (par secousses)
3. Résistance du matériau sec
4. Plasticité
5. Couleur et odeur
6. Traitement à l'acide Chlorhydrique et
7. Aspect de surface

4.4.3 Classification unifiée de l'USBR

La classification unifiée de l'U.S. Bureau of Reclamation (U.S.B.R.) est basée sur l'analyse granulométrique et sur les limites d'Atterberg (Figure 4.8). Les désignations des sols comprennent deux lettres majuscules :

1. La première : C (clay) ; M (Mo : silt) ; S (sand) ; G (gravel) ; O (organic) ;
2. La seconde : W (well graded) ; P (poorly graded) ; C (fines argileuses) ; M (fines limoneuses) ; H (high compressibility) ; L (Low compressibility)
3. Pour les tourbes, un seul symbole : Pt (Peat).

Classification unifiée des sols basée sur l'analyse granulométrique et sur les limites d'Atterberg selon l'U.S.B.R. ou classification "AC System" (Airfield Classification System)						
Groupes principaux		Symbole de groupe	Noms typiques	Critères de classification		
Sols à grains grossiers 50 % au moins de refus à 75 µm	Graviers 50 % au moins de refus à 4,75 mm	GW	Graviers ou mélange de graviers et de sables, propres et à granulométrie étalée.	$C_u = d_{60}/d_{10} > 4$ $1 < C_c = (d_{30})^2/d_{10} \cdot d_{50} < 3$		
		GP	Id. mais granulométrie serrée.	Au moins un des deux critères précédents non satisfait		
		GM	Graviers limoneux. Mélange de graviers, sables et limons.	$I_p < 0.73$ (wL - 20) ou $I_p < 4$	Si $4 < I_p < 7$ et $I_p > 0.73$ (wL - 20), utilisation des deux symboles	
		GC	Graviers argileux. Mélange de graviers, sables et argiles	$I_p > 0.73$ (wL - 20) et $I_p < 7$		
	Sables 50 % au moins de passants à 4,75 mm	SW	Sables ou sables graveleux, propres et à granulométrie étalée.	$C_u > 6$ $1 < C_c < 3$	Au moins un des deux critères précédents non satisfait	
		SP	Id. mais granulométrie serrée.	$I_p < 0.73$ (wL - 20) ou $I_p < 4$		
		Sables avec des fines	SM	Sables limoneux. Mélanges de sables et de limon	$I_p > 0.73$ (wL - 20) et $I_p < 7$	Si $4 < I_p < 7$ et $I_p > 0.73$ (wL - 20), utilisation des deux symboles
			SC	Sables argileux. Mélanges de sables et d'argile		
	Sols à grains fins 50 % au moins de passants à 75 µm	Limons et argiles wL < 50	ML	Limons inorganiques, sables très fins limoneux ou argileux.		
			CL	Argiles inorganiques à plasticité faible à moyenne, argiles graveleuses, argiles sableuses, argiles limoneuses, argiles maigres		
OL			Limons organiques et argiles limoneuses organiques de faible plasticité			
Limons et argiles wL > 50		MH	Limons inorganiques, sables fins ou limons micacés ou diatomés, limons élastiques			
		CH	Argiles inorganiques à haute compressibilité, argiles grasses			
		OH	Argiles organiques de compressibilité moyenne à forte			
Sols fortement organiques		PT	Tourbes, fanges ou autres sols très organiques			

FIGURE 4.8 – Classification unifiée de l'U.S.B.R

[39]

Les résultats obtenus pour les sols du Kasai oriental (Tableau 4.7) confirment les caractères sableux des sols de Mbujimayi et argileux pour les sols de la ville de Muene-Ditu. Il sied de signaler que, pour la production des briques de terre cuite, une attention particulière est nécessaire sur les échantillons D2 et D3 suite à leur probable forte compressibilité et leur forte limite de liquidité.

	$< 75\mu\text{m}$	$< 4,75\text{mm}$	w_L	Classification	Nom plus probable
M1	$< 50\%$	$> 50\%$	-	SC	sable argileux
M2	$< 50\%$	$> 50\%$	-	SC	sable argileux
D1	$> 50\%$	-	$< 50\%$	ML ou CL	Argile sableuse
D2	$> 50\%$	-	$> 50\%$	MH ou CH	Argile inorganique
D3	$> 50\%$	-	$> 50\%$	MH ou CH	Argile inorganique
D4	$> 50\%$	-	$< 50\%$	ML ou CL	Argile sableuse
D5	$> 50\%$	-	$< 50\%$	ML ou CL	Argile sableuse
D6	$> 50\%$	-	$< 50\%$	ML ou CL	Argile sableuse
D7	$> 50\%$	-	$< 50\%$	ML ou CL	Argile sableuse

Tableau 4.7 – Classification unifiée des sols du Kasaï oriental

4.4.4 Diagramme de plasticité de Casagrande

Pour les sols fins, on a recours au diagramme de plasticité de Casagrande qui est un diagramme de l'indice de plasticité (I_p) en fonction de la limite de liquidité (w_L). La Figure 4.9 est une représentation des neufs échantillons du Kasaï oriental sur le diagramme de Casagrande. Quelques observations ressortent de

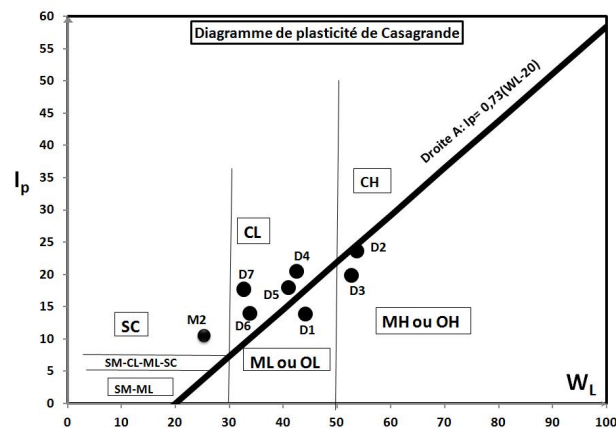


FIGURE 4.9 – Représentation des sols du Kasaï oriental sur le diagramme de Casagrande

cette figure :

- Le sol M1 de Mbujimayi, non-plastique, ne se retrouve pas sur le diagramme ;
- Le sol D1 de Matshitshi se présente comme un limon à faible plasticité
- Le sol D2 se retrouve à la limite de la droite A, nous pensons qu'il serait

plus proche des sols CH que MH du fait de sa faible quantité en limons.

- Tous les points se retrouvent dans la plage d’argiles faiblement gonflantes : famille de la kaolinite.
- Les points de D1 et D3 se retrouvent en-dessous de la droite A. Sur le terrain, les briques artisanales à base de ces sols n’ont pas donné satisfaction et ces couches de sols sont actuellement abandonnées. On sait en outre que les matériaux appartenant à une même couche géologique se retrouvent alignés sur une droite quasi parallèle à la droite A, ce qui est le cas des points D1 et D3.

4.5 Caractéristiques de compactage

4.5.1 Introduction

L’une des méthodes de mise en place ou modelage des briques avant la cuisson est le compactage. C’est actuellement le seul moyen utilisé au Kasai oriental pour la production des briques cuites artisanales. C’est également la méthode que nous avons adoptée lors de la fabrication des briquettes en laboratoire. La réussite de ce processus dépendra de la connaissance du comportement des matériaux.

L’efficacité d’un compactage dépend :

- du matériau (de sa nature, de sa granulométrie,...)
- de la teneur en eau
- de l’énergie de compactage
- du type de compactage (statique, dynamique, malaxage,...) et
- du programme de compactage

Les conditions de mise en place des sols cohérents sont plus strictes que celles des sols sableux, principalement en ce qui concerne les conditions d’humidité [39].

Dans cette section, nous présentons quelques aspects théoriques utiles à la compréhension du phénomène de compactage des matériaux non-saturés. Les caractéristiques de compactage des sols du Kasai oriental sont ensuite déterminées par un essai Proctor standard et par certaines méthodes empiriques.

4.5.2 Objectifs du compactage

L'objectif du compactage est de resserrer les grains en expulsant l'air contenu dans le matériau foisonné. C'est ce qui entraîne la diminution du volume initial du matériau et aboutit à un meilleur arrangement des grains. Dans le cas où la terre est utilisée en construction, le principal objectif est l'amélioration des caractéristiques mécaniques, car les sollicitations qui seront appliquées à ces matériaux sont beaucoup plus importantes que dans le cas des remblais.

4.5.3 Phénomènes observés lors du compactage

Nous ne traitons ici que du compactage oedométrique d'éprouvettes de terre foisonnée.

4.5.3.1 Approche volumétrique

Lors du compactage oedométrique d'un matériau foisonné dans un moule, la courbe reliant la contrainte totale axiale σ_1 au tassement Δl_1 enregistré verticalement, est du type de celle présentée sur la Figure 4.10.

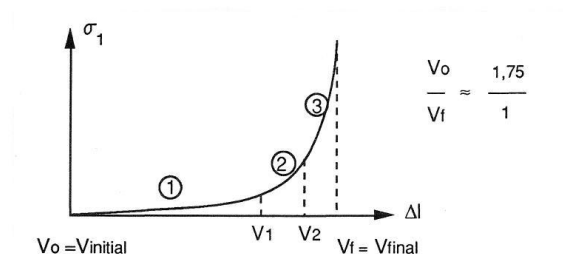


FIGURE 4.10 – Phases du compactage oedométrique
[109]

Cette courbe varie en fonction de la granulométrie du sol et du type d'argile qu'il contient, de sa teneur en eau de compactage, de la vitesse et du type de sollicitation. Sur cette courbe, nous observons trois zones :

- La zone 1 correspondant à l'évacuation d'une grande partie de l'air contenu dans le sol. Dans cette partie, les diamètres moyens des grains varient beaucoup, de 1mm à l'origine à 100 μm environ, et les grains ont peu de zones

de contact. A la fin de cette zone, le rapport V_1/V_f est de l'ordre de 1,5 à 1,3.

- La zone 2 correspond au début du calage des grains. Ceux-ci s'intercalant, développent des efforts de frottement de plus en plus élevés, ce qui provoque l'augmentation des contraintes nécessaires au compactage. Cet effort reste cependant assez faible, inférieur à 0,5 MPa, c.-à-d. en deçà de la contrainte correspondant à l'énergie "Proctor Normal" (cfr Tableau 4.8). V_1/V_2 est de l'ordre de 1,2.
- La zone 3 est celle qu'on atteint obligatoirement en construction. A ce niveau l'augmentation du compactage ne diminue presque plus le diamètre des pores, mais améliore l'intercalation des grains, ce qui entraîne la fermeture de certains pores limitant ainsi les circulations d'air entre les pores. Le volume varie donc faiblement dans cette zone. Le rapport V_2/V_f varie de 1,3 à 1,1 alors que V_o/V_f est de l'ordre de 1,75 à 1,8.

On admet qu'étant donnés la vitesse d'application de l'effort de compactage et de diamètre des pores dans les zones 1 et 2, la porosité de l'air y est suffisamment ouverte pour que sa pression reste égale à la pression atmosphérique. L'air peut donc s'échapper librement sans provoquer de surpression. En revanche, dans la dernière partie, on peut supposer que ces surpressions peuvent exister [109].

4.5.3.2 Perméabilité à l'eau et à l'air

La mise en pression de l'air peut également être mise en évidence par l'analyse de la perméabilité à l'eau et à l'air des matériaux non-saturés.

Plusieurs approches montrent que lors du compactage d'un échantillon de sol destiné à la fabrication d'un bloc de terre, la contrainte totale appliquée à cet échantillon est en partie reprise par l'eau et l'air qu'il contient. Or seule la partie résiduelle peut être considérée comme " efficace " pendant le compactage, puisque c'est elle qui caractérise la contrainte exercée réellement entre les grains. En revanche, la pression interstitielle prise en compte dans le calcul de la succion après le compactage, viendra participer à l'amélioration des caractéristiques mécaniques du matériau.

La mécanique des sols appliquée aux milieux non-saturés a développé des

modélisations dont l'objectif est de traduire quantitativement la répartition de la contrainte totale extérieure en contraintes sur les grains, l'eau et le gaz qui constituent le sol. Ces théories introduisent un paramètre supplémentaire, la succion, s , qui est définie telle que :

$$s = u_a - u_w > 0 \quad (4.8)$$

avec :

u_a : pression du gaz (air en général) ;

u_w : pression du liquide (eau en général).

La succion s'exprime en MPa mais elle peut aussi être exprimée sous forme de potentiel de succion ($pF = \log(s)$).

L'un des effets les plus connus de la succion est la remontée capillaire de l'eau dans un tube fin (Figure 4.11).

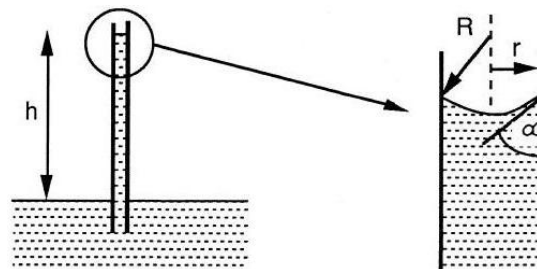


FIGURE 4.11 – Remontée capillaire dans un tube
[109]

Ce phénomène de succion se retrouve dans les sols, mais d'une manière plus complexe, car les pores y sont de diamètres très variables. De plus, la teneur en eau du sol intervient comme paramètre supplémentaire vu que les pores ont un diamètre très faible et les circulations d'eau peuvent être bloquées par les bulles d'air. Il s'en suit une relation assez complexe entre la succion et la teneur en eau du sol.

Dans la phase de compactage, c'est essentiellement l'aspect circulation d'eau et d'air qui est importante, car c'est ce qui peut entraîner le piégeage et la mise en pression de l'eau et de l'air dans le sol. C'est pourquoi le paramètre succion est intéressant à introduire.

La succion est également importante dans l'évaluation de la perméabilité à

l'air ou à l'eau des sols. La variation de ce paramètre a des conséquences très importantes sur le tassement et la consolidation des sols non-saturés, ainsi que sur le comportement de ces sols lors de cycles séchage-humidification et chargement-déchargement [109].

4.5.4 Essai Proctor

4.5.4.1 Généralités

L'influence de la teneur en eau sur l'état de compaction est déterminée généralement par un essai Proctor. Le but de cet essai est de déterminer la variation du poids volumique du sol sec γ_d en fonction de la teneur en eau w d'un échantillon compacté en plusieurs couches dans un cylindre au moyen d'une pilette en respectant des conditions standardisées dont les principales sont reprises dans le Tableau 4.8.

	Proctor Normal	Proctor Modifié	Proctor Normal	Proctor Modifié
Moule	"CBR"	"CBR"	"Proctor"	"Proctor"
Diamètre (mm)	152,4	152,4	101,6	101,6
Hauteur utile (mm)	2,316	2,316	0,948	0,948
Volume (dm^3)	127	127	117	117
Dame				
Diamètre (mm)	50,8	50,8	50,8	50,8
Masse (kg)	2,49	4,54	2,49	4,54
Hauteur de chute (mm)	305	457	305	457
Nombre de chutes par couche	55	55	25	25
Nombre de couches	3	5	3	5
Energie (Nm ou J)	1229	5593	559	2544
Energie volumique (MJ/m^3)	0,531	2,415	0,589	2,683

Tableau 4.8 – Caractéristiques des principaux essais Proctor
[39]

Les résultats des essais sont reportés sur un diagramme du poids volumique du matériau sec en fonction de la teneur en eau w (courbe Proctor). Le poids volumique maximum γ_{dmax} et la teneur en eau correspondante (teneur en eau optimum w_{opt}) sont déterminés à partir de cette courbe.

4.5.4.2 Essai Proctor standard d'un échantillon de sol du Kasai oriental

Afin d'obtenir les caractéristiques de compactage, un essai Proctor standard (Proctor normal en moule Proctor) a été réalisé sur l'échantillon M2 au laboratoire LEMSC selon la norme française NF P 94-093 [17] et les résultats se présentent sur la Figure 4.12.

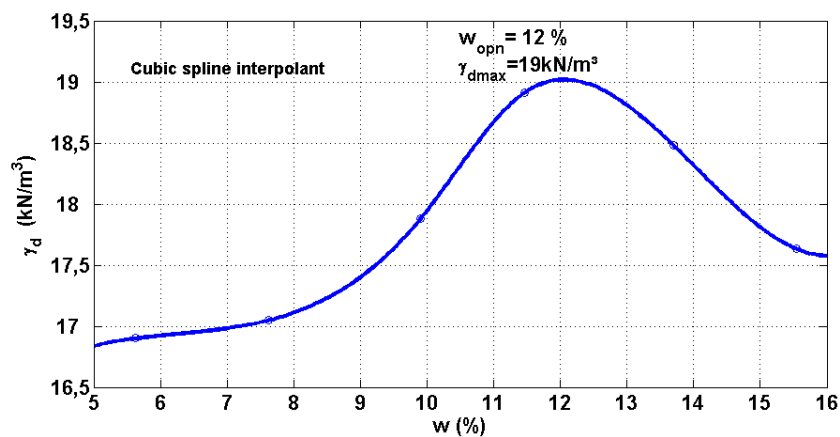


FIGURE 4.12 – Courbe Proctor standard de l'échantillon M2 de Mbujimayi.

Nous obtenons pour ce sol une teneur en eau optimum $w_{opt} = 12\%$ et un poids volumique du sol sec $\gamma_{dmax} = 19 \text{ kN/m}^3$.

4.5.5 Estimation des propriétés de compactage à partir des caractéristiques physiques des sols argileux.

Il n'est toujours pas possible, pour plusieurs raisons, comme l'insuffisance de matériaux, d'obtenir les caractéristiques de compactage (Proctor) d'un sol alors que ces dernières sont indispensables pour le contrôle de la qualité de compactage. Dans notre cas, le laboratoire d'essai (LEMSC) étant très éloigné des sites d'échantillonnages (RDC), le transport de quantité de sols nécessaires aux essais Proctor était devenu une tâche difficile, ce qui nous a conduit à exploiter les expressions semi-empiriques.

Plusieurs auteurs ont proposé des relations qui permettent d'évaluer ces paramètres (densité sèche maximale et teneur en eau optimum) à partir de grandeurs

physiques. Nous présentons ici quelques-unes de ces relations.

1. Lucio Di Matteo [99] propose les relations suivantes entre la limite de liquidité (w_L), l'indice de plasticité (I_P), la densité absolue (G_s), la teneur en eau optimum (w_{opm}) et la densité sèche maximale (γ_{dmax}) pour un Proctor Modifié.

$$w_{opm} = -0,86.w_L + 3,04.(w_L/G_s) + 2,2 \quad (4.9)$$

$$\gamma_{dmax} = [(40,316.w_{opm}^{-0,295}).I_P^{0,032}] - 2,4 \quad (4.10)$$

Ces formules empiriques sont valables dans les conditions suivantes :

- $7 \leq w_{opm} \leq 23\%$;
- $15 \leq \gamma_{dmax} \leq 22kN/m^3$;
- $18 \leq w_L \leq 82\%$;
- $1 \leq I_P \leq 51\%$; et
- $2,47 \leq G_s \leq 3,09$.

2. Lisa R. Blotz [96] propose quant à lui des relations entre w_{op} et γ_{dmax} avec la limite de liquidité et l'énergie de compactage E.

$$\gamma_{dmax,E} = \gamma_{dmax,k} + (2,27w_L - 0,94)\log\left(\frac{E}{E_k}\right) \quad (4.11)$$

$$w_{op,E} = w_{OP,k} + (12,39 - 12,21w_L)\log\left(\frac{E}{E_k}\right) \quad (4.12)$$

Si seule la limite de liquidité est connue, on peut estimer les caractéristiques d'un essai Proctor à une énergie donnée E par les relations ci-dessous :

$$\gamma_{dmax,E} = (2,27\log w_L - 0,94)\log E - 0,16w_L + 17,02 \quad (4.13)$$

$$w_{op,E} = (12,39 - 12,21\log w_L)\log E + 0,67w_L + 9,21 \quad (4.14)$$

Blotz suggère que ces formules s'appliquent aux sols ayant les caractéristiques proches de celles des sols utilisés dans le modèle, dont les limites de liquidité étaient comprises entre 17 et 70%. Il recommande la Figure 4.13 afin d'estimer les paramètres du Proctor en fonction de la limite de liquidité

d'un sol.

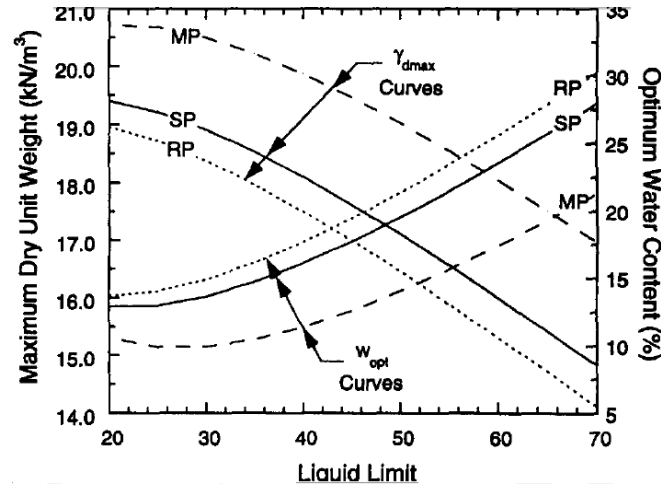


FIGURE 4.13 – Caractéristiques de compactage en fonction de la limite de liquidité [96]

3. Craig H. Benson, dans son article [40], présente la relation suivante entre γ_{dmax} et w_{op} , tiré des travaux de Blotz et al.[96]

$$\gamma_{dmax} = 45w_{OP}^{-0,34} \quad (4.15)$$

L'auteur propose également une zone de la courbe de compactage Proctor adéquate pour un bon compactage afin d'atteindre une perméabilité inférieure à 10^{-7} cm/s, recommandée dans le compactage d'argiles utilisées comme couverture lors du confinement des déchets.

Kolawole Osinubi [86], traitant de la conductivité hydraulique des sols latéritiques compactés, aborde dans le même sens que Benson. Il caractérise la distribution granulométrique d'un sol par un module granulométrique (MG) défini comme suit :

$$MG = \frac{[300 - (\% < 2mm + \% < 425\mu m + \% < 75\mu m)]}{100} \quad (4.16)$$

Les formules (4.13) et (4.14), appliquées à l'échantillon M2 sur lequel a été réalisé l'essai Proctor standard, pour une énergie du Proctor standard de 592,5

kJ/m^3 , donnent $w_{opn} = 12,92\%$ et $\gamma_{dmax} = 19,26 \text{ kN/m}^3$, valeurs qui se rapprochent bien de celles obtenues après réalisation de l'essai sur cet échantillon. Le Tableau 4.9 donne les caractéristiques du Proctor modifié obtenu avec les formules (4.9), (4.10), (4.13) et (4.14).

	w_L (%)	w_p (%)	I_P	G_S	w_{opm} (%)		γ_{dmax} (kN/m^3)	
					Di Matteo	Blotz	Di Matteo	Blotz
D1	44,1	31,5	12,6	2,66	14,7	12,4	17,4	19,5
D2	52,9	29,2	23,7	2,68	16,8	15,0	17,0	18,8
D3	52,2	32,4	19,8	2,70	16,0	14,7	17,2	18,8
D4	41,2	21,8	19,4	2,66	13,8	11,7	18,0	19,8
D5	40,5	22,7	17,8	2,65	13,9	11,5	18,0	19,8
D6	35,9	21,8	14,1	2,65	12,5	10,6	18,4	20,2
D7	34,8	17,4	17,4	2,65	12,2	10,5	18,7	20,2
M2	24,1	13,7	10,4	2,66	9,0	10,0	20,3	20,7

Tableau 4.9 – Caractéristiques Proctor modifié de huit échantillons de sols du Kasaï oriental

Nous constatons que les formules de L. Di Matteo donnent un point Proctor à droite (w_{opm} plus élevée) mais plus bas (γ_{dmax} plus faible) que celui donné par les formules de L.R. Blotz. Afin de se placer du côté de la sécurité, ce sont les premières qui seront utilisées lors du façonnage des briques.

4.6 Analyses chimiques de la matière première

4.6.1 Introduction

La prédiction du comportement à la cuisson d'un matériau exige une connaissance approfondie de la composition chimique. L'analyse chimique peut aider à l'identification des minéraux argileux présents dans la matière première.

Une forte proportion en matières organiques peut conduire à la production des "corps noirs", nuisibles à la qualité des briques. Comme dit plus haut (cfr section 4.1), les éléments chimiquement réactifs, les teneurs en soufre et en CaO devront être contrôlés.

Dans ce paragraphe, nous analysons les teneurs en matières organiques, les teneurs en chaux et l'analyse chimique élémentaire. Nous terminons par une discussion sur la déferrification des argiles du Kasaï oriental.

4.6.2 Teneur en matières organiques et teneur en chaux

4.6.2.1 Mode opératoire

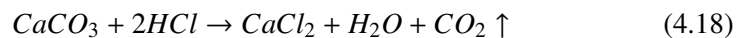
Les teneurs en matières organiques et en chaux ont été obtenues suivant les normes belges NBN 589-207 [88] et NBN 589-209 [89].

Les matières organiques contiennent le carbone combiné à l'hydrogène, l'oxygène, l'azote et d'autres éléments. Au laboratoire, ces composés sont éliminés par des méthodes variées dont les principales sont : la calcination, l'oxydation au peroxyde et l'oxydation au dichromate. Nous avons utilisé la méthode du peroxyde au laboratoire LEMSC. Il s'agit d'une attaque d'une quantité déterminée de sol par le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2). En fait, le peroxyde se décompose en libérant un atome d'oxygène qui agit vigoureusement sur la matière organique.



Ce réactif élimine le carbone contenu dans les matières organiques sous forme de CO_2 . Par différence entre la masse initiale de l'échantillon sec et celle du résidu sec, on déduit le pourcentage des matières organiques.

Quant à la teneur en chaux, on procède par une attaque à l'HCl. Quand l'acide chlorhydrique agit avec le carbonate de calcium (qui est la forme principale de carbonates dans les sols), il se forme le chlorure de calcium et un dégagement de dioxyde de carbone suivant la réaction :



Après filtration et séchage (Figure 4.14), la teneur en chaux est déterminée par différence entre la masse initiale et celle du résidu de filtration séché.

4.6.2.2 Résultats

	M1	M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
M.O (%)	0,07	0,15	0,09	0,57	0,38	0,31	0,45	0,53	0,26
T.C (%)	2,07	3,99	3,52	4,87	4,14	5,03	4,85	5,01	4,95

Tableau 4.10 – Composition en matières organiques et en chaux

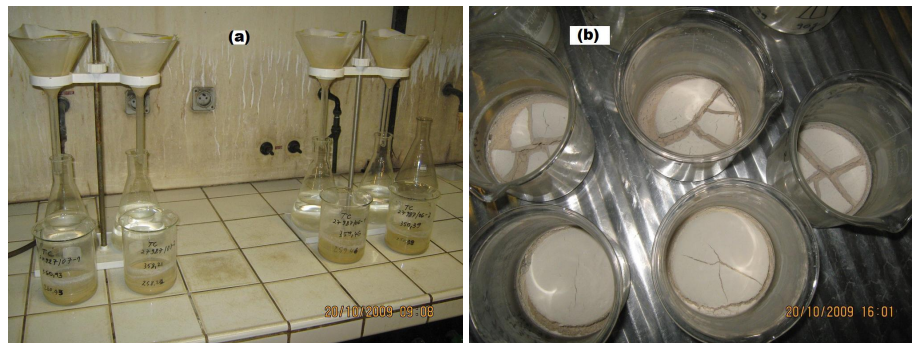


FIGURE 4.14 – Procédure de filtration (a) et décoloration du sol (b) après attaque à l'HCl (photos LEMSC)

4.6.2.3 Observations et interprétation

Nous constatons que les proportions en matières organiques sont comprises entre 0,07 et 0,57%. Selon la classification de la Figure 4.15, on a des sols quasi non-organiques. Les teneurs en matières solubles dans HCl sont inférieures à 10%, une caractéristique des sols à tendance argilo-limoneuse. Tous les sols analysés sont peu calcaires à calcaires.

Le Tableau 4.10 montre que plus l'échantillon est argileux plus les valeurs obtenues par les deux essais sont élevées. Il s'avère que les réactifs utilisés attaquent également d'autres composés de la fraction fine tels que les oxydes de fer. Sur la Figure 4.14 (b), nous constatons la disparition de la couleur rouge caractéristique des sols ferrallitiques après l'attaque par les différents réactifs (H_2O_2 et HCl), signe de l'élimination des oxydes de fer présents. Daniel Njopwouo [114] souligne également, dans une étude minéralogique de quelques sols tropicaux sur granite, que l'utilisation des acides forts a l'inconvénient d'attaquer les feldspaths, les micas et les autres minéraux sensibles aux acides.

Comme matière première dans la fabrication des briques cuites, les sols analysés présentent des teneurs en matières organiques et en chaux acceptables car elles sont largement inférieures à 10%. Ceci évitera la formation de corps noirs lors de la cuisson. Mais la faible teneur en carbonate de calcium aura aussi comme conséquence d'augmenter la température de vitrification. En effet, selon l'*International Labour Office* [75], une teneur en carbonate de calcium et une perte au feu élevées

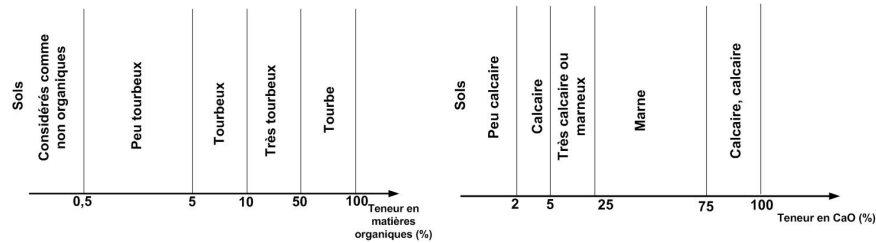


FIGURE 4.15 – Classification en fonction des matières organiques et de la teneur en chaux

[39]

peuvent conduire à des basses températures de vitrification.

4.6.3 Acidité des sols

Pour la mesure du pH, 25 ml d'eau déminéralisée ou de KCl 1M ont été ajoutés à 5g de sol. Après agitation et repos, le pH a été mesuré.

		M1	M2
pH	eau	5,45	5,42
	KCl	4,52	4,44

Tableau 4.11 – Acidité des sols de Mbujimayi

Les résultats du Tableau 4.11 montrent que les sols ont un caractère acide qui se manifeste par des pH inférieurs à 7. Ils sont en effet issus d'un milieu tropical à forte pluviosité et sur des encaissants acides (grès ou granite).

Le pH (KCl) est inférieur au pH (eau) car le KCl forme, avec l'hydrogène échangeable, de l'acide chlorydrique qui diminue le pH.

Si nous nous en tenons à l'affirmation selon laquelle les propriétés rhéologiques d'une argile sont meilleures pour des pH compris entre 6 et 8,5 [116], il est possible d'entrevoir une amélioration par un traitement au carbonate de sodium.

4.6.4 Analyse chimique des éléments

4.6.4.1 Mise en solution par fusion au métaborate de Lithium

L'échantillon destiné à une analyse chimique doit se trouver sous une forme adéquate. Pour la spectroscopie d'émission atomique utilisée ici, les différents

échantillons ont été mis en solution par fusion au métaborate de lithium selon le mode opératoire ci-dessous :

- Peser environ 100 - 150 mg d'échantillon "perte au feu"⁷ bien broyé et le verser dans un creuset en graphite
- Ajouter 1,6 g de métaborate de Lithium ($LiBO_2$) et 0,4 g de tétraborate de Lithium ($Li_2B_4O_7$), comme fondants
- Calciner le tout pendant environ dix minutes dans un four
- Laisser refroidir puis ajouter au calciné 50 ml d'acide nitrique 2N en chauffant à plus ou moins 150°C
- Filtrer et récupérer le filtrat dans un ballon de 100 ml
- Porter au trait de jauge (100 ml)
- Analyser les éléments par ICP

4.6.4.2 Principe de la spectrométrie d'émission atomique ICP-AES (inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry)

La méthode consiste à ioniser l'échantillon en l'injectant dans un plasma d'argon, ou parfois d'hélium, c'est-à-dire que les atomes de la matière à analyser sont transformés en ions par une sorte de flamme extrêmement chaude : jusqu'à 8 000 K, mais en général autour de 6 000 K pour les applications géochimiques. Certains appareils sont cependant dotés d'une option dite "à plasma froid", qui chauffent à plusieurs centaines de K tout de même, permettant l'analyse de molécules organiques qui seraient autrement détruites.

L'échantillon pénètre généralement dans le plasma sous une forme condensée (liquide ou solide), et doit donc subir les changements d'états suivants : fusion (pour les solides), vaporisation, ionisation. L'introduction a lieu au centre du plasma, parallèlement au flux de gaz plasmagène (Figure 4.16).

L'échantillon doit être introduit dans le plasma sous une forme finement divisée, car les puissances utilisées (généralement inférieures à 2 000 watts de puissance incidente) ne permettent pas de traiter des particules de taille supérieure au micromètre durant leur temps de résidence au sein du plasma ; si l'on veut analyser un solide, il faut donc d'abord le transformer en une suspension de fines

7. C'est un échantillon de sol calciné à 1000°C



FIGURE 4.16 – Vue d’un appareil de spectrométrie ICP (photo SOLS)

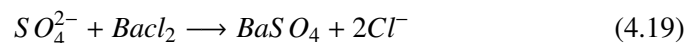
particules, portées par un courant de gaz plasmagène⁸.

4.6.4.3 Dosage des chlorures et sulfates

Dans la briqueterie, il est important d’analyser les proportions de certains sels tels que les sulfates et chlorures qui peuvent former avec le sodium, le potassium et le magnésium, des composés solubles ou insolubles ayant une influence sur les produits cuits.

Les sulfates solubles peuvent par exemple conduire à des efflorescences, nuisibles pour la qualité des faces des briques. Par contre, la présence des composés insolubles de potassium et sodium peut révéler la présence des minéraux tels que les feldspaths ou micas qui sont bénéfiques pour la réduction de la température d’obtention d’un matériau vitreux. Le magnésium, le calcium et le fer (ferreux) peuvent également avoir ce comportement [75].

Le dosage des chlorures et sulfates a été réalisé au laboratoire LACAMI. Le dosage des sulfates s’est fait par précipitation au chlorure de Baryum suivant la réaction :



Les chlorures ont quant à eux été dosés par la méthode VOLHARD qui se déroule en trois étapes :

8. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Torche-%C3%A0-plasma-\(chimie\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Torche-%C3%A0-plasma-(chimie))

1. Précipitation des chlorures par $AgNO_3$ en excès suivant la réaction :



2. Dosage de l'excès d'ions argent par une solution titrée de KSCN. Il se forme un précipité blanc de thiocyanate d'argent ($AgSCN$)



La fin de la réaction est visualisée par l'utilisation de l'alun de fer ammoniacal de formule chimique $NH_4Fe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ comme indicateur coloré.

4.6.4.4 Perte au feu

La perte au feu, ou loss on ignition (LOI) en anglais, est un paramètre important pour les céramistes. Elle détermine la capacité du sol à perdre sa matière lors d'une élévation de température. Elle dépend de la température utilisée. Dans notre cas, les pertes au feu ont été mesurées à 1000°C. Elle est obtenue par la formule :

$$LOI(\%) = \frac{m_s - m_c}{m_s} \cdot 100 \quad (4.22)$$

où :

m_s : masse du sol sec (à 105°C) ; m_c : masse du sol calciné à 1000°C

Pour une bonne qualité des briques, la perte au feu doit être faible afin d'éviter des déformations exagérées mais elle doit également être suffisamment élevée pour diminuer la température de vitrification. La plupart des normes recommandent un maximum de 10%.

4.6.4.5 Résultats, observations et interprétations

Le Tableau 4.12 présente les pourcentages en oxydes pour les éléments majeurs. Parmi les éléments en traces, soulignons la présence de sodium, potassium, magnésium, calcium à des teneurs inférieures à 0,05%. La proportion des sulfates dans ces sols est inférieure à 0,15% et celle des chlorures autour de 0,3%.

Ces faibles proportions impliquent que le phénomène d'efflorescence se poserait moins dans les briques à base de ces sols.

	M1	M2	D1	D2	D5	D6
SiO_2 (%)	89,6	83,6	67,4	67,4	66,5	73,6
Al_2O_3 (%)	5,9	9,1	19,9	18,6	21,0	14,9
Fe_2O_3 (%)	1,48	2,53	3,72	3,86	3,85	2,95
TiO_2 (%)	0,44	0,40	0,47	0,40	0,42	0,40
Autres (%)	0,3	0,6	0,6	0,5	0,6	1,2
LOI (%)	2,29	3,74	7,86	9,2	7,65	6,95

Tableau 4.12 – Composition chimique en oxydes, en pourcentage poids

La silice est le composant majeur. Cette silice vient d'une part du quartz (silice libre) et de la kaolinite (silice liée). Nous constatons que les deux sols de Mbujimayi présentent une plus grande quantité de silice due à leur caractère sableux dominant. Parmi les échantillons de Muene-Ditu, celui de la carrière de Sanguluja (D6) semble être le plus sableux.

L'alumine tire presque totalement son origine de la kaolinite. Ses proportions sont logiquement plus élevées dans les sols de Muene-Ditu, qui sont plus argileux. Il en est de même des oxydes de fer. Remarquons également une présence non-négligeable d'oxydes de titane. Ce titane proviendrait des minéraux tels le rutilé ou l'ilménite, que nous n'avions pas pu identifier lors de la diffraction des rayons X à cause de leur faible proportion.

Les pertes au feu sont toutes inférieures à 10% comme recommandé par les normes. Elles sont faibles pour les sols de Mbujimayi. Ceci serait la conséquence d'une faible quantité de matières organiques, des carbonates, sulfates et une faible fraction argileuse (faible déshydroxylation).

Selon la norme ASTM C618 (1980) [128], la condition $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > 70\%$ devra être respectée dans le cas des briques cuites. La norme indienne a retenu comme critère $SiO_2 + Al_2O_3 > 50\%$ et $CaO < 10\%$. Tous ces critères sont respectés par les sols du Kasai analysés dans ce travail. Néanmoins, l'action pouzzolanique peut être diminuée par la présence de composés chimiquement réactifs tels que SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 [128]. Les échantillons M1 et M2 qui contiennent une quantité importante de silice libre (quartz) peuvent être difficiles à mettre en oeuvre lors du façonnage des briques. Une addition de matériaux plus

plastiques peut leur être indiquée.

4.6.5 Déferrification de l'argile

Comme nous le constatons dans le Tableau 4.12, le fer est le troisième élément chimique majeur après le silicium et l'aluminium. Il est important dans une étude de sols ferrallitiques de savoir sous quel forme il se présente car selon sa forme dominante (amorphe ou cristalline), nous pouvons être en présence d'argiles différentes comme cela a été signalé à la section 3.2.

4.6.5.1 Principe et mode opératoire

Dans le but de déterminer la proportion de fer amorphe et cristallin, deux méthodes d'élimination du fer ont été réalisées sur les premiers sols analysés, c'est-à-dire ceux de la ville de Mbujimayi.

1. Extraction à l'acide oxalique

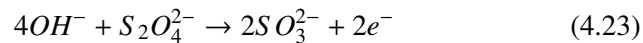
Cette méthode se base sur la capacité de l'acide oxalique ($H_2C_2O_4$) à extraire les complexes colloïdaux [77]. Ce réactif dissout les oxydes amorphes et son attaque aux oxydes cristallins est très limitée.

Le réactif utilisé est composé d'un litre d'oxalate d'ammonium 0,2 M et de 0,75 litre d'acide oxalique 0,2 M, ajusté à un pH de 3. L'extraction s'est faite selon le mode opératoire suivant :

- Faire une prise de 0,50 g de sol brut ou d'argile et la mettre dans un cup de centrifugation
- Ajouter 50 ml de réactif préparé
- Agiter pendant environ 4 heures dans le noir
- Centrifuger pendant 5 à 10 minutes à 2000 radians par minute
- Filtrer et récupérer le filtrat dans un ballon de 250 ml
- Ajuster jusqu'au trait de jauge et récupérer une partie destinée au dosage par ICP. L'analyse à l'ICP se fait par rapport à une solution standard à 1000 $\mu g/ml$ de Fe, Al et Si préparée en dissolvant 1 g de fer (aluminium ou silicium) pur dans HCl concentré avec addition de quelques gouttes de sel de mercure pour catalyser la réaction.

2. **Extraction au dithionitecitrate (DCB)** : Il s'agit d'une méthode proposée par Mehra et Jackson [102][77].

Ce traitement assure la dissolution des composés de fer sans endommager les phyllosilicates présents. Le DCB extrait toutes les formes libres d'oxydes de fer (amorphes et cristallines). La réaction se passe en milieu bicarbonate-citrate de sodium. Le bicarbonate tamponne le milieu à un pH d'environ 8 et amène les ions OH^- nécessaires à la réduction du fer par le dithionite de sodium ($Na_2S_2O_4$) suivant les réactions :



Une fois le fer réduit, comme le dithionite perd rapidement son pouvoir réducteur, ce fer est complexé par le citrate qui empêche donc sa précipitation sous forme de sulfure de fer (II).

Dans notre cas, l'extraction à la DCB s'est réalisée au laboratoire ACME, sur des échantillons ayant déjà subi une attaque à l'acide oxalique suivant le mode opératoire ci-après :

40 ml de citrate tamponné sont ajoutés dans le tube à essai contenant l'échantillon. L'ensemble est chauffé dans un bain thermostaté à $88,7^\circ C$ (Figure 4.17 (a)). On ajoute ensuite 3 fois 1g de dithionite de sodium tout en agitant continuellement. Après ces trois réactions, le tube à essai est retiré du bain-marie, refroidi et centrifugé ensuite à 3000 r.p.m.⁹ pendant dix minutes. Le surnageant limpide est récupéré dans un ballon jaugé de 250 ml. Le culot est lavé par la suite au moins 3 fois avec 2 ml d'une solution de NaCl saturé. Le surnageant est versé dans le ballon contenant la première extraction. Le ballon est porté jusqu'au trait de jauge et une portion est prélevée pour l'analyse par ICP.

9. radians par minute

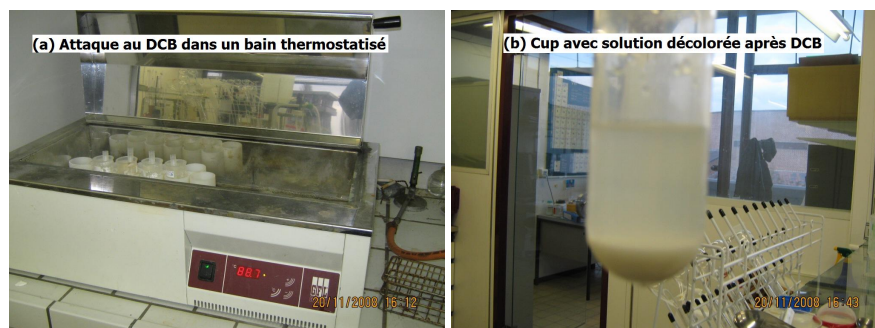


FIGURE 4.17 – Déferrification des sols (photo SOLS)

4.6.5.2 Résultats, Observations et interprétation

Les résultats de l'ICP après la déferrification sont repris dans le Tableau 4.13.

	Al (%)			Fe (%)			Si (%)		
	Total	Dosé	Reste	Total	Dosé	Reste	Total	Dosé	Reste
M1B	3,1	0,1	3,0	1,0	0,7	0,3	41,9	0,1	41,8
M1A	20,9	0,3	20,6		3,0		21,8	0,2	21,6
M2B	4,8	0,1	4,7	1,8	1,5	0,3	39,1	0,1	39,0
M2A	20,9	0,3	20,6		4,8		21,8	0,2	21,6

Tableau 4.13 – Analyse chimique de la solution après DCB

avec :

Total : pourcentage total dans le sol ;

Dosé : Fraction éliminée après attaque ;

Reste : fraction restante après attaque ;

M1B : Sol M1 brut

M1A : Argile du sol M1

M2B : Sol M2 brut

M2A : Argile du sol M2

- Le Tableau 4.13 montre que les attaques à l'oxalate et à la DCB ont été très sélectives pour la mise en solution du fer. A peine 2% d'aluminium total et moins d'1% du Silicium total se retrouvent en solution après les deux réactions.
- La grande partie du fer se présenterait sous forme cristalline. En effet,

nous avons observé que la couleur rouge des sols, relative aux oxydes de fer, n'a disparue qu'après l'attaque à la DCB comme on le voit sur la Figure 4.17(b). On serait donc en présence d'oxydes ou hydroxydes de fer en fines couches enveloppant les minéraux argileux.

4.7 L'analyse en composantes principales

4.7.1 Introduction

Dans cette section, la préoccupation majeure est de pouvoir décrire les paramètres physiques et chimiques obtenus en analysant leurs corrélations. Ces dernières peuvent être obtenues après une analyse statistique bivariée ou multivariée. L'avantage de l'analyse multivariée sur celle bivariée réside dans la possibilité de visualiser globalement la situation de tous individus entre eux et avec les variables. Elle permet en plus d'éviter la lourdeur de manipuler plusieurs tableaux et figures.

L'Analyse en composantes principales (ACP) est une des méthodes statistiques multivariées, qui est très utile pour la compression et la classification des données. Elle fait partie des méthodes d'analyses factorielles [54].

Le problème consiste à réduire la dimension d'un ensemble des données en trouvant un nouvel ensemble de variables plus petit que l'ensemble initial des variables, qui néanmoins contient la plupart d'informations de l'échantillon [51]. En d'autres termes, le but de l'ACP est de rechercher une représentation simple mais fidèle des objets à travers laquelle on puisse aisément analyser le matériel numérique [52]. Elle permet au praticien de réduire l'information en un nombre de composantes plus limité que le nombre initial de variables.

4.7.2 Principe de l'ACP

Il est difficile de visualiser directement un nuage n d'individus du fait de sa dimension importante de l'espace F ($\dim F = p$). Le principe de l'ACP consiste à projeter orthogonalement le nuage n sur un plan. Le plan est choisi de façon à ce que la projection orthogonale déforme le moins possible le nuage.

L'ensemble des données peut être schématisé par une matrice X à n lignes et p colonnes ($n > p$).

$$\mathcal{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1p} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{np} \end{pmatrix}$$

Les colonnes représentent les variables a_i (avec $i=1,2,\dots,p$), les lignes représentent les individus I_j (avec $j=1,2,\dots,n$), alors qu'un élément a_{ij} est la réalisation de l'individu i dans la variable j . On identifiera une variable par la colonne X correspondante : une variable n'est rien d'autre que la liste des n valeurs qu'elle prend sur les n individus.

$$\mathcal{A}^j = \begin{pmatrix} a_{1j} \\ a_{2j} \\ \vdots \\ a_{nj} \end{pmatrix}$$

On identifiera un individu i au vecteur I_i à p composantes dont le transposé est :

$$I'_i = (a_{i1} \quad a_{i2} \quad \cdots \quad a_{ip})$$

L'ensemble des n individus est un nuage de points dont le barycentre est le point G défini par :

$$\mathcal{G}' = (\bar{a}_1 \quad \bar{a}_2 \quad \cdots \quad \bar{a}_p)$$

où $\bar{a}_p$ est la moyenne arithmétique des x_p .

Cette méthode sera utilisée sous sa forme normée, ce qui est très utile lorsque les variables ne s'expriment pas avec les mêmes unités. Si les variables sont centrées et réduites, il existe un espace (espace des facteurs) où les objets statistiques peuvent être décrits par un ensemble de critères indépendants, hiérarchisés selon leur pouvoir explicatif de la covariance, et calculés par combinaison linéaire des caractères mesurés. L'origine d'un tel repère est le barycentre G du nuage d'observations, les variables peuvent y être représentées par des vecteurs dont les composantes sont les coefficients de corrélation qu'elles ont vis à vis des facteurs.

La position des représentations est alors indépendante des unités.

4.7.3 Données et résultats

4.7.3.1 Données

Pour l'analyse des paramètres physiques des sols, les individus sont huit échantillons de sol du Kasaï oriental (M2, D1, D2, D3, D4, D5, D6 et D7) tandis que les variables sont les six essais d'identification suivants :

- Teneur en matière organique (MO) et teneur en chaux (TC)(Cfr section 4.6.2) ;
- Poids volumiques des grains solides (gs) obtenus après les essais au pycnomètre suivant la norme NF P 94-054 [16] ;
- Pourcentage des particules inférieures à $2\ \mu m$ (FA) (Cfr Tableau 4.3) ;
- Limite de retrait (ws) et indice de plasticité (I_P) (cfr Tableau 4.5).

La matrice des caractéristiques physiques des sols est représentée par le Tableau 4.14.

	MO (%)	TC (%)	gs (kN/m ³)	FA (%)	ws (%)	I_P (%)
M2	0,15	3,99	26,1	29,7	12,7	10,4
D1	0,09	3,52	26,1	16,8	28,1	12,6
D2	0,57	4,87	26,3	50,7	22,1	23,7
D3	0,38	4,14	26,5	46,4	24,8	19,8
D4	0,31	5,03	26,1	49,9	18,2	19,4
D5	0,45	4,85	26,0	51,5	19,9	17,8
D6	0,53	5,01	26,0	42,1	15,7	14,1
D7	0,26	4,95	26,0	39,5	16,1	17,4

Tableau 4.14 – Caractéristiques d'identification des sols du Kasaï oriental

Pour avoir une vue rapide des paramètres statistiques des différentes variables, nous présentons leurs "boxplots" sur la Figure 4.18.

La variable FA (passant à 2 microns) montre une valeur anormalement faible par rapport aux trois quartiles, valeur l'échantillon D1 de Muene-Ditu pour lequel une lacune granulométrique a déjà été décelée.

Nous avons utilisé le logiciel Matlab 7.1, pour effectuer l'ACP. La matrice des données a été centrée et réduite en soustrayant la moyenne de chaque élément de

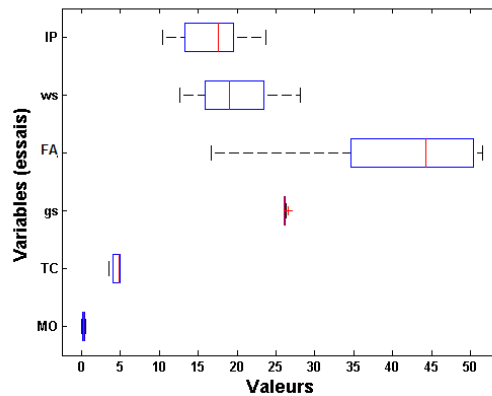


FIGURE 4.18 – Boxplots des six variables

la colonne et la divisant par l'écart-type. Pour les 6 variables, nous obtenons 6 composantes principales, qu'il n'est toujours pas facile à représenter.

4.7.3.2 Choix du nombre d'axes (ou de composantes principales)

Le nombre d'axes dépend des objectifs de l'analyse. Le but est d'obtenir le maximum d'inertie conservée avec le minimum de facteurs [54].

La littérature propose plusieurs critères permettant de choisir les composantes principales majeures. En fonction de la facilité de représentation, nous avons opté pour le critère des variances expliquées par les différentes composantes principales. Ce critère veut qu'on retienne les composantes qui expliquent plus de 70% de la variance totale. La Figure 4.19 est une représentation des variances expliquées par les six composantes principales.

On constate sur cette figure que les deux premières composantes expliquent plus de 80% de variabilité. Nous pouvons ainsi faire notre représentation en ne considérant que les deux premières composantes principales.

4.7.3.3 Construction des nuages de points projetés

Chaque nuage de points (variables et individus) est construit en projection sur le plan principal (Figure 4.20).

L'examen de ce plan factoriel permettra de visualiser les corrélations entre les

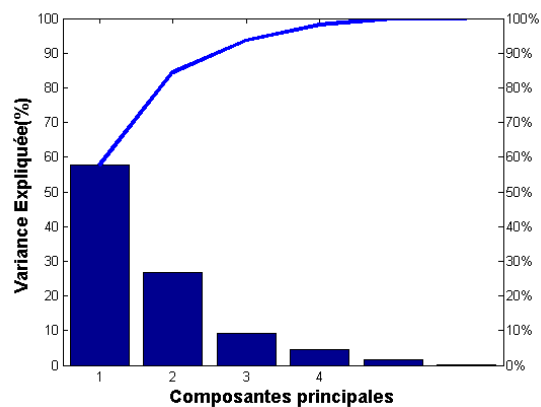


FIGURE 4.19 – Variance expliquée par les composantes principales

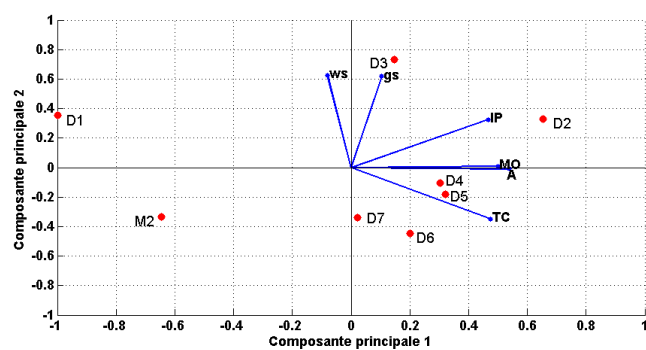


FIGURE 4.20 – Représentation des échantillons et essais dans le plan principal

différentes variables (essais) et d'identifier les groupes d'individus (échantillons) en fonction des valeurs qu'ils prennent.

4.7.4 Interprétation

4.7.4.1 Interprétation des axes

Soulignons que l'analyse étant normée (variables centrées-réduites), les axes sont adimensionnels.

Nous constatons sur Figure 4.20 que les variables FA, MO, IP, TC contribuent positivement à la composante principale 1. Les échantillons D2, D4, D5, ayant des valeurs plus élevées dans les essais cités se retrouvent vers l'avant. Cette composante donnerait plus de poids au caractère argileux et plastique des échantillons. A l'opposé, l'échantillon M2, plus sableux ou moins plastique, se projette dans la partie négative de l'axe. L'échantillon D1, bien que plastique, se retrouve dans la partie négative de l'axe à cause de son anomalie granulométrique.

La seconde composante principale met plutôt en avant la limite de retrait w_s dans sa partie positive. Les échantillons ayant une limite de retrait plus élevée (D1, D2, D3) sont dans la partie positive de l'axe. La variable TC contribue négativement à cet axe, la teneur en chaux agirait donc dans le sens de la diminution du retrait.

Il est à noter que l'interprétation d'un axe se fait à l'aide des variables qui contribuent le plus à cet axe.

4.7.4.2 Etude des proximités des individus et des variables

Pour être interprétés sur un axe, les points et droites doivent être bien représentés sur cet axe. Un point est dit bien représenté sur un axe ou un plan factoriel s'il est proche de sa projection sur l'axe ou le plan. S'il est éloigné, on dit qu'il est mal représenté [51]. Au plus l'angle formé entre le point et sa projection est proche de 90° , au moins le point est bien représenté. Dans notre cas, les points D2, D4, D5 et M2 sont plus ou moins bien représentés par rapport à l'axe de la CP1. Par rapport à l'axe de la CP2, se sont les points D3, D6 et D7 qui sont les mieux représentés.

La proximité des échantillons D4 et D5 ; D6 et D7 traduit leurs ressemblances par rapport à la plasticité et au retrait.

L'angle entre les différents vecteurs représentant les variables (droites bleues) est une mesure de la corrélation entre les essais. Plus il est petit, plus les résultats de ces essais sont corrélés entre eux. On constate par exemple une très bonne corrélation entre la fraction argileuse (FA) et la teneur en matière organique (MO). Ceci serait dû au fait que le réactif utilisé pour l'essai MO (H_2O_2) attaque également la partie argileuse [126].

4.7.5 Caractéristiques chimiques

La matrice correspondante aux caractéristiques chimiques des sols est la transposée du Tableau 4.12. Le critère de la variance expliquée nous permet d'extraire également deux composantes principales majeures.

La représentation en composantes principales de la Figure 4.21 montre que la teneur en fer, la teneur en aluminium et la perte au feu des échantillons sont très bien corrélées et sont inversement proportionnelles à la teneur en silice. En effet, plus le sol est argileux, plus les trois premières teneurs sont élevées et moins élevée est la teneur en SiO_2 . La corrélation entre les teneurs précédentes et celles en oxydes de titane est très mauvaise, caractérisée par des angles proches de 90° .

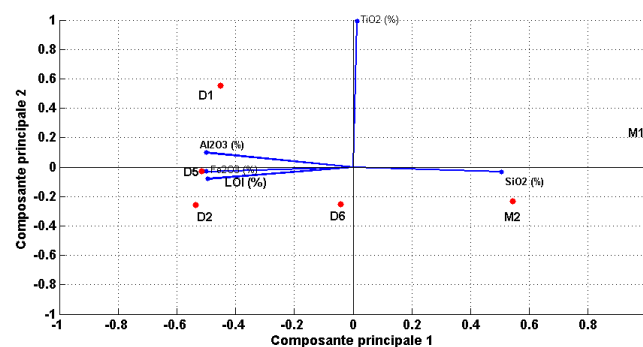


FIGURE 4.21 – Composition chimique des échantillons du Kasai oriental dans le plan principal

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé les comportements physiques et chimiques des sols destinés à la cuisson.

L'étude commence par une analyse granulométrique. En effet, la connaissance granulométrique est très importante dans le choix d'une terre à briques, car elle dicte le comportement mécanique et chimique de ce sol pendant les différentes phases. Sur les sols du Kasaï oriental analysés dans ce travail, l'étude montre que les sols de Mbujimayi ont une granulométrie uniforme alors que ceux de Muene-Ditu présentent une granulométrie étendue avec quelques fois plus de 10% de grains supérieurs à 2 mm. Il y a donc une nécessité d'uniformiser la granulométrie par une bonne réduction granulométrique à moins de 2 mm afin d'éviter des effets perturbateurs sur les briques cuites. Par contre, le diamètre moyen des sols de Muene-Ditu est très faible par rapport à celui des sols de Mbujimayi. Ces derniers se classent dans la catégorie des sables argileux alors que les sols de Muene-Ditu sont des argiles, sableuses ou non.

Le caractère argileux des sols de Muene-Ditu se confirme par un indice de plasticité et une limite de retrait plus élevés. Certains céramistes proposent une fraction argileuse minimale de 40% pour les sols destinés à la fabrication des briques cuites, ce qui correspond, selon la corrélation établie dans ce travail, à 50% de fraction fine (passant au tamis de 80 microns). Tous les sols de Muene-Ditu respectent cette condition. Avec plus de 40% de fraction fine, nous pouvons envisager une utilisation du sol du polygone Miba en recommandant une amélioration par ajout de fines.

Le ILO (International Labour Office) suggère qu'une bonne matière première contienne toutes les fractions granulométriques, avec un pourcentage en fractions argileuse et limoneuse compris entre 25 et 50% ; une proportion des sables et graves qui devrait être comprise entre 50 et 75%. Par rapport à ces critères, le sol de l'aéroport de Mbujimayi nécessiterait un complément de fines alors que ceux de Kamabue, avec plus de 60% de fractions argileuse et limoneuse, auront besoin d'un ajout de corps inertes (dégraissants). L'ajout de matériaux dégraissants aura également comme effet de réduire l'indice de plasticité qui approche, voire

dépasse 20 pour les sols du site de Nduba à Muene-Ditu.

Tous ces sols se caractérisent par une quasi-absence de limons : c'est une caractéristique des sols latéritiques tropicaux, conséquence d'une forte altération. Cette faible proportion de limon réduirait leurs propriétés rhéologiques.

Dans ce travail, nous avons choisi de mettre les briques en oeuvre par la méthode de compactage. Il est donc indispensable de connaître le comportement des sols face au compactage à travers la teneur en eau Optimum Proctor et le poids volumique sec maximum. Ces paramètres ont été obtenus après un essai Proctor normal pour le sol du polygone Miba et en utilisant certaines formules empiriques pour tous les autres sols.

Les analyses chimiques sont indispensables pour la matière première, car elles nous permettent d'identifier qualitativement et quantitativement les différents éléments présents. Les résultats montrent que les teneurs en matières organiques et en chaux sont largement inférieures à 10%, un bon indice pour la qualité des briques cuites. Il en est de même de la silice, des oxydes de fer et de l'alumine dont la somme est supérieure à 70%. Par contre, la faible plasticité des échantillons de Mbujimayi semble venir de leur forte teneur en silice libre (quartz). Comme la plupart des sols tropicaux, les sols du Kasai oriental analysés ont un caractère acide avec des pH inférieurs à 5 ; une addition de carbonate de sodium pourrait augmenter leur pH et ainsi, améliorer leurs propriétés rhéologiques.

La déferrification des sols et des argiles par l'acide oxalique, ensuite par le dithionite-citrate tamponné au bicarbonate (DCB), a confirmé que la grande partie du fer présent dans ces sols, responsable de la coloration rougeâtre, s'y trouverait sous-forme cristalline (hématite ou goethite), dans la fraction argileuse (< 2microns) et non dans la structure des phyllosilicates.

L'analyse en composantes principales des paramètres physiques et chimiques utilisée dans sa forme normée, nous a permis de constater l'existence ou non de corrélation en eux.

Chapitre 5

Comportement hydromécanique des sols

Nouveaux symboles du chapitre

SYMBOLE	DESCRIPTION
ϵ_g	Amplitude de gonflement
γ	Poids volumique
γ_w	Poids volumique de l'eau
ϕ'	Angle de frottement effectif
ϕ_{cu}	Angle de frottement non-drainé
σ'_g	Pression de gonflement
σ'_p	Contrainte de préconsolidation
σ'_v	Contrainte verticale effective
A	Constante de gonflement
B	Paramètre de Skempton
C	Constante de compressibilité
c'	Cohésion effective
c_{cu}	Cohésion non-drainée
Cc	Indice de compression
CD	Essai consolidé drainé

Nouveaux symboles du chapitre (suite)

SYMBOLE	DESCRIPTION
C_s	Indice de gonflement
CU	Essai consolidé non-drainé
c_v	Coefficient de consolidation
ΔVS	Variation de volume pendant la consolidation
e	Indice des vides
E_{oed}	Module oedométrique
G	Taux de gonflement
G_{sec}	Taux de gonflement secondaire
G_p	Taux de gonflement primaire
H_{100}	Hauteur de fin de consolidation primaire
H_{dr}	Longueur du chemin de drainage
k	Coefficient de perméabilité
m_v	Coefficient de consolidation
n	Porosité
p'	Pression effective moyenne
q	Déviateur en contraintes
S	Section
S_r	Degré de saturation
t_{100}	Temps de fin de consolidation primaire
t_{50}	Temps nécessaire pour 50% de consolidation
T_v	Facteur temps
UU	Essai non-consolidé non-drainé
V_s	Volume des grains solides
w	Teneur en eau
z	Profondeur

5.1 Introduction

La matière première destinée à la fabrication des briques cuites doit être extraite du sous-sol et pour mener à bien cette opération, une connaissance de son comportement hydromécanique est indispensable. Cette connaissance est aussi utile pour les futurs travaux de construction sur les différents sites d'où ces sols ont été prélevés tels que le dimensionnement des fondations.

Les lois de comportement des géomatériaux sont variées ; elles dépendent de nombreux facteurs dont les principaux sont :

- La nature minéralogique
- L'état d'altération
- La teneur en eau
- La structure et la texture
- Les antécédents géologiques
- Les conditions aux limites

Divers essais permettent l'établissement des lois de comportement des sols, mais toujours dans des conditions particulières. *Le choix des essais à considérer se fait en fonction des problèmes à résoudre et des possibilités de réalisation* [39]. Nous avons choisi l'essai de consolidation oedométrique et l'essai de compression triaxial car ces essais permettent de fournir les paramètres suffisants pour l'établissement des lois simples de comportement des matériaux. De plus, leur coût reste abordable d'une manière générale et, pour nous en particulier, il était réduit du fait de notre appartenance directe au laboratoire. Ces essais peuvent actuellement être réalisés au Kasaï oriental avec l'installation du nouveau laboratoire de géotechnique de l'Université de Mbujimayi (UM), dans le cadre d'un projet interuniversitaire ciblé.

L'essai de perméabilité a également été réalisé afin d'obtenir les caractéristiques hydrauliques des sols.

Dans le cas de la province du Kasaï oriental, cette connaissance large des caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des sols est une bonne base de données, non seulement dans le cas de la cuisson des matériaux, mais aussi pour d'autres applications, qu'elles soient géotechniques ou non.

Vu la distance entre le lieu d'échantillonnage (Kasaï oriental/RDC) et le laboratoire LEMSC, nous avons fait le choix de réaliser les différents essais sur des échantillons remaniés et reconstitués en laboratoire.

5.2 Essai de consolidation oedométrique

5.2.1 Principe et appareillage

Il s'agit d'un essai de compression d'une éprouvette cylindrique de faible hauteur, maintenue latéralement dans un anneau rigide et drainée haut et bas par des bases poreuses (Figure 5.1). La déformation axiale relative stabilisée ϵ_1 est égale à la déformation volumique relative ϵ_v , alors que les déformations transversales $\epsilon_2 = \epsilon_3$ sont nulles.

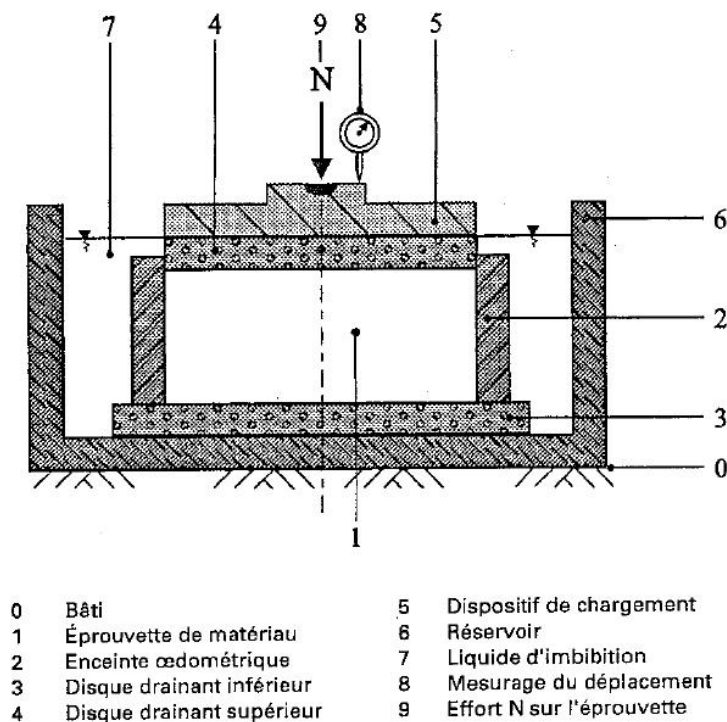


FIGURE 5.1 – Principe de l'oedomètre
[21]

La rupture du sol ne peut être obtenue par cisaillement et la déformation prin-

principale est due à la compressibilité du matériau résultant de l'écrasement aux points de contact et du glissement des grains avec réarrangement de ceux-ci.

Afin d'obtenir un état de contrainte aussi uniforme que possible, il faut réduire l'effet perturbateur principal qui est le frottement latéral. Pour cela, le rapport entre la hauteur H et le diamètre D de l'anneau doit être faible, souvent compris entre $1/4$ et $1/3$.

L'échantillon est quasi toujours essayé sous eau, car d'une part, c'est le plus souvent le cas des sols fins déformables et d'autre part, c'est le cas le plus défavorable du point de vue de la déformabilité. Mais ces dernières années, des essais en milieu non saturé se sont multipliés.

Pour étudier le comportement dans le temps, les contraintes sont appliquées par paliers successifs de charge et éventuellement de décharge jusqu'à obtenir une vitesse de déformation négligeable.

L'appareillage spécifique à l'essai comprend :

- Le bâti : qui permet d'appliquer les contraintes de chargement sur l'éprouvette. Il est quasi indéformable sous l'effet des efforts appliqués. Il supporte la cellule oedométrique et maintient sa base horizontale (Figure 5.2 (b))
- La cellule oedométrique : en matériaux inertes chimiquement vis-à-vis de l'éprouvette et des fluides qu'elle contient. Elle comporte les éléments indiqués sur la Figure 5.1.
- Le dispositif d'application de la charge : qui doit être capable d'appliquer une force suivant la direction axiale, avec une incertitude de 2% et de la maintenir constante.
- Le système de mesurage : comprenant des capteurs de mesure de la force verticale et du déplacement vertical. Les caractéristiques géométriques de la bague sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse de précision et permettent de calculer la section transversale ainsi que le volume de l'enceinte.

Le matériel complémentaire comprend une balance de portées compatibles avec les masses à peser, une étuve à température réglable, les outils nécessaires au découpage et à la préparation des éprouvettes et un dessiccateur.

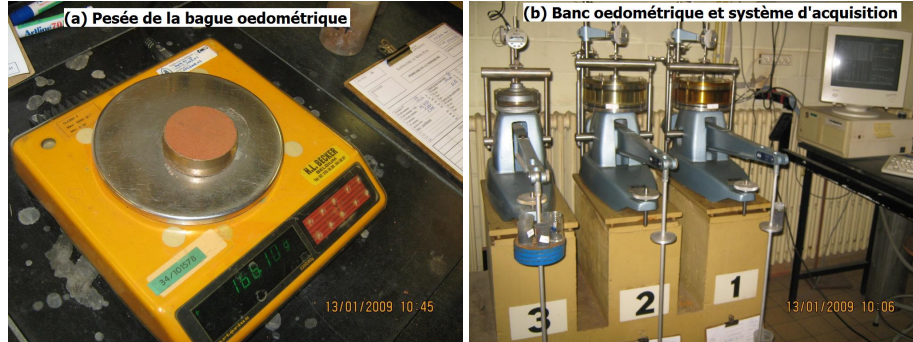


FIGURE 5.2 – Pesée de la bague avec l'échantillon (a) et banc oedométrique (b) (photos LEMSC)

5.2.2 Mode opératoire et choix des paramètres

5.2.2.1 Norme

XP P 94-090-1 [21]

5.2.2.2 Préparation des éprouvettes

Les échantillons ont été préparés dans les conditions de compactage proches de l'Optimum Proctor normal pour les échantillons de Mbujimayi et proches de l'Optimum Proctor modifié pour les échantillons de Muene-Ditu. Les caractéristiques ont été prises identiques pour les échantillons de même site (Tableau 5.1).

	M1	M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
w_i (%)	12,5	12,5	14,6	16,8	16,0	13,9	13,9	12,5	12,2
$\gamma_{di}(KN/m^3)$	18,9	18,9	17,1	17,0	17,1	18,0	17,9	18,4	18,7
e_o (%)	37,6	38,2	53,0	54,7	55,0	45,1	45,0	41,3	38,8
S_{ri} (%)	88,3	87,4	73,4	82,4	78,6	82,0	82,0	80,2	83,1

Tableau 5.1 – Caractéristiques initiales à l'oedomètre

avec : w_i : teneur en eau initiale ;

γ_{di} : poids volumique sec initial ;

e_o : indice des vides initial ;

S_{ri} : degré de saturation initial

5.2.2.3 Paliers de chargement et de déchargement

Nous avons considéré une charge de départ de 0,0015 MPa due au plateau de chargement. Les autres paliers de chargement-déchargement ont été choisis en progression géométrique avec les valeurs suivantes (en MPa) : 0,02-0,04-0,08-0,16-0,32-0,16-0,08-0,04. Le passage d'un palier à un autre se faisait dès que la déformation relative était inférieure à 4 microns pour une durée de 24h. Pour les paliers de chargement, cette valeur était plus faible afin d'avoir une bonne courbure.

Il sied de signaler qu'à la différence des recommandations de la norme, nous avons fait le choix de commencer le chargement dans les conditions de saturation initiale données dans le Tableau 5.1. Deux essais ont été ensuite réalisés avec des échantillons saturés avant le début du premier palier.

5.2.2.4 Acquisition des données

Les données ont été directement enregistrées via les différents capteurs (de force et de déplacement) sur un ordinateur connecté aux oedomètres et les résultats affichés sur un écran (Figure 5.2 (b)).

5.2.3 Quelques relations importantes

- Indice de compression C_c :

$$C_c = \frac{2,3(1+e)}{C} \quad (5.1)$$

où :

C est la constante de compressibilité : pente de la droite de compression vierge ;

e : indice des vides

- Indice de gonflement C_s :

$$C_s = \frac{2,3(1+e)}{A} \quad (5.2)$$

où A est la constante de gonflement : pente de la droite de gonflement.

Ces coefficients sont représentés sur la Figure 5.3.

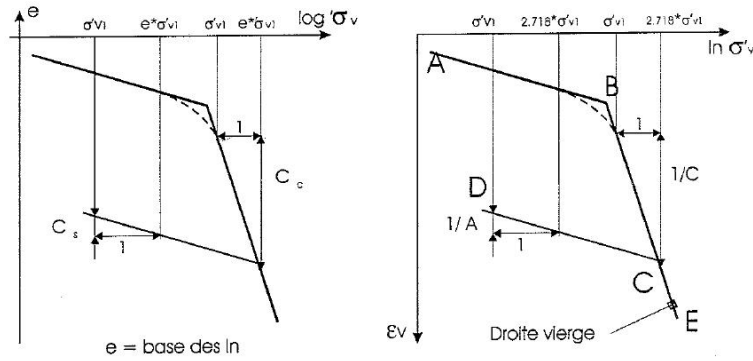


FIGURE 5.3 – Définition des coefficients de compressibilité et de gonflement [39]

- Coefficient de compressibilité m_v :

$$m_v = \frac{\Delta e}{(1 + e)\Delta\sigma'_v} [(kPa)^{-1}] \quad (5.3)$$

- Module oedométrique E_{oed} :

$$E_{oed} = \frac{1}{m_v} [kPa] \quad (5.4)$$

- Coefficient de consolidation c_v :

$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (5.5)$$

avec :

k : coefficient de perméabilité en m/s

γ_w : poids volumique de l'eau, en kPa.

- Pression de préconsolidation σ'_p , à laquelle l'échantillon était soumis antérieurement. Elle est obtenue graphiquement.

5.2.4 Expression des résultats et observations

5.2.4.1 Courbes oedométriques des sols de Mbuji mayi

Nous représentons les courbes oedométriques sur la Figure 5.4 en termes d'indice des vides e en fonction de la contrainte effective de consolidation σ'_v . Ces courbes présentent un comportement non linéaire et irréversible. Elles comportent une composante élastique et une composante plastique. Leurs raccords sont plus ou moins adoucis du fait du remaniement sur terrain et en laboratoire lors de la remise en place.

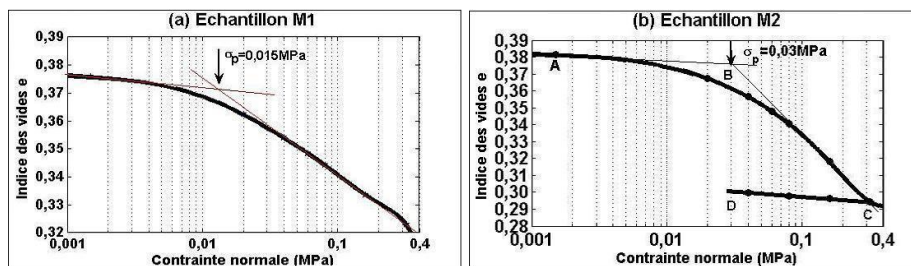


FIGURE 5.4 – Courbe de compressibilité des sols de Mbuji mayi

Entre 0,0015 MPa et 0,32 MPa, l'indice des vides de l'échantillon M1 varie de 37,6% à 32,3%, soit une réduction de 14%. Dans la même plage de contraintes, l'échantillon M2 voit son indice des vides diminuer de 22,8%. Ce dernier sol est donc plus compressible que le premier. Cette compressibilité élevée est attribuable, en partie, à son indice des vides initial plus élevé comme le montre le Tableau 5.1.

En idéalisant les diagrammes de l'indice des vides en fonction de la contrainte verticale par les droites AB, BC et CD, nous constatons que la droite AB de début de mise en charge est quasi parallèle à la droite CD de décharge. Ces deux droites correspondent à un comportement élastique du sol tandis que la droite BC correspond au développement simultané des déformations plastiques et élastiques.

L'intersection des droites AB et BC donne la pression de préconsolidation σ'_p . C'est la contrainte verticale maximale due au poids des terres à laquelle un échantillon a déjà été soumis dans son passé géologique [74]. C'est une quantité très importante en géotechnique car elle détermine l'état de consolidation d'un

sol. Elle vaut 15 kPa pour le sol de l'aéroport de Mbujimayi et 30 kPa pour celui du polygone Miba. Sachant que les échantillons ont été prélevés entre 2-8 m de profondeur, nous pouvons calculer la contrainte effective verticale initiale σ'_{vo} par l'expression :

$$\sigma'_{vo} = (\gamma - \gamma_w)z \quad (5.6)$$

Où γ : poids volumique du sol en kN/m^3 ; γ_w : poids volumique de l'eau en kN/m^3 ; z : profondeur en m

En absence de nappe phréatique, comme c'est le cas dans les deux carrières de Mbujimayi, on obtient :

$$\sigma'_{vo} = \gamma.z \quad (5.7)$$

A partir de l'équation 5.7, on arrive après calcul à des valeurs de σ'_{vo} comprises entre 42,5 - 170 kPa, nettement supérieures aux contraintes de préconsolidation de ces sols. Nous concluons alors que **les deux sols sont en cours de consolidation**. Le sol du polygone Miba est néanmoins plus consolidé que celui de l'aéroport de Mbujimayi.

5.2.4.2 Courbes oedométriques des sols de Muene-Ditu

Tous les échantillons de Muene-Ditu (D1 à D7) avaient tendance à soulever le dispositif d'application de la charge alors qu'ils n'étaient soumis qu'à la contrainte due uniquement au dispositif de charge. Dans ce cas, la norme française XP P 94-090-1 recommande que l'éprouvette reste maintenue dans sa position initiale par un chargement qui lui est appliqué immédiatement et progressivement jusqu'à l'apparition du premier tassement stabilisé [21]. Le chargement devra ensuite se poursuivre avec un taux d'accroissement de contrainte n'excédant pas 1 sans déchargement intermédiaire jusqu'à l'obtention d'au moins trois points alignés sur la courbe. L'essai se terminera par un déchargement comportant au moins quatre paliers. L'allure des courbes de compressibilité des sols de Muene-Ditu est représentée à la Figure 5.5.

Le gonflement observé dans les sols peut être dû soit à une saturation non totale de l'échantillon soit à la présence d'argile gonflante. En effet, on distingue deux types de gonflement dans les argiles. Le premier est appelé gonflement in-

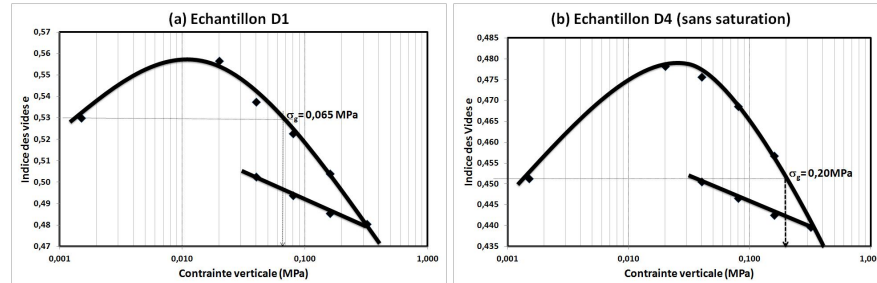


FIGURE 5.5 – Courbe de compressibilité de deux échantillons de sols de Muene-Ditu

terfoliaire ou intraparticulaire dû à la fixation des molécules d'eau entre deux feuillets et définit les argiles dites gonflantes. Le second gonflement est appelé interparticulaire car l'eau ne pénètre pas à l'intérieur des particules d'argiles, il est lié à l'état de saturation et concerne toutes les argiles [104].

Dans notre cas, la présence d'argiles gonflantes semble être très peu probable vu les résultats d'analyses minéralogiques (cfr section 3.4) et des activités obtenues (cfr Tableau 4.5). Les degrés de saturation initiaux donnés dans le Tableau 5.1 montrent plutôt que l'insaturation complète des échantillons expliquerait ce phénomène. En effet, on sait que pour des faibles teneurs en eau, la pression (dépression) de succion est supérieure dans les argiles que dans les limons et les sables.

Afin de vérifier l'origine du gonflement, un essai oedométrique a été réalisé sur l'échantillon D4 de Muene-Ditu en veillant sur la saturation de l'échantillon avant le début du chargement. Le résultat, présenté à la Figure 5.6, montre une disparition du gonflement initial. Cette observation confirme que l'hydratation initiale du sol est la cause du gonflement.

Les courbes de compressibilité des autres échantillons de Muene-Ditu sont reprises en annexe A.2.

5.2.4.3 Courbes de consolidation

La courbe de consolidation est un graphique de la variation de la hauteur de l'échantillon en fonction du temps ou de la racine carrée du temps selon la mé-

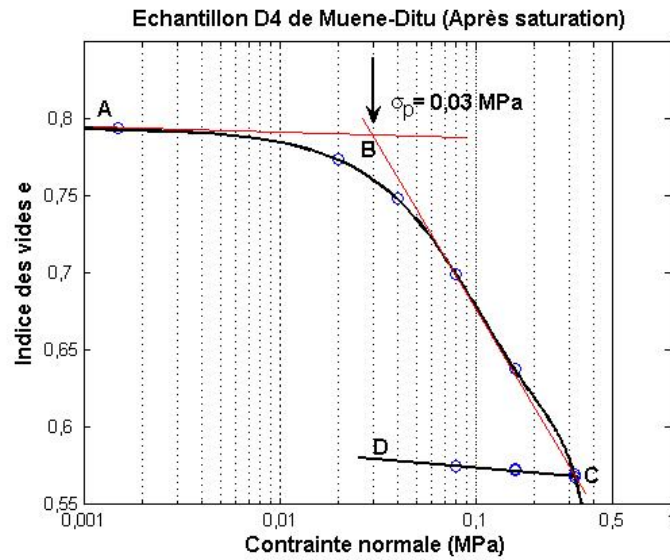


FIGURE 5.6 – Courbes de compressibilité d'un échantillon de sol de Muene-Ditu

thode choisie. Nous avons utilisé la méthode de Casagrande qui consiste à représenter la hauteur en fonction du logarithme du temps [21]. Cette courbe nous a permis, pour chaque palier de chargement, de déterminer le coefficient de consolidation c_v qui a servi à estimer le coefficient de perméabilité k connaissant le coefficient de compressibilité m_v selon l'équation (5.5).

Le coefficient de consolidation est déterminé pour un degré de consolidation de 50% à partir de l'équation :

$$c_v = \frac{T_v H_{dr}^2}{t_{50}} \quad (5.8)$$

où :

T_v : facteur temps égal à 0,197 pour 50% de consolidation

t_{50} : temps nécessaire pour obtenir 50% de consolidation

H_{dr} : longueur du chemin de drainage égale à la demi-épaisseur de l'éprouvette à $t=t_{50}$.

La Figure 5.7 présente l'allure de la courbe de consolidation du premier palier d'un échantillon de sol de l'aéroport de Bipemba à Mbujimayi. Sur cette courbe, t_{100} est le temps de fin de consolidation primaire ou hydrodynamique et H_{100} la

hauteur équivalente.

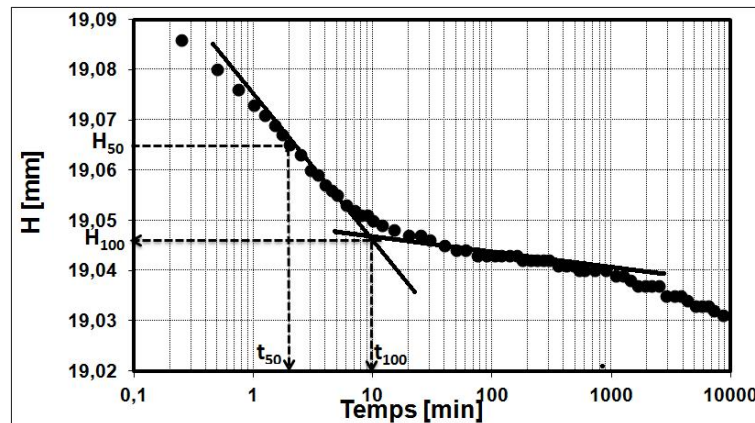


FIGURE 5.7 – Courbe de consolidation de l'échantillon de l'aéroport de Mbujimayi (Palier 1)

La courbe de consolidation montre les deux phases. Une consolidation primaire ou hydrodynamique jusqu'à t_{100} et une consolidation secondaire au-delà de t_{100} . Cette dernière phase correspond au fluage de l'échantillon, un phénomène très lent par rapport à la consolidation primaire. Pour le cas du palier représenté à la Figure 5.7, nous constatons que la consolidation primaire a pris fin au bout de 10 minutes pour un palier qui a duré sept jours.

Nous avons déjà signalé que tous les échantillons de Muene-Ditu ont présenté un gonflement lors de leur premier palier, en condition non-saturée. Nous parlerons dans ce cas de courbe de gonflement. Comme pour les courbes de consolidation, les courbes de gonflement présentées à la Figure 5.8 indiquent la présence de deux phases. La première phase de gonflement, liée à la migration de l'eau dans l'éprouvette à partir de ses extrémités, relève de la diffusion. La seconde phase est le gonflement secondaire qui serait plus complexe car la direction de la déformation de gonflement est opposée à celle du chargement, contrairement au fluage qui produit une déformation de compression sous des charges de compression [62].

5.2.4.4 Paramètres de compressibilité et de gonflement

Les valeurs des principaux paramètres de compressibilité sont synthétisées dans le Tableau 5.2, pour les échantillons des sols qui n'ont pas connu de gonfle-

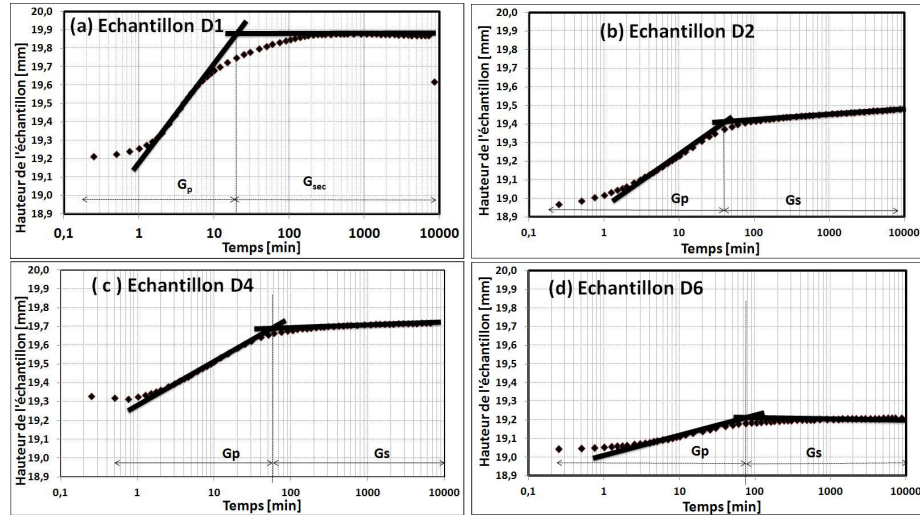


FIGURE 5.8 – Courbe de gonflement primaire et secondaire des sols de Muene-Ditu

ment lors de la mise en eau.

	C_c	C_s	m_v MPa	a_v MPa^{-1}	E_{oed} MPa	c_v $10^{-6} m^2/s$	k $10^{-9} m/s$	σ'_p kPa
M1	0,04	0,006	0,16	0,22	6,09	8,9	14	15
M2	0,08	0,006	0,23	0,31	4,35	2,6	6,8	30
D4 (saturé)	0,23	0,01	0,49	0,81	2,05	7,2	35	30

Tableau 5.2 – Paramètres de compressibilité de trois échantillons de sols du Kasai oriental

Les indices de compression C_c des sols de Mbujimayi sont dans la marge des sols sableux, généralement compris entre 0,01 et 0,1. L'échantillon M1 du sol le plus sableux présente logiquement l'indice de compression le plus faible. Le sol de Muene-Ditu (D4), plus argileux, a un indice de compression plus élevé que celui des sols de Mbujimayi. Pour les argiles, les valeurs de C_c sont souvent comprises entre 0,17 et 0,8. Quant au rapport C_c/C_s , il est de 5,8 pour l'échantillon M1, 13 pour l'échantillon M2 et 22,6 pour D4. La littérature propose un rapport proche de 10 pour les sables et proche de 3 pour les argiles [39]. L'indice de gonflement élevé pour l'échantillon D4 de Kamabue Est est dû à une constante de gonflement faible.

Le module oedométrique E_{oed} , qui est l'inverse du module de consolidation

m_v , est également donné dans le Tableau 5.2. Il est compris entre 2 et 6 MPa. Ces valeurs sont caractéristiques des sols à tendance argileuse.

Les coefficients de perméabilité montrent que ces sols sont peu perméables dans les conditions de compactage proches de l'Optimum Proctor normal ou modifié.

Les contraintes de pré-consolidation de ces sols, comme nous l'avons déjà signalé, font penser à des sols en cours de consolidation.

Pour les échantillons qui ont manifesté un gonflement lors de la mise sous eau, nous déterminons certaines de leurs caractéristiques principales. L.Mekki [104] distingue deux paramètres de gonflement :

- la pression de gonflement σ_g , définie comme la pression qui serait nécessaire à empêcher le gonflement en maintenant la déformation initiale constante et,
- l'amplitude du gonflement ϵ_g (ou gonflement libre) qui est la déformation maximale que provoque l'imbibition d'un sol sous un état de contraintes nulles ou quasi-nulles.

On peut également calculer le taux de gonflement, noté G , exprimé par l'expression suivante :

$$G(\%) = \frac{H_f - H_o}{H_o} \cdot 100 \quad (5.9)$$

H_f : hauteur de l'échantillon après gonflement

H_o : hauteur initiale de l'échantillon avant gonflement

Pour les sols de Muene-Ditu, le Tableau 5.3 présente des pressions de gonflement comprises entre 0,06 et 0,35 MPa, valeurs caractéristiques des sols à potentiel de gonflement faible selon le Tableau 5.4. Les taux de gonflement sont quant à eux compris entre 0,66 et 4,15 MPa. Pour les sols trop gonflants, les montmorillonites par exemple, la pression de gonflement peut atteindre 1 MPa ou plus. Le taux gonflement peut atteindre plusieurs dizaines de pourcent [39].

Nous constatons également sur le Tableau 5.3 que les pourcentages de gonflement secondaire sont nettement inférieurs au gonflement primaire. A l'instar du fluage, le gonflement secondaire est un processus très lent.

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
G (%)	1,75	2,53	4,15	1,85	2,27	0,68	0,66
σ_g (MPa)	0,06	0,35	0,35	0,21	0,22	0,15	0,08
G_p (%)	3,49	2,38	3,94	1,84	2,57	0,80	0,90
G_{sec} (%)	0,00	0,32	0,56	0,16	0,20	0,08	0,05

Tableau 5.3 – Paramètres de gonflement des échantillons de Muene-Ditu

$< 74\mu m$ %	w_L %	Pression de gonflement MPa	Potentiel de gonflement
> 95	> 60	10	Très élevé
60 - 95	40 - 60	2,5 - 5	Elevé
30 - 60	30 - 40	1,5 - 2,5	Moyen
< 30	< 30	$< 0,5$	Faible

Tableau 5.4 – Valeurs des potentiels et pressions de gonflement
[104]

5.3 Essais de perméabilité à l'oedomètre

5.3.1 Principe et mode opératoire

L'essai de perméabilité est réalisé dans un oedomètre qui a été adapté pour la mesure de la perméabilité à charge variable (Figure 5.9). Le perméamètre à charge variable est plus adapté pour les sols fins pour lesquels la vitesse d'écoulement d'eau est très faible.

Dans cet essai, un échantillon cylindrique de sol est drainé sur ses faces supérieures et inférieures à l'aide de pierres poreuses et de papier filtre. L'échantillon est d'abord saturé pendant 24h et un comparateur mesure en même temps le gonflement. Après saturation, l'essai débute en partant d'un niveau d'eau initial et en mesurant le niveau d'eau après des intervalles de temps déterminés. Après l'essai, l'échantillon est enlevé et mis à l'étuve pour la mesure de la teneur en eau.

Afin de mesurer la perméabilité uniquement dans le sens vertical, une colle est placée entre l'échantillon et la paroi du moule comme on peut le voir sur la Figure 5.9 (b), ce qui évite tout écoulement dans le sens horizontal.

Afin d'obtenir une même base de comparaison, les échantillons d'un même site ont été mis en place dans les mêmes conditions de densité et d'humidité initiales. Ces caractéristiques ont été prises proches de l'Optimum Proctor.

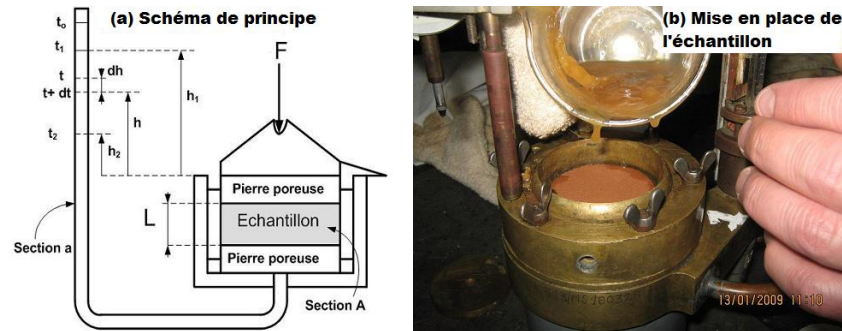


FIGURE 5.9 – Perméamètre à charge variable dans un oedomètre

5.3.2 Calculs et expressions des résultats

Pour un perméamètre à charge variable, l'expression du coefficient de perméabilité est :

$$k = 0,01 \frac{a}{S} \cdot \frac{H}{t} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (5.10)$$

avec :

a : section du tube piézométrique (cm^2)

S : section de l'échantillon (cm^2)

H : hauteur entre les orifices d'entrée et de sortie du perméamètre (cm)

t : temps pour passer de h_1 à h_2 (s)

h_1 et h_2 respectivement charge hydraulique initiale et finale (en cm) et

k : coefficient de perméabilité (en m/s).

Les résultats des différents essais réalisés sur les neuf échantillons de sols du Kasaï oriental sont présentés dans le Tableau 5.5.

w_i : teneur en eau initial

γ_d : poids volumique du sol sec

S_{ri} et S_{rf} : degrés de saturation initial et final

G : gonflement du sol après saturation

5.3.3 Observations et interprétations

Avec des valeurs de coefficient de perméabilité variant de 2 à $13 \cdot 10^{-10} m/s$, ces sols pourraient être considérés comme très peu perméables à un compactage

	$w_i(\%)$	$\gamma_d(KN/m^3)$	$Sr_i(\%)$	$Sr_f(\%)$	$G(\%)$	$k (10^{-10}m/s)$
M1	12,53	18,92	88,5	94,3	16,81	5
M2	12,53	18,91	87,5	105,2	18,62	1,7
D1	14,78	17,39	78,6	118,6	6,01	2,5
D2	16,78	17	82,5	116,4	0,82	6
D3	16,8	17,01	81,2	116,0	6,14	13
D4	13,8	18,04	82,0	120,1	6,26	3
D5	13,83	18,04	83,1	121,6	6,80	2
D6	12,57	18,43	81,1	103,8	0,93	1,5
D7	12,45	18,45	80,6	132,8	10,00	2

Tableau 5.5 – Caractéristiques hydrauliques de 9 échantillons de sols du Kasai oriental

proche de l'Optimum Proctor. Ceci corrobore les caractéristiques des sols argileux et latéritiques. En effet, les sols latéritiques présentent d'une façon générale une grande porosité totale et une forte capacité de rétention dans les micropores causée par la micro-agrégation [63], ce qui réduit leur perméabilité.

Les valeurs montrent une plus grande perméabilité de l'échantillon D3 de Kamabue Ouest par rapport aux autres échantillons. La valeur est environ double de celle de l'échantillon D2 du même site. Ceci semble logique car cet échantillon a été prélevé dans une couche située à 2,30 m de profondeur contenant plus de gros grains. En effet, lorsque la dimension des grains augmente, la perméabilité augmente.

Tous les sols ont présenté un gonflement dû à l'hydratation lors de la mise sous eau.

Nous avons fait le choix de compacter les échantillons à des teneurs en eau et densité sèche proches de l'Optimum Proctor. Ce compactage aurait normalement comme conséquence de diminuer la perméabilité de ces sols par rapport à leur perméabilité in situ. En effet, la perméabilité d'un sol diminue quand la teneur en eau de compactage augmente jusqu'à des valeurs de teneur en eau proche de l'Optimum Proctor puis augmente très légèrement pour des plus grandes valeurs [39], comme le montre la Figure 5.10.

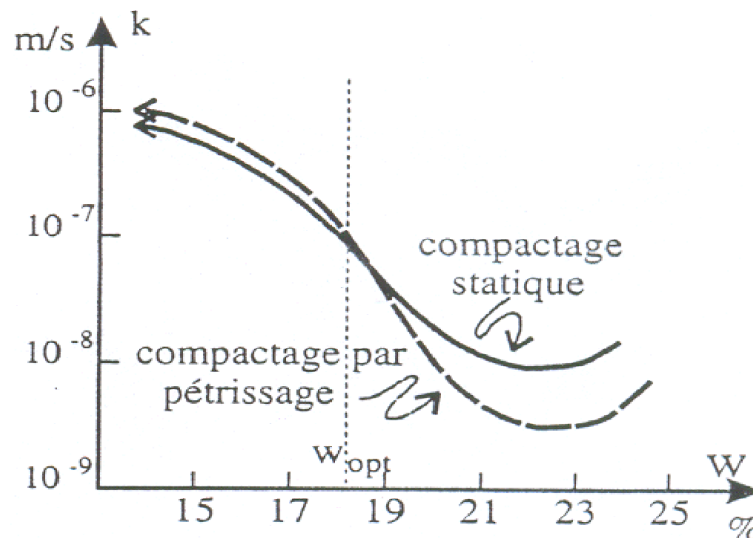


FIGURE 5.10 – Evolution de la perméabilité d'un sol en fonction de sa teneur en eau

[39]

5.4 Essais de compression triaxiale

5.4.1 Introduction

L'essai triaxial fournit les paramètres qui sont importants dans l'analyse de la résistance au cisaillement des sols. Cette résistance au cisaillement constitue un aspect très important de la géotechnique. En particulier, les problèmes de stabilité lors de l'excavation de la matière première concernent ce travail.

5.4.2 Principe et appareillage

L'éprouvette de sol de forme cylindrique et de section droite circulaire est placée sur une embase rigide munie d'un disque drainant, à l'intérieur d'une enceinte étanche. Sur la surface latérale, l'éprouvette est recouverte d'une membrane souple et imperméable. A sa partie supérieure est placée une embase rigide munie ou non d'un disque drainant, sur laquelle vient s'appliquer un piston. L'essai s'effectue en imposant une déformation axiale à vitesse constante. L'éprouvette est soumise à une pression hydrostatique imposée à l'intérieur de l'enceinte par

un liquide, généralement de l'eau. Il s'agit d'un essai de compression triaxiale particulier, axisymétrique, pour lequel $\sigma_2 = \sigma_3$. La contrainte axiale σ_1 est égale à la somme de la pression de confinement σ_3 et du déviateur $\sigma_1 - \sigma_3$ produit par l'effort appliqué F . Pour se placer dans les conditions les plus défavorables, mais aussi aisément reproductibles, l'éprouvette est généralement saturée.

L'effort vertical F peut être appliqué dès que la pression de confinement est appliquée, on dit que l'essai est non-consolidé (NC ou U). Dans le cas le plus courant, qui nous concerne aussi, une pression de confinement est d'abord appliquée. On laisse dissiper les surpressions interstitielles engendrées et le cisaillement n'est effectué qu'après dissipation totale des pressions interstitielles, l'essai est alors dit consolidé (C).

Lors du cisaillement, on peut maintenir :

- soit la pression interstitielle constante ; l'essai est alors dit drainé (D) et les variations de volumes sont mesurées ;
- soit le volume d'eau interstitielle constant, l'essai est dit non-drainé (ND ou U) et c'est alors la pression interstitielle qui est mesurée.

Ces quatre possibilités donnent lieu à trois types d'essais (CD, CU et UU), la quatrième possibilité (UD) n'étant pas bien définie car l'éprouvette se consolide plus ou moins lors du cisaillement lent et, de ce fait, son état de consolidation évolue d'une manière inconnue [39]. L'essai CU a l'avantage de pouvoir modéliser le comportement du matériau à court ou à long terme.

L'appareil triaxial de révolution est constitué d'un ensemble d'éléments qui doivent assurer les fonctions suivantes [19] :

- appliquer à une éprouvette cylindrique de section droite circulaire des sollicitations axiale et radiale ;
- déterminer les déformations axiales ϵ_1 , éventuellement radiale ϵ_3 , et les volumes d'eau absorbés ou expulsés par l'éprouvette (sauf pour les essais UU) ;
- mesurer l'effort vertical et pression radiale ;
- mesurer, selon le type d'essai, les pressions de l'eau interstitielle régnant dans l'éprouvette.

L'appareil comporte (Figure 5.11) :

- une cellule triaxiale de dimensions appropriées ;
- un dispositif de chargement et différents moyens de mise en pression permettant d'imposer un déplacement axial et des contraintes à l'éprouvette ;
- un dispositif de mesure ;
- un appareillage annexe comprenant une balance, un pied à coulisse, un touret, un carottier et des moules destinés à la confection des éprouvettes.

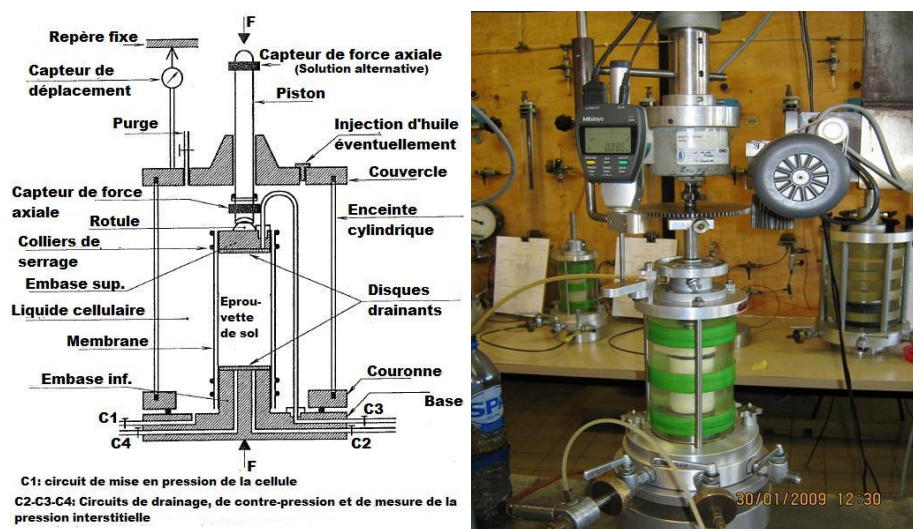


FIGURE 5.11 – Appareillage triaxial - Schéma général et dispositif de chargement ([19]-photo LEMSC)

5.4.3 Mode opératoire et choix des paramètres

- Norme : NF P 94-074 [19]. Essai consolidé non-drainé avec mesure de la pression interstitielle (CU+u)
- Préparation et installation des éprouvettes : les échantillons ont été préparés dans les conditions de compactage proches de l'Optimum Proctor normal pour les échantillons de Mbujimayi et modifié pour les échantillons de Muene-Ditu. La différence d'énergie de compactage est un choix en fonction de la nature des sols. Les sols de Mbujimayi, à caractère sableux dominant, nécessitent une énergie plus faible que les sols à caractère argileux pour atteindre une compacité suffisante. Les caractéristiques ont été prises

identiques pour les échantillons de même site (Tableau 5.6).

	M1	M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
w_i (%)	14,4	14,7	19,4	16,8	16,8	13,8	13,8	12,5	12,5
$\gamma_{di}(KN/m^3)$	17,8	18,2	17,2	17,1	16,7	18,2	18,1	18,5	18,5
S_{ri} (%)	83,2	90,5	75,9	83,5	77,4	83,8	83,6	81,8	82,1
w_f (%)	17,0	15,6	22,1	24,3	27,0	20,1	21,6	18,2	17,9
S_{rf} (%)	-	-	-	-	98,2	-	-	-	100,4

Tableau 5.6 – Paramètres des essais triaxiaux des échantillons du Kasaï oriental

- Saturation des éprouvettes : le contrôle de la saturation s’est réalisé en calculant le paramètre de Skempton $B = \Delta u / \Delta \sigma_c$ pour une variation de la pression cellulaire $\Delta \sigma_c = 50 kPa$ jusqu’à obtenir une valeur stable supérieure à 0,95.
- Consolidation : la consolidation a été contrôlée en traçant le diagramme du temps de consolidation en fonction de la variation de volume. La consolidation se termine lorsque les points s’alignent suivant une asymptote. On déduit la valeur t_{100} nécessaire au calcul de la vitesse maximale de cisaillement (voir Figure A.6 en annexe).

A la fin de la consolidation, on calcule le ΔVS qui est la diminution de volume de l’éprouvette pendant la phase de consolidation, par l’équation suivante :

$$\Delta VS = V_{vo} + (V_{we} - V_{ws}) \quad (5.11)$$

avec :

V_{vo} : le volume des vides (air) initial

V_{we} : le volume d’eau entrée pendant la saturation et

V_{ws} : le volume d’eau sortie pendant la consolidation.

- Cisaillement : des trois essais d’un même échantillon, nous avons choisi une vitesse de déformation égale à celle de l’échantillon le plus lent, elle est calculée comme suit :

$$v = \frac{\Delta h_r}{t_r} \quad (5.12)$$

avec :

$$\Delta h_r = 0,10 h_o \quad (5.13)$$

et

$$t_r = 0,53.t_{100} \quad (5.14)$$

ou

$$t_r = 2,26.t_{100} \quad (5.15)$$

où h_o est la hauteur initiale de l'échantillon et t_{100} le temps de fin de consolidation primaire. On utilise l'équation (5.14) pour un drainage à une extrémité sans drain latéral et l'équation (5.15) pour un drainage aux deux extrémités avec un drain latéral. C'est le dernier cas qui nous concerne.

Les résultats de l'essai ont été enregistrés sur un ordinateur via les différents capteurs.

N.B : Suite à la mollesse des éprouvettes après les essais, les degrés de saturation finaux de la plupart d'entre-elles n'ont pas été calculés car la détermination du volume par immersion dans le mercure devenait impossible.

5.4.4 Expression des résultats

5.4.4.1 Cercles de Mohr et paramètres de résistance des sols

Le cercle de Mohr est une représentation des états de contraintes à la rupture dans le plan contrainte tangentielle τ - contrainte normale σ . Pour un échantillon de sol donné, nous avons tracé les cercles de Mohr relatifs à trois contraintes latérales différentes.

Les différents cercles permettent d'obtenir, pour un critère de rupture donné, la courbe intrinsèque qui est l'enveloppe des cercles. Ces états de contraintes correspondent aux contraintes effectives τ et σ' pour les sols saturés et aux contraintes totales τ et σ pour les sols non saturés. Cette courbe enveloppe est assimilée, dans notre cas, à une droite appelée droite de Mohr-Coulomb d'équation :

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' : \text{pour les sols saturés} \quad (5.16)$$

$$\tau = c + \sigma \tan \phi : \text{pour les sols humides non saturés} \quad (5.17)$$

Dans la pratique, il est difficile d'obtenir une tangente à tous les trois cercles en

fonction de la précision des mesures, comme on le constate sur la Figure 5.12 (c), (d), (e) et (f). On essaie dans ce cas d'ajuster une droite moyenne ou d'éliminer un cercle en fonction de la connaissance des conditions d'essai.

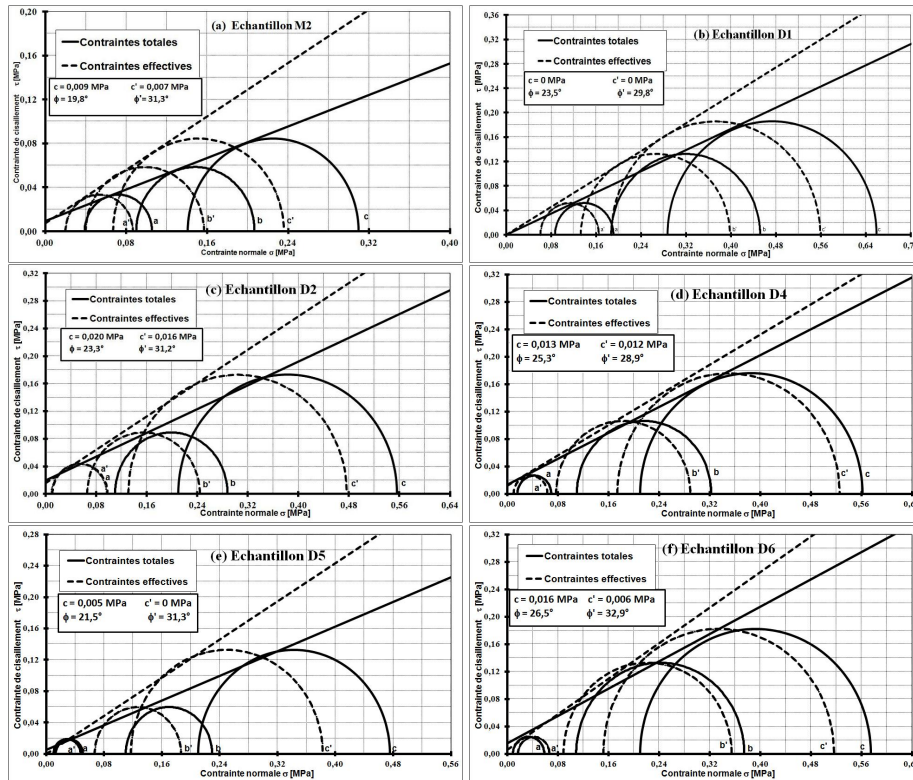


FIGURE 5.12 – Cercles de Mohr de six échantillons de sols du Kasaï oriental

Signalons que tous les cercles de Mohr de la Figure 5.12 sont tracés en tenant compte du critère de rupture du maximum du rapport des contraintes effectives σ'_1/σ'_3 . Pour les sols argileux, ce critère est souvent utilisé dans le cas où le déviateur des contraintes continue à croître pour les grandes déformations avec une variation de la pression interstitielle [20]. Il est illustré à la Figure 5.13.

Le Tableau 5.7 donne les valeurs d'angles de frottement interne et de cohésion des neuf échantillons de sols obtenus à partir de trois cercles de Mohr pour les échantillons M2, D1, D2, D4, D5 et D6 et à partir de deux cercles de Mohr pour les échantillons M1, D3 et D7.

Nous constatons que les cohésions effectives des échantillons D1 et D5 sont

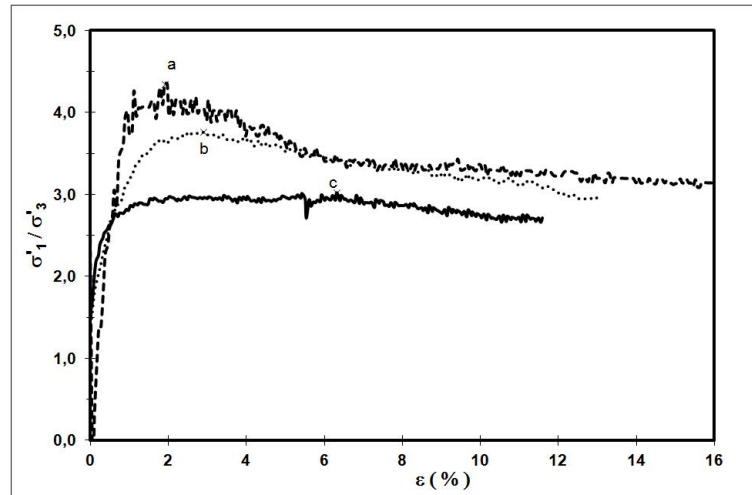


FIGURE 5.13 – Rapport contrainte effective en fonction du déplacement vertical : cas de l'échantillon D4 de Muene-Ditu

	M1	M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
Nbre essais	2	3	3	3	2	3	3	3	2
c_{cu} (kPa)	19	9	0	20	14	13	5	16	18
ϕ_{cu} (°)	10,2	19,8	23,5	23,3	26,7	25,3	21,5	26,5	23,9
c' (kPa)	2	7	0	16	7	12	0	6	10
ϕ' (°)	33,0	31,3	29,8	31,2	33,6	28,9	31,3	32,9	30,9

Tableau 5.7 – Angles de frottement et cohésion des sols du Kasai oriental

quasi-nulles. La valeur maximale étant celle de l'échantillon D2 de Kamabue Ouest. Les échantillons M1 et M2 présentent une cohésion malgré leur caractère sableux mais celle-ci reste très faible. L'existence de cohésion pour les sols sableux de Mbujimayi peut s'expliquer par l'augmentation de l'enchevêtrement des grains à la suite du compactage effectué lors de la reconstitution des éprouvettes. En effet, on sait que la résistance au cisaillement d'un sol est due, d'une part au frottement et, d'autre part à l'enchevêtrement des particules. Pour les sables, c'est généralement le terme de frottement qui est prépondérant mais si le sable est compact, l'effet de l'enchevêtrement peut ne plus être négligeable, ce qui conduit à des résistances au cisaillement importantes avec parfois une cohésion apparente [39].

L'intervalle de confiance de l'angle de frottement effectif de tous les échantillons est $[30,6^\circ - 33,1^\circ]$ avec une moyenne de $31,9^\circ$. Les valeurs d'angles de frottement effectifs ϕ' des deux sols de Mbujimayi sont comprises dans les limites des sables uniformes fins ou moyens en état moyennement dense [39].

Pour les sols argileux de Muene-Ditu, le comportement est d'une façon générale normalement consolidé sous faible contrainte latérale effective et devient surconsolidé pour des σ'_3 élevées. Les échantillons D1 et D5 ayant des cohésions nulles seraient dans un état normalement consolidé.

5.4.4.2 Courbes déviateur en fonction de la déformation axiale

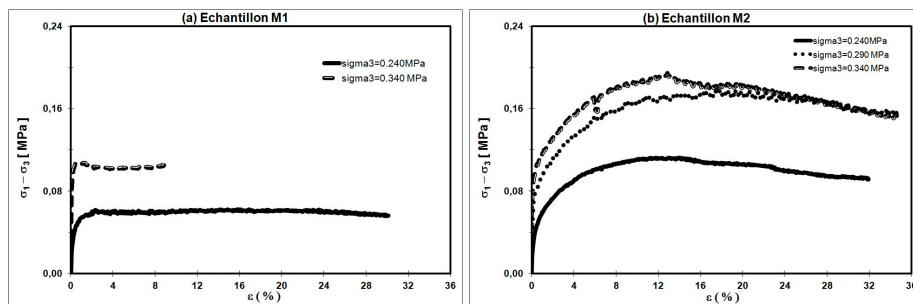


FIGURE 5.14 – Courbes déviateur de contrainte en fonction de la déformation axiale (Sols de Mbujimayi)

La Figure 5.14 présente les courbes de déviateur de contraintes en fonction de la déformation axiale des échantillons de sols de Mbujimayi, qui ont un caractère

sableux dominant. Leur comportement à faible contrainte de confinement tend vers celui des sables lâches. En effet, pour un sable lâche, la résistance au cisaillement croît et le volume diminue lorsque la déformation augmente [20]. À pression de confinement élevée, le comportement est plutôt celui des sables denses avec une résistance au cisaillement qui passe par un maximum puis décroît lorsque la déformation augmente. L'état du sol, lorsque le déviateur s'est stabilisé et lorsque l'éprouvette ne subit plus de variations de volume est appelé **état critique**. Les sables lâches tendent asymptotiquement vers cet état par le bas tandis que les sables denses y tendent par le haut.

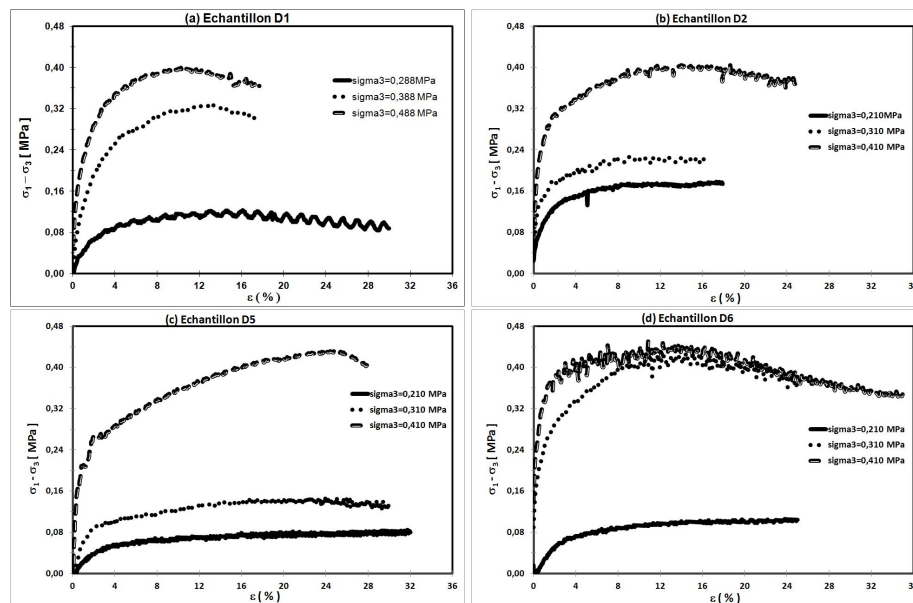


FIGURE 5.15 – Déviateur en fonction de la déformation axiale : cas des sols de Muene-Ditu

Pour les sols à caractère argileux de Muene-Ditu, la Figure 5.15 montre que leur comportement à faible contrainte de confinement est proche de celui d'argiles normalement consolidées c'est-à-dire avec un déviateur qui a tendance à se stabiliser après une croissance monotone. Par contre, à des pressions de confinement élevées, leur comportement est celui des argiles surconsolidées avec un pic de déviateur bien remarquable et une descente pour se stabiliser vers un état critique.

Le comportement d'argiles surconsolidées s'observe également sur les cour-

bes de variations de la pression interstitielle en fonction de la déformation axiale. En effet, si l'échantillon a tendance à augmenter de volume ou à gonfler pendant le cisaillement, la pression interstitielle induite est négative ; il tend à prendre du volume et à attirer l'eau dans ses pores, mais en est incapable comme cette variation est empêchée dans un essai CU. Dans ce cas, la pression interstitielle diminue et peut même devenir négative [74]. Cette situation est présentée à la Figure 5.16.

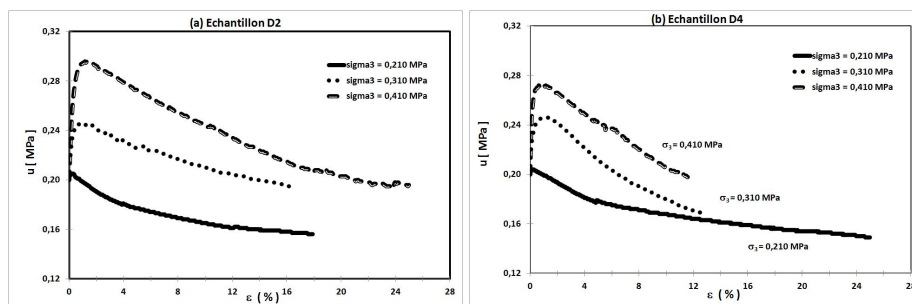


FIGURE 5.16 – Evolution de la pression interstitielle en fonction de la déformation axiale

5.4.4.3 Représentation de Lambe

Une autre représentation est celle du cheminement (ou chemin) de contraintes. On représente dans un diagramme p (contrainte moyenne) et q (déviateur) en termes de contrainte effectives ou en termes de contraintes totales [74] ; avec en abscisse la pression effective moyenne $p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$ et en ordonnée le déviateur en contraintes $q = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_1 - \sigma'_3$.

C'est le professeur T.W. Lambe qui a mis en évidence la grande utilité de cette représentation sur le plan pédagogique et comme outil de conception dans divers problèmes de la géotechnique. Une droite intrinsèque analogue à la droite de la représentation de Mohr passe par l'ensemble des points représentatifs de l'état de rupture, pour le critère choisi. La Figure 5.17 présente la situation pour deux échantillons de sols du Kasaï oriental.

L'allure des chemins de contraintes montre un comportement des sols saturés dans le domaine surconsolidé [74]. En effet, nous avons souligné que dans le cas d'argiles surconsolidées, l'excès de pression interstitielle est négatif ($\Delta U < 0$).

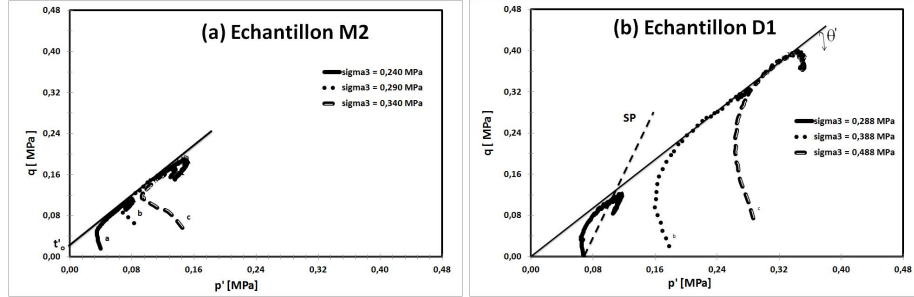


FIGURE 5.17 – Chemin de contraintes et enveloppe des résistances de pics

A partir du point de l'axe des contraintes isotropes, c'est-à-dire à des valeurs de p respectivement égales aux contraintes totales et aux contraintes effectives de consolidation, le cheminement pour une compression axiale à contrainte de consolidation constante est une droite inclinée de 45° (SP) comme on le voit sur la Figure 5.17 (b). Pour une argile normalement consolidée, le chemin de contraintes effectives devrait se trouver totalement à gauche de la droite SP étant données les pressions interstitielles positives. Pour une argile surconsolidée par contre, la forme est différente. Les pressions interstitielles commencent par augmenter légèrement pour décroître ensuite rapidement comme nous l'avons présenté à la Figure 5.16. C'est ainsi que le chemin des contraintes se déplace d'abord légèrement vers la gauche ($+\Delta U$) de SP ; ensuite la pression interstitielle devient de plus en plus négative et le chemin des contraintes vient croiser la droite SP pour atteindre la valeur maximale de q .

Deux paramètres θ (θ') et t_o (t'_o) peuvent être tirés des diagrammes de Lambe. Leur correspondance avec les paramètres de la droite intrinsèque de Mohr-Coulomb est la suivante [20] :

$$\sin\varphi' = \tan\theta' \quad (5.18)$$

$$c' = t'_o / \cos\varphi' \quad (5.19)$$

$$\sin\varphi_{uu} = \tan\theta \quad (5.20)$$

$$c_{uu} = t_o / \cos\varphi_{uu} \quad (5.21)$$

Les deux premières équations concernent les sols saturés ou sables secs, alors que

les deux dernières sont établies pour les sols humides non-saturés. Ces paramètres, calculés en contraintes effectives à partir des résultats du Tableau 5.7, sont donnés dans le Tableau 5.8 pour les échantillons de sols analysés dans ce travail.

	M1	M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
Nbre essais	2	3	3	3	2	3	3	3	2
t'_o (kPa)	1,7	6	0	13,7	5,8	10,5	0	5	8,6
θ' (°)	28,6	27,5	26,4	27,4	29	25,8	27,5	28,5	27,2

Tableau 5.8 – Paramètres de la droite intrinsèque de Lambe pour 9 échantillons de sols du Kasai oriental

5.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté les résultats d'analyses hydromécaniques de notre matière première. Ces analyses permettent une modélisation de leur comportement pendant la phase d'exploitation des carrières et lors des travaux connexes à la production des briques tels que le dimensionnement d'ouvrages de construction. Les essais ont été réalisés sur des échantillons remaniés et reconstitués en laboratoire dans les conditions Optimum Proctor.

Les courbes oedométriques des sols de Mbujimayi révèlent un comportement non-linéaire et irréversible avec une composante élastique et une composante plastique. Leurs raccords sont adoucis à cause du remaniement. Le sol du polygone Miba semble être plus compressible que celui de l'aéroport de Bipemba, car sa variation d'indice de vides pendant la compression oedométrique est plus élevée. Cette compressibilité est attribuable, en partie, à son indice des vides initial élevé. Les valeurs des contraintes de préconsolidation de ces deux sols montrent qu'ils sont en cours de consolidation, le sol du polygone Miba étant néanmoins plus consolidé que celui de l'aéroport de Bipemba, avec une σ'_p double.

Les courbes de consolidation présentent une allure connue en mécanique des sols avec une phase très courte de consolidation primaire et une phase beaucoup plus longue de consolidation secondaire correspondant au fluage de l'échantillon.

Tous les échantillons de sols de Muene-Ditu ont présenté un gonflement sous la petite charge due au dispositif de chargement (plateau). Nous avons montré que ce gonflement est relatif à leur hydratation car, pour des faibles teneurs en eau, la pression de succion est supérieure dans les sols argileux que dans les limons et les sables. Néanmoins, tant bien les valeurs des pressions de gonflement (0,06 - 0,35 MPa) que celles des taux de gonflement (0,66 - 4,15) démontrent que tous ces sols ont un potentiel de gonflement très faible.

Comme pour les courbes de consolidation, les courbes de gonflement des sols de Muene-Ditu se subdivisent en deux phases : le gonflement primaire qui relève de la diffusion d'eau dans l'échantillon et le gonflement secondaire. Ce dernier est plus complexe car la direction de déformation est opposée à celle du chargement.

Les valeurs d'indices de compression des sols de Mbujimayi sont dans la

marge des sols sableux. Les sols de Muene-Ditu présentent des valeurs plus élevées, dans les marges des sols argileux. Les modules oedométriques sont compris entre 2 et 6 MPa, une caractéristique des sols à tendance argileuse.

A un compactage proche de l'Optimum Proctor, tous les sols analysés sont très peu perméables. Les coefficients de perméabilité varient de 2 à 13.10^{-10} m/s qui correspondent aux valeurs des sols argileux et latéritiques. Il faut par contre signaler que le compactage a eu pour effet de diminuer la perméabilité des sols par rapport à leur perméabilité in situ.

Les essais de compression triaxiale CU nous ont permis, à partir des cercles de Mohr ou des chemins de contraintes, de déterminer les paramètres de résistance du modèle de Mohr-Coulomb que sont la cohésion et l'angle de frottement interne. Les cohésions effectives sont comprises entre 0 et 16 kPa. L'existence de cohésion pour les sols sableux de Mbujimayi s'expliquerait par une augmentation de l'enchevêtrement des grains à la suite du compactage en laboratoire. Par contre, les cohésions nulles des échantillons D1 et D5 de Muene-Ditu seraient une conséquence de leur état normalement consolidé. Les angles de frottement interne effectifs sont compris entre $28,9^\circ$ et $33,6^\circ$. Ceux des sols de Mbujimayi sont dans la marge des sables uniformes fins moyennement denses.

Toutes les courbes obtenues après essais de compression triaxiale révèlent que les sols de Muene-Ditu se comportent comme des argiles normalement consolidées sous faibles contraintes de confinement et leur comportement pour des contraintes de confinement élevées est celui des argiles surconsolidées.

Chapitre 6

Caractérisation physico-mécanique des briques

Nouveaux symboles du chapitre

SYMBOLE	DESCRIPTION
$\Delta\rho_{app}$	Variation de la masse volumique apparente après cuisson
$\Delta\rho_a$	Variation de la masse volumique apparente après séchage
ϵ_1	Déformation verticale
λ_v	Coefficient de variation
ρ	Masse volumique
ρ_{ah}	Masse volumique après compactage
$\rho_{app.S}$	Masse volumique apparente sèche
ρ_{as}	Masse volumique après séchage
ρ_s	Masse volumique des grains solides
σ_1	Contrainte verticale
A_w	Absorption d'eau
AFNOR	Association française de normalisation
Coeff.Corr	Coefficient de corrélation pour une régression linéaire
d	Densité
D	Diamètre
d_{app}	Densité apparente

Nouveaux symboles du chapitre (suite)

SYMBOLE	DESCRIPTION
E_{lin}	Module linéaire
E_{sec}	Module sécant
E_{tan}	Module tangent
F	Charge maximale
H	Hauteur
ILO	International Labour Office
KME	Site de Kamabue Est (D4, D5)
KMO	Site de Kamabue Ouest (D2, D3)
MAT	Site de Matshitshi (D1)
Max	Valeur maximale
MBM	Site de Mbujimayi (M2)
Min	Valeur minimale
Moy	Valeur moyenne
n_o	Porosité ouverte
Nbr	Nombre d'échantillons
OCS	Optimum de Compactage Statique
R_c	Résistance en compression simple
R^2	Coefficient de détermination pour une régression linéaire
R_V	Retrait volumique après séchage
$R_{V_{sc}}$	Variation volumique après cuisson
R_{V_i}	Variation volumique totale
SAN	Site de Sanguluja (D6, D7)
w_F	Teneur en eau de façonnage

6.1 Introduction

A la suite d'une connaissance approfondie de la matière première présentée dans les chapitres précédents, il est indispensable d'analyser les briques à base de mêmes sols. Le mode opératoire adopté à cet effet est illustré à la Figure 6.1.

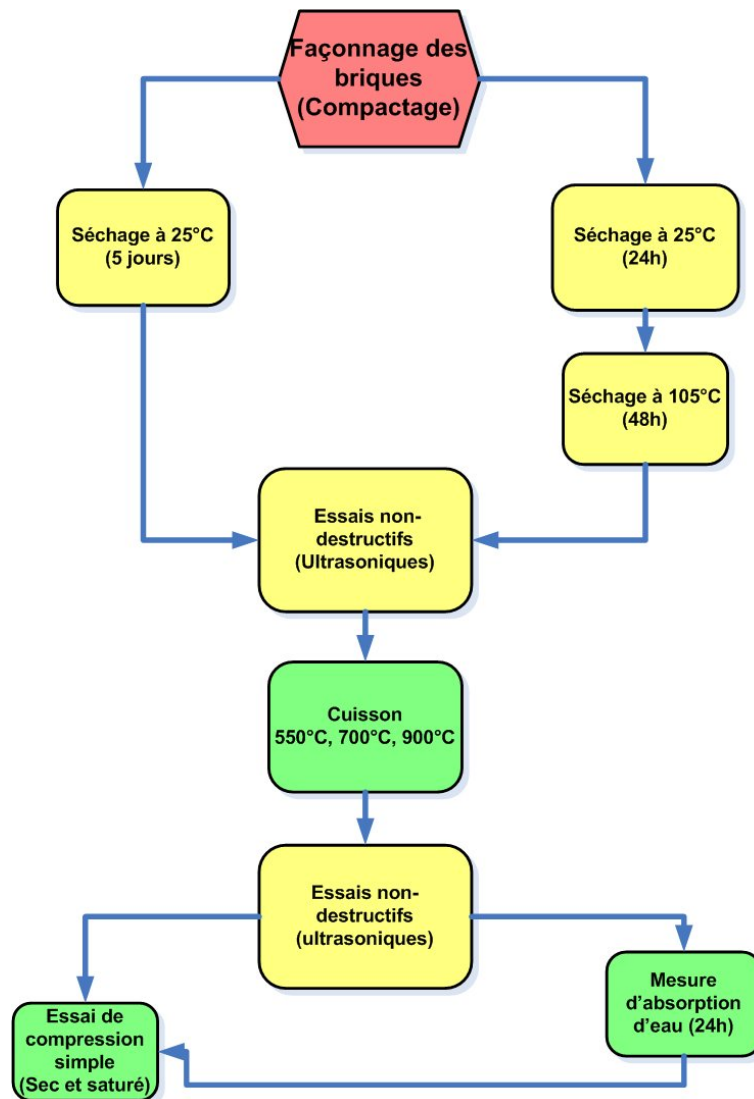


FIGURE 6.1 – Etapes d'analyse physico-mécanique des briques

Le sol préalablement broyé, séché et humidifié, est compacté en trois couches

dans un moule de 38 mm de diamètre et d'élancement 2. Les briquettes ainsi façonnées sont extraites et séchées afin d'en éliminer la quasi-totalité de l'humidité. Les éprouvettes sèches sont ensuite cuites dans un four électrique de laboratoire.

Après chaque étape, des mesures dimensionnelles et massiques permettent de connaître les caractéristiques physiques des briquettes. Les mesures de la quantité d'eau absorbée après 24 h, ainsi que celles de la résistance en compression simple, permettent de comprendre le comportement mécanique des briquettes.

Des mesures ultrasoniques ont été réalisées avant et après la cuisson des éprouvettes afin d'ausculter leur degré de fissuration. Elles feront l'objet du chapitre suivant.

6.2 Préparation de la matière première

6.2.1 Broyage et séchage du sol

Avant d'être utilisé, le sol préalablement séché est broyé manuellement à l'aide d'un rouleau en acier et tamisé sur un tamis de 2mm (Figure 6.2). Cette opération a pour but de rendre la matière plus homogène sur le plan granulométrique et d'augmenter la surface spécifique. Elle a également pour but de réduire les inclusions solides éventuellement présentes et pouvant influencer négativement la structure du produit cuit.



FIGURE 6.2 – Broyage d'un échantillon de sol

6.2.2 Dosage et mélange

La préparation de la matière première passe également par l'ajout d'eau. Celle-ci permet de garantir la plasticité de l'argile et de faciliter la mise en forme dans le moule. L'objectif choisi en terme de poids volumique est d'obtenir un matériau de résistance suffisante mais également pas trop lourd pour une facilité de manutention. Pour la teneur en eau, elle dépend du mode de façonnage des briques. Nous avons fait le choix d'analyser les briquettes de forme cylindrique compactées dans des moules d'élanement 2 ($D=38\text{mm}$; $H=76\text{mm}$)¹. Initialement, les conditions de densité et d'humidité adoptées sont celles de l'Optimum Proctor car la littérature montre que c'est proche de ces conditions que les caractéristiques des terres compactées dynamiquement sont meilleures [109]. D. Myriam montre par ailleurs que les résistances obtenues avec l'Optimum Proctor sont inférieures à celles obtenues en utilisant les conditions Optimum de Compactage Statique (OCS). Le tableau 6.1 donne les teneurs en eau de façonnage des briquettes.

	M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
w_F (%)	8,2	13,2	15,5	16,0	13,4	12,6	11,1	11,7

Tableau 6.1 – Teneurs en eau de façonnage des briquettes (programme initial)

6.2.3 Exécution du compactage des sols du Kasaï oriental

6.2.3.1 Mode opératoire

Les sols aux teneurs en eau voulues ont été compactés manuellement dans un moule cylindrique de 38 mm de diamètre et 76 mm de hauteur, en trois couches identiques (Figure 6.3 (a)). Avant la pose d'une nouvelle couche, la surface supérieure est scarifiée afin d'éviter le décollement des couches lors du démoulage. Le démoulage de l'échantillon s'effectue à l'aide d'un extracteur manuel de laboratoire (Figure 6.3 (b)).

Immédiatement après l'extraction, l'échantillon de brique est pesé et ses dimensions mesurées suivant le schéma de la Figure 6.4.

1. Elancement : rapport hauteur/diamètre

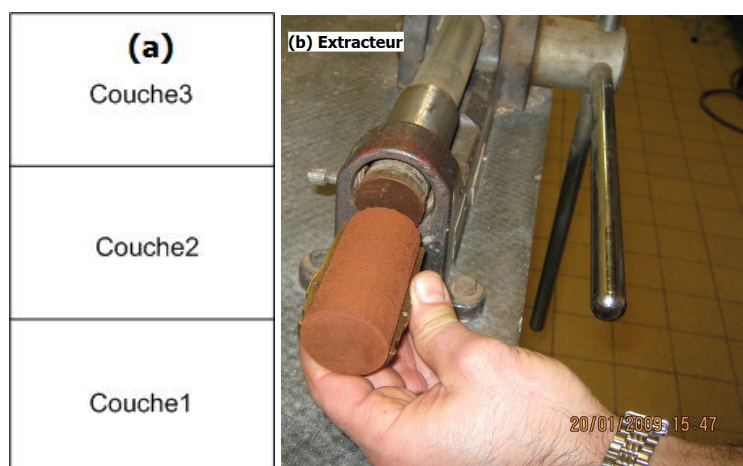


FIGURE 6.3 – Succession des couches lors du compactage (a) et extracteur (b)

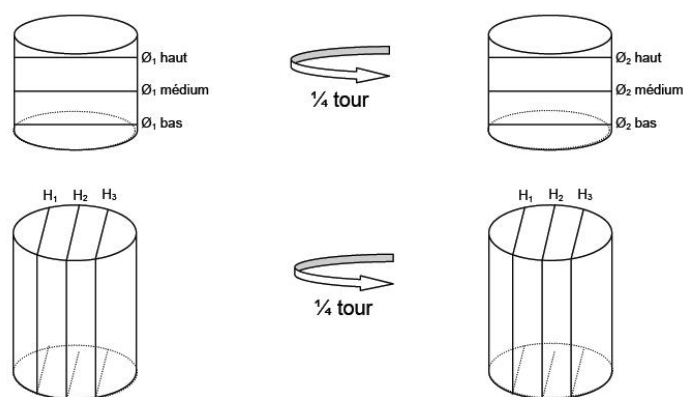


FIGURE 6.4 – Schéma de mesure des dimensions sur les échantillons cylindriques

6.2.3.2 Caractéristiques physiques après compactage

L'objectif initial était d'atteindre des poids volumiques proches de l'Optimum Proctor modifié lors du façonnage des briques. Cet objectif a été atteint pour tous les échantillons. Les valeurs de densité et de poids volumiques secs des éprouvettes sont données dans le Tableau 6.2.

		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
d	Nbr	3	3	3	2	2	4	2	2
	Min	2,19	1,92	1,96	1,97	1,99	1,79	2,08	2,05
	Max	2,21	2,01	2,04	1,98	2,13	2,09	2,09	2,08
	Moy	2,20	1,95	2,01	1,97	2,04	1,96	2,08	2,07
γ_d (KN/m ³)	Moy	19,9	16,9	17,1	16,7	17,7	17,1	18,4	18,2

Tableau 6.2 – Densités et poids volumiques secs après compactage (programme initial)

Dans le Tableau 6.3, les densités des briquettes sont regroupées par site d'échantillonnage. Nous constatons que la dispersion des résultats est très faible, avec des valeurs de coefficient de variation (λ_v) inférieures à 7%.

		MBM	MAT	KMO	KME	SAN
d	Nbr	3	3	5	6	4
	Min	2,19	1,92	1,96	1,79	2,05
	Max	2,21	2,01	2,04	2,13	2,09
	Moy	2,20	1,95	1,99	1,99	2,07
	λ_v (%)	0,55	2,49	1,84	6,76	0,84

Tableau 6.3 – Densités des éprouvettes après compactage, regroupées par sites (programme initial)

avec :

$$\lambda_v = \frac{\text{Ecart-type}}{\text{Moyenne}} : \text{Coefficient de variation}$$

Rappelons que la densité d est le rapport de la masse volumique ρ du matériau par la masse volumique ρ_w de l'eau, égale à 1000 kg/m³.

Ces densités font que toutes ces briques appartiennent à la classe f8 à la fabrication c'est-à-dire à la classe des briques de masse volumique supérieure ou égale à 1600 kg/m³ d'après la norme belge [49].

6.3 Séchage des briquettes

6.3.1 Théorie du séchage des terres compactées

6.3.1.1 Introduction

Avant d'être cuites, les briques doivent encore perdre une grande partie de leur teneur en eau. Le matériau suit un cycle de drainage/séchage pendant lequel une grande partie de l'eau libre s'évapore. *Le degré de séchage sera fonction du temps de séchage et des conditions dans lesquelles il se déroule (température et hygrométrie).*

Cette section traitera des phénomènes physiques liés au séchage. Les caractéristiques physiques obtenues en fin de séchage sont présentées à la section 6.3.3.

6.3.1.2 Dessiccation enregistrée pendant le séchage

Après compactage, une éprouvette placée dans un milieu non-saturé aura tendance à perdre une partie de son eau libre, par évaporation. Les mouvements de l'eau dans les sols sont surtout étudiés, en mécanique des sols, du point de vue du flux des fluides et de la perméabilité des sols à l'eau et à l'air. Le phénomène de séchage est également étudié en mécanique des sols non-saturés, pour la modélisation de la succion en fonction de l'état du sol. La science qui est la plus concernée par ce phénomène, et qui en conséquence l'a beaucoup étudié, est l'agronomie, car elle s'intéresse à l'état physique du sol en fonction des conditions météorologiques qui entraîneront un séchage, ou au contraire une réhumidification du sol sous-jacent.

D. Myriam [109] présente une abondante bibliographie sur l'eau et le sol, et en particulier le problème du dessèchement, c'est-à-dire de l'évaporation en l'absence de nappe phréatique. Le problème ressemble donc assez fortement à ce qui se passe dans le cas qui concerne ce travail c'est-à-dire celui du dessèchement des blocs de terre ou d'éprouvettes reconstituant ces matériaux.

Dans le cas de milieux semi-infinis et en système isotherme, le dessèchement d'un sol, selon la théorie de Hillel présentée par Myriam, se produit suivant deux stades :

- Le premier stade à régime constant au cours duquel le régime d'évaporation est déterminé par les conditions extérieures et par celles de la surface du sol, plutôt que par les propriétés conductrices du profil ;
- Un stade de régime décroissant au cours duquel l'évaporation se déroule à un régime toujours inférieur à l'évaporativité² et où le régime réel est contrôlé par l'aptitude du profil du sol à fournir de l'humidité à la zone d'évaporation.

Ces deux stades correspondent à deux fonctionnements de l'évaporation. Dans un premier temps, la surface extérieure du sol se dessèche au contact de l'air ambiant créant un gradient hydraulique dans le sol, ce qui attire l'eau vers sa surface. Parallèlement, la diminution de la teneur en eau dans le sol entraîne une baisse de la conductivité hydraulique du sol. Ces deux phénomènes se compensent pendant un certain temps (premier stade), jusqu'à ce que la surface du sol atteigne une teneur en eau d'équilibre avec le milieu environnant. Le gradient de succion cesse d'augmenter, puis décroît au fur et à mesure que le sol se sèche (2ème phase). Ce principe est illustré à la Figure 6.5.

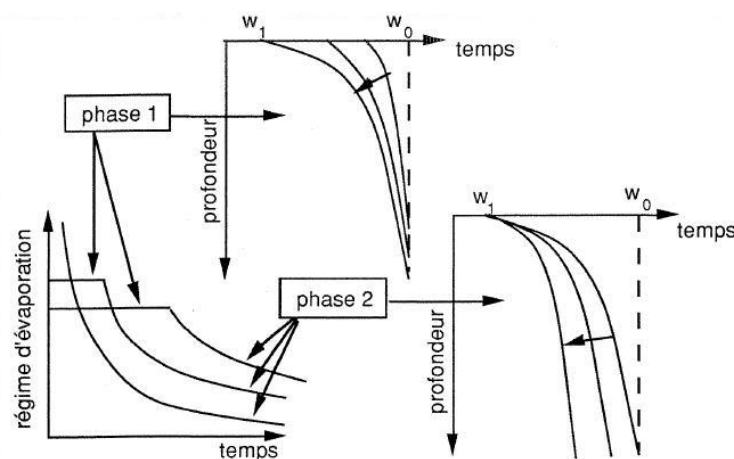


FIGURE 6.5 – Les phases de dessèchement d'après Hillel
[109]

Le temps de dessèchement sera fonction, pour un sol donné, du régime d'éva-

2. L'évaporativité atmosphérique est le flux maximum auquel l'atmosphère peut vaporiser l'eau à partir d'une surface d'eau libre

poration. Plus le régime initial est élevé, plus la perte cumulative est importante, quel que soit le temps de séchage.

Le premier stade de dessèchement sera d'autant plus long que le sol est argileux, car ces sols ont une conductivité plus faible et une teneur en eau plus élevée par rapport à celles des sables, pour un même potentiel de succion.

Signalons en outre que le temps de séchage, la température et l'hygrométrie ambiante jouent un rôle important dans le séchage, car ce sont ces conditions qui déterminent la teneur en eau finale de la surface et la vitesse de la réaction d'évaporation. Leur choix sera donc primordial pour ce travail.

6.3.1.3 Evolution de la succion en fonction du séchage

Le séchage des matériaux ne peut pas être caractérisé uniquement par la teneur en eau résiduelle et la densité sèche. En effet, le chemin de séchage et l'histoire du matériau peuvent conduire à des valeurs de teneur en eau identiques pour des comportements différents. La valeur de la succion est un paramètre plus intéressant, qui a été utilisé dans de nombreuses modélisations du comportement des sols, surtout lorsque le degré de saturation S_r devient inférieur à 90%. Il semble cependant nécessaire de ne pas dissocier cette valeur de celle de l'histoire du matériau [109].

Le dessèchement des éprouvettes compactées entraîne une augmentation de la succion due à la diminution de la quantité d'eau entre les grains. Pour les matériaux compactés, le séchage entraîne une très faible variation de la densité sèche, alors que l'humidification n'entraîne aucune variation de cette valeur.

Des études ont montré que, juste après le compactage, les valeurs de succion varient dans le sens inverse de la teneur en eau de compactage et de manière quasi-linéaire. Elles sont, de plus, indépendantes de l'état de densification du sol : la densité optimale n'entraîne pas de valeur spéciale de la succion [109].

La composition minéralogique des argiles du matériau est en revanche, un paramètre important. Pour une même valeur de compactage, les valeurs de succion sont très variables entre les sols constitués d'argile à base de kaolin et ceux formés d'argiles à base de smectite. Les valeurs de succion sont plus élevées pour les derniers que pour les premiers.

Faisons remarquer que la réaction de captation de l'eau par la terre est exo-

thermique et que celle de la libération de l'eau est endothermique. Ainsi, pour les maisons en terre, pendant la saison froide et humide, la terre, en captant de l'eau, va émettre de la chaleur, alors que durant la saison chaude, la terre sèche en refroidissant l'atmosphère. Ce flux contribue aussi au confort de ces maisons qui sont plus fraîches en saison chaude et plus chaudes en saison froide.

Ce travail ne s'intéresse pas aux valeurs de la succion, sans ignorer son existence, d'autant plus que les éprouvettes de briques sont séchées dans les mêmes conditions et sont constituées d'argiles de même nature.

6.3.2 Mode opératoire

Afin de réduire le retrait et des éclatements dus à la dilatation de la vapeur dans la masse sans pour autant perdre beaucoup de temps, nous avons adopté le programme de séchage suivant, schématisé sur la Figure 6.6 :

1. Les briquettes compactées sorties de l'extracteur sont d'abord séchées pendant 24 heures. Cette première étape se déroule dans une salle où la température et le taux d'humidité sont contrôlés au moyen d'un système informatique réglé de façon précise (20 °C et 40 - 60% d'humidité) ;
2. Après le séchage dans les conditions de laboratoire, les dimensions et le poids des briquettes sont mesurés ;
3. Les briquettes sont ensuite séchées à l'étuve à 105°C jusqu'à atteindre un poids constant (maximum 48 heures) ;
4. Les dimensions et masses sont encore mesurées afin de déterminer le poids volumique apparent sec. Avec les dimensions avant et après séchages, nous mesurons les retraits linéaires et les masses permettent alors de calculer les retraits massiques après séchage. La perte totale de masse après séchage correspond à la teneur en eau de fabrication de l'éprouvette.

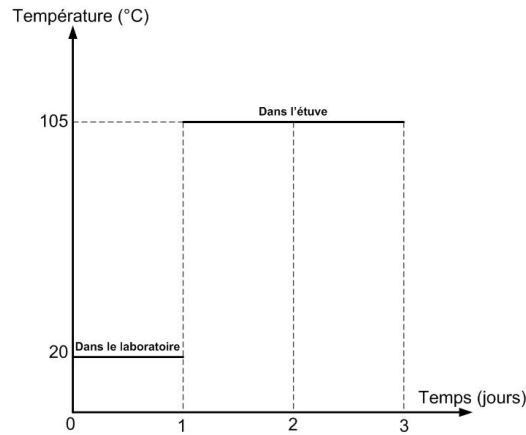


FIGURE 6.6 – Programme de séchage des briquettes compactées

6.3.3 Caractéristiques physiques après séchage

6.3.3.1 Retrait volumique

Des variations dimensionnelles ont été observées lors du séchage et peuvent avoir trois origines [52] :

1. La présence d'argiles gonflantes dans les briquettes. En effet, les argiles de la famille des smectites admettent des molécules d'eau entre les feuillets et leur départ entraînerait des modifications de la taille d'argiles, dont un retrait ;
2. L'eau située dans les pores de la brique compactée peut exercer une pression capillaire, force attractive entre les grains adjacents. Son départ au séchage peut entraîner un rapprochement des grains, donc un retrait ;
3. L'évaporation de l'eau située dans les pores peut entraîner des augmentations liées à la variation volumique de l'eau à 100°C.

Dans notre cas, la première cause peut être exclue car les analyses antérieures ont montré l'absence d'argiles gonflantes. Les variations dimensionnelles sont donc à imputer aux deux dernières causes.

Les essais ont porté sur la mesure des volumes apparents d'éprouvettes de briques avant (V_o) et après (V) séchage, par la méthode des mesures dimensionnelles présentée à la Figure 6.4 et le calcul du volume. Connaissant le diamètre D

et la hauteur H de l'éprouvette, le changement de volume apparent (R_V) est calculé à partir de la relation suivante :

$$R_V = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V_0 - V}{V_0} \cdot 100\% \quad (6.1)$$

avec

$$V = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot H}{4} \quad (6.2)$$

Les valeurs positives de R_V représentent les retraits tandis que les valeurs négatives indiquent des dilatations.

		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6
R_V (%)	Nbr	2	3	3	2	2	4	2
	Min	0,96	-0,11	1,50	0,15	1,07	-0,19	1,52
	Max	1,17	0,54	2,71	0,83	1,75	0,47	1,84
	Moy	1,06	0,16	2,23	0,49	1,41	0,05	1,68

Tableau 6.4 – Retraits volumiques des échantillons après séchage à l'étuve (programme initial)

Le tableau 6.4 montre d'une manière générale que ce sont des retraits qui ont été observés pour l'ensemble des essais. Ces valeurs restent néanmoins très faibles du fait d'un compactage proche de l'Optimum Proctor et de la teneur en eau en-dessous de la limite de retrait. Ces échantillons se trouvent tous dans un état solide sans retrait. Par contre, la succion est plus importante pour les briquettes qui ont des teneurs en eau très inférieures à celles de saturation.

6.3.3.2 Variation de la masse volumique apparente après séchage

Les masses volumiques apparentes des éprouvettes humides et sèches sont calculées à partir de leur volume et de leur masse. La variation de la masse volumique apparente après séchage est calculée à partir de la formule suivante :

$$\Delta \rho_a = \frac{\rho_{ah} - \rho_{as}}{\rho_{as}} \cdot 100 \quad (6.3)$$

avec

ρ_{ah} : masse volumique après compactage ;

ρ_{as} : masse volumique après séchage à l'étuve.

		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6
d	Nbr	2	3	3	2	2	3	2
	Min	2,03	1,68	1,71	1,67	1,75	1,73	1,88
	Max	2,05	1,74	1,77	1,67	1,89	1,85	1,89
	Moy	2,04	1,7	1,75	1,68	1,82	1,81	1,89
γ_d (kN/m ³)	Moy	20,05	16,68	17,12	16,38	17,84	17,77	18,52
$\Delta\rho_a$ (%)	Nbr	2	3	3	2	2	3	2
	Min	7,53	14,49	14,71	17,61	12,78	12,39	10,14
	Max	7,66	14,97	15,18	18,48	13,80	12,72	10,31
	Moy	7,60	14,70	14,99	18,04	13,29	12,52	10,22

Tableau 6.5 – Densités, poids volumiques et variations de la densité apparente après séchage (programme initial)

		MBM	MAT	KMO	KME	SAN
$\Delta\rho_a$ (%)	Nbr	2	3	5	5	3
	Min	7,53	14,49	14,71	12,39	10,12
	Max	7,66	14,97	18,48	13,80	10,31
	Moy	7,60	14,70	16,21	12,83	10,19
	λ_v (%)	1,21	1,68	10,6	4,42	1,02

Tableau 6.6 – Variations de la densité apparente après séchage, regroupées par sites (programme initial)

Les résultats pour les échantillons de sols du Kasai oriental, présentés dans le Tableau 6.5, montrent de manière générale que les éprouvettes subissent une diminution de la densité apparente au séchage. Cette variation s'étend de 7,5 à 18,5% avec la valeur la plus faible pour le sol le plus sableux (M2) et la plus élevée pour le sol le plus argileux (D3). La variation de la densité est due surtout à la perte de masse au séchage plutôt qu'à la variation de volume, peu importante dans ce cas. La vidange des pores saturés en eau se fait sans variation importante de volume.

Le Tableau 6.6 montre des coefficients de variations relativement faibles. La dispersion des résultats est plus élevée entre les deux couches (D2 et D3) du site de Kamabue Ouest, mais reste néanmoins largement inférieure à 30%.

6.3.3.3 Estimation de la porosité ouverte des éprouvettes sèches

La densité réelle des briques n'ayant pas été déterminée par des mesures au pycnomètre à hélium ou au toluène, la porosité ouverte est calculée à partir de la

masse volumique moyenne des grains de sol déterminée lors de l'essai au pycnomètre à eau sur le sol sec et dont les valeurs ont été présentées dans le Tableau 4.9. L'estimation de la porosité ouverte des éprouvettes sèches nous permettra de comparer et de quantifier les phénomènes de densification.

La porosité ouverte n_o est estimée par la formule suivante :

$$n_o = \frac{V - V_S}{V} \quad (6.4)$$

Comme l'éprouvette est sèche $m = m_S$ l'équation ci-dessus devient :

$$n_o = \frac{\frac{m_S}{\rho_{app.S}} - \frac{m_S}{\rho_S}}{\frac{m_S}{\rho_{app.S}}} \quad (6.5)$$

Ou encore :

$$n_o = \frac{\rho_S - \rho_{app.S}}{\rho_S} = (1 - \frac{\rho_{app.S}}{\rho_S}) \times 100 \quad (6.6)$$

avec

V (m) : le (la) volume (masse) total(e) ;

V_S (m_S) : le (la) volume (masse) des grains solides ;

$\rho_{app.S}$: la masse volumique apparente sèche et

ρ_S : la masse volumique des grains solides.

		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6
n_o (cylindre) (%)	Nbr	2	3	3	2	2	4	2
	Min	22,9	34,4	33,9	38,2	29,0	30,0	28,5
	Max	23,6	36,9	36,3	38,3	34,5	39,9	28,9
	Moy	23,2	36,1	34,8	38,2	31,7	33,7	28,7

Tableau 6.7 – Estimation de la porosité ouverte après séchage (programme initial)

		MBM	MAT	KMO	KME	SAN
n_o (%)	Nbr	2	3	5	6	3
	Min	22,9	34,4	33,9	29,0	28,5
	Max	23,6	36,9	38,3	39,9	28,9
	Moy	23,2	36,1	36,2	33,0	28,7
	λ_v (%)	2,13	4,0	5,74	12,51	0,71

Tableau 6.8 – Porosités ouvertes après séchage, regroupées par sites (programme initial)

Les valeurs de porosité ouverte des éprouvettes sont comprises entre 23 % et 40 % pour les briques destinées au programme initial de cuisson (Tableaux 6.7 et 6.8) avec une faible dispersion ($<15\%$). Elles sont comprises entre 29,8-43,6% ; 29,6-34,2% et 30-34,5% respectivement pour les autres cuissons à 550°C, 700°C et 900°C comme nous pouvons le constater dans le Tableau B.6 en annexe. Ces valeurs sont en très bonne corrélation avec les valeurs de teneur en eau de façonnage comme nous pouvons le voir sur la Figure 6.7. Ceci montre que la porosité ouverte des éprouvettes est inhérente au départ d'eau après séchage.

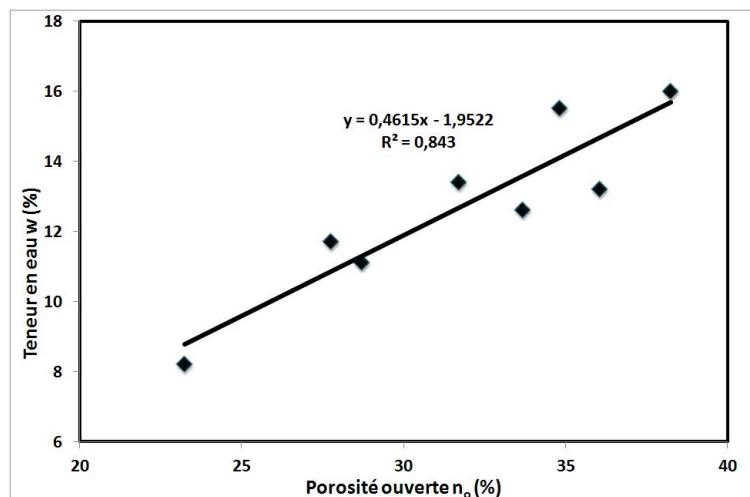


FIGURE 6.7 – Corrélation entre porosité ouverte après séchage et teneur en eau de fabrication (programme initial)

6.4 Cuisson des produits

6.4.1 Objectifs de la cuisson

La cuisson des briques modifie leur structure physique et leur donne de bonnes propriétés mécaniques ainsi qu'une étanchéité suffisante à l'eau.

S'il est effectué correctement, le processus de cuisson devrait réduire l'apparition des problèmes suivants [75] :

1. éclatement des briques en raison d'un séchage incomplet avant la cuisson ;
2. faible résistance à cause d'une cuisson insuffisante ;

3. décollement par l'eau à cause d'un contrôle inadéquat de la température ;
4. fusion des briques ou distorsion par la charge imposée lors de la superposition des briques dans le four. Ce problème est causée par une température trop élevée ;
5. variabilité des dimensions des briques causée par des variations de températures entre les différentes parties du four ;
6. fissurations fines sur les faces des briques résultant d'un changement trop rapide de température pendant le chauffage ou le refroidissement, ou de la condensation de la vapeur d'eau dans les briques ;
7. fissuration locale sur les morceaux de pierres mélangés à l'argile. Ces inclusions auraient dû être retirées lors de la préparation de l'argile, bien que des changements rapides de température peuvent aggraver le problème ;
8. corps noirs³ : ils peuvent être dus à une forte teneur en carbone mais aussi au fer ferreux (Fe^{2+}). Ces deux causes peuvent être corrigées par un apport suffisant d'oxygène (ex. en laissant des espaces pour la circulation d'air entre les briques). Un matériau dégraissant peut également être mélangé à la matière première ;
9. boursouflures : gonflement qui apparaissent à la surface des briques à la suite de la pression des gaz produits après le début de la vitrification. Le maintien de la température à un niveau précoce pourrait permettre aux gaz de diffuser à l'extérieur alors que le produit est encore perméable. Le problème peut également être atténué par l'incorporation d'un dégraissant dans l'argile.
10. écumes sur les faces des briques : peuvent être minimisées en empêchant la condensation des produits de combustion sur les briques refroidies.

Nous voyons que le stade de cuisson est le plus important du processus de fabrication des briques. C'est l'opération finale et décisive. Pendant cette phase, se développe une mobilité atomique suffisante et même un fluide visqueux qui, après refroidissement, conduit à la consolidation et à une réduction de la porosité [101]. C'est la raison qui explique l'attention que nous apportons à cette section.

3. Black cores en anglais

6.4.2 Détermination de la température de cuisson des briques en argiles

Dans son article [94], Gérard Litvan propose d'utiliser l'essai dilatométrique ainsi la DSC (Differential Scanning Colorimetry) pour déterminer la température de cuisson des briques d'argiles. Lassaad Ajam [6], Laurent Mbumbia[101] et Nadia Yakoubi [110] ont en effet utilisé l'essai dilatométrique dans leurs études sur la cuisson d'argiles respectivement tunisiennes, camerounaises et marocaines.

6.4.2.1 Essai dilatométrique d'un produit cru

L'analyse dilatométrique fournit des indications intéressantes sur le comportement au feu d'un matériau en précisant les variations dimensionnelles en fonction de la température, et de la vitesse avec laquelle elles se produisent. A partir des courbes dilatométriques on peut définir les conditions optimales de cuisson des briques (température, atmosphère, palier,...). On peut également suivre le retrait du matériau.

L'essai consiste à soumettre une éprouvette (brique) de dimensions connues, à une série de dilatation-retrait en le portant à différentes températures de cuisson et à une vitesse de montée en température bien contrôlée (généralement 3°C/min). La Figure 6.8 donne un exemple de courbe dilatométrique d'un sol latéritique du Cameroun [101].

Sur l'axe des ordonnées de la Figure 6.8, les valeurs positives représentent les dilatations tandis que les valeurs négatives sont relatives aux retraits. Nous observons dans le cas de la figure les phénomènes suivants [101] :

- une dilatation rapide entre 50°C et 100°C puis progressive jusqu'à 250°C environ. Elle indiquerait la présence d'alvéoles de gaz dans l'échantillon ;
- après un léger retrait vers 250°C, une nouvelle dilatation se fait remarquer jusqu'à 450°C. Une transformation importante dans cette phase serait la déshydratation de la goethite pour donner de l'hématite ;
- deux grands retraits progressifs vers 580°C et 850°C. Ces retraits seraient en grande partie dus à la perte d'eau de constitution de la kaolinite. Signalons également la transformation du quartz α en quartz β qui culmine autour

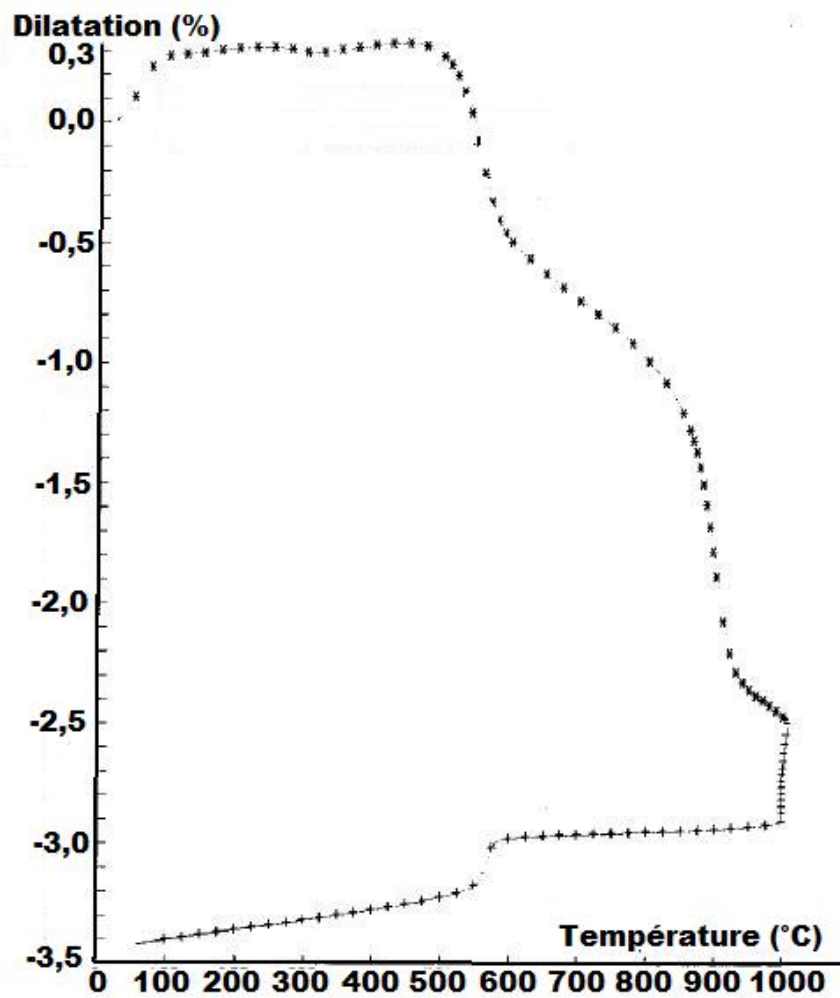


FIGURE 6.8 – Exemple de courbe dilatométrique
[101]

- de 580° ;
- un grand retrait progressif entre 825° et 885°C qui s'accroît jusqu'à 920°C. Il correspondrait à l'effet exothermique caractéristique de la kaolinite ;
- un retrait progressif entre 920° et 970°C qui se poursuit au palier de cuisson à 970° - 1000°C ;
- un retrait progressif au refroidissement avec un brusque changement entre 550° et 575°C, qui confirme la présence de quartz résiduel.

L'essai dilatométrique n'a pas été réalisé dans le cadre de ce travail. Pour le choix de la température de cuisson, nous nous baseront principalement sur les résultats des analyses thermogravimétriques et thermodifférentielles ainsi que sur les courbes dilatométriques réalisées par d'autres chercheurs sur des matériaux analogues. L'expérience des céramistes nous a également été d'une grande utilité.

6.4.2.2 Effet pouzzolanique des briques en argiles

Les argiles n'ont généralement pas beaucoup d'activité pouzzolanique. Afin de bien développer l'action pouzzolanique, les briques doivent être cuites à une température assez basse (inférieure à 900°) et l'argile doit être finement broyée afin d'augmenter la surface spécifique [26]. La nature de l'argile est également importante car toutes les argiles ne sont pas pouzzolaniques.

6.4.2.3 Briques réfractaires

L'argile la plus utilisée dans les briques réfractaires est la **kaolinite**. Un matériau argileux ne peut développer sa résistance maximale avant d'être vitrifié. Cette vitrification commence aux environs de 900°C et s'étend jusqu'à plus de 1500°C dépendant du type d'argile. Pendant cette phase, la porosité de la masse diminue entraînant une augmentation de résistance et de dureté. Chimiquement, les teneurs en oxydes tolérées dans les normes sont plus faibles que celles des briques cuites [111].

6.4.3 Programme de cuisson

Le programme de cuisson devrait tenir compte des différentes phases présentes dans le matériau, de leur transformation lors des phases de cuisson et de l'obtention des caractéristiques finales suffisantes. Le choix de la température, de la vitesse et du temps de cuisson devront être conséquents. Dans le domaine des basses températures ($<1000^{\circ}\text{C}$) les principales transformations sont :

1. La perte d'eau absorbée : celle-ci a lieu entre 20 et 200°C .
2. La décomposition des matières organiques : jusqu'à 500°C ;
3. La transformation de la kaolinite en métakaolinite : entre 380°C et 550°C ;
4. La transformation du quartz α en quartz β (point de quartz) : aux environs de 573°C : à cette température, les briques sont très sensibles à la formation de fissures, la vitesse de montée en température doit être baissée.

6.4.3.1 Choix de la température maximale de cuisson

A la lumière des résultats précédents, la température maximale de cuisson (palier IV sur la Figure 6.9) est choisie afin d'obtenir une cimentation suffisante des grains. En effet, entre le début d'oxydation ($300^{\circ}\text{-}350^{\circ}\text{C}$) et la vitrification (975°C), on passe par des températures auxquelles certains minéraux contenus dans les briques, bien que toujours en-dessous de leurs points de fusion, deviennent capables de réagir entre eux et de former des solutions visqueuses qui s'écoulent sur les grains moins fusibles, les cimentent et remplissent leurs espaces poreux. En général, ces solutions en se refroidissant, se solidifient en une phase vitreuse ou amorphe.

La température de cuisson des briques est généralement prise comme étant l'intersection de la courbe dilatométrique avec l'axe des températures. Mais dans ce travail, nous avons choisi d'analyser les températures comprises entre la fin de la décomposition des matières organiques (500°C) et le début de la vitrification (975°C). Initialement, les briques ont été cuites à 900°C .

6.4.3.2 Choix du temps de cuisson

Le temps de cuisson à la température maximale est généralement choisi en fonction des dimensions des briques à cuire. Les céramistes proposent une cuisson entre 4h et 8h [101]. Au cours de ce travail, nous suivrons l'évolution des caractéristiques des briques en fonction de certains paramètres, dont le temps de cuisson. Initialement, le temps de 2h a été choisi en fonction des dimensions réduites des éprouvettes de briques. Nous analyserons également l'influence d'un passage de 2h à 4h de cuisson à la température maximale.

6.4.3.3 Choix de la vitesse de montée en température

La vitesse de montée en température est un paramètre très important lors d'une cuisson car elle doit permettre d'assurer une cuisson lente et progressive. C'est un compromis entre l'obtention de caractéristiques suffisantes et une économie d'énergie. En effet, une faible vitesse permet d'obtenir un produit homogène et exempt de fissures. Le International Labour office (ILO) [75] propose une vitesse de montée de 50°C/heure avec une réduction du taux à la température d'inversion du quartz. Les mêmes auteurs soulignent qu'un taux de montée plus élevé entraîne moins de temps de chauffage, moins de pertes de chaleur et par conséquent une réduction des coûts. Le taux de chauffage optimal serait celui qui nécessite le calendrier le plus court tout en produisant une brique de qualité satisfaisante.

Comme on le voit sur la Figure 6.9, deux vitesses de montée en température ont été initialement choisies. Une vitesse de 3°C/min dans les tronçons I et III, la même que celle généralement utilisée lors des analyses dilatométriques. Une vitesse plus faible (1°C/min) dans le tronçon II. En effet, dans ce dernier tronçon, a lieu le point de quartz (573°C) qui exige une prudence tant en montée qu'en descente afin d'éviter les microfissures dans les produits cuits.

6.4.3.4 Choix de la vitesse de descente en température

Se référant à l'expérience d'une briqueterie belge, nous avons initialement choisi de travailler avec une seule vitesse de descente en température (3°C/min) mais avec une pause d'une heure à 573°C, point de transformation du quartz β en

quartz α .

Les briquettes ayant été préchauffées à 105°C, en tenant compte des différentes transformations et de la nécessité d'obtenir des bonnes caractéristiques physiques et mécaniques, le programme initial de cuisson des briques est présenté sur la Figure 6.9.

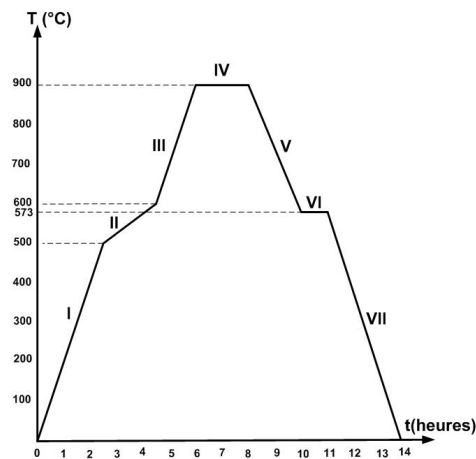


FIGURE 6.9 – Programme initial de cuisson des briquettes

6.4.4 Conduite de la cuisson

La cuisson a été réalisée au laboratoire LEMSC. Le four utilisé est un four électrique programmable de laboratoire, de dimensions intérieures 25 cm x 30 cm x 50 cm, de marque Mettler-Toledo. Les briquettes étaient enfournées par groupe et posées sur leurs bases. Les caractéristiques physiques sont celles mesurées après séchage à l'étuve. Les paramètres introduits dans le programme de cuisson étaient :

1. Les vitesses de montée et de descente en température Pr (°C/min)
2. Les paliers de température PL (°C)
3. Les durées des paliers PD (minutes)

A la fin de la cuisson et après un refroidissement dans le four, les produits cuits sont enlevés du four, conservés au dessiccateur avant la mesure des caractéristiques physiques et mécaniques.

6.4.5 Caractéristiques physiques après cuisson

Après cuisson, les dimensions des briques ainsi que leurs masses sont mesurées et permettent de calculer les variations volumiques après cuisson ($R_{V_{sc}}$) et la perte au feu (LOI).

6.4.5.1 Variation de volume après cuisson

Les variations de volume après cuisson ont été calculées par la formule suivante :

$$R_{V_{sc}} = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\text{Volume cuit} - \text{Volume sec}}{\text{Volume cuit}} \quad (6.7)$$

		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
$R_{V_{sc}}$ (%)	Nbr	3	3	3	2	2	4	2	1
	Min	1,18	0,11	-1,30	-1,55	-0,40	-0,56	1,14	-
	Max	2,00	0,97	-0,42	-1,54	1,13	0,67	1,20	-
	Moy	1,60	0,50	-0,86	-1,55	0,36	-0,01	1,17	1,75

Tableau 6.9 – Variations volumiques après cuisson à 900°C

		MBM	MAT	KMO	KME	SAN
$R_{V_{sc}}$ (%)	Nbr	3	3	5	6	3
	Min	1,18	0,11	-1,55	-0,56	1,14
	Max	2,00	0,97	-0,42	1,13	1,75
	Moy	1,60	0,50	-1,14	0,11	1,36
	λ_v (%)	25,6	86,4	42,8	58,6	24,7

Tableau 6.10 – Variations volumiques après cuisson à 900°C, regroupées par sites

Le signe négatif dans les tableaux signifie qu'il y a retrait et le signe positif pour un gonflement. A part les échantillons D2, D3 et D5 du site de Kamabue qui ont subi des faibles retraits, les autres échantillons ont présenté un gonflement. Les valeurs sont par contre très dispersées, avec des coefficients de variation supérieures à 30% pour les sols plus argileux de Kamabue Est et Ouest (Tableau 6.10). Cette dispersion, comme celle des variations de volumes après séchage, proviendrait de la méthode de calcul volumique adoptée. Néanmoins, les variations volumiques restent acceptables, de 0,5 à 2%. Il est généralement recommandé que le

retrait ou gonflement volumique entre le séchage et la cuisson soit compris entre 0,5% et 3% [6] [12].

On limite le retrait ou gonflement volumique total après cuisson⁴ à 8% [142] [6] pour une bonne qualité de briques. Les valeurs de retrait ou gonflement total R_{V_t} , calculées pour les sols qui intéressent ce travail, sont reprises dans les Tableaux 6.11 et 6.12. Nous constatons qu'elles sont largement inférieures à la limite exigée.

		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6
R_{V_t} (%)	Nbr	3	3	3	2	2	4	2
	Moy	2,66	0,66	1,37	-1,06	1,77	0,04	2,85

Tableau 6.11 – Variations volumiques totales

		MBM	MAT	KMO	KME	SAN
R_{V_t} (%)	Nbr	3	3	5	6	3
	Moy	2,66	0,66	0,40	0,62	3,34

Tableau 6.12 – Variations volumiques totales après cuisson à 900°C, regroupées par sites

6.4.5.2 Perte au feu

La perte au feu ou Loss on ignition (LOI) en anglais est une perte de poids de l'échantillon après cuisson. Cette perte de poids est une propriété importante dans l'étude des briques au même titre que la densité et le retrait. Au plus une brique est compacte, au plus ses performances mécaniques seront élevées. Mais au plus elle est légère, au plus sa mise en oeuvre sera aisée. Il est donc important de trouver un compromis. Cette perte au feu devrait rester acceptable afin d'éviter une grande déformation de la brique. Pour une bonne qualité de briques, la perte au feu devrait être inférieure à 10% [128]. La norme chinoise (CNS 1999) quant à elle fixe la limite supérieure à 15% [142].

La perte au feu est calculée, à partir du poids de la brique avant cuisson (P_0)

4. Retrait total : retrait après séchage et cuisson

et après cuisson (P), par la relation suivante :

$$LOI(\%) = \frac{\Delta P}{P_0} = \frac{P_0 - P}{P_0} \quad (6.8)$$

		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
LOI (550 °C) (%)	Nbr	2	2	2	2	2	-	2	-
	Min	2,88	6,24	5,04	7,98	4,5	-	4,21	-
	Max	2,93	6,31	5,94	8,31	4,54	-	4,29	-
	Moy	2,9	6,27	5,49	8,15	4,52	-	4,25	-
LOI (700 °C) (%)	Nbr	4	-	-	-	-	4	-	4
	Min	3,17	-	-	-	-	6,78	-	5,56
	Max	3,22	-	-	-	-	6,84	-	5,67
	Moy	3,19	-	-	-	-	6,82	-	5,63
LOI (900 °C) (%)	Nbr	3	3	3	2	2	4	2	2
	Min	3,52	7,46	8,53	9,3	7,25	7,36	6,44	6,27
	Max	3,88	7,70	8,57	9,40	7,41	7,40	6,49	6,28
	Moy	3,64	7,61	8,56	9,35	7,33	7,38	6,47	6,28

Tableau 6.13 – Pertes au feu des échantillons du Kasai oriental, cuits à 550, 700 et 900 °C

		MBM	MAT	KMO	KME	SAN
LOI (900 °C)(%)	Nbr	3	3	5	6	4
	Minimum	3,52	7,46	8,53	7,25	6,27
	Maximum	3,88	7,70	9,40	7,41	6,49
	Moyenne	3,64	7,61	8,87	7,36	6,37
	λ_v (%)	5,71	1,69	4,92	0,79	1,75

Tableau 6.14 – Pertes au feu à 900°C des échantillons du Kasai oriental, regroupés par sites

Dans les tableaux 6.13 et 6.14, les valeurs sont toutes positives représentant des pertes de poids. Les pertes de poids à 900°C sont toutes logiquement supérieures à celles à 700°C et à 500 °C. Mais l'écart de perte de masse entre 700 et 900°n'est que de 3 à 6 %. En effet, les transformations importantes, relatives à la perte de poids, ont lieu en dessous de 700°. Comme l'avaient déjà montré les analyses chimiques et thermiques, la perte au feu est directement proportionnelle à l'argilosité du sol. Les échantillons D2, D3 de Kamabue Ouest, plus argileux, présentent les pertes de masse les plus élevées alors que l'échantillon M2 de Mbu-jimayi, plus sableux, possède la plus faible perte de masse. Toutes ces valeurs,

comprises entre 3,5-9,4%, restent acceptables selon les recommandations du domaine des briques cuites. Ces sols sont une fois de plus utilisables comme matière première dans la briqueterie. Les valeurs de coefficient de variation (Tableau 6.14) révèlent une faible dispersion des valeurs obtenues.

Une attention particulière serait indispensable lors de l'utilisation des sols M2 et D3. Le premier cité à cause de la très faible perte de masse qui pourrait nécessiter un ajout d'argile. La perte au feu du second sol se rapproche beaucoup de 10%, une diminution de plasticité pourrait être utile afin de faciliter sa mise en oeuvre dans la briqueterie. Nous pouvons procéder par l'ajout d'agents dégraisants (sables, verres broyés, chamottes, feldspaths, pegmatite ou autres substances à caractère non hydraulique).

6.4.5.3 Variations de la masse volumique apparente après cuisson

La connaissance de la densité apparente est importante pour le calcul de la maçonnerie et du nombre de briques dont on aura besoin. La variation de la masse volumique apparente après cuisson est calculée de la manière suivante :

$$\Delta\rho_{app}(cuisson) = \frac{\rho_{app}(sec) - \rho_{app}(cuit)}{\rho_{app}(sec)} \cdot 100 \quad (6.9)$$

		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
d_{app}	Nbr	3	3	3	2	2	4	2	1
	Min	1,91	1,53	1,57	1,53	1,62	1,70	1,74	-
	Max	1,94	1,60	1,63	1,54	1,74	1,72	1,75	-
	Moy	1,93	1,56	1,61	1,54	1,68	1,71	1,75	1,74
$\gamma_d (kN/m^3)$	Moy	18,9	15,3	15,8	15,1	16,5	16,8	17,1	17,1
$\Delta\rho_{app} (\%)$	Nbr	3	3	3	2	2	4	2	1
	Min	4,58	7,56	7,74	7,90	7,04	6,84	7,51	-
	Max	5,08	8,59	8,19	8,00	8,30	8,01	7,62	-
	Moy	4,77	8,07	7,77	7,95	7,67	7,37	7,56	7,91

Tableau 6.15 – Densités, poids volumiques et variations de densité apparente après cuisson à 900°C

Comme pour la densité apparente après séchage, la variation de la masse volumique apparente est beaucoup plus déterminée par la variation de la masse, donc la perte au feu car les variations de volume sont très faibles (Tableaux 6.9 et 6.10).

		MBM	MAT	KMO	KME	SAN
$\Delta\rho_{app}$ (%)	Nbr	3	3	5	6	3
	Min	4,58	7,56	7,38	7,04	7,51
	Max	5,08	8,59	8,19	8,30	7,91
	Moy	4,77	8,07	7,84	7,47	7,68
	λ_v (%)	5,63	6,38	3,90	7,61	2,69

Tableau 6.16 – Variations de densité apparente après cuisson à 900°C, regroupées par sites

La dispersion des valeurs reste faible (Tableau 6.16) bien que, pour certains sites, elle est supérieure à la dispersion des pertes au feu à cause de la forte dispersion des volumes.

Les autres cuissons à 550°, 700°C et 900°C provoquent respectivement des réductions de masse volumique apparente de 2,7 à 8,2%, 3,5 à 7,2% et 3,7 à 8,6% (Voir Tableau B.9 en annexe).

La corrélation est bonne entre la variation de la densité apparente après cuisson et la perte au feu, comme on peut le constater sur la Figure 6.10. A densité identique ou proche, la variation de la masse volumique apparente évolue dans le même sens que la perte au feu c'est-à-dire augmente avec la température.

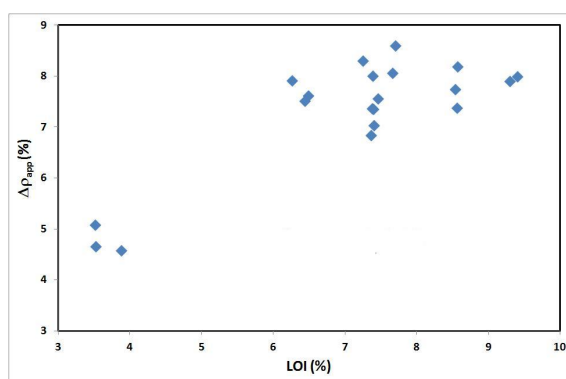


FIGURE 6.10 – Relation entre la variation de la masse volumique après cuisson et la perte au feu à 900°C

6.5 Caractéristiques mécaniques des briques cuites

6.5.1 Introduction

Dans ce paragraphe, nous investiguons la résistance intrinsèque des matériaux cuits à travers leurs propriétés mécaniques. La résistance mécanique est une propriété fondamentale des matériaux solides qui peut être définie comme l'aptitude à supporter les charges sans déformation inacceptable, ni déficience. Cette résistance mécanique peut être évaluée à partir d'essais destructifs et/ou non destructifs. Dans notre cas, il s'agit particulièrement de la résistance en compression simple, l'absorption d'eau et la vitesse ultrasonique. Cette dernière fera l'objet du chapitre suivant.

6.5.2 Résistance en compression simple

6.5.2.1 Introduction

La résistance en compression est un paramètre essentiel et le plus fréquemment déterminé pour évaluer la capacité d'un matériau à être employé dans la construction. On le considère comme un bon indicateur de la qualité pour deux raisons majeures [101] :

- Les murs sont soumis à des charges verticales du fait de la pesanteur et travaillent, dans les conditions normales en compression pure ;
- La résistance d'un matériau est une mesure de sa durabilité.

Un essai de compression simple doit idéalement se rapprocher d'un essai de compression uniaxiale. Les conditions d'appui perturbent cependant inévitablement l'état de contrainte près des bases en introduisant des contraintes radiales et des contraintes circonférentielles qui conduisent à une compression multiaxiale aux extrémités de l'éprouvette. Il faut donc choisir un élanement suffisant pour que la zone médiane ne soit pas perturbée. Des valeurs plus grandes peuvent conduire à des phénomènes d'instabilité alors que des valeurs plus faibles conduisent à des surestimations de la résistance, de l'ordre de 20% pour un élanement unitaire.

La vitesse de mise en charge doit être telle que les effets dynamiques soient négligeables et que les fluages ne soient pas non plus trop importants. Le compro-

mis conduit à des essais réalisés en quelques minutes. Très souvent, l'essai a lieu à l'humidité naturelle mais parfois on considère l'état de saturation, cas le plus défavorable, en immergeant l'éprouvette.

6.5.2.2 Courbe classique contrainte-déformation

Les courbes classiques de la contrainte axiale σ_1 en fonction de la déformation proportionnelle axiale ϵ_1 , de la déformation proportionnelle transversale ϵ_3 et de la déformation proportionnelle volumique $\Delta V/V$ sont représentées à la Figure 6.11.

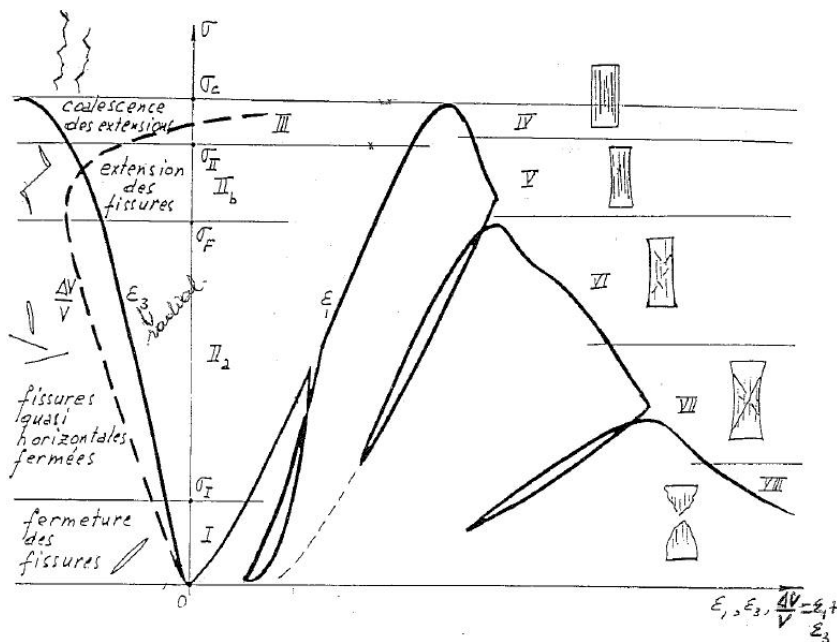


FIGURE 6.11 – Courbe classique contrainte-déformation en compression simple [38]

Le comportement sous faible charge n'est pas linéaire, la déformabilité axiale diminue avec la charge tandis que la déformabilité transversale augmente (phase I). La forme curviligne des diagrammes peut s'expliquer par la présence de fissures ou de microfissures qui se referment. La concavité du diagramme (σ_1, ϵ_1) est d'autant plus prononcée que la porosité de fissures est grande. La forte concavité aux faibles charges vers les σ positifs a aussi comme cause la mise en place des bases et peut être corrigée en déplaçant l'origine des axes.

Après cette phase de serrage, le comportement du matériau est linéaire ou quasi. C'est un comportement pseudoélastique (phase II). La déformation résulte de phénomènes élastiques accompagnés de glissements des lèvres des fissures. L'énergie absorbée par ces glissements n'est pas récupérable lors d'une décharge de l'éprouvette, ce qui explique que le module de déformation à la décharge est supérieur à celui de la première mise en charge.

Au-delà d'une contrainte σ_F , les glissements sont tels que des ruptures se produisent aux extrémités des fissures. La rigidité axiale de l'éprouvette n'est pas affectée d'une manière sensible mais ce phénomène ne peut se déceler que sur le diagramme de la dilatance transversale qui augmente de plus en plus rapidement puisqu'il y a ouverture des fissures verticales. L'éprouvette augmente donc de volume, il y a dilatance.

Au-delà de σ_{II} , les fissures additionnelles se rejoignent provoquant des discontinuités verticales accompagnées de ruptures intracristallines peu développées, de séparations de grains, de glissements intergranulaires et de quelques ruptures de pointes de cristaux, avec pour effet une réduction de la rigidité axiale et une forte augmentation de la dilatation transversale. La charge maximale est alors rapidement atteinte (phase III).

Au-delà de la charge maximale, l'éprouvette continue à se rompre mais elle est cependant toujours capable de supporter une charge. La rupture progresse du développement des ruptures intracristallines (phase IV) jusqu'à la désintégration de l'éprouvette (phase VIII). L'observation macroscopique des échantillons montre que dans les phases III et IV de la courbe de chargement, le phénomène de rupture est imposé par des *défauts locaux* qui produisent des concentrations de contraintes en des points particuliers. Le début des phénomènes de rupture est donc dû à l'hétérogénéité intrinsèque du matériau.

La forme de la courbe (σ_1, ϵ_1) est influencée par les facteurs suivants :

1. L'élancement de l'éprouvette
2. L'orientation préférentielle des défauts de structure
3. La vitesse de chargement
4. Le degré de saturation

5. La température (pour les hautes températures)

6.5.2.3 Principe, matériel et méthodes

L'éprouvette est placée entre deux pistons, l'un fixe et l'autre mobile. Afin d'obtenir une compression uniforme, une plaque cylindrique est placée entre la tête du piston supérieur et la surface de l'éprouvette afin d'obtenir une surface de compression plane et uniforme (Figure 6.12). La charge est appliquée de manière continue et progressive par un système hydraulique qui entraîne la base, tandis que la partie supérieure reste fixe. Toutes les mesures de force et de déplacement sont enregistrées via des capteurs vers un ordinateur. La vitesse de déplacement choisie est de 0,1mm/min.

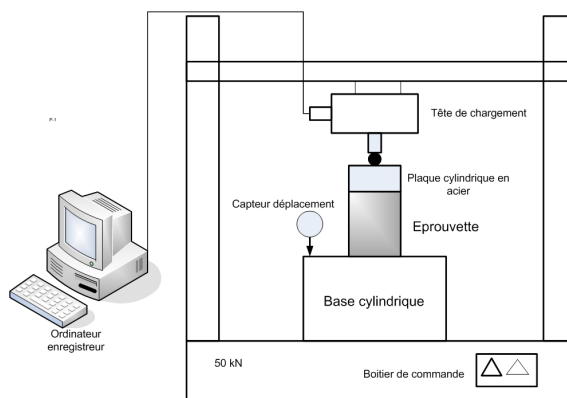


FIGURE 6.12 – Schéma de la presse de compression uniaxiale

La presse utilisée pour le programme initial est de marque TRITECH, de 50 kN d'effort maximal. Les mesures étaient enregistrées toutes les cinq secondes. L'ordinateur ayant été programmé pour les essais triaxiaux, nous avons utilisé le programme de l'essai non-consolidé non drainé (UU) en imposant une pression latérale nulle. Une presse plus petite de 5 kN a été choisie pour les échantillons cuits à 550°C et 700°C. Une troisième presse nous a servi de vérification pour la seconde série d'échantillons cuits à 900°C. Cette dernière, de marque ZWICK/Roell/Z250, est plus récente, de plus grande capacité et précision. Un programme (TestXpertII) traite, enregistre et affiche les résultats (Figure 6.13). Tous ces essais ont été réalisés au LEMSC/UCL.

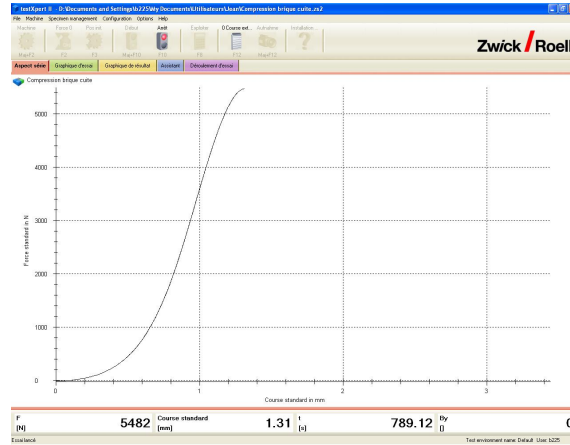


FIGURE 6.13 – Affichage de la courbe effort-déplacement lors de l’essai de compression

La contrainte est calculée en divisant la force F par la section A de l’éprouvette.

$$R_c = \frac{F}{S} \quad (6.10)$$

avec

R_c : résistance en compression de l’éprouvette, en MPa ;

F : charge maximale appliquée, en N ;

S : section de l’éprouvette, en mm^2 .

Le module linéaire E_{lin} est le coefficient angulaire de la partie linéaire de la courbe (σ_1, ϵ_1) . Il détermine la déformabilité (rigidité) de la brique dans sa phase pseudoélastique.

6.5.2.4 Analyse des courbes contrainte-déformation obtenues

La Figure 6.14 présente les courbes contrainte-déformation des briquettes à base de quatre sols analysés dans ce travail. Nous constatons que toutes les courbes présentent une forme en S qui peut être scindée en quatre zones :

- Une première partie non-linéaire qui correspondrait à une mise en place du plateau sur l’éprouvette et au début de la fermeture de microfissures.
- Cette première branche est suivie d’une partie linéaire où la brique a un

comportement pseudo-élastique linéaire jusqu'à la contrainte limite élastique qui marque la fin du domaine élastique. La pente de cette droite élastique est appelée **module de déformation linéaire**, noté E_{lin} . La rigidité du matériau augmente dans cette branche due à la fermeture des microfissures.

- La branche élastique est suivie d'une partie non-linéaire jusqu'à la résistance limite.
- Au-delà de résistance limite, la brique subit de grandes déformations alors que la contrainte axiale diminue.

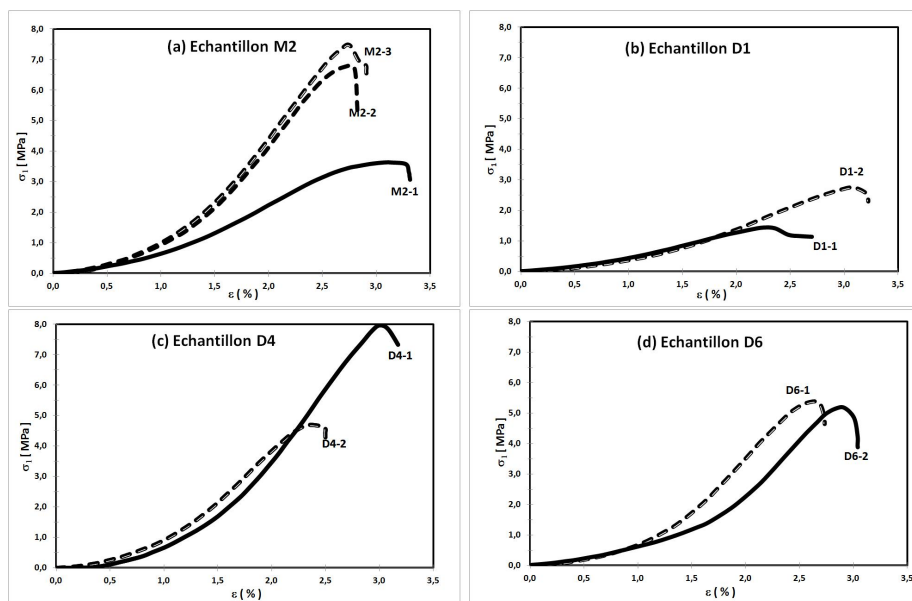


FIGURE 6.14 – Courbes $\sigma_1 - \epsilon$ des briques à base de quatre sols du Kasai oriental (programme initial)

6.5.2.5 Valeurs de la résistance en compression simple

- La résistance en compression varie de 1,45 à 8,2 MPa en fonction de la nature du matériau de base et de la densité sèche.
- Les sols plus argileux présentent, à densité proche, des résistances plus élevées que celles des sols moins argileux. C'est le cas de D4, D5 (Kamabue Est) et D6, D7 (Sanguluja).
- Il apparaît, d'une façon générale, qu'un échantillon plus dense est plus ré-

Echantillons		ρ (kg/m ³)	Rc (MPa)	E_{lin} (MPa)
M2	M2-1	1906	3,62	185
	M2-2	1931	6,76	425
	M2-3	1941	7,48	443
D1	D1-1	1533	1,45	83
	D1-2	1604	2,75	138
D2	D2-1	1633	6,76	379
	D2-2	1630	6,44	327
D3	D3-1	1534	4,55	246
D4	D4-1	1735	7,96	471
	D4-2	1622	4,68	334
D5	D5-1	1484	1,32	134
	D5-3	1703	7,38	439
	D5-4	1717	8,20	459
D6	D6-1	1749	5,35	369
	D6-2	1742	5,18	366
D7	D7-1	1743	4,43	271
	D7-2	1708	4,64	287

Tableau 6.17 – Résistances en compression simple et modules linéaires des briquettes (programme initial)

sistant, pour un même matériau et en absence de défauts.

- Nous observons qu'un défaut, aussi minime soit-il, peut sensiblement faire baisser la résistance du produit fini. Les briques M2-1 et D5-1 démontrent cet effet avec des résistances trop faibles par rapport à leurs homologues M2-3 et D5-4. Il est donc important que chaque étape de la production des briques cuites soit minutieusement contrôlée.
- Les résistances des briques ont également été mesurées après 24h d'immersion dans l'eau et séchage à l'étuve. Nous constatons (Figure 6.15) que, pour des densités proches, cette opération influence très peu la résistance de la brique cuite à 900°C. Cette remarque corrobore l'affirmation que la brique cuite est un matériau résistant à l'humidité.

6.5.2.6 Comparaison des valeurs de résistance obtenues à certaines normes

La comparaison des différentes résistances avec les normes est représentée sur la Figure 6.16. Ce graphique montre également l'influence de la masse volumique et de la nature du sol. Faisons remarquer sur le graphique que les sols de même

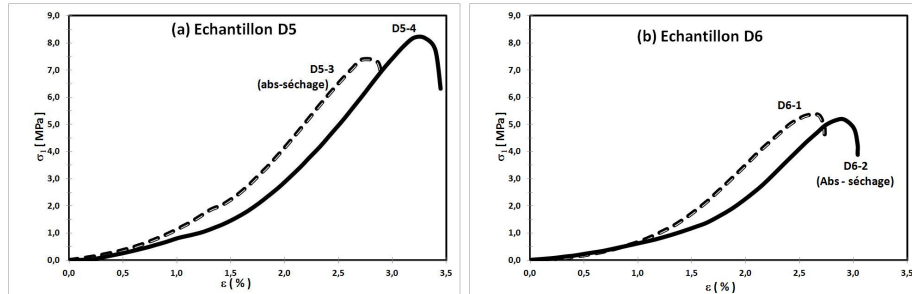


FIGURE 6.15 – Influence de l'immersion dans l'eau suivie d'un séchage (programme initial)

origine géographique ont tendance à s'aligner suivant des droites parallèles. Les deux carrières de Kamabue font partie du site NDUBA tandis que les carrières de Matshitshi et Sanguluja appartiennent au site LUETET. A la lumière de cette

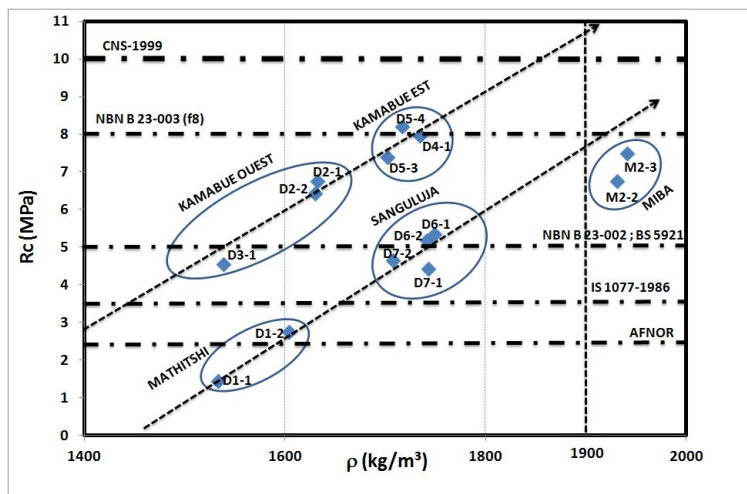


FIGURE 6.16 – Relations résistance en compression-masse volumique et comparaison aux normes (programme initial)

figure, les observations suivantes peuvent être faites :

- Le British Standards BS 5921 : 1985 exige une R_c minimale de 5MPa pour les briques de construction. Cette valeur est également recommandée par la norme belge NBN B 23-002 (1986) pour les briques de parement [48]. Excepté le site de Matshitshi (D1), tous les échantillons sans défaut respectent ou se rapprochent de ce critère.

- La norme chinoise CNS-1999 [142] fixe un minimum de 10 MPa pour une densité sèche comprise entre 1,8 et 2,0 g/cm^3 . Ce critère semble écarter tous nos échantillons. Il semble logique que la norme chinoise soit plus contraignante à cause des effets dynamiques auxquels les constructions doivent faire face. Néanmoins, pour une densité sèche de 1900 kg/m^3 par exemple, les briques de NDUBA (Kamabue-Est et Ouest) respecteraient cette norme comme nous le constatons sur la Figure 6.16.
- La norme Belge NBN B 23-003(1991) [49] quant à elle fixe le minimum à 8 MPa pour les briques destinées à la maçonnerie non décorative de classe f8 c'est-à-dire ayant une masse volumique sèche supérieure à 1600 kg/m^3 et un rapport hauteur-largeur plus grand que 1,5 [49]. Seul le site de Kamabue-Est (D4 et D5) vérifie ce critère. Le site de Kamabue-Ouest pourrait également satisfaire cette norme pour une densité supérieure à 1,7. Une densité supérieure à 1,9 serait nécessaire aux briques de LUETET (Matshitshi et Sanguluja) pour vérifier ce critère.
- La norme Belge NBN B 23-002 (1986) exige une limite inférieure de 8MPa pour les briques de parement étirées [48]. Pour des densités supérieures à 1,7, le site de Nduba satisfait cette condition.
- Le Indian Standards IS 1077-1986 recommande un minimum de 3,5 MPa pour les briques cuites utilisables en construction. Seul le site de Matshitshi est rejeté par ce critère. Ce critère nous semble plus recommandé par la similitude des réalités géologiques. En effet, les sols indiens sont des sols généralement latéritiques, se retrouvant dans une zone tropicale.
- Tous les sols analysés seraient adaptés à une utilisation comme matière première, suivant l'AFNOR [76] [3] [2] [6] qui recommande une résistance minimale de 2,3 MPa.
- Un pourcentage de limon suffisant serait un atout pour une résistance en compression élevée. En effet, la norme NBN EN 771-1 exige une résistance à la compression minimale de 10 MPa pour les briques à base d'argiles alluviales alors que cette résistance minimale est de 20 MPa pour les briques à base de limons éoliens comme nous pouvons le constater sur les figures B.1 et B.2 en annexe. Nous pouvons imaginer que la quasi absence de frac-

tion limoneuse dans les sols tropicaux et en particulier ceux analysés dans ce travail, joue en défaveur de leur résistance en compression.

6.5.2.7 Modules de déformation

Le module d'élasticité est un paramètre important qui détermine la déformabilité d'un matériau au cours du chargement. L'analyse du comportement des éprouvettes de briques se fera à l'aide de trois modules, le module linéaire (E_{lin}), le module sécant (E_{sec}) et le module tangent (E_{tan}). Ces modules sont définis par les relations suivantes :

$$E_{lin} = \frac{\sigma_A - \sigma_B}{\epsilon_A - \epsilon_B} \quad (6.11)$$

où A et B sont deux points suffisamment éloignés sur la partie linéaire de la courbe (σ_1, ϵ_1).

$$E_{sec} = [\sigma/\epsilon]_{\sigma=\sigma_i} \quad (6.12)$$

$$E_{tan} = [d\sigma/d\epsilon]_{\sigma=\sigma_i} \quad (6.13)$$

où i est un point quelconque du diagramme (σ_1, ϵ_1).

Les valeurs du module d'élasticité linéaire des briques analysées sont données dans le Tableau 6.17. Les valeurs de E_{lin} sont comprises entre 270 et 475 MPa pour les sols dont les résistances sont supérieures à 3,5MPa, conformément à la norme indienne IS 1077-1986 que nous prenons comme référence pour la similitude des régions géographiques. Ces valeurs semblent rejoindre celles trouvées par d'autres chercheurs qui ont travaillé sur les sols tropicaux. En effet, L. Mbumbia [101] dans son étude sur les latérites du Cameroun pour la production des briques, est arrivé à des valeurs de module linéaire comprises entre 250 et 420 MPa pour une cuisson à 850°. Pour une cuisson à 975°C, ces valeurs étaient comprises entre 238 et 667 MPa.

La Figure 6.17 montre qu'il existe une très bonne corrélation entre la résistance en compression et le module d'élasticité, ce qui signifie que les briques qui se déforment le plus résistent également moins aux charges. En nous référant à la relation $\sigma = E.\epsilon$, l'existence de cette relation linéaire signifie aussi que la déformation à la rupture est une constante.

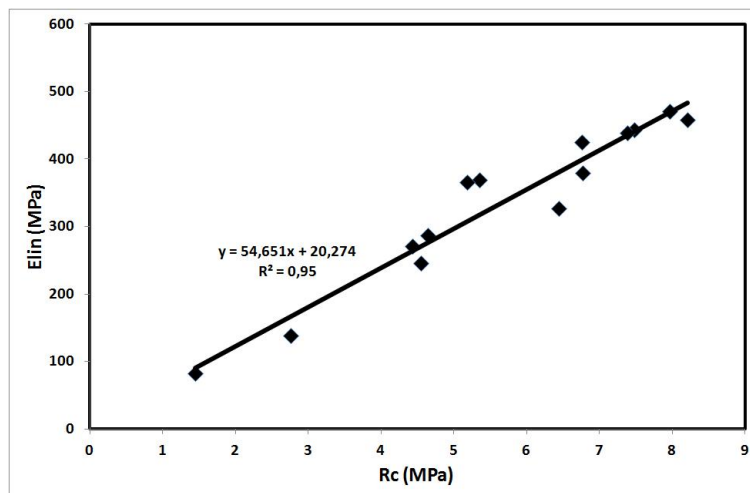


FIGURE 6.17 – Relation entre la résistance en compression et le module linéaire

La Figure 6.18 donne l'allure de l'évolution du module sécant E_{sec} en fonction de la déformation. Nous constatons que E_{sec} augmente de manière linéaire avec la déformation jusqu'à la limite élastique de la courbe contrainte-déformation. Il atteint son maximum peu avant la contrainte maximale et diminue ensuite au-delà. Quant au module tangent, représenté sur la Figure 6.19, c'est la dérivée de la courbe (σ_1, ϵ_1) . Il croît jusqu'au maximum, correspondant au point d'inflexion, changement de concavité de la courbe (σ_1, ϵ_1) . Au-delà de ce point, la rigidité de la brique diminue. Des extrema locaux peuvent être constatés pour certaines briques en fonction de leur état de fissuration.

Les courbes des modules pour les échantillons non-présentés sur les figures précédentes sont reprises en annexe B.2.

6.5.3 Absorption d'eau après 24h

6.5.3.1 Introduction

L'absorption d'eau est un facteur clé dans la durabilité des briques. Elle donne une idée de la perméabilité de la brique ainsi que le degré de réactivité pendant la cuisson. Une faible absorption d'eau indique une forte durabilité de la brique et une bonne résistance aux conditions atmosphériques. Ainsi, la structure interne

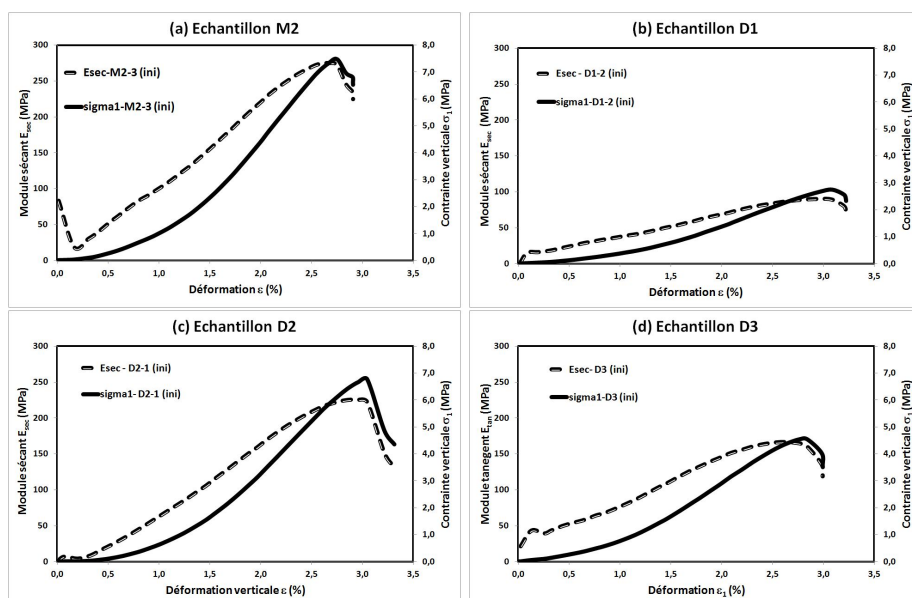


FIGURE 6.18 – Module sécant et contrainte en fonction de la déformation (programme initial)

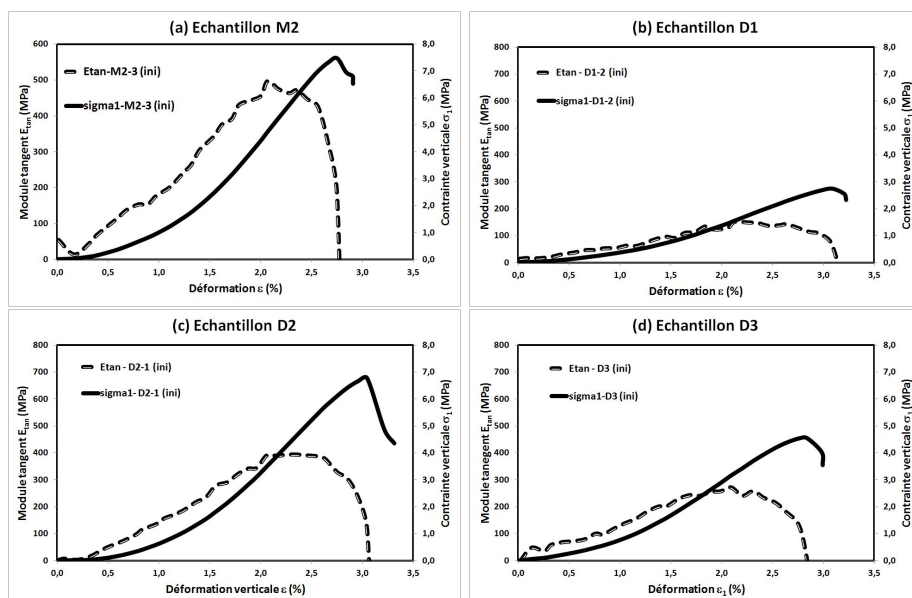


FIGURE 6.19 – Module tangent et contrainte en fonction de la déformation (programme initial)

d'une brique doit être suffisante pour éviter une forte intrusion d'eau. D'autre part, pour mieux remplir son rôle tampon vis-à-vis de l'humidité, une brique doit être capable d'absorber une certaine quantité d'eau. La norme chinoise CNS exige une absorption maximale de 19% [142]. La norme européenne EN TS 2415 fixe cette limite à 11,2% pour une densité de 1,425 [33]. D'après l'expérience des céramistes, l'absorption d'eau minimale serait d'environ 8% [118]. La norme ASTM exige des maxima d'absorption d'eau variant entre 8% et 25%, fonction de la destination de la brique [4].

6.5.3.2 Principe

L'essai a porté sur la mesure de la quantité d'eau absorbée après 24h. L'éprouvette sèche de brique est pesée (M_0) puis totalement immergée dans l'eau pendant 24h. Elle est ensuite retirée, essuyée avec une éponge humide et immédiatement pesée pour obtenir une masse M_1 . La quantité d'eau absorbée est donnée par :

$$A_W(\%) = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \cdot 100 \quad (6.14)$$

6.5.3.3 Résultats et observations

	M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6
A_W (%)	12,36	25,23	24,58	26,54	21,66	20,59	17,94

Tableau 6.18 – Valeurs d'absorption des briques cuites après 24 h (programme initial)

- Les valeurs d'absorption d'eau des briques cuites à 900°C sont comprises entre 12,4 et 26,5%.
- Les briques M2, du sol de Mbujimayi présentent la plus faible absorption d'eau suite à leur faible teneur en eau et en argile mais néanmoins, cette absorption est supérieure à 8%.
- Par rapport à la CNS-1999 ci-haut citée, les briques D6 de la carrière de Sanguluja présentent des absorptions acceptables alors que les échantillons de Kamabue (D4,D5) et Matshitshi (D1) fournissent des briques plus absorbantes d'eau. Un mélange des sols de base avec un dégraissant pourrait

réduire cette absorption. Signalons que des études analogues sur d'autres sols africains ont montré des valeurs d'absorption d'eau similaires, voire plus grandes [101][22].

- Les valeurs obtenues seraient conformes aux recommandations de différentes catégories de briques selon l'ASTM.

6.5.4 Analyse de la sensibilité des caractéristiques mécaniques des briques

6.5.4.1 Introduction

L'objectif principal de ce travail consiste en une connaissance approfondie des caractéristiques des matériaux de cuisson, utile à une production industrielle ou semi-industrielle qui soit économiquement et écologiquement efficiente. Ceci suppose une analyse de la sensibilité des caractéristiques mécaniques obtenues lors du programme initial. C'est l'objet de la présente section.

Une analyse de sensibilité permet de situer dans quelle mesure le résultat d'une recherche est influencé par un changement de méthode, de valeurs, de variables ou de critères de jugement. Plusieurs scénarios sont ainsi juxtaposés, ce qui permet d'identifier les variables qui influencent le plus les résultats⁵.

Notre analyse se limite aux quatre paramètres suivants :

1. La température de cuisson
2. Le Mode de séchage
3. Le temps de cuisson
4. La saturation de la brique.

6.5.4.2 Influence de la température de cuisson

La température de 900°C ayant donné des résultats satisfaisants et toujours animés par le besoin d'une économie d'énergie, nous explorons des températures inférieures à cette dernière mais supérieures ou égales à la fin de la décomposition

5. http://minerva-ebm.be/articles/FR/woordenlijst_fr/analyse_sensibilite.html

des matières organiques (500°C). Deux autres températures ont été utilisées, il s'agit de 550°C, 700°C.

Les valeurs de résistance en compression simple, obtenues pour les trois valeurs, ont montré une allure croissante de la résistance avec la température, pour des densités très proches. Nous observons également sur la Figure 6.20 (a) que l'augmentation de la résistance est moins perceptible entre 550-700°C que dans la plage 700-900°C. La Figure 6.20 (b) montre que l'absorption d'eau diminue entre 700 et 900°C alors qu'elle augmente de 550 à 700°C. Ces deux observations sont des signes d'un début de cimentation qui se manifeste par une diminution de la porosité avec comme conséquence logique une diminution de la capacité d'absorption d'eau et une augmentation de résistance en compression. Ces valeurs dépendent logiquement de l'argilosité de la brique et donc de son degré d'hydratation. Plus le sol est argileux, plus la résistance est élevée mais également plus l'absorption d'eau est élevée.

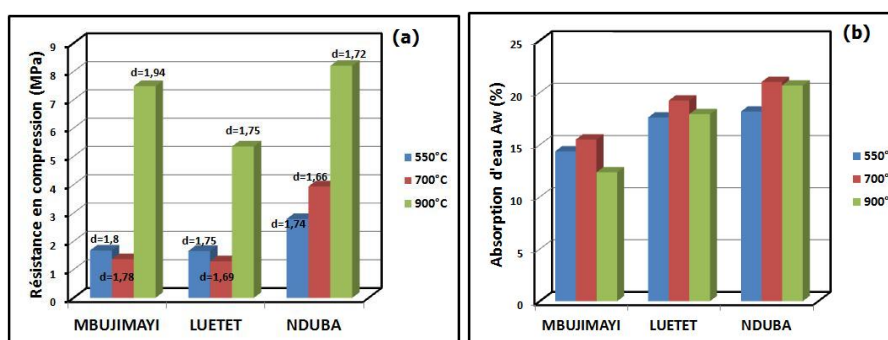


FIGURE 6.20 – Influence de la température sur la résistance en compression simple (a) et sur la capacité d'absorption d'eau (b)

6.5.4.3 Influence de la méthode de séchage

Afin d'analyser l'influence du mode de séchage des briques après compactage, quatre échantillons de chaque zone d'échantillonnage ont été fabriqués : il s'agit de M2 pour la zone de Mbujimayi, D3 pour la zone de NDUBA et D6 pour la zone de LUETET. Après 24 heures de séchage à 25°C, deux des quatre échantillons ont été séchés à l'étuve à 105°C et les deux autres ont continué leur séchage

à 25°C pendant cinq jours. Les briques ont ensuite été cuites dans les mêmes conditions. Le résultat, résumé sur la Figure 6.21 (a) montre que les briques séchées à 105°C avant la cuisson ont une résistance légèrement supérieure à celle des briques séchées à 25°C. Le préchauffage des briques serait donc important pour l'amélioration de ces qualités mécaniques du fait qu'il permet un durcissement lent et progressif. Nous avons signalé à la section 6.4.1 qu'un séchage incomplet avant la cuisson pourrait amener à des éclatements des briques qui affectent leurs résistances.

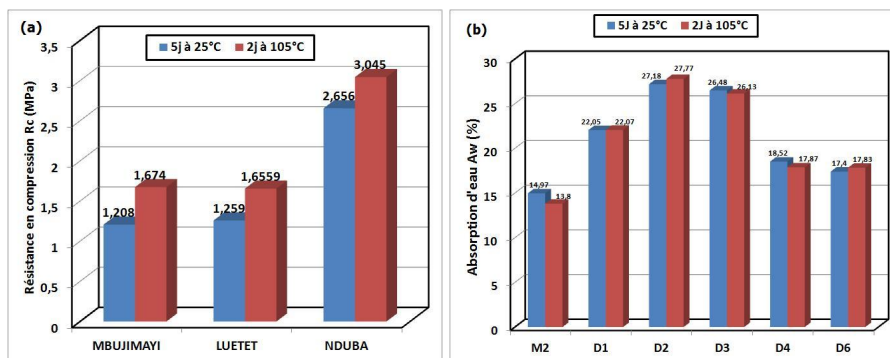


FIGURE 6.21 – Influence du mode de séchage (cas d'une cuisson à 550°C)

Les valeurs d'absorption d'eau après 24h d'immersion dans l'eau ne présentent pas de différences remarquables pouvant être imputées au mode de séchage (Figure 6.21 (b)). La capacité d'absorption serait donc plus dépendante de la porosité qui est une fonction de la teneur en eau de compactage des briques et, dans notre cas, toutes les briques de même qualité ont été compactées à des teneurs en eau quasi identiques.

6.5.4.4 Influence du temps de cuisson (t_c)

Quatre échantillons par zone d'échantillonnage ont été choisis pour l'analyse de l'influence du temps de cuisson sur les caractéristiques mécaniques des briques. Deux des quatre ont été cuites avec un palier de 2h à 900°C et les deux autres avec un palier de 4h à la même température. Les échantillons d'un même site ont des densités sèches égales, au centième près.

Il ne semble pas se dégager une loi claire entre la cuisson pendant 2h et celle

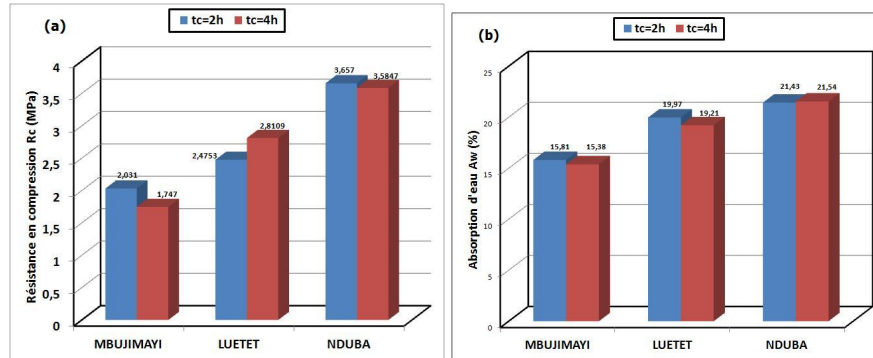


FIGURE 6.22 – Influence du temps de cuisson (cuisson à 900°C)

pendant 4h pour tous les échantillons. Il y a une légère diminution de la résistance pour les sites de Mbuji-Mayi et Nduba alors que les échantillons de Luetet présentent une augmentation de R_c entre 2h et 4h de temps de cuisson (Figure 6.22 (a)).

La capacité d'absorption d'eau des briques n'est pas, ici encore, notablement influencée par cette variation du temps de cuisson (Figure 6.22 (b)).

6.5.4.5 Influence de la saturation sur la résistance à la compression

Après cuisson des briques, celles-ci ont été immergées dans l'eau dans un local à humidité et température contrôlées, et ce pendant cinq jours. La norme EN 771-1 recommande une immersion pendant 96 heures soit 4 jours, mais nous avons voulu simuler les conditions de fortes intempéries qui sont connues dans la province du Kasai. Après immersion, les briques sont essuyées avec une étoffe humide et l'essai de compression uniaxiale est immédiatement réalisé.

La Figure 6.23 montre que les briques cuites à 550 et 700°C sont très sensibles à la saturation. Leur résistance en compression simple diminue de moitié environ après immersion dans l'eau. Par contre, on voit sur la Figure 6.24 que les briques cuites à 900°C subissent une influence très faible et quelquefois inexistante sur leur résistance. Il s'avère donc que la structure interne acquise par les briques après cuisson à 550 et 700°C ne soit pas encore suffisante pour une bonne résistance aux intempéries. Rappelons encore le danger de maintenir la température constante à un niveau précoce qui pourrait permettre aux gaz de diffuser vers

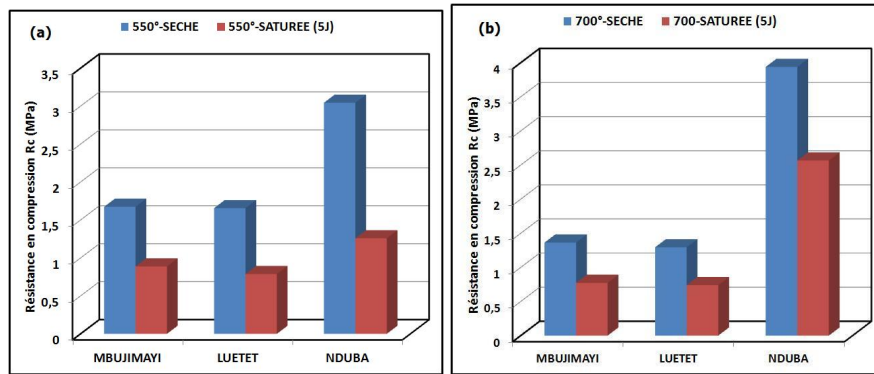


FIGURE 6.23 – Influence de la saturation sur les briques cuites à 550°C et 700°C

l'extérieur, alors que le produit est encore perméable, ce qui peut conduire à des boursouflures [75].

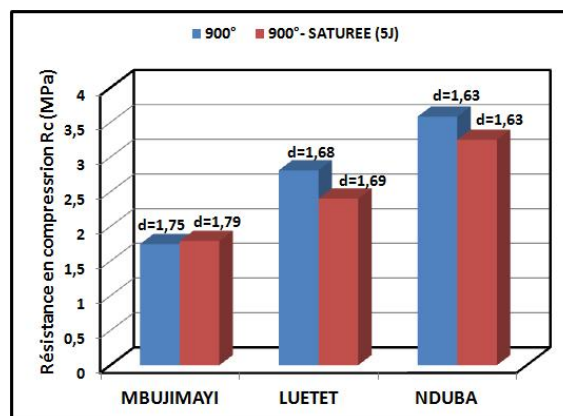


FIGURE 6.24 – Influence de la saturation sur les briques cuites à 900°C

6.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé les briques, depuis leur fabrication jusqu'à leur sortie du four.

Le sol a été broyé et tamisé sous 2mm afin de le rendre plus homogène et de réduire les inclusions solides susceptibles de conduire à des fissurations locales lors de la cuisson. Les briquettes cylindriques de 38 mm de diamètre et d'élanement 2 ont été fabriquées par compactage en trois couches. Les conditions de compactage proches de l'Optimum Proctor nous ont semblé mieux adaptées. Les briquettes ainsi fabriquées ont été séchées pendant trois jours dont un dans l'atmosphère de laboratoire, puis deux jours à l'étuve à 105°C. Après séchage, les produits ont été cuits dans un four électrique de laboratoire. Dans un compromis entre les propriétés hydromécaniques des briques et une économie d'énergie, nous avons initialement choisi une température de cuisson de 900°C et des vitesses de montée-descente en température qui dépendent des différentes transformations observées lors des analyses thermiques.

A chacune des étapes, les dimensions et masses des briquettes ont été mesurées afin de déterminer les différentes caractéristiques physiques, nécessaires à l'évaluation de la qualité des briques. Les retraits volumiques après séchage sont très faibles grâce au mode de compactage. Après la cuisson, les briques à base du sol du polygone Miba et à base du sol de Luetet à Muene-Ditu ont présenté une faible tendance au gonflement, alors que celles à base du sol de Nduba manifestent une tendance au retrait. Les retraits volumiques totaux restent néanmoins inférieurs à 8%, valeurs exigées par plusieurs normes du domaine céramique.

La densité apparente diminue après séchage à cause principalement de la perte de masse due au départ d'eau. Elle varie de 7,5 à 18,5% en fonction de la teneur en eau de façonnage. Ce départ d'eau influence fortement la porosité ouverte des éprouvettes sèches, un facteur important dont dépend la qualité du produit cuit et qui varie de 23 à 43,6% dans notre cas.

Les pertes au feu sont comprises entre 3,5 et 9,4%, valeurs acceptables selon les recommandations. Néanmoins, le sol du polygone Miba nécessiterait un ajout en argile alors qu'un complément en dégraissants serait nécessaire afin de réduire

la perte de masse des briques de Kamabue Ouest. La perte au feu influence fortement la variation de la masse volumique apparente qui s'étend de 4,8 à 8,7% après la cuisson à 900°C.

Les courbes contrainte-déformation, obtenues après l'essai de compression simple, débutent par une concavité tournée vers les contraintes positives. Cette phase correspond à la mise en place des bases sur l'éprouvette et à la fermeture des microfissures. Elle est suivie d'une branche pseudo-élastique caractérisée par un module élastique linéaire. Après la partie linéaire vient une partie non-linéaire avec diminution de rigidité avant le pic de résistance en compression simple. Cette résistance varie de 1,45 à 8,2 MPa pour la cuisson à 900°C et dépend de la nature de la matière première, de la densité, de la porosité et du degré de fissuration des briques.

En comparant les valeurs de résistances en compression et celles d'absorption d'eau obtenues à celles recommandées par la norme indienne, la plus proche des réalités géologiques du Kasaï, nous concluons que tous les sols, excepté celui de Matshitshi, seraient adaptés à une utilisation dans la briqueterie.

Une analyse de sensibilité a été réalisée dans ce chapitre afin d'identifier les variables qui influencent les résultats obtenus par la cuisson initiale à 900°C.

L'examen de trois températures de cuisson (550°C, 700°C et 900°C) a révélé une augmentation de résistance avec la température, pour des densités proches. La cuisson à 900°C serait plus recommandée, car tant bien l'augmentation de la résistance que la diminution de l'absorption d'eau sont observées entre 700 et 900°C. Les mesures de résistances en compression sur des éprouvettes saturées montrent une forte perte de résistance des briques cuites à 550°C et 700°C. Ces températures seraient inadaptées dans les conditions de fortes intempéries que sont celles du Kasaï oriental.

Le préchauffage des briques aurait une influence sur leur résistance, car les briques séchées à 105°C pendant deux jours ont présenté des résistances légèrement supérieures à celles des briques séchées entre 20-25°C pendant cinq jours. A ce sujet, les céramistes conviennent qu'un séchage incomplet avant la cuisson pourrait amener à des éclatements qui affecteraient la résistance des briques.

Enfin, nous pensons qu'il serait important d'approfondir l'étude de sensibilité,

surtout pour l'influence du mode de séchage et celle du temps de cuisson. Pour la première influence, en plus du nombre d'échantillons à augmenter, les conditions de séchage devraient être contrôlées afin d'aboutir à un matériau totalement sec. Pour le temps de cuisson à la température maximale, nous pensons qu'il serait utile d'élargir la plage de temps en plus d'augmenter le nombre d'échantillons.

Chapitre 7

Essais non-destructifs

Nouveaux symboles du chapitre

SYMBOLE	DESCRIPTION
C_{ijkl}	Tenseur des rigidités élastiques
δ_{ij}	Symbole de Kröneckner
λ, μ	Coefficients de Lamé
E	Module de Young
ν	Coefficient de Poisson
K	Module de compressibilité
ϵ_v	Déformation volumique
ϕ	Potentiel scalaire
V_p	Vitesse des ondes de compression
V_s	Vitesse des ondes de cisaillement
Ψ	Potentiel vecteur
v_d	Vitesse ultrasonique diamétrale
v_h	Vitesse ultrasonique longitudinale
PUNDIT	Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester
E_d	Module dynamique
t	Temps de parcours

7.1 Introduction

Les essais non-destructifs permettent d'ausculter un produit sans affecter son état physique. Dans le cas des briques, ils permettront de suivre leur évolution qualitative durant les principales étapes de la fabrication (séchage, cuisson). De plus, la vitesse ultrasonique peut fournir une estimation de la résistance des briques, ce qui conduit à des économies de temps et de moyens par rapport aux essais destructifs.

Ce chapitre présente les résultats d'essais ultrasoniques réalisés sur les échantillons de briques crues et cuites. Les mesures ont été conduites sur environ 60 échantillons de briques appartenant à tous les sites. Les résultats sont précédés d'un aperçu théorique sur la propagation d'ondes dans les roches et une présentation des moyens et méthodes utilisés.

7.2 Éléments de propagation d'ondes dans les roches

7.2.1 Introduction

L'étude du comportement et de la propagation d'ondes dans les roches, qui est étudiée en physique des roches, s'est développée ces dernières années avec les recherches pétrolières. Un des principaux aspects de cette étude a été le besoin d'une meilleure compréhension des relations entre les propriétés de production (porosité, perméabilité) ainsi que leur état (minéralogie, saturation, pression de pore,...).

De nombreux paramètres peuvent être disponibles par les mesures acoustiques, électriques ou autres, et la traduction de toutes ces informations en termes de propriétés physiques des roches exige un effort accru de compréhension physique, car les roches sont des systèmes complexes [44].

Les méthodes de mesure utilisant des ondes qui se propagent sont particulièrement intéressantes car, par définition, les phénomènes impliqués sont des phénomènes de propagation analogues à ceux de l'exploration sismique. S'il s'agit de mesures en laboratoire, le domaine fréquentiel est totalement différent comme on le voit sur la Figure 7.1.

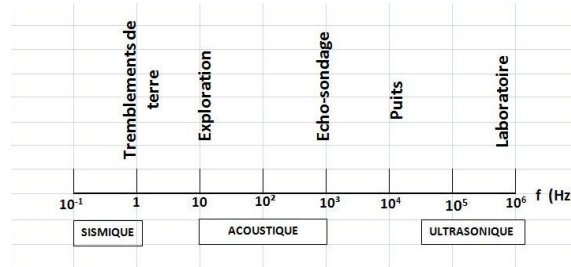


FIGURE 7.1 – Gammes de fréquence des mesures de propagation d'ondes
[44]

En ce qui concerne les mesures en laboratoire, le milieu étudié est plus ou moins bien connu, les interfaces définies, les trajets relativement clairs, ce qui donne en général des vitesses précises (à 1% près). Néanmoins, J-F Couvreur [44] dans son étude sur la "propagation d'ondes ultrasoniques dans les roches sédimentaires" souligne la difficulté de déterminer avec précision l'instant de la première arrivée de l'onde en milieu atténuant. Une autre difficulté concerne le respect du rapport $H/D > 2$ imposé pour les essais mécaniques afin d'éviter une forte atténuation. En effet, tous les échantillons analysés dans ce travail ont des élancements proches de 2.

7.2.2 Notions d'acoustoélasticité

L'acoustoélasticité est la discipline qui traite de l'influence de l'état de contrainte d'un milieu solide sur la propagation des ondes acoustiques et en particulier sur leur vitesse de propagation.

La relation entre contraintes σ_{ij} et déformations ϵ_{kl} est la loi de comportement du matériau. La loi la plus simple est la loi de comportement élastique telle que les déplacements et déformations sont indépendants de l'historique du chargement et telle que le corps retrouve son état initial quand les charges appliquées sont supprimées. Un comportement particulier est celui pour lequel la relation contraintes-déformations est linéaire :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\epsilon_{kl} \quad (7.1)$$

où C_{ijkl} est le tenseur des rigidités élastiques du matériau.

Dans le cas isotrope et du fait de la symétrie des tenseurs, deux constantes seulement sont nécessaires et nous retrouvons la loi de Hooke :

$$C_{ijrs} = \lambda \delta_{ij} \delta_{rs} + \mu (\delta_{ir} \delta_{js} + \delta_{is} \delta_{jr}) \quad (7.2)$$

avec

δ_{ij} le symbole de Krönecker ;

λ et μ les coefficients de Lamé, μ étant aussi connu comme le module de cisaillement.

Dans un essai de compression simple où seule la contrainte axiale $\sigma_1 = \sigma_{zz}$ n'est pas nulle, la loi de Hooke peut simplement s'écrire :

$$\sigma_{zz} = E \epsilon_{zz} \quad (7.3)$$

où E est le module de Young qui est donnée par l'expression :

$$E = \frac{\mu (3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad (7.4)$$

Il est également commode de définir le coefficient de poisson ν , généralement compris entre 0 et 0,5, donné par l'expression :

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (7.5)$$

Le coefficient de Poisson lie la déformation axiale à celle latérale par la relation :

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = -\nu \epsilon_{zz} \quad (7.6)$$

Si l'on cherche la relation entre la déformation volumique ϵ_V et la contrainte hydrostatique $\sigma_0 = \sigma_{kk}/3$, on met en évidence la module de compressibilité K , donné par la relation :

$$K = \frac{(3\lambda + 2\mu)}{3} \quad (7.7)$$

Lorsque, sous l'action des forces extérieures, un corps se déforme, des con-

traintes prennent naissance en s'opposant à la déformation et l'équation généralisée du mouvement dans les trois dimensions est :

$$\rho \ddot{u} = (\lambda + 2\mu) \text{grad}(\text{div}u) + \mu \text{rot}(\text{rot}u) \quad (7.8)$$

avec :

u le déplacement et

ρ la masse volumique.

Si l'on considère le mouvement irrotationnel ($\text{rot} u = 0$) défini par un potentiel scalaire Φ tel que :

$$u = \text{grad}\Phi \quad (7.9)$$

L'équation du mouvement se réduit à :

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{V_p^2} \ddot{\Phi} \quad (7.10)$$

avec V_p donnée par l'expression :

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (7.11)$$

L'équation (7.11) définit la vitesse de propagation des ondes de dilatation ou de compression car elles concernent la propagation de la dilatation volumique. Ces ondes sont aussi appelées ondes P correspondant à "Primaires" car elles sont les plus rapides qui puissent se propager dans un milieu linéaire isotrope. La Figure 7.2 représente le mouvement des particules de ces ondes par rapport à leur direction de propagation.

En considérant maintenant un mouvement défini par un potentiel vecteur Ψ tel que $u = \text{rot}\Psi$, l'équation du mouvement se ramène à :

$$\nabla^2 \Psi = \frac{1}{V_s^2} \ddot{\Psi} \quad (7.12)$$

avec V_s donnée par :

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (7.13)$$

La relation (7.13) définit la vitesse des ondes de cisaillement qui se propagent sans changement de volume. Elles sont aussi appelées ondes S pour "Secondaires" car plus lentes que les ondes P.

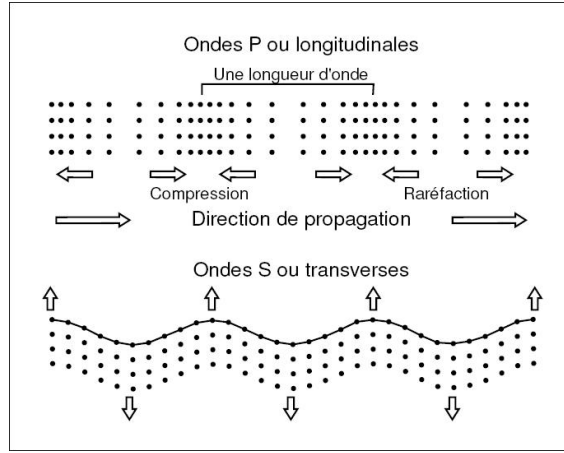


FIGURE 7.2 – Représentation des ondes P et S
[41]

A partir des relations (7.11) et (7.13), on peut écrire :

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\mu}} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (7.14)$$

Le coefficient de Poisson et le module d'élasticité dynamique peuvent être exprimés en fonction des vitesses :

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (7.15)$$

$$E = \rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} = 2\rho(1+\nu)V_s^2 \quad (7.16)$$

Plusieurs auteurs (cités par [44]) ont constaté que les modules Young issus des essais uniaxiaux ou triaxiaux sont fortement corrélés avec V_p mesuré au laboratoire sur des échantillons non chargés.

7.2.3 Paramètres qui influencent les vitesses ultrasoniques

Les vitesses V_p et V_s peuvent être influencées par un certain nombre de paramètres dont voici les plus importants qui nous intéressent :

1. La densité

Les vitesses ultrasoniques sont explicitement liées à la densité. Les vitesses plus élevées sont rencontrées pour des matériaux de densité plus élevée, comme on peut le constater dans le Tableau 7.1.

2. La fissuration

La présence de fissures réduit le module élastique des solides et par conséquent, la vitesse de propagation des ondes élastiques à travers un solide fissuré s'en trouvera réduite.

3. La fréquence

La vitesse, dans les milieux atténuants est fonction de la fréquence ; elle est dite dispersive. Mais si l'atténuation reste raisonnable, on peut considérer que cette dépendance est faible. Les ondes à très hautes fréquences sont diffractées et parcourent un trajet plus long. La vitesse calculée sur base d'un trajet direct serait donc diminuée artificiellement. Par contre, si le contenu fréquentiel est bas, la vitesse calculée représente la vitesse réelle car les fréquences plus basses sont peu diffractées [44].

4. La teneur en argile

Il semblerait qu'une relation linéaire de la vitesse en fonction de la porosité, mais aussi de la teneur en argile, existe pour des roches sédimentaires. Il serait possible que l'augmentation des vitesses en fonction de la pression montre, en plus de la fermeture continue des microfissures, un alignement des grains d'argile dans le plan de résistance maximale au cisaillement [134] [44].

Nature des terrains	v_P m/s	v_S m/s	ρ g/cm ³
Eboulis, terre végétale	300-700	100-300	1,7-2,4
Sables secs	400-1200	100-500	1,5-1,7
Sables humides	1500-2000	400-600	1,9-2,1
Argiles saturées	1100-2500	200-800	2,0-2,4
Marnes	2000-3000	750-1500	2,1-2,6
Série argilo-gréseuse saturée	1500-2200	500-750	2,1-2,4
Grès poreux et saturés	2000-3500	800-1800	2,1-2,4
Calcaires	3500-6000	2000-3300	2,4-2,7
Craie	2300-2600	1100-1300	1,8-2,3
Sel	4500-5500	2500-3100	2,1-2,3
Anhydrite	4000-5500	2200-3100	2,9-3
Dolomie	3500-6500	1900-3600	2,5-2,9
Granite	4500-6000	2500-3300	2,5-2,7
Basalte	5000-6000	2800-3400	2,7-3,1
Gneiss	4400-5200	2700-3200	2,5-2,7
Charbon	2200-2700	1000-1400	1,3-1,8
Eau	1450-1500	-	1
Glace	3400-3800	1700-1900	0,9
Huile	1200-1250	-	0,6-0,9

Tableau 7.1 – Valeurs usuelles de vitesses ultrasoniques suivant les plages de densité

[41]

7.3 Matériel et méthodes

7.3.1 Matériel

La Figure 7.3 représente le dispositif expérimental. Il est constitué d'un générateur d'impulsions électriques, de deux transducteurs soit en forme de pointes ou avec extrémités planes. Il dispose en plus d'un amplificateur et d'un dispositif électronique de chronométrage permettant de mesurer l'intervalle de temps qui s'écoule entre la détection du son par le transducteur d'enclenchement et la détection de son arrivée au transducteur de déclenchement, intégrés dans le générateur d'impulsion.

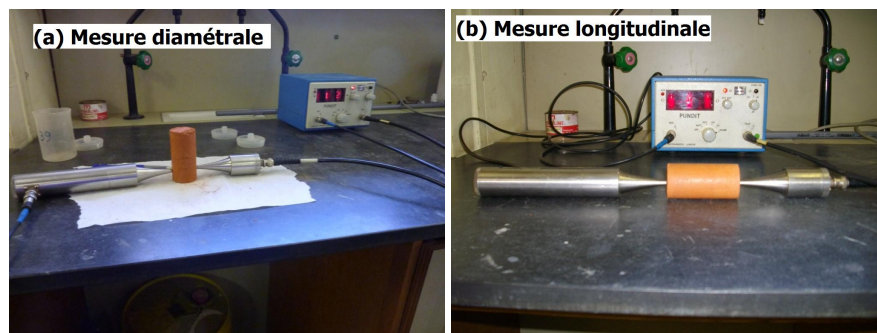


FIGURE 7.3 – Dispositif ultrasonique avec mesure diamétrale (a) et longitudinale (b)

L'équipement est une unité PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester). Les transducteurs contiennent une pile de cristaux piézo-électriques PTZ. L'unité génère des impulsions électriques qui excitent le cristal piézo-électrique dans l'émetteur. Chaque impulsion est transformée en onde mécanique qui, après propagation à travers l'échantillon, excite le cristal du récepteur qui sort une onde électrique qui est enregistrée par l'oscilloscope digital et y est affichée. La fréquence nominale intrinsèque des transducteurs est de 1MHz.

Certaines mesures ont été réalisées avec les transducteurs avec extrémités planes. Dans ce cas, pour assurer un bon contact entre l'échantillon et les transducteurs, un agent couplant a été appliqué. Nous avons utilisé de la graisse comme agent couplant. Notre choix a été guidé par les études de J-F. Couvreur [44] qui,

après avoir essayé plusieurs agents couplants, recommande la graisse ou le miel comme agent couplant si seules les ondes P sont requises et à faible pression de contact, ce qui correspond à notre cas.

Les mesures ultrasoniques ont été réalisées au Laboratoire LEMSC.

7.3.2 Méthodes

Deux dispositions de mesure ont été adoptées : la première suivant l'axe longitudinal passant par les bases (vitesse v_h) et la seconde perpendiculaire à la première comme sur la Figure 7.3 (vitesse v_d). Dans la seconde disposition, trois mesures ont été faites suivant les trois couches compactées. La vitesse v de propagation des ondes dans l'échantillon est donnée par la formule :

$$v = \frac{a}{t} (\text{en m/s}) \quad (7.17)$$

où

a est la distance parcourue, diamètre ou hauteur de l'échantillon selon le cas

Le temps t est la différence entre le temps lu t' et le temps zéro t_o . Le temps zéro correspond au temps de parcours entre les transducteurs avec entre eux une épaisseur de brique nulle. Il est déterminé en raccordant les transducteurs directement entre eux dans les cas des transducteurs en forme de pointes. Pour les transducteurs en plaques, le temps t_o est le temps de passage dans un échantillon étalon en acier, de temps de passage connu.

Les essais ont été réalisés sur les échantillons de briques avant et après la cuisson, dans les conditions de laboratoire (température : 20-25°C ; humidité : 40 à 60%)

7.4 Résultats et discussions

7.4.1 Valeurs des vitesses ultrasoniques

Les Tableaux 7.2 et 7.3 ainsi que les Tableaux C.1 et C.2 en annexe donnent les résultats des mesures ultrasoniques réalisées sur soixante échantillons de briques

sèches et cuites. Ils sont classés par nature d'échantillon et par température de cuisson. Dans ces tableaux, les symboles suivants sont utilisés :

- v_{ds} : vitesse de la brique sèche mesurée diamétralement ;
- v_{hs} : vitesse de la brique sèche mesurée longitudinalement ;
- v_{dc} : vitesse de la brique cuite mesurée diamétralement ;
- v_{hc} : vitesse de la brique cuite mesurée longitudinalement

		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
v_{ds} (m/s)	Nbr	4	1	4	2	3	4	3	3
	Min	1250	-	1387	1237	1323	1466	1414	1436
	Max	1267	-	1499	1274	1347	1509	1454	1464
	Moy	1260	747	1450	1255	1332	1488	1438	1451
v_{hs} (m/s)	Nbr	4	1	4	2	3	4	3	3
	Min	1115	-	1267	1251	1004	1229	1229	1284
	Max	1146	-	1450	1270	1124	1359	1257	1319
	Moy	1130	568	1349	1260	1056	1323	1246	1302
v_{dc} (m/s)	Nbr	2	2	2	2	1	2	2	2
	Min	599	326	619	523	-	647	465	480
	Max	623	366	643	564	-	676	485	507
	Moy	611	346	631	544	662	662	475	493
v_{hc} (m/s)	Nbr	2	2	2	2	1	2	2	2
	Min	374	144	484	515	-	636	401	443
	Max	494	246	623	547	-	657	450	447
	Moy	434	195	553	531	618	647	426	445

Tableau 7.2 – Vitesse ultrasonique avant et après cuisson à 900°C

En analysant les vitesses des briques cuites à 900°C, nous pouvons relever les observations suivantes :

1. Les vitesses ultrasoniques avant cuisson v_{ds} , mesurées parallèlement au diamètre de l'échantillon, sont comprises entre 747 m/s et 1509 m/s. La valeur la plus faible revient aux briques de Matshitshi (D1) dont l'anomalie a été constatée depuis d'analyse granulométrique. Les briques à base des sols plus argileux de Kamabue (D2, D5), présentent les vitesses les plus élevées. Cette tendance est également remarquée sur les vitesses mesurées parallèlement à la hauteur, notées v_{hs} , qui prennent des valeurs allant de 568 à 1450 m/s. Les vitesses sont également fonction de la densité sèche des briques.
2. Les vitesses après cuisson à 900°C sont comprises entre 326 et 678 m/s pour des mesures parallèles à la petite dimension de l'éprouvette (v_{dc}) et

		MBM	MAT	KMO	KME	SAN
v_{ds} (m/s)	Nbr	4	1	6	6	6
	Min	1250	-	1237	1323	1414
	Max	1267	-	1499	1509	1464
	Moy	1260	747	1385	1410	1444
	λ_v	0,56	-	7,77	6,19	1,21
v_{hs} (m/s)	Nbr	4	1	6	6	6
	Min	1115	-	1251	1004	1229
	Max	1146	-	1449	1381	1319
	Moy	1130	568	1320	1190	1274
	λ_v	1,17	-	5,85	13,5	2,65
v_{dc} (m/s)	Nbr	2	2	4	3	4
	Min	599	326	619	647	465
	Max	623	366	643	676	507
	Moy	611	346	587	662	484
	λ_v (%)	2,78	8,17	9,21	2,19	3,59
v_{hc} (m/s)	Nbr	2	2	4	3	4
	Min	374	144	484	618	401
	Max	494	246	623	657	450
	Moy	434	195	542	637	435
	λ_v (%)	19,55	37,0	11,0	3,1	5,3

Tableau 7.3 – Vitesses ultrasoniques avant et après cuisson à 900°C, regroupées par sites

entre 144 et 658 m/s pour celles suivant la grande dimension (v_{hc}). Elles dépendent également de la nature du matériau de base et de la densité. Signalons qu'en plus de la nature minéralogique et de la densité, la vitesse ultrasonique des briques est fortement influencée par le degré de fissures et fractures qui peuvent sensiblement diminuer les valeurs [46].

3. Dans le Tableau 7.3, nous pouvons constater que la dispersion (λ_v) des résultats reste faible sauf pour les éprouvettes cuites de Matshitshi qui présentent un coefficient de variation supérieur à 30%.
4. Les valeurs de vitesse classent ces briques dans la catégorie des roches très tendres, comme nous pouvons le constater dans le Tableau 7.1.

A. Mekhermeche [103] dans son étude sur les briques crues compactées, à base de sols algériens, est arrivé à des valeurs de vitesse ultrasonique moyenne comprises entre 3000 et 3500 m/s pour des résistances en compression simple allant de 1,5 MPa à 2,5 MPa après 28 jours. De leur côté, Cultrone et al. [46], analysant les briques cuites (850°C et 1000°C) à base de sols espagnols, ont obtenu sur des éprouvettes parallélépipédiques des valeurs de vitesse comprises entre 1440 - 1732 m/s perpendiculairement aux couches et 1912 - 2338 m/s suivant les deux directions parallèles aux couches. Ces valeurs correspondent à des résistances en compression simple variant entre 9,3 - 13 MPa dans le premier cas et entre 12,6 - 15,7 MPa dans le second. Dans les deux exemples, il s'agit des matières premières de natures très différentes entre elles et avec les sols du Kasaï oriental qui nous concernent.

7.4.2 Relations entre les vitesses longitudinales et transversales

Les deux vitesses sont mesurées dans deux directions différentes par rapport aux couches de compactage de la brique. La vitesse v_d est mesurée parallèlement aux couches alors que v_h est une mesure perpendiculaire aux couches. Dans les mesures ultrasoniques, une certaine anisotropie est toujours constatée entre les orientations. La vitesse correspondant aux déplacements dans le plan parallèle aux couches est souvent plus importante que celle correspondant aux déplacements perpendiculaires aux couches. G. Cultrone et al. [46] [47] ont également montré

cette tendance dans leurs études sur les sols espagnols.

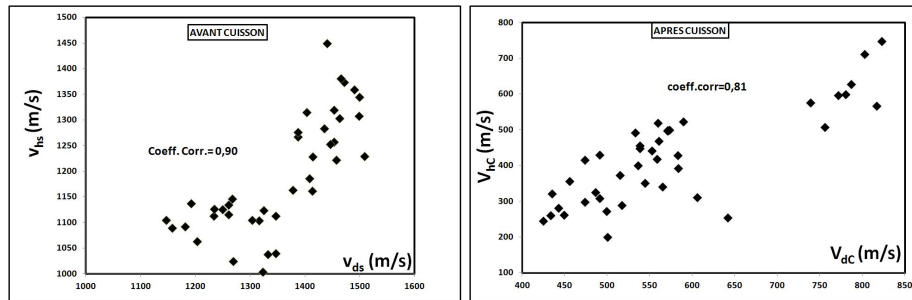


FIGURE 7.4 – Relation entre les vitesses transversales et longitudinales

La Figure 7.4 montre qu'avant et après cuisson, les mesures de vitesse suivant les deux axes sont bien corrélées, avec une bien meilleure corrélation avant la cuisson. Le calcul du rapport v_h/v_d donne une moyenne de 0,88 avant la cuisson et 0,73 après la cuisson. La moyenne calculée sur les valeurs après cuisson, obtenues par Cultrone et al. [46], entre les vitesses perpendiculaires et parallèles aux couches donne également un rapport de 0,73.

La différence des vitesses avec l'orientation est plus remarquable après cuisson car l'effet de la température accentue les discontinuités et l'anisotropie des briques en creusant davantage l'écart entre les vitesses selon des deux orientations. Ceci explique un rapport v_h/v_d plus élevée avant cuisson que celui après la cuisson.

7.4.3 Relation entre les vitesses avant et après cuisson

Nous constatons d'une manière générale, pour tous les échantillons et à toutes les températures, que les vitesses avant la cuisson sont 2 à 3,5 fois supérieures à celles après la cuisson, comme représenté sur la Figure 7.5 pour la cuisson à 900°C.

Les facteurs qui expliqueraient cette diminution sont la porosité, la densité et la microfissuration. En effet, nous savons que la vitesse ultrasonique est liée à la porosité. La cuisson des briques conduit au départ de matière sans changement notable de volume, ce qui implique une augmentation de porosité. Ce n'est qu'au environ de 975°C que la vitrification devient importante et qu'une diminu-

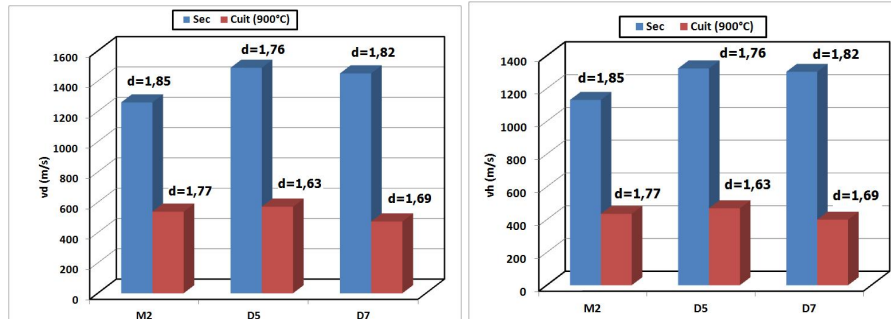


FIGURE 7.5 – Relation entre vitesses avant et après cuisson à 900°C

tion sensible de porosité pourrait intervenir. L'élévation de la température entraîne également des microfissures qui augmentent la porosité de fissures.

Le traitement thermique, selon la température, provoque le départ de l'eau de constitution et transforme certains minéraux en phases nouvelles responsables de l'agglomération de la masse solide d'une part, tout en provoquant la création des vides et microfissures qui sont atténués ou renforcés par la présence ou non de phases colloïdales (solutions solides), d'autre part.

Le volume des fissures peut être négligeable devant celui des autres pores, mais les fissures ralentissent beaucoup plus (environ 20 fois) la propagation des ondes que les autres pores. Fourmaintraux [59][44] a décrit le cas d'un grès à $n=10\%$ et $IC^1=84\%$ qui, après chauffage, n'a pas changé de porosité ($n=12\%$) mais a vu chuter le IC à 52%. Le comité français de mécanique des roches [60] souligne que *"la vitesse des ondes P varie à lithologie constante avec la porosité de pores, mais diminue plus fortement encore avec la porosité de fissures"*.

7.4.4 Relation entre les vitesses ultrasoniques et les résistances entre compression simple

Nous observons sur la Figure 7.6 que les corrélations sont très bonnes entre la résistance en compression simple des briques cuites et leurs vitesses ultrasoniques transversales et longitudinales. Les vitesses ultrasoniques sont directement

1. C'est l'indice de continuité qui tient compte des défauts de la roche par le rapport entre la vitesse de propagation des ondes dans une roche V_p et ce qu'elle serait dans un milieu de composition minéralogique idéal

proportionnelles à la résistance en compression simple des briques.

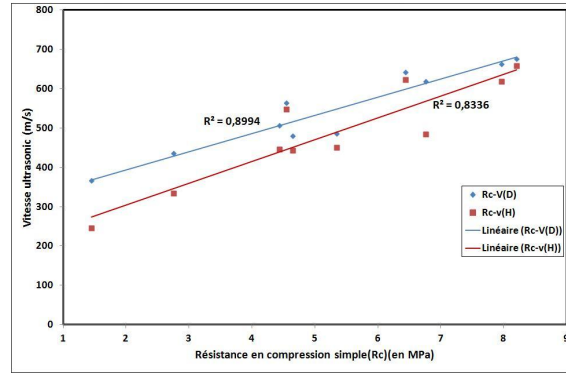


FIGURE 7.6 – Relation vitesse et résistance en compression simple (cuisson à 900°C)

En effet, plus une brique est dense, plus est elle résistante et plus la vitesse de propagation des ondes est élevée. Quant au degré de fissuration des briques, nous savons déjà qu'il diminue la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques et plus un matériau est fissuré, moins il est résistant. Nous voyons donc que ces paramètres agissent dans le même sens sur la vitesse et sur la résistance en compression simple.

7.4.5 Relation entre module statique ou linéaire et modules dynamiques

Le module statique ou linéaire est le coefficient angulaire de la partie linéaire sur la courbe contrainte-déformation de l'essai de compression simple. Il est calculé, à partir de deux points de la droite, suffisamment éloignés, par la relation (6.11). Les modules dynamiques sont calculés à partir de l'expression suivante :

$$E_d = \rho \frac{V_p^2 (1 + \nu) (1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad (7.18)$$

avec :

ρ : masse volumique de la brique ;

ν : coefficient de Poisson pris égal à 0,3 pour les briques et

V_p : vitesse ultrasonique des ondes P.

E_d : module dynamique. Il est noté E_{dc1} dans le cas de la vitesse après cuisson dans la direction parallèle aux couches v_{dc} . Pour la vitesse après cuisson v_{hc} perpendiculaire aux couches, le module est noté E_{dc2} .

Les Tableaux 7.4, 7.5 et 7.6 présentent les valeurs minimales, maximales et moyennes obtenues et précisent le nombre d'échantillons utilisés ainsi le coefficient de variation (λ_v) pour chaque cas.

		M2	D2	D4	D6
	Nbr	1	1	2	2
Rc (MPa)	Min	-	-	2,07	1,26
	Max	-	-	2,79	1,66
	Moy	1,67	3,06	2,43	1,46
	λ_v (%)	-	-	20,87	19,37
E_{lin} (MPa)	Min	-	-	193	122
	Max	-	-	202	211
	Moy	175	255	198	167
	λ_v (%)	-	-	3,22	37,89
E_{dc1} (MPa)	Min	-	-	770	708
	Max	-	-	892	759
	Moy	926	774	831	734
	λ (%)	-	-	10,42	4,95
E_{dc2} (MPa)	Min	-	-	338	429
	Max	-	-	452	452
	Moy	263	287	395	440
	λ_v (%)	-	-	20,41	3,61

Tableau 7.4 – Résistances en compression simple et modules de briques cuites à 550°C

De ces tableaux, les observations suivantes peuvent être faites :

1. Le module statique linéaire est toujours inférieur aux deux modules dynamiques. Il se rapproche plus de E_{dc2} car ce dernier découle d'une vitesse mesurée dans le sens longitudinale de la pièce, même sens que celui du chargement lors de l'essai de compression simple. Le rapport entre E_{dc2} et E_{lin} varie de 1,04 à 2,64. J-F Couvreur [44] a obtenu, dans ses travaux de recherches sur les roches sédimentaires, un rapport d'environ 2,4. Signalons en outre que ces deux modules expriment deux réalités différentes. Le module statique se rapporte à une réalité macroscopique alors que le module dynamique exprime un aspect microscopique.

		M2	D5	D7
	Nbr	2	2	2
Rc (MPa)	Min	1,24	3,14	1,07
	Max	1,36	3,94	1,29
	Moy	1,30	3,54	1,18
	λ_v (%)	6,63	15,98	13,40
E_{lin} (MPa)	Min	129	193	72
	Max	157	217	91
	Moy	143	205	81
	λ_v (%)	13,59	8,38	17,05
E_{dc1} (MPa)	Min	401	385	223
	Max	436	421	247
	Moy	419	403	235
	λ_v (%)	6,00	6,35	7,24
E_{dc2} (MPa)	Min	255	215	74
	Max	329	226	99
	Moy	292	220	86
	λ_v (%)	18,03	3,53	20,60

Tableau 7.5 – Résistances en compression simple et modules de briques cuites à 700°C

		M2	D2	D5	D7
	Nbr	2	1	2	2
Rc (MPa)	Min	1,75	-	3,59	2,48
	Max	2,03	-	3,66	2,81
	Moy	1,89	4,96	3,62	2,64
	λ (%)	10,63	-	1,41	8,99
E_{lin} (MPa)	Min	116	-	176	159
	Max	169	-	215	178
	Moy	143	283	196	168
	λ_v (%)	25,9	-	14,04	8,11
E_{dc1} (MPa)	Min	381	-	379	260
	Max	384	-	396	280
	Moy	382	391	387	270
	λ_v (%)	0,67	-	3,09	5,23
E_{dc2} (MPa)	Min	263	-	301	159
	Max	275	-	324	214
	Moy	268	295	313	187
	λ_v (%)	3,29	-	5,34	21,16

Tableau 7.6 – Résistances en compression simple et modules de briques cuites 900°

2. La corrélation entre les deux modules dynamiques E_{dc1} et E_{dc2} semble être assez bonne, avec un coefficient de corrélation de 0,72.
3. Il ne se dégage pas une tendance nette entre les modules dynamiques et les résistances en compression ainsi qu'entre les modules pour des échantillons de briques de natures différentes, comme on peut le constater dans les tableaux et sur la Figure 7.7. Il est connu que la corrélation entre la résistance en compression et le module dynamique n'est pas toujours très bonne car la résistance est sensible à l'orientation et à l'importance de la microfissuration existant dans l'échantillon [44].

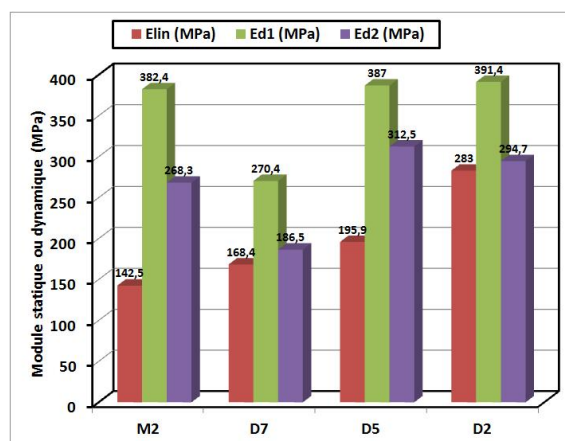


FIGURE 7.7 – Relation entre les différents modules pour une cuisson à 900°C

4. A l'exception des modules linéaires des éprouvettes D6 cuites à 550°C (Tableau 7.4), les résultats sont peu dispersés, avec des valeurs de λ_v inférieures à 30%.

7.4.6 Influence du choix des transducteurs

La plupart des mesures ultrasoniques réalisées l'ont été avec des transducteurs en forme de pointes (voir Figure 7.3). Nous avons néanmoins, pour certaines éprouvettes, voulu analyser l'influence du changement du type de transducteurs. Des transducteurs en forme de disques avec bases planes ont été utilisés en complément de ceux en pointes. Afin d'assurer un bon contact entre les transducteurs et l'échantillon, de la graisse a été utilisée comme agent couplant (Figure 7.8).

Avant de passer à un échantillon, la mesure est d'abord réalisée sur un cylindre étalon en acier dont le temps de passage est bien connu, $26,3 \mu s$ dans notre cas. Le calcul de la vitesse ultrasonique se fait comme dans le cas des pointes. Signalons en outre, que les transducteurs en disques n'ont été appliqués que sur les deux bases opposées des briques cuites ; les mesures concernent donc uniquement la vitesse v_{hc} .



FIGURE 7.8 – Mesures ultrasoniques avec transducteurs en formes de disques sur le cylindre étalon

Le Tableau 7.7 donne les valeurs des vitesses v_{hc} obtenues par ces deux méthodes. Les masses volumiques des éprouvettes cuites ainsi que les vitesses diamétrales avec transducteurs en forme de pointe sont également présentées.

Echantillon	ρ kg/m^3	v_{dc} m/s	v_{hc} en m/s		
			Pointes	Disques	Rapport
M2-A (700°)	1784	574	499	614	1,2
M2-B (700°)	1767	553	441	586	1,3
M2-C (900°)	1767	539	447	592	1,3
M2-D (900°)	1781	539	455	577	1,3
D2-A (900°)	1616	571	496	604	1,2
D2-B (900°)	1624	606	310	347	1,1
D2-C (900°)	1638	450	261	344	1,3
D5-A (700°)	1667	583	428	521	1,2
D5-B (700°)	1658	559	417	637	1,5
D5-C (900°)	1626	560	518	641	1,2
D5-D (900°)	1633	571	498	602	1,2
D7-A (700°)	1691	443	280	366	1,3
D7-B (900°)	1682	474	414	498	1,2
D7-C (900°)	1686	456	356	457	1,3

Tableau 7.7 – Valeurs des vitesses ultrasoniques avec transducteurs différents

Nous constatons que les vitesses obtenues avec les transducteurs en forme de disques sont 1,1 à 1,5 supérieures à celles obtenues avec les premiers transducteurs et, comme nous pouvons le voir sur la Figure 7.9, la corrélation entre les deux paramètres est très bonne. En termes de temps de passage, cette différence correspond à presque le double de la différence des références des transducteurs, $17,3 \mu s$ pour la forme en pointes et $26,3 \mu s$ pour les disques à surfaces planes. Des investigations sont donc nécessaires pour la compréhension de cette différence, notamment en essayant différents agents couplants et ce, pour un nombre suffisamment élevé d'échantillons.

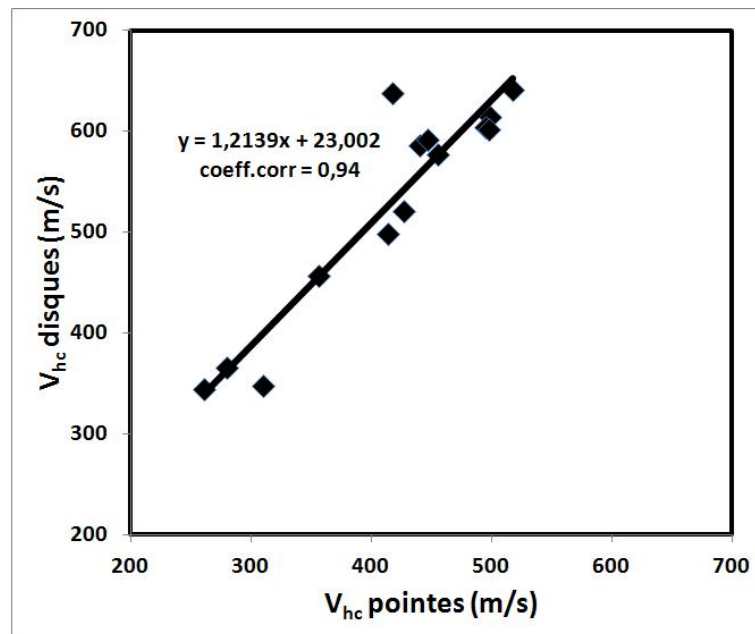


FIGURE 7.9 – Corrélation entre les vitesses obtenues avec différents transducteurs

7.5 Conclusion

Dans le domaine de la production des briques, les mesures non-destructives permettent de suivre l'évolution qualitative des produits sans endommager leur état physique. Dans ce chapitre, les mesures ultrasoniques ont été réalisées sur les briquettes, avant et après leur cuisson. L'appareil utilisé est une unité PUNDIT avec des transducteurs en forme de pointes ou en forme de disques. Les vitesses ont été mesurées parallèlement et perpendiculairement aux couches de compactage.

Les vitesses ultrasoniques des briques sèches révèlent une anisotropie suivant les directions de mesures. Elles sont plus faibles pour des mesures perpendiculaires aux couches de compactage que celles parallèles aux couches. Le rapport entre les deux vitesses est d'environ 0,9 en moyenne. Elles sont également fonction de la nature de la matière première, de la densité et de la porosité des pores des briques.

Après la cuisson, nous avons constaté une diminution des vitesses ultrasoniques d'un facteur compris entre 2 et 3,5. Cette diminution s'expliquerait par une augmentation de la porosité de fissures qui influence plus sensiblement la vitesse ultrasonique que la porosité de pore. Le rapport des vitesses perpendiculaires et parallèles aux couches diminue également après la cuisson car l'effet de la température accentuerait les discontinuités entre les couches, en creusant l'écart des vitesses suivant les deux orientations.

Les vitesses ultrasoniques après la cuisson sont très bien corrélées aux résistances en compression simple et varient dans le même sens. Elles pourraient, dans les limites de leur utilisation, servir à l'évaluation de la résistance des briques en plus de révéler leur état de fissuration.

Le module statique linéaire est toujours inférieur aux modules dynamiques des deux directions de mesure. Ce module est de 1,04 à 2,64 inférieur au module dynamique suivant la direction de compactage. Comme d'autres chercheurs l'ont démontré, il ne se dégage pas une nette relation entre la résistance en compression et les modules dynamiques, car la résistance est sensible à l'orientation et à l'importance de la microfissuration existant dans l'échantillon.

Ce chapitre a également montré qu'il existe une bonne corrélation entre les mesures ultrasoniques réalisées avec les deux types de transducteurs. Ceux en forme de disques donnent des valeurs 1,1 à 1,5 plus élevées. Il serait important d'investiguer l'origine de cette différence notamment par l'usage d'autres agents couplants entre les disques et l'éprouvette.

Chapitre 8

Conclusion et Perspectives d'Avenir

8.1 Conclusion Générale

Face aux difficultés que connaît la province du Kasai oriental en République Démocratique du Congo pour s'approvisionner en matériaux de construction et sa quasi-totale dépendance des autres provinces de la République, notre travail s'est fixé comme objectif principal d'analyser et de comprendre la nature et le comportement de quelques sols de cette province, afin de proposer des solutions en vue de leur utilisation dans la construction, particulièrement pour la production des briques de terre cuite.

Une des premières non-évidences de ce travail a été la présence de sols suffisamment argileux qui pourraient servir de matière première dans l'industrie de la brique cuite. En effet, le Kasai oriental regorge plus de 85% de sols sableux. Des maisons en briques cuites ont existées depuis le temps colonial, mais la matière première venait des termitières qui ne peuvent se prévaloir à une exploitation industrielle. Nous avons donc commencé par l'identification des sources potentielles sur base d'études bibliographiques, géologiques et sur l'observation d'indices que sont les exploitations artisanales. Les complexes granitiques de Dibaya ainsi que celui de Kanda-Kanda sont apparus comme des socles pouvant fournir, par altération, des sols suffisamment argileux. Les échantillons ont été prélevés dans quatre

carrières artisanales d'exploitation des briques, dans la ville de Muene-Ditu. A ces échantillons, se sont ajoutés ceux des deux autres sites de la ville de Mbujimayi, généralement utilisés dans le secteur de la construction routière. Tous ces échantillons, systématiquement préparés, ont été amenés pour analyse à l'Université catholique de Louvain, en Belgique.

Les analyses d'identification, réalisées au laboratoire d'essais mécaniques, structures et Génie Civil (LEMSC) de l'UCL, ont montré que les sols de Mbujimayi contiennent une fraction sableuse plus importante que ceux de Muene-Ditu. Tous les sols de Muene-Ditu ont présenté une fraction fine suffisante pour la briqueterie. Le sol de l'aéroport de Mbujimayi a été écarté de l'étude à cause de sa très faible fraction fine et celui du polygone Miba pourrait donner des résultats satisfaisant avec un complément en matières fines. Le site de Kamabue à Muene-Ditu est le plus argileux, mais ses limites de retrait élevées exigeraient une attention particulière. Un ajout de produits dégraissants leur serait indispensable. La faible proportion en fraction limoneuse dans les sols analysés, comme dans tous les sols tropicaux, réduirait leurs propriétés rhéologiques.

Les briques devant être façonnées par compactage, les caractéristiques optimales de compactage ont été déterminées en se servant de l'approche expérimentale et d'une approche semi-empirique. Les valeurs de teneurs en eau et de densité obtenues, ont été utilisées lors de la fabrication des briques.

Les analyses chimiques nous ont révélé que les sols sont très acides à cause de la forte altération qui est une caractéristique des sols tropicaux dits ferralitiques ou latéritiques, avec également des teneurs en oxyde de fer compris entre 2 et 4%. Les critères imposés par différentes normes en matière de teneur en chaux, perte au feu, somme silice + alumine+ oxyde de fer, sont respectés pour les sols sélectionnés.

La kaolinite est le phyllosilicate le plus abondant dans les sols du Kasai oriental de notre étude. Le quartz est également présent dans tous les sols avec une grande proportion dans les sols de Mbujimayi. La quasi-totalité du fer, responsable de la coloration rougeâtre des sols, existerait sous-forme d'hématite ou goethite. Une présence de faibles quantités de muscovite est signalée dans ce travail car ce dernier se transforme entre 770°et 850°C en mullite, caractéristique de la

vitrification.

Le degré d'hydratation et le comportement à hautes températures ont été étudiés dans ce travail par des analyses thermiques. Deux grandes zones ont été identifiées : la première de 50 à 100°C suite au départ d'eau adsorbée et absorbée, et la seconde, correspondant à la déshydroxylation de la kaolinite, autour de 550°C. La température de 573°C devra être contrôlée lors de la cuisson, car les réactions qui s'y déroulent sont souvent la cause de la fissuration des briques : c'est le point de quartz, connu par les céramistes. Cette étude thermique a guidé notre choix des températures de cuisson en essayant d'associer un frittage suffisant et une économie d'énergie. Les briques ont donc été cuites entre 550°C et 900°C.

Les briques, compactées à l'Optimum Proctor modifié ont été séchées pendant 24 heures à 20-25 °C et 48 heures à l'étuve (105°C). Elles ont ensuite été cuites dans un four électrique de laboratoire. Les retraits volumiques totaux des briques cuites sont inférieurs au maximum exigé par les normes. Les pertes au feu, inférieures à 10%, sont acceptables en briqueterie et varient en fonction de la nature argileuse de la matière première et de la température de cuisson.

Les résistances en compression simple varient de 1,45 à 8,2 MPa pour les briques cuites à 900°C. Elles augmentent avec l'argilosité du sol et la densité de la brique. Par contre, elles diminuent avec la porosité de pores et surtout celle de fissures. Excepté les briques à base du sol de Matshitshi, toutes les autres présentent des résistances supérieures à 3,5 MPa pour des densités comprises entre 1,5 et 2. Cette résistance est celle recommandée par la norme indienne.

Les valeurs d'absorption d'eau, obtenues après immersion des échantillons dans l'eau pendant 24h, sont comprises entre 12,4 et 26,5% ; résultats acceptables et similaires à d'autres sols africains utilisés comme terre à briques.

Une étude de sensibilité des caractéristiques des briques a été réalisée dans ce travail afin d'analyser l'influence de quatre paramètres : la température de cuisson, le temps de cuisson à la température maximale, le mode de séchage et la saturation des briques. Les résultats présentés dans cette thèse ont montré une augmentation de la résistance avec la température de cuisson. La température de 900°C a été jugée plus recommandable dans les conditions du Kasaï oriental car en plus d'une augmentation sensible de la résistance, nous avons observé une diminution de po-

rosité et une faible influence de la saturation des briques sur les résistances.

Ce travail s'est également intéressé aux caractéristiques hydromécaniques des sols. Des essais oedométriques, de perméabilité et triaxiaux ont été conduits sur des échantillons de sols reconstitués en laboratoire dans les conditions proches de l'Optimum Proctor. Ils fournissent une base de données indispensable à la modélisation du comportement de la matière première lors de l'exploitation des carrières à briques et des travaux connexes à la production des briques tels que le dimensionnement des fondations. Les résultats de cette partie du travail confirment le caractère sableux des sols de Mbujimayi avec une plus grande compressibilité du sol du polygone Miba par rapport à celui de l'aéroport de Bipemba. Sous faible contrainte de confinement, les sols de Muene-Ditu manifestent un comportement d'argiles normalement consolidées alors que le comportement sous forte contrainte de confinement est celui d'argiles surconsolidées. Les valeurs de cohésions effectives sont comprises entre 0 et 16 kPa. L'angle de frottement interne effectif quant à lui, varie de 28,9 à 33,6°C. Tous les sols étudiés sont très peu perméables à un compactage Optimum Proctor.

Une des originalités de ce travail est d'avoir associé des essais non-destructifs sur les briques. Ces derniers ont l'avantage de suivre l'évolution de la qualité des briques pendant les différents processus. Les mesures ultrasoniques ont été réalisées sur les éprouvettes sèches et cuites. Ils ont révélé que les vitesses ultrasoniques diminuent après la cuisson, due principalement à la microfissuration des éprouvettes. Une anisotropie a été constatée entre les directions parallèles et perpendiculaires aux couches de compactage. Les vitesses mesurées parallèlement aux couches sont plus élevées. Elles le sont davantage après la cuisson car celle-ci vient accentuer les discontinuités entre les couches.

Les vitesses ultrasoniques sont directement proportionnelles à la résistance en compression simple. Elles pourraient alors servir de test plus rapide et moins coûteux pour l'évaluation de la résistance des briques cuites. Le module statique est quant à lui toujours inférieur aux modules dynamiques, tout en se rapprochant de celui calculé à partir de la vitesse mesurée perpendiculairement aux couches de compactage.

8.2 Perspectives d'Avenir

C'est à l'aboutissement d'un travail comme celui-ci que l'homme se rend compte que "tout n'est ni réalisé, ni réalisable". Bien que les objectifs majeurs de ce travail aient été atteints, plusieurs pistes restent à explorer, notamment :

1. La possibilité d'améliorer les caractéristiques du compactage par une méthode statique à l'aide d'une presse à énergie contrôlée. En effet, la littérature, particulièrement les travaux de D. Myriam [109], montre que les conditions Optimum de Compactage Statique (OCS) sont meilleures que celles Optimum Proctor ;
2. L'analyse du comportement des briques en moyenne température, c'est-à-dire entre 950°et 1300°C, serait logiquement dans la continuité de ce travail ;
3. Nous pensons qu'il serait important d'analyser l'effet des mélanges de certains sols dont les sites sont très proches. Des études ont en effet montré que le comportement à hautes températures de deux matières premières de natures variées peut être totalement différent de celui de ces sols pris individuellement ;
4. Nous avons proposé des ajouts (argiles ou dégraissants) à certains sols afin d'améliorer la qualité de leurs produits de cuisson. Cette question nécessiterait une attention particulière dans les travaux futurs ;
5. L'étude de la propagation des ultrasons dans les briques, amorcée dans ce travail, pourrait se poursuivre afin de donner plus de lumière à certains aspects restés en suspens. C'est le cas de la différence entre les vitesses ultrasoniques obtenues avec des transducteurs différents ;
6. L'amélioration des caractéristiques des briques par certains ajouts (chaux, ciment,...). Nous pensons également à un aspect écologique très important qui est celui de la récupération des déchets ménagers ou autres, pour leur utilisation en mélange dans la briqueterie. Des études ont été menées à travers le monde et les résultats sont encourageants ;
7. Nous pensons qu'il faille approfondir l'analyse des influences du mode de

séchage et du temps de cuisson pour lesquelles ce travail a été limité par la quantité de matière disponible ;

8. Des aspects économiques et sociaux devront être intégrés par la suite afin d'aboutir à une modélisation d'outils de production. Nous pensons entre autre au choix de la source d'énergie.

ANNEXES

ANNEXE A

CARACTÉRISTIQUES DES SOLS

A.1 Caractéristiques minéralogiques

A.1.1 Mode opératoire de mesure de la CEC et des bases échangeables

A.1.1.1 Principe

La détermination de la CEC exige la mesure de la quantité des charges négatives par unité de poids. La CEC mesurée varie suivant :

- Le cation saturant ;
- La concentration du sel ;
- Le pH de l'équilibre

La CEC est déterminée en saturant d'abord le sol par un cation métallique ; ensuite, on lave l'excès de sel par un solvant et, on termine par une désorption du cation saturant par un autre sel.

A.1.1.2 Préparation des colonnes de percolation

Nous présentons la percolation à l'acétate d'ammonium 1N à pH=7 suivant la méthode Schollenberger représentée sur la Figure A.1. C'est une méthode classique, applicable à tous les sols ; néanmoins, dans le cas des sols calcaires, une partie du carbonate est dissout, ce qui a pour effet d'augmenter le calcium dit échangeable ($\text{Ca mesuré} = \text{Ca échangeable} + \text{une partie du Ca carbonaté}$).

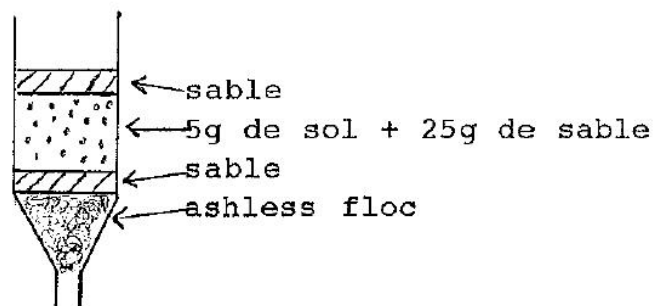


FIGURE A.1 – Percolation du sol : succession des couches

Réactifs

- $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1N : peser 77,08 g/l, régler le pH à 7 avec une solution diluée de CH_3COOH ou de NH_4OH
- Ethanol dénaturé
- KCl 10% pH 3 : peser 100 g par litre, régler le pH à 3 avec une solution diluée de HCl ou de KOH

Mode opératoire

- Percoler 6 fois 25 ml d'acétate toutes les 20 minutes (150 ml en 2 heures). Recueillir le percolat dans des ballons jaugés de 250 ml et porter au volume avec de l'eau. Détermination des cations Ca, Mg, K et Na par absorption atomique ;
- Laver 6 fois avec 50 ml d'éthanol dénaturé toutes les 20 minutes (300 ml en 2 heures). Jeter le percolât
- Percoler 6 fois 25 ml de KCl toutes les 20 minutes (150 ml en 2 heures). Recueillir le percolât dans des ballons jaugés de 250 ml. Porter au volume avec de l'eau ;
- Détermination de la teneur en NH_4^+ (CEC) par distillation.

A.1.1.3 CEC sur les argilesRéactifs

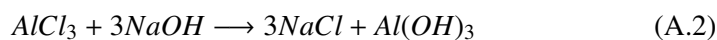
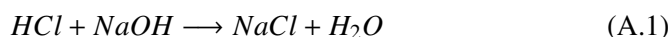
- $AcNH_4$ 1N, pH = 7
- Méthanol pour analyse

Mode opératoire

- Peser environ 200 mg d'argile dans des tubes de centrifugation de 50 ml ;
- Ajouter environ 7 à 8 ml d' $AcNH_4$, boucher et agiter pendant une nuit ;
- Enlever les bouchons avec précautions en les nettoyant avec un jet de pissette d' $AcNH_4$;
- Equilibrer les tubes et centrifuger à la Sorvall durant 10 minutes à 2500 tpm¹ ;
- Eliminer délicatement le surnageant ;
- Rajouter de l' $AcNH_4$, secouer énergiquement pour mettre l'argile en suspension, puis modérément pendant 30 minutes. Equilibrer, centrifuger, verser le surnageant et recommencer une fois à l' $AcNH_4$, et trois fois au méthanol ;
- Reprendre par de l'eau distillée et verser le tout dans l'appareil à distiller ;
- Ajouter environ 15 ml de NaOH 50%, distiller 5 minutes et récupérer dans l'acide borique ;
- Titrer à l'aide de HCl N/10 et exprimer les résultats en méq/100 g.

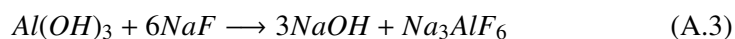
A.1.2 Mode opératoire de mesure de l'acidité totale**A.1.2.1 Réactions de base**

Si un sel tel que KCl est utilisé pour remplacer l'Al et l'H échangeables des sols, le filtrat peut être titré par une base standard afin d'obtenir la mesure de l'acidité totale échangeable.

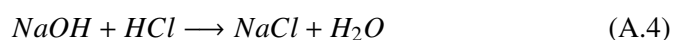


1. tpm : tours par minutes

Si on ajoute du NaF à la solution titrée, l'Al de $Al(OH)_3$ est transformée en un complexe stable (fluoroaluminate) avec production de NaOH, suivant l'équation :



La quantité d'Al est indiquée par titrage du NaOH



La quantité d'H est obtenue par différence entre l'acidité totale et la quantité d'Al.

A.1.2.2 Réactifs

- Sable propre
- KCl 1N
- Phénolphthaléine 1%
- NaOH 0,1N
- HCl 0,1N
- NaF : 40 g/l d'eau déminéralisée

A.1.2.3 Mode opératoire

- Préparer les colonnes de percolation comme sur la Figure A.2 ;

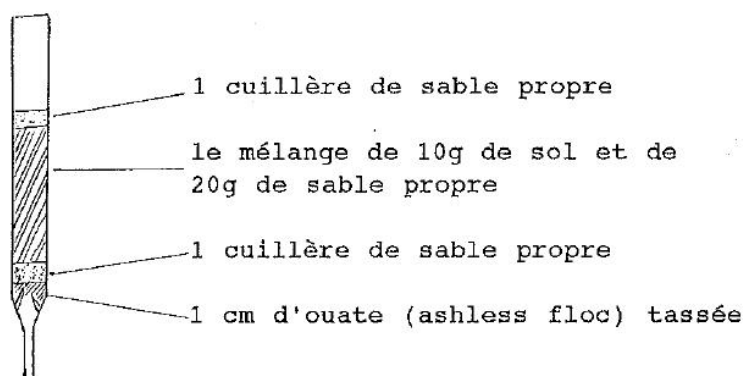


FIGURE A.2 – Colonne de percolation pour acidité totale échangeable

- Il faut préparer en même temps 2 colonnes où le mélange sol-sable est remplacé par 30 g de sable afin de déterminer la quantité d'H ou d'Al qui pourrait provenir du sable ou de l'ouate et non du sol (blanco) ;
- Percoler avec 100 ml de KCl 1N par petites quantités et récupérer la solution dans un ballon de 100 ml ;
- Ajuster le volume avec KCl 1N et bien mélanger ;
- Pipeter 20 ml de solution (pipette de 20 ml à 1 trait) et placer dans un Erlen de 150 ml. Rincer les bords de l'Erlen par un jet de pissette ;
- Ajouter quelques gouttes de phénolphthaléine et titrer avec du NaOH 0,1N jusqu'au moment où la solution passe d'incolore à rouge. Si nécessaire, ajouter quelques gouttes d'indicateur pour remplacer celui qui est absorbé par le précipité d' $Al(OH)_3$. La quantité de base utilisée est équivalente à la quantité totale d'acidité dans l'aliquote ;
- Ajouter une goutte de HCl 0,1N et 10 ml de solution de NaF (pipette de 10 ml graduée) ; Mélanger. Laisser réagir 10 minutes. Titrer avec HCl 0,1N jusqu'au moment où la solution redevient incolore. Ajouter 1 ou 2 gouttes d'indicateur. Si la couleur apparaît, continuer à ajouter de l'acide. La couleur ne peut revenir dans les 2 minutes. La quantité d'acide utilisée est équivalente à la quantité d'Al dans l'aliquote.

A.1.3 Autres diffractogrammes d'argiles du Kasai oriental

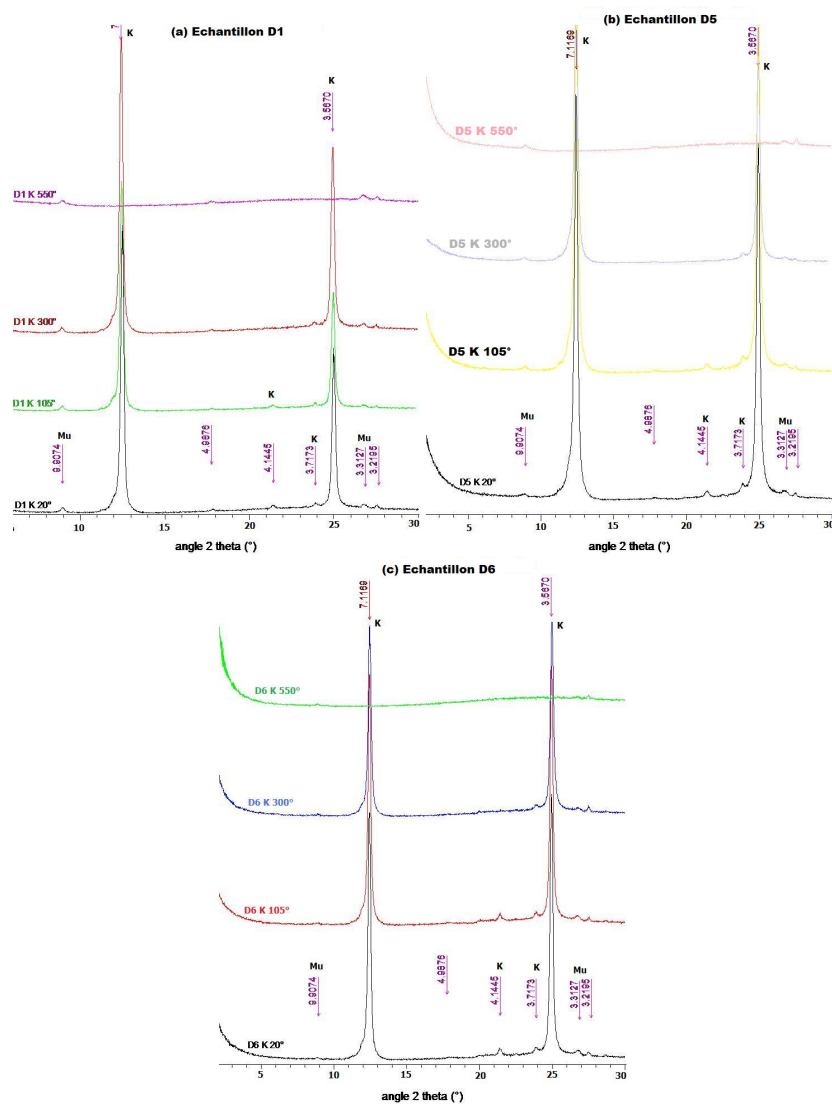


FIGURE A.3 – Autres diffractogrammes d'argiles de Muene-Ditu

A.2 Caractéristiques hydromécaniques

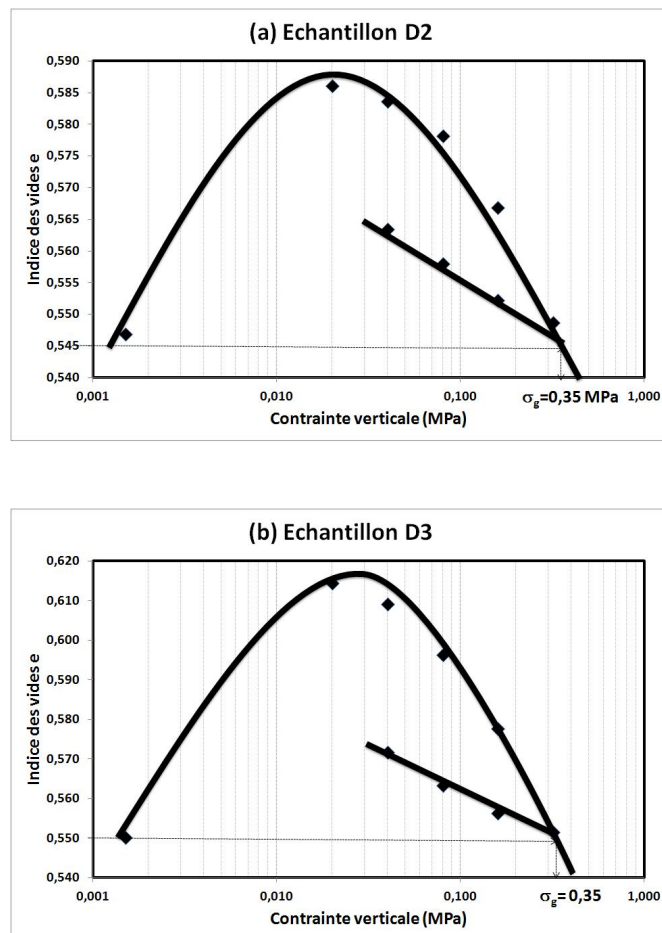


FIGURE A.4 – Courbes de compressibilité des sols de Kamabue Ouest

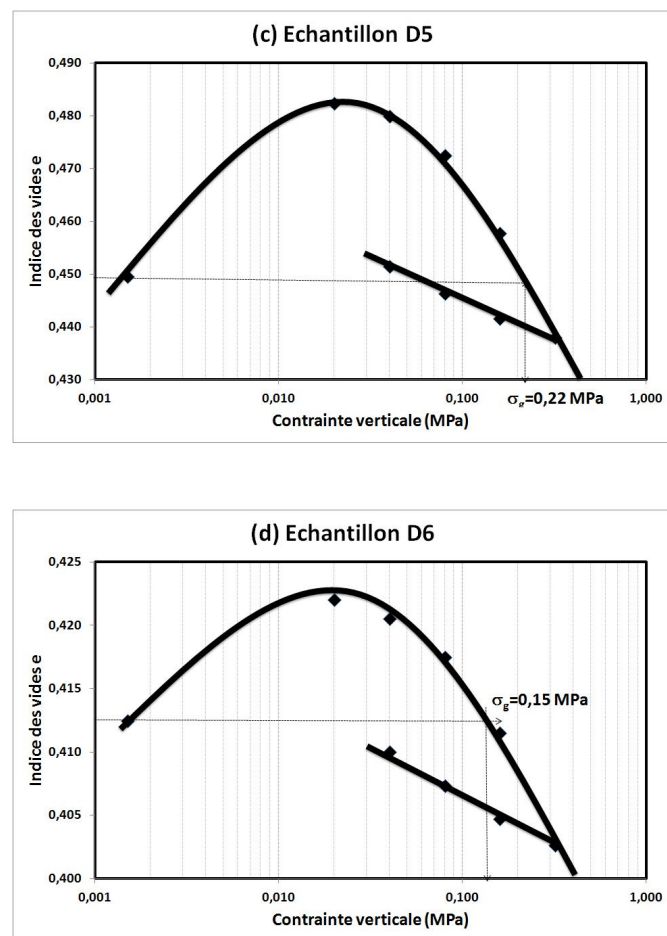


FIGURE A.5 – Courbes de compressibilité des sols D5 et D6

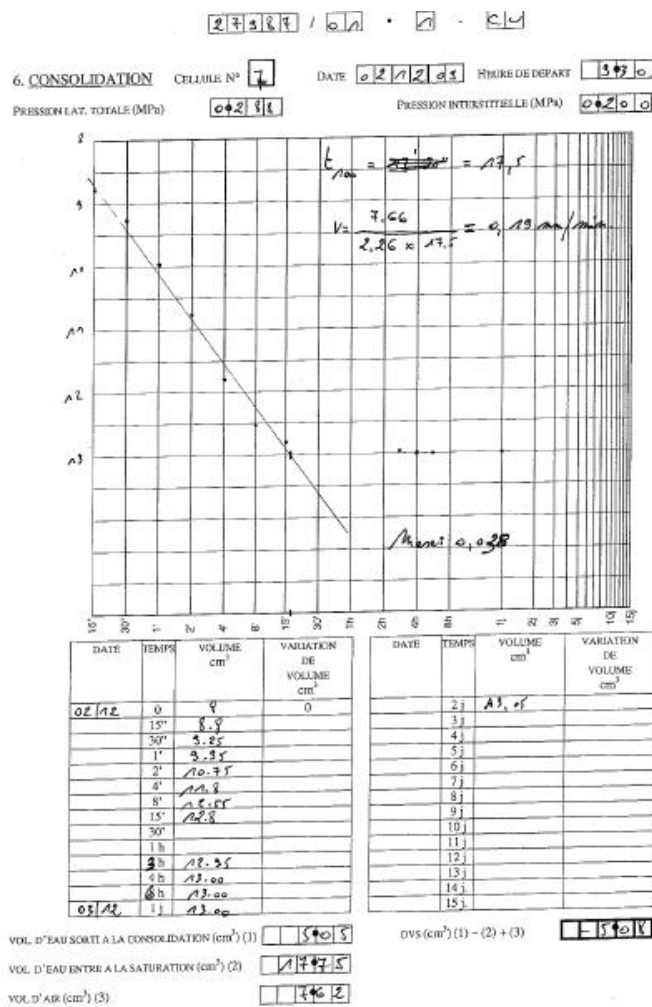


FIGURE A.6 – Suivi de la consolidation de l'échantillon D1 de Muene-Ditu

ANNEXE B

CARACTÉRISTIQUES DES BRIQUES

B.1 Caractéristiques physiques avant cuisson

	M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
w_F 550°C (%)	14,5	14,5	14,6	23,4	18,5	-	18,14	-
w_F 700°C (%)	15,1	-	-	-	-	18,3	-	18,2
w_F 900°C (%)	12,1	-	18,6	-	18,1	18,5	15,1	15,0

Tableau B.1 – Teneurs en eau de compactage des briques (autres cuissons)

		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
d (550 °C)	Nbr	4	4	3	4	4	-	4	-
	Min	2,02	1,94	1,72	1,93	1,98	-	2,00	-
	Max	2,09	1,98	1,91	1,96	2,03	-	2,03	-
	Moy	2,06	1,96	1,78	1,94	2,01	-	2,01	-
γ_d (KN/m ³)	Moy	17,7	16,8	15,3	15,4	16,6	-	16,7	-
		M3	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
d (700 °C)	Nbr	4	-	-	-	-	4	-	3
	Min	1,96	-	-	-	-	1,98	-	1,98
	Max	2,08	-	-	-	-	2,06	-	2,01
	Moy	2,03	-	-	-	-	2,02	-	1,99
γ_d (KN/m ³)	Moy	17,3	-	-	-	-	16,8	-	16,5
		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
d (900 °C)	Nbr	4	-	4	-	4	4	4	4
	Min	2,03	-	2,01	-	2,03	2,00	2,04	1,99
	Max	2,07	-	2,04	-	2,04	2,01	2,08	2,05
	Moy	2,04	-	2,03	-	2,03	2,00	2,05	2,03
γ_d (KN/m ³)	Moy	17,8	-	16,8	-	16,9	16,6	17,5	17,3

Tableau B.2 – Densités et poids volumiques secs après compactage des briques (autres cuissons)

		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
Rv (550°C) (%)	Nbr	2	2	2	2	2	-	2	-
	Min	2,21	-1,90	0,37	4,14	4,59	-	4,95	-
	Max	3,89	-1,85	1,50	4,25	5,25	-	6,06	-
	Moy	3,05	-1,87	0,93	4,20	4,92	-	5,50	-
		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
Rv (700°C) (%)	Nbr	3	-	-	-	-	4	-	2
	Min	1,46	-	-	-	-	3,23	-	4,25
	Max	4,83	-	-	-	-	4,61	-	5,85
	Moy	3,68	-	-	-	-	4,07	-	5,05
		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
Rv (900°C) (%)	Nbr	4	-	4	-	4	4	4	4
	Min	1,04	-	3,22	-	3,62	3,84	2,61	2,14
	Max	2,11	-	3,57	-	4,66	4,43	3,62	2,56
	Moy	1,73	-	3,40	-	4,14	4,15	3,00	2,33

Tableau B.3 – Retraits volumiques après séchage à l'étuve (autres cuissons)

		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
d (550°C)	Nbr	2	2	1	2	2	-	4	-
	Min	1,87	1,69	-	1,63	1,76	-	1,79	-
	Max	1,87	1,70	-	1,64	1,80	-	1,83	-
	Moy	1,88	1,69	1,51	1,64	1,78	-	1,81	-
γ_d (kN/m ³)	Moy	18,4	16,6	14,8	16,1	17,5	-	17,8	-
		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
d (700°C)	Nbr	3	-	-	-	-	4	-	2
	Min	1,83	-	-	-	-	1,74	-	1,77
	Max	1,90	-	-	-	-	1,80	-	1,79
	Moy	1,86	-	-	-	-	1,78	-	1,78
γ_d (kN/m ³)	Moy	18,2	-	-	-	-	17,5	-	17,5
		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
d (900°C)	Nbr	4	-	4	-	4	4	4	4
	Min	1,84	-	1,75	-	1,79	1,76	1,82	1,76
	Max	1,86	-	1,78	-	1,81	1,77	1,86	1,83
	Moy	1,85	-	1,77	-	1,80	1,76	1,84	1,80
γ_d (kN/m ³)	Moy	18,2	-	17,3	-	17,6	17,3	18,0	17,7

Tableau B.4 – Densités et poids volumiques après séchage (autres cuissons)

		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
$\Delta\rho_a$ (550°C) (%)	Nbr	2	2	2	2	2	-	2	-
	Min	10,5	16,3	12,9	18,1	12,5	-	11,1	-
	Max	11,5	16,9	14,2	18,3	12,9	-	12,2	-
	Moy	11,0	16,6	13,4	18,2	12,7	-	11,6	-
		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
$\Delta\rho_a$ (700°C) (%)	Nbr	3	-	-	-	-	4	-	2
	Min	9,3	-	-	-	-	12,9	-	11,5
	Max	13,6	-	-	-	-	14,2	-	13,6
	Moy	10,9	-	-	-	-	13,4	-	12,6
		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
$\Delta\rho_a$ (900°C) (%)	Nbr	4	-	4	-	4	4	4	4
	Min	9,6	-	12,7	-	11,3	13,3	10,1	12,0
	Max	11,1	-	12,8	-	12,0	13,8	10,7	12,8
	Moy	10,1	-	12,7	-	11,6	13,6	10,4	12,4

Tableau B.5 – Variations de la densité apparente après séchage (autres cuissons)

		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
no (550°C)(%)	Nbr	2	2	2	2	2	-	2	-
	Min	29,8	36,3	36,7	39,2	32,5	-	31,2	-
	Max	29,9	36,5	43,6	39,7	33,8	-	32,3	-
	Moy	29,9	36,4	40,2	39,4	33,2	-	31,7	-
		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
no (700°C) (%)	Nbr	3	-	-	-	-	4	-	2
	Min	29,6	-	-	-	-	32,0	-	32,3
	Max	31,2	-	-	-	-	34,2	-	33,4
	Moy	30,3	-	-	-	-	32,8	-	32,9
		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
no (900°C) (%)	Nbr	4	-	4	-	4	4	4	4
	Min	30,0	-	33,5	-	32,2	33,3	29,9	30,9
	Max	30,7	-	34,5	-	32,7	33,6	30,8	33,5
	Moy	30,4	-	34,0	-	32,5	33,4	30,7	32,0

Tableau B.6 – Estimation de la porosité ouverte après séchage (autres cuissons)

B.2 Caractéristiques physiques après cuisson

		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
R_{vsc} (550°C) (%)	Nbr	2	2	1	2	2	-	2	-
	Min	0,18	-1,33	-	-1,53	-0,52	-	-0,03	-
	Max	0,32	-1,29	-	0,20	0,02	-	0,67	-
	Moy	0,25	-1,31	-0,49	-0,66	-0,25	-	0,32	-
R_{vsc} (700°C) (%)	Nbr	3	-	-	-	-	4	-	2
	Min	0,32	-	-	-	-	0,00	-	0,16
	Max	1,41	-	-	-	-	0,42	-	0,42
	Moy	0,90	-	-	-	-	0,24	-	0,29
		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
R_{vsc} (900°C) (%)	Nbr	4	-	4	-	4	4	4	4
	Min	0,06	-	0,85	-	0,06	0,12	0,93	0,02
	Max	1,38	-	-0,13	-	0,82	0,28	2,01	1,29
	Moy	0,82	-	-0,53	-	0,40	0,21	1,33	0,70

Tableau B.7 – Variations volumiques après cuisson (autres cuissons)

		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
d (550°C)	Nbr	2	2	1	2	2	-	2	-
	Min	1,81	1,60	-	1,51	1,70	-	1,71	-
	Max	1,81	1,61	-	1,52	1,75	-	1,75	-
	Moy	1,81	1,61	1,62	1,51	1,73	-	1,73	-
γ_d (kN/m ³)	Moy	17,7	15,8	15,9	14,9	16,9	-	16,9	-
d (700°C)	Nbr	3	-	-	-	-	4	-	2
	Min	1,77	-	-	-	-	1,62	-	1,66
	Max	1,79	-	-	-	-	1,67	-	1,69
	Moy	1,78	-	-	-	-	1,66	-	1,68
γ_d (kN/m ³)	Moy	17,5	-	-	-	-	16,2	-	16,4
d (900°C)	Nbr	4	-	4	-	4	4	4	4
	Min	1,76	-	1,62	-	1,66	1,63	1,68	1,65
	Max	1,78	-	1,64	-	1,66	1,63	1,72	1,70
	Moy	1,77	-	1,62	-	1,66	1,63	1,70	1,68
γ_d (kN/m ³)	Moy	17,4	-	15,9	-	16,3	16,0	16,6	16,5

Tableau B.8 – Densités et poids volumiques après cuisson (autres cuissons)

		M2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
$\Delta\rho_{app}$ (550°) (%)	Nbr	2	2	1	2	2	-	2	-
	Min	3,1	4,99	-	6,91	2,7	-	4,26	-
	Max	3,2	5,1	-	8,16	3,43	-	4,85	-
	Moy	3,2	5,0	4,58	7,5	3,06	-	4,56	-
$\Delta\rho_{app}$ (700° C) (%)	Nbr	3	-	-	-	-	4	-	2
	Min	3,5	-	-	-	-	6,8	-	5,7
	Max	4,6	-	-	-	-	7,2	-	6,0
	Moy	4,1	-	-	-	-	7,0	-	5,9
$\Delta\rho_{app}$ (900° C) (%)	Nbr	4	-	4	-	4	4	4	4
	Min	3,65	-	7,87	-	7,27	7,49	7,40	6,20
	Max	4,96	-	8,51	-	7,91	7,62	8,35	7,46
	Moy	4,39	-	8,19	-	7,58	7,56	7,74	6,87

Tableau B.9 – Variations de la masse volumique apparente après cuisson (autres cuissons)

86

BOSTON

De grondstoffen voor deze gevelstenen zijn alluviale kleien uit het afzettingengebied van de Maas. De rivier heeft de rotsformaties van de Ardennen uitgesleten en het erosiemateriaal meegevoerd. Het oordeelkundig mengen van deze klei-afzettingen levert de juiste grondstoffen op voor de productie van handvormgevelstenen.

Les matières premières de ces briques sont les argiles alluviales issues de la zone de gisement de la Meuse. Le fleuve a érodé les formations rocheuses des Ardennes et emporté les matériaux détritiques. Le mélange judicieux de ces gisements d'argile fournit la matière première idéale pour la production de briques faites-main.

The raw materials needed for these facing bricks are alluvial clays from the sedimentary region of the river Maas. The river eroded the Ardennes rock formations and carried along the eroded materials. Judicious mixing of the clay deposits produces the ideal base material for the production of hand form facing bricks.

Die Rohstoffe für die Ziegel sind Alluviallehm aus dem Absatzgebiet der Maas. Der Fluss hat die Gesteinsformationen der Ardennen ausgewaschen und dabei das Erosionsmaterial mitgeführt. Durch fachkundige Mischung besagter Lehmsedimente werden die richtigen Grundstoffe für die Herstellung von Ziegelsteinen erworben.

KLEUR	COULEUR	FARBE	COLOUR
Boston is een licht genuanceerde donkerrode gevelsteen. Naargelang het baksel zijn lichte schommelingen in de kleurnuance mogelijk.	Boston est une brique de parement rouge-bordeaux légèrement nuancée. Les différentes cuissons peuvent présenter des légères variations de couleur.	Boston ist ein zart nuancierter dunkelroter Verblender. Je nach Serie sind leichte Unterschiede in der Farbnuance möglich.	Boston is a soft shaded dark red facing brick. Slight differences from one series to another are possible.
FORMAAT - GEWICHT	FORMAT - POIDS	FORMATE - GEWICHT	SIZES - WEIGHT
M50 (*) WV50 M65 (*) WV65	212 x 101 x 51 mm 214 x 100 x 65 mm	(1,65 kg) (2,15 kg)	(*) M50 WV (*) M65 WV65
Naargelang de bakserie kunnen deze gemiddelde maten licht afwijken.	Les différentes cuissons peuvent présenter des légères variations des dimensions moyennes.	Je nach Serie können die Durchschnittliche Maße leicht abweichen.	From one series to another, the average size may slightly differ.
(*): geen standaardformaat, beschikbaar op aanvraag	(*): format non standardisé, disponible sur demande	(*): nicht Standard	(*): not standard

SPECIFIEKE EIGENSCHAPPEN	CARACTERISTIQUES SPECIFIQUES	CE NBN EN 771-1 Cat. I - HD	SPEZIFISCHE EIGENSCHAFTEN	INDIVIDUAL CHARACTERISTICS
Gemidd. genorm. druksterkte	Résist. à la compression norm.	10 N/mm ²	Normierte Druckfestigkeit	Norm. compressive strength
Maattolerantie categorie	Dimensions: cat. de tolérance	T2	Abmessungen: Toleranzkat.	Dimension: tolerance cat.
Maatspreiding	Dimensions: cat. de plage	R1	Abmessungen: Maßspanne	Dimensions: range cat.
Vormstabiliteit	Stabilité dimensionnelle	0,04 mm/m	Übliche Feuchtedehnung	Dimensional stability
Hechtsterkte (mortelvoeg)	Adhérence (maçonnerie)	0,15 N/mm ²	Verbundfestigkeit (Mauerwerk)	Bond strength (mortar joints)
Gehalte act. oplosb. zouten	Teneur en sels solubles actifs	S2	Geh. an akt. löslichen Salzen	Active soluble salts
Brandreactie: Euroklasse	Réaction au feu: Euroclasse	A1	Brandverhalten: Euroklasse	Reaction to fire: Euroclasse
Wateropneming	Absorption d'eau	≤18% (kg/kg)	Wasseraufnahme	Water absorption
Initiële wateropzuiging	Taux initiale absorption d'eau	<5 kg/m ² .min	Anfängliche Wasseraufnahme	Initial rate of water absorption
Dampdoorlaatbaarheid	Perméabilité à la vapeur	5/10	Wasserdampfdurchlässigkeit	Water vapour diffusion coeff.
Netto volumieke massa	Masse vol. absolue sèche	/	Netto-Trockenrohdichte	Net dry density
Bruto volumieke massa	Masse vol. apparente sèche	1580 kg/m ³ (D1)	Bruto-Trockenrohdichte	Gross dry density
Equival. warmtegeleidbaarheid	Conductivité thermique équival.	0,47 W/m.K	Äquivalente Wärmeleitfähigkeit	Equivalent thermal conductivity
Vorst/dooi bestandheid	Résistance au gel / dégel	F2	Frostwiderstand	Freeze / thaw resistance
Gevaarlijke stoffen	Substances dangereuses	NPD	Gefährliche Substanzen	Dangerous substances

SPECIFIEKE EIGENSCHAPPEN	CARACTERISTIQUES SPECIFIQUES	86 BENOR 11 NBN B 23-002 (Spouwen)	SPEZIFISCHE EIGENSCHAFTEN	INDIVIDUAL CHARACTERISTICS
Neiging tot uitbloeiing	Efflorescence	zonder uitbloeiing sans efflorescence	Ausblühung	Efflorescence
Vorstweerstand	Résistance au gel	zeer vorstbestand résistance élevée (NBN B 27-009)	Frostbeständigkeit	Frost resistance



(Lanklaar)



(Spouwen + Lanklaar)



EN 9001:2000

VANDERSANDEN

release: jan. 2007

FIGURE B.1 – Caractéristiques des briques à base d'argile alluviale

33				
PARMA - PARMA - FLÄMISCH BUNT - PARMA				
De grondstoffen voor deze gevelstenen worden hoofdzakelijk uit locale, eolische Weichsel-leemlagen gedolven, afzettingen uit de periode van de ijstijden. Dit löss bevat een belangrijke fractie siltig materiaal en is uitermate geschikt voor de productie van handvormgevelstenen. Door gebruik te maken van specifieke zandsorten voor de oppervlaktebebanding wordt de gewenste kleur bekomen.	Les matières premières de ces briques de parement sont extraites principalement des couches de limon locales éoliennes déposées par le vent pendant le Weichselien. Ce löss consiste en grande partie d'une fraction de silt, ce qui est idéal pour la production de briques faites-main. La couleur finale est obtenue en utilisant des types de sables spécifiques pour le sablage de surface.	Die Rohstoffe für die Ziegel werden in örtlich vorkommender Weichsel Lehmschichten abgebaut, der während der Eiszeit vom Wind transportiert wurden. Dieses "Löss" ist hauptsächlich zusammengestellt aus Silt, das sich ideal zur Herstellung handgeformter Fassadensteine eignet. Durch die Verwendung und Verteilung über die Oberfläche von angemessenen Sandsorten, wird der gewünschte Farbton erzielt.	The raw materials needed for the production of the bricks are excavated in Weichsel loam layers, the local loam of Aeolian origin dating from the Ice Age. This "löss" mainly consists of a silt-like fraction, suited ideally for the manufacturing of hand form bricks. By using specific sand types for surface covering, the desired colour is achieved.	
KLEUR	COULEUR	FARBE	COLOUR	
Parma is een karaktervolle genueanceerde gevelsteen waarvan de kleur varieert van paarsrood tot blauwzwart. Naargelang het baksel zijn lichte schommelingen in de kleurnuance mogelijk.	Parma est une brique de parement nuancée dont la teinte varie de rouge-violet à bleu-noir. Les différentes cuissons peuvent présenter des légères variations de couleur.	Flämisch Bunt ist ein stark nuancierter Verblender. Die Farbe variiert von lila-rot bis blau-schwarz. Je nach Serie sind leichte Unterschiede in der Farbnuance möglich.	Parma is a multi-coloured facing brick. The colour varies from red-purple to blue-black. Slight differences from one series to another are possible.	
FORMAAT - GEWICHT	FORMAT - POIDS	FORMATE - GEWICHT	SIZES - WEIGHT	
M50 (*) WV50 M65 (*) WV65	214 x 101 x 50 mm 214 x 101 x 65 mm	(1,65 kg) (2,15 kg)	(*) M50 WV (*) M65 WV65	
Naargelang de bakserie kunnen deze gemiddelde maten licht afwijken.	Les différentes cuissons peuvent présenter des légères variations des dimensions moyennes.	Je nach Serie können die Durchschnittliche Maße leicht abweichen.	From one series to another, the average size may slightly differ.	
(*): geen standaardformaat, beschikbaar op aanvraag	(*): format non standardisé, disponible sur demande	(*): nicht Standard	(*): not standard	
SPECIFIEKE EIGENSCHAPPEN	CARACTERISTIQUES SPECIFIQUES	CE	SPEZIFISCHE EIGENSCHAFTE	INDIVIDUAL CHARACTERISTICS
Gemidd. genorm. druksterkte	Résist. à la compression norm.	20 N/mm ²	Normierte Druckfestigkeit	Norm. compressive strength
Maatolerantiecategorie	Dimensions: cat. de tolérance	T2	Abmessungen: Toleranzkat.	Dimension: tolerance cat.
Maalspreiding	Dimensions: cat. de plage	R1	Abmessungen: Maßspanne	Dimensions: range cat.
Vormstabiliteit	Stabilité dimensionnelle	0,04 mm/m	Übliche Feuchtedehnung	Dimensional stability
Hechtsterkte (mortelvoeg)	Adhérence (maçonnerie)	0,15 N/mm ²	Verbundfestigkeit (Mauerwerk)	Bond strength (mortar joints)
Gehalte act. oplosb. zouten	Teneur en sels solubles actifs	S2	Geh. an akt. löslichen Salzen	Active soluble salts
Brandreactie: Euroklasse	Réaction au feu: Euroclasse	A1	Brandverhalten: Euroklasse	Reaction to fire: Euroclasse
Wateropneming	Absorption d'eau	≤14% (kg/kg)	Wasseraufnahme	Water absorption
Initiële wateropzuiging	Taux initiale absorption d'eau	<5 kg/m ² .min	Anfängliche Wasseraufnahme	Initial rate of water absorption
Dampdoorlaatbaarheid	Perméabilité à la vapeur	5/10	Wasserdampfdurchlässigkeit	Water vapour diffusion coeff.
Netto volumieke massa	Masse vol. absolue sèche	1700 kg/m ³ (D1)	Netto-Trockenrohichte	Net dry density
Bruto volumieke massa	Masse vol. apparente sèche	1600 kg/m ³ (D1)	Bruto-Trockenrohichte	Gross dry density
Equival. warmtegeleidbaarheid	Conductivité thermique équival.	0,45 W/m.K	Äquivalente Wärmeleitfähigkeit	Equivalent thermal conductivity
Vorst/dooi bestandheid	Résistance au gel / dégel	F2	Frostwiderstand	Freeze / thaw resistance
Gevaarlijke stoffen	Substances dangereuses	NPD	Gefährliche Substanzen	Dangerous substances
SPECIFIEKE EIGENSCHAPPEN	CARACTERISTIQUES SPECIFIQUES	86 BENOR 11	SPEZIFISCHE EIGENSCHAFTE	INDIVIDUAL CHARACTERISTICS
Neiging tot uitbloeiing	Efflorescence	zonder uitbloeiing sans efflorescence	Ausblühung	Efflorescence
Vorstweerstand	Résistance au gel	zonder vorstbestand résistance élevée (NBN B 27-009)	Frostbeständigkeit	Frost resistance



(Lanklaar)



(Spouwen + Lanklaar)



EN 12618

VANDERSANDEN

FIGURE B.2 – Caractéristiques des briques cuites à base de limons éoliens

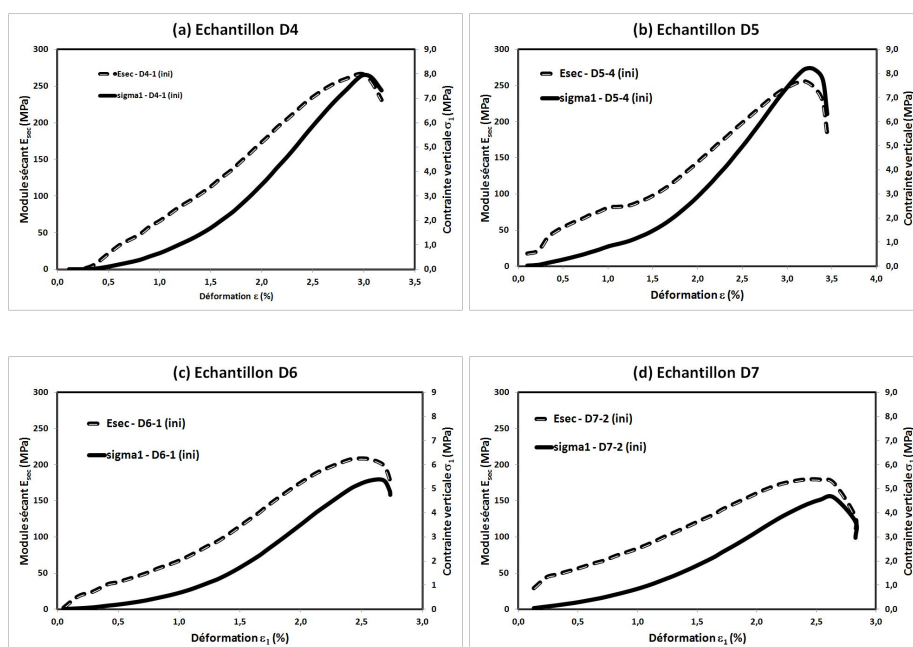


FIGURE B.3 – Module sécant et contrainte en fonction de la déformation (programme initial-suite)

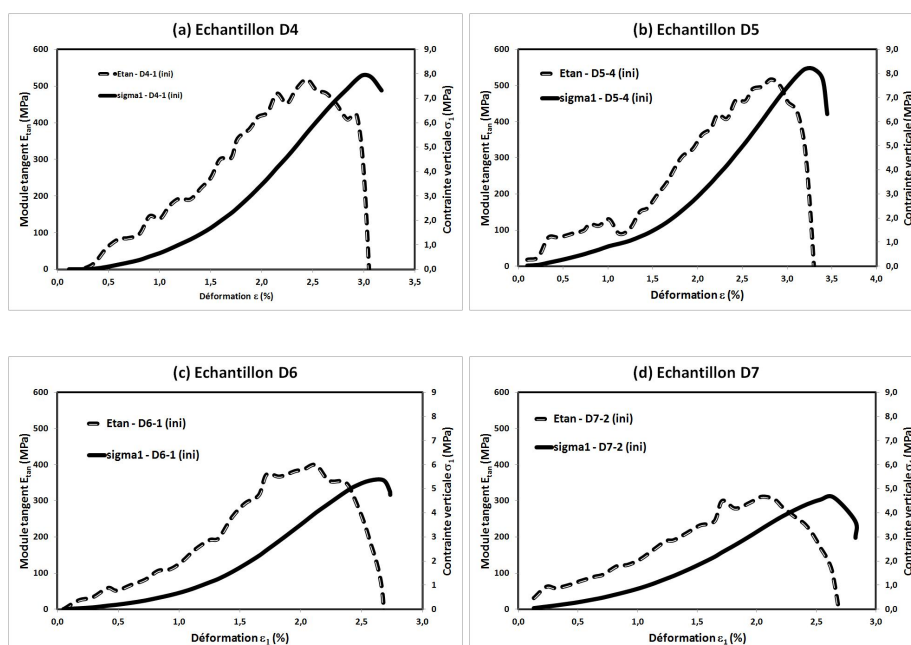


FIGURE B.4 – Module tangent et contrainte en fonction de la déformation (programme initial-suite)

ANNEXE C

MESURES ULTRASONIQUES

		M2	D1	D3	D4	D6
v_{ds} (m/s)	Nbr	2	2	2	2	2
	Min	1158	697	1148	1270	1408
	Max	1181	704	1170	1289	1413
	Moy	1170	701	1159	1280	1411
v_{hs} (m/s)	Nbr	2	2	2	2	2
	Min	1090	357	719	998	1161
	Max	1092	420	985	1024	1186
	Moy	1091	388	852	1011	1174
v_{dc} (m/s)	Nbr	2	2	2	2	2
	Min	803	397	602	780	739
	Max	823	419	642	817	756
	Moy	813	408	622	799	748
v_{hc} (m/s)	Nbr	2	2	2	2	2
	Min	711	71	84	566	507
	Max	747	107	254	598	575
	Moy	729	-	-	582	541

Tableau C.1 – Vitesses ultrasoniques avant et après cuisson à 550°C

		M2	D5	D7
v_{ds} (m/s)	Nbr	3	4	2
	Min	1192	1388	1304
	Max	1234	1500	1317
	Moy	1210	1437	1310
v_{hs} (m/s)	Nbr	3	4	2
	Min	1064	1222	1104
	Max	1137	1345	1105
	Moy	1104	1290	1104
v_{dc} (m/s)	Nbr	3	4	2
	Min	553	537	425
	Max	574	590	443
	Moy	564	567	433
v_{hc} (m/s)	Nbr	2	4	2
	Min	491	399	244
	Max	499	522	280
	Moy	495	441	262

Tableau C.2 – Vitesses ultrasoniques avant et après cuisson à 700°C

INDEX

- | | |
|--|---|
| Aéroport de Bipemba, 15 | Capacité d'échange anionique, 32 |
| Absorption d'eau, 183, 193, 195, 197,
198, 202, 231 | Capacité d'échange cationique, 32, 35 |
| Acide oxalique, 111, 112, 122 | Capacité d'absorption d'eau, 30, 197, 199 |
| Acoustoélasticité, 207 | Capacité tampon, 6 |
| ACP, 114, 122 | Carapace latéritique, 66 |
| Activité pouzzolanique, 77, 174 | Carbonate de sodium, 106 |
| Agent couplant, 213, 223 | Cellule oedométrique, 127 |
| Amplitude de gonflement, 137 | Charbon de bois, 4, 8 |
| Analyse de sensibilité, 196, 202 | Chemin de séchage, 164 |
| Analyse granulométrique, 77, 87, 93 | Cimentation des grains, 175 |
| Analyse thermodifférentielle, 35, 52, 53 | Classe f8 des briques, 161 |
| Analyse thermogravimétrique, 35, 52 | Classification unifiée, 93 |
| Argile déferriifiée, 51 | Coefficient de Poisson, 208, 210, 220 |
| Argile fibreuse, 30 | Coefficients de Lamé, 208 |
| Argile gonflante, 30, 49, 132, 133, 166 | Compactage, 95, 122, 128, 139, 140, 148,
154, 226, 232 |
| Argiles latéritiques, 66, 72 | Compactage oedométrique, 96 |
| ASTM, 77, 110, 195, 196 | Comportement pseudoélastique, 185 |
| Atténuation, 207, 211 | Concentration de contraintes, 185 |
| Bâti, 127 | Conductivité hydraulique, 163 |
| Biotite, 29, 47, 49, 72 | Confort thermique, 7 |
| Boursouflures, 171, 200 | Contrainte hydrostatique, 208 |
| Brique de terre cuite, 3, 4 | Corps noirs, 171 |
| Brique réfractaire, 174 | Correction d'agent dispersant, 82 |
| Caméra de Debye-Scherrer, 41 | Correction de densité d'eau, 82 |
| | Correction de ménisque, 82 |

- Correction de température, 82
Couche, 23
Courbe granulométrique, 82
Courbe Proctor, 99
Cristal, 23
Cristal piézo-électrique, 213

Décollement des briques, 171
Déferrification, 103
Définition granulométrique, 21
Définition minéralogique, 21
Déformation volumique, 208
Dégraissant, 171, 195
DCB, 112
Degré de séchage, 162
Densimètre, 81
Densité sèche, 164, 188, 191
Dessèchement, 162
Diagramme de Casagrande, 94
Dickite, 26
Diffraction des rayons X, 26, 35, 72
Diffractogramme, 46, 47, 49
Diffractomètre, 41, 48
Dissolution congruente, 22
Dissolution incongruente, 22
Distance inter-réticulaire, 39
Double couche de Helmholtz, 33
DSC, 172
Durée de palier, 177

Ecumes, 171
Elancement, 159, 207
Energie de compactage, 95

Espace basal, 26, 28, 31
Espace interfoliaire, 24, 30, 55
Essai consolidé, 142
Essai consolidé non-drainé, 143
Essai de perméabilité, 125
Essai dilatométrique, 172
Essai drainé, 142
Essai non-consolidé, 142
Essai non-drainé, 142
Essai oedométrique, 125
Essai Proctor, 77, 99
Essai Proctor standard, 100
Essai triaxial, 125
Essais de perméabilité, 138
Etat critique, 149
Etat plastique, 88
Etat solide, 87
Etat solide avec retrait, 88
Etat solide sans retrait, 88

Façonnage des briques, 159
Famille des smectites, 166
Fluage, 183
Fluide visqueux, 171
Fraction argileuse, 21, 85
Fuseau granulométrique, 84

Générateur d'impulsions électriques, 213
Gaz plasmagène, 107
Gibbsite, 48, 67, 72
Glaciations, 69
Goethite, 51
Gonflement du sol, 139

- Gonflement interfoliaire, 133
Gonflement interparticulaire, 133
Gonflement primaire, 137
Gonflement secondaire, 137
Granite, 105
Granulométrie uniforme, 83
Graveleux latéritiques, 66

Hématite, 51
Héxamétaphosphate de sodium, 81
HRTEM, 35
Hydrolyse, 23
Hygrométrie ambiante, 164

ICP, 107, 111
Indice de plasticité, 88, 90, 94, 101, 116, 121

Kamabue, 17
Kamisangi, 18
Kaolinite, 49, 51
Kaolisols, 65

Lacune granulométrique, 84
Latérite, 64–70
Latéritisation, 66, 68
Later, 65
Lecture à la pointe, 82
Lecture au plateau, 82
Limite de liquidité, 88
Limite de plasticité, 88
Limite de retrait, 77
Limites d'Atterberg, 77, 87, 93
Loi de Bragg, 39, 44

Loi de Hooke, 208
Luetet, 18, 84

Métaborate de Lithium, 107
Métakaolinite, 48
Méthode des décantations successives, 48
Méthodes infrarouges, 35
Matshitshi, 16
MEB, 35, 60, 61, 72
MET, 35
Mica blanc, 49
Micas trioctaédriques, 28
Microfissuration, 218
Microfissures, 176, 219
Minéraux dioctaédriques, 28
Minéraux interstratifiés, 26
Module de cisaillement, 208
Module de compressibilité, 208
Module de Young, 208
Module granulométrique, 102
Module linéaire, 187, 192
Module sécant, 192
Module tangent, 192
Montage goniométrique, 41
Montmorillonite, 137
Mouvement irrotationnel, 209
Muscovite, 28, 47, 49, 52, 59, 72

Nacrite, 26
Nduba, 18, 84

Oedomètre, 138
Ondes P, 209, 214

- Ondes S, 210
 Optimum Proctor, 159, 167
 Optimum Proctor modifié, 128
 Optimum Proctor normal, 128
 Oscilloscope, 213
 Oxalate d'ammonium, 111

 Peroxyde d'hydrogène, 104
 Palier de température, 177
 Perméamètre à charge variable, 138, 139
 Perte au feu, 109, 179
 Phases colloïdales, 219
 Phlogopite, 29
 Phyllosilicate, 21, 23, 51, 112
 Physique des roches, 206
 Plan, 23
 Plan externe de Helmholtz, 34
 Plan interne de Helmholtz, 34
 Plasma, 107
 Point de charge zéro, 32
 Polygone Miba, 15
 Polytypes, 26
 Porosité de fissures, 219
 Potentiel scalaire, 209
 Pression capillaire, 166
 Pression de gonflement, 137
 Produits de cuisson, 2
 Pycnomètre, 168

 Réflexion principale, 43
 Régions boréales, 68
 Résistance en compression simple, 183, 199
 Rayons X, 39
 Refus cumulé, 78, 83
 Retrait volumique, 167
 Ruptures intracristallines, 185

 Sédimentation, 80
 Sables lâches, 149
 Sanguluja, 16
 Saturation cationique, 48
 SDTA, 55
 Smectite, 28, 30, 164
 Sols ferrallitiques, 65
 Sols latéritiques, 2, 64, 69
 Sols reconstitués, 4
 Solvation à l'éthylène-glycol, 49
 Structure dioctaédrique, 24
 Structure trioctaédrique, 25
 Succion, 98, 162, 164, 167
 Surface spécifique, 174

 Tétraborate de Lithium, 107
 Taux de gonflement, 137
 Température de séchage, 164
 Temps de séchage, 164
 Teneur en chaux, 103
 Teneur en matières organiques, 103
 Terre à briques, 121
 Transducteur d'enchèvement, 213
 Transducteur de déclenchement, 213
 Transducteurs, 213, 223
 Tube à rayons X, 40, 41
 Unité Pundit, 213

-
- Variation de densité après séchage, 167
 - Variation volumique après cuisson, 178
 - Vermiculite, 28
 - Vitesse de descente en température, 177
 - Vitesse de montée en température, 177
 - Vitesse dispersive, 211
 - Vitesse ultrasonique, 218
 - Vitrification, 171, 174, 175

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A.Chakchouk, B.Samet, and T.Mnif. Study on the potentiel use of tunisian clays as pozzolanic material. *Applied Clay Science*, 33 :79–88, mai 2006.
- [2] AFNOR. *Briques en terre cuite destinées à rester apparentes. NFP 13-304*.
- [3] AFNOR. *Spécification des éléments en maçonnerie. EN 777-1*.
- [4] Saeed Ahmari and Lianyang Zhang. Production of eco-friendly bricks from copper tailings through geopolymerization. *Construction and building materials*, 29(1) :323–331, avril 2012.
- [5] AID/csd-2164. *Laterite and lateritic soils and other problem soils of Africa*. Lyon associated,INC., Baltimore, Maryland, USA, juin 1971.
- [6] Lassaad Ajam, Mongi ben Ouezdou, H.S. Felfoul, and R.E. Mensi. Characterization of the tunisian phosphogypsum and its valorisation in clay bricks. *Construction and building materials*, 23 :3240–3247, mai 2009.
- [7] Muzahim Al-Mukhtar, Jean-Claude Touray, and Faïza Bergaya. Une argile modèle pour l'étude du gonflement des sols argileux : la laponite-na de synthèse. *Earth and Planetary Sciences*, 329(4) :239–242, août 1999.
- [8] Amer Ali Al-Rawas and Abdel Wahid Hago. Evaluation of field and laboratory produced burnt clay pozzolans. *Applied Clay Science*, 31(1) :29–35, Mai 2006.
- [9] A. Alami, M. Boulmane, M. Hajjaji, and S. Kacim. Chemico-mineralogical study of a moroccan clay. *Annales de chimie et sciences des matériaux*, 23(4) :173–176, Avril 1998.
- [10] Halil Murat Algin and Paki Turgut. Cotton and limestone powder wastes as brick material. *Construction and building materials*, 22(6) :1074–1080, juin 2008.

- [11] Robert J. Allison. A non-destructive method of determining rock strength. *Earth surface processes and landforms*, 13 :000–000, 1988.
- [12] Lucien Alviset. Matériaux de terre cuite. *Techniques de l'Ingénieur*, mai 1994.
- [13] Abdelhak Arib, Abdallah Sarhiri, Rédouane Moussa, Taoufik Remmal, and Moussa Gomina. Caractéristiques structurales et mécaniques de céramiques à base d'argiles : influence de la source de feldspath. *Comptes rendus Chimie*, 10(6) :502–510, juin 2007.
- [14] Marcel Arnould, Jean-Yves Boisson, and Ivan P. Ivanov. Les argiles bleues du cambrien inférieur de saint-petersbourg et leur fissuration. implication pour des stockages souterrains. *Comptes rendus Geoscience*, 334(16) :1135–1140, décembre 2002.
- [15] Association française de normalisation, Tour europe cedex 792049, Paris la défense. *Normalisation française*, 1990.
- [16] Association française de normalisation, Tour europe cedex 792049, Paris la défense. *Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la masse volumique des particules solides des sols : méthode du pycnomètre à eau*, octobre 1991.
- [17] Association française de normalisation, Tour europe cedex 792049, Paris la défense. *Sols : reconnaissance et essais. Détermination des caractéristiques de compactage d'un sol*, décembre 1993.
- [18] Association française de normalisation, Tour europe cedex 792049, Paris la défense. *Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg*, mars 1993.
- [19] Association française de normalisation, Tour europe cedex 792049, Paris la défense. *Sols : reconnaissance et essais. Essais à l'appareil triaxial de révolution*, octobre 1994.
- [20] Association française de normalisation, Tour europe cedex 792049, Paris la défense. *Sols : reconnaissance et essais. Essais à l'appareil triaxial de révolution : généralités-définitions*, octobre 1994.

- [21] Association française de normalisation, Tour europe cedex 792049, Paris la défense. *Sols : reconnaissance et essais. Essai oedométrique-Partie 1 : essai de compressibilité sur matériaux fins quasi saturés avec chargement par paliers*, décembre 1997.
- [22] K.-E Atcholi, E. Padayodi, J.C. Sagot, T. Beda, O. Samah, and J. Vantomme. Thermo-mechanical behaviour of the structures of tropical clays from togo (west africa) fired at 500°C, 850°C and 1060°C. *Construction and Building Materials*, 27(1) :141–148, février 2012.
- [23] Armelle Baldeyrou-Bailly. *Etude expérimentale et modélisation de la stabilité des phyllosilicates soumis à un fort gradient thermique. Test dans le contexte du site géothermique de Soultz-sous-Forêts*. PhD thesis, Ecole et observatoire des Sciences de la terre de Strasbourg, 2003.
- [24] Damien Pham Van Bang. *Comportement instantané et différé des sables des petites aux moyennes déformations : expérimentation et modélisation*. PhD thesis, Institut national des Sciences appliquées de Lyon, 2004.
- [25] Mihai Bann. *Mise en forme d'apatites nanocritiques nanocristallines : céramiques et ciments*. PhD thesis, Institut national polytechnique de Toulouse, 2005.
- [26] Giulia Baronio and Luigia Binda. Study of the pozzolanicity of some bricks and clays. *Construction and building materials*, 11(1) :41–46, Mai 1997.
- [27] Corinne Bauer-Plaindoux, Daniel Tessier, and Mehdi Ghoreychi. Propriétés mécaniques des roches argileuses carbonatées : importance de la relation calcite-argile. *Earth and Planetary Sciences*, 326(4) :231–237, février 1998.
- [28] Adel Benchabane. *Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles-polymères. Effets de l'ajout de polymères*. PhD thesis, Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 2006.
- [29] Yves Bensimon, Bruno Deroide, Monique Martineau, and Jean-Victor Zanchetta. Description de défauts paramagnétiques fondamentaux observés dans une argile brute : un indice pour la datation par rpe de céramique

- anciennes. *Comptes rendus de l'académie des sciences*, 2(2) :119–126, février 1999.
- [30] BOHI Zondjé Poanguy Bernadin. *Caractérisation des sols latéritiques utilisés en construction routière : Cas de la région de l'AGNÉBY (Côte d'Ivoire)*. PhD thesis, Ecole nationale des ponts et chaussées, 2008.
- [31] François Bigorre, Daniel Tessier, and Georges Pédro. Contribution des argiles et des matières organiques à la retention de l'eau dans les sols. signification et rôle fondamental de la capacité d'échange en cations. *Earth and Planetary Sciences*, 330(4) :245–250, février 2000.
- [32] Ndigui Billong, U.C.Melo, F. Louvet, and D. Njopwouo. Properties of compressed lateritic soil stabilized with a burnt clay-lime : effect of mixture components. *Construction and building materials*, 335 :175–183, 2008.
- [33] Hanifi Binici, Orhan Aksogan, Derya Bakbak, Hasan Kaplan, and Bilge Isik. Sound insulation of fibre reinforced mud brick walls. *Construction and building materials*, 23 :1035–1041, 2009.
- [34] Lilia Khalfallah Boudali, Abdelhamid Ghorbel, Hassen Amri, and François Figueras. Propriétés catalytiques de la montmorillonite intercalée au titane dans l'oxydation de l'alcool allylique (e)-hex-2-én-1-ol. *Comptes rendus de l'académie des sciences*, 4(1) :67–72, janvier 2001.
- [35] Pierre Boulin. *Expérimentation et modélisation du transfert d'hydrogène à travers des argiles de centre de stockage de déchets radioactifs*. PhD thesis, Institut polytechnique de Grenoble, 2008.
- [36] Nicolas Cabane. *Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation*. PhD thesis, Ecole Nationale supérieure des mines de Saint-Etienne, 2004.
- [37] C.Cherubini, F. Paccapelo, and F.P. Ramunni. Compressibility behaviour of remoulded, finegrained soils and correlation with index properties : discussion. *Canadian Geotechnical Journal*, 38 :1152–1153, octobre 2001.
- [38] Robert Charlier. *Cours de mécanique des roches et ouvrages souterrains*. Université de Liège, 2004-2005.

- [39] Robert Charlier. Mécanique des sols, routes, fondations et soutènements. note de cours, 2004-2005.
- [40] C.H.Benson, D.E. Daniel, and G.P.Boutwell. Field performance of compacted clay liners. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 125(5) :390–403, mai 1999.
- [41] Michel Chouteau and Bernard Giroux. Géophysique appliquée ii : Méthodes sismiques. Note de Cours de l'école polytechnique de Montréal, 2005.
- [42] Gérard Cougny. Spécifications sur les matières premières argileuses pour la fabrication de granulats légers expansés. *Bulletin de l'association internationale de géologie de l'ingénieur*, 63(41) :47–55, Avril 1990.
- [43] Philippe Coussot, Claude Gauthier, and Djaouida Nadji. Critère d'instabilité du front de retrait lors du séchage lent d'une suspension d'argile dans un dièdre. *Comptes rendus de l'académie des sciences/Physicochimie*, 326(12) :919–926, juin 1998.
- [44] Jean-François Couvreur. *Propagation d'ondes ultrasoniques dans des roches sédimentaires : étude de l'endommagement par traitement des signaux*. PhD thesis, Université Catholique de Louvain, 2007.
- [45] Jean-François Couvreur and Jean-François Thimus. The properties of coupling agents in improving ultrasonic transmission. *International Journal of Rock Mechanics , Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 33(4) :417–424, juin 1996.
- [46] G. Cultrone, E. Sebastian, O. Cazalla, and M. Nechar. Ultrasound and mechanical tests combined with anova to evaluate brick quality. *Ceramics international*, 27(4) :401–406, juin 2001.
- [47] G. Cultrone, E. Sebastian, and M.J. de la Torre. Mineralogical and physical behaviour of solid bricks with additives. *Construction and Building Materials*, 19(1) :39–48, février 2005.
- [48] Institut Belge de normalisation. Briques de parement en terre cuite. Avril 1986.

- [49] Institut Belge de normalisation. Briques de terre cuite destinées à la maçonnerie non décorative. Février 1991.
- [50] Unité de pilotage du processus DSRP en RDC. Monographie de la province du kasaï oriental. Mars 2005.
- [51] Christine Decaestecker and Marco Saerens. Cours de statistiques exploratoires multidimensionnelle. ULB et UCL, 2005-2006.
- [52] Karine Devineau. *Déstabilisation haute température des poudres granitiques : Evolution des propriétés minéralogiques et physiques*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2002.
- [53] Luc Dormieux, Eric Lemarchand, and Julien Sanahuja. Comportement macroscopique des matériaux poreux à microstructure en feuillets. *Comptes rendus Mécanique*, 334(5) :304–310, mai 2006.
- [54] C. Duby and S. Robin. *Analyse en composantes principales*. Institut National Agronomique Paris-Grignon, 2006.
- [55] Michel Dumont. *Argiles*. Annuaire des minéraux du Canada, 2003.
- [56] Emma Errais. *Réactivité de surface d'argiles naturelles. Etude de l'adsorption de colorants anioniques*. PhD thesis, Université de Strasbourg, 2011.
- [57] German Appropriate Technology Exchange. *Clay Brick and Tile Moulding Equipment*. Division of the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit., 1991.
- [58] Nathalie FAGEL. Cours de géologie des argiles. note de cours de l'Université de Liège, 2005-2006.
- [59] Dominique Fourmaintraux. *La mécanique des roches appliquée aux ouvrages de génie civil*. Association amicale des ingénieurs anciens de l'ENPC, 1976.
- [60] Comité français de mécanique des roches. *Manuel de mécanique des roches. Tome 1 : Fondements*. Ecole des mines de Paris, 2000.
- [61] Comité français de mécanique des roches. *Manuel de mécanique des roches. Tome 2 : Les applications*. Ecole des mines de Paris, 2004.

- [62] F.Z.Aissiou and A.Nechnech. Comportement des sols gonflants algérois par incorporation de chaux : Cas de ouled fayet et chéraga. In *2nd International Conference on geotechnical Engineering*, pages 265–274, Hammamet, Tunisie, octobre 2010.
- [63] M. Vonclooster B. Delvaux G. Pochet, M. Van der Velde. Hydric properties of high charge, halloysitic clay soils from tropical south pacific region. *Geoderma*, 138 :96–109, 2007.
- [64] A. Gannouni, A. Bellagi, and M. Bagane. Préparation d’une argile activée pour la décoloration de l’huile d’olive. *Annales de chimie science des matériaux*, 24(6) :407–416, juin 1999.
- [65] Nejmeddine Gasmi, Muzahim Al-Mukhtar, Najia Kbir Ariguib, and Faïza Bergaya. La nature du cation compensateur et le comportement rhéologique des argiles : une dépendance intime. *Comptes rendus de l’académie des sciences/Sciences de la terre et des planètes*, 330(6) :385–390, mars 2000.
- [66] Claude Gauthier, Philippe Coussot, and Djaouida Nadji. Instabilité du front de retrait lors du séchage d’une suspension d’argile dans un empilement granulaire. *Comptes rendus de l’académie des sciences/Physicochimie*, 326(11) :767–774, novembre 1998.
- [67] Naima Gherbi. *Etude expérimentale et identification des cations métalliques par des matériaux naturels*. PhD thesis, Faculté des Sciences de l’Ingénieur d’Algérie, 2008.
- [68] Service géologique. *Notice explicative des feuilles de Luiza et Musodi (Partie orientale)*. Musée Royal d’Afrique Centrale, 1964.
- [69] Service géologique. *Notice explicative de la feuille de Dibaya*. Musée Royal d’Afrique Centrale, 1966.
- [70] Service géologique. *Feuille de Luiza et Musodi (partie orientale) : S8/22 (S8/21)*. Musée Royal d’Afrique Centrale, 1979.
- [71] Service géologique. *Feuille de Mbujimayi (S7/23)*. Musée Royal d’Afrique Centrale, 1979.

- [72] Service géologique. *Notice explicative de la feuille de Mbujimayi*. Musée Royal d'Afrique Centrale, 1979.
- [73] William H. Hendershot and Martin Duquette. A simple barium chloride method for determining cation exchange capacity and exchangeable cations. *Soil Science society of America Journal*, 50(3) :605–608, août 1986.
- [74] Robert D. Holtz and William D. Kovacs. *Introduction à la géotechnique*. Presses internationales polytechnique, 1991.
- [75] International Labour Office (ILO). *Small scale brickmaking*. Genève, 1984.
- [76] INORPI. *Spécification des éléments en maçonnerie*. NT 21-287.
- [77] International Soil reference and Information Centre, 6700 AJ Wageningen, The Netherlands. *Procedures for soil analysis*, 2002.
- [78] Fakher Jamoussi, Mourad Bédir, Noureddine Boukadi, Samir Kharbachi, Fouad Zargouni, Alberto Lopez-Galindo, and Hélène Paquet. Répartition des minéraux argileux et contrôle tectono-eustatique dans les bassins de la marge tunisienne. *Geoscience*, 335 :175–183, 2003.
- [79] Fakher Jamoussi, Mourad Bédir, Noureddine Boukadi, Samir Kharbachi, Fouad Zargouni, Alberto Lopez-Galindo, and Hélène Paquet. Répartition des minéraux argileux et contrôle tectono-eustatique dans les bassins de la marge tunisienne. *Comptes rendus Geoscience/Géomatériaux*, 335(2) :175–183, janvier 2003.
- [80] Oriane Jenck. *Le renforcement des sols compressibles par inclusions rigides verticales. modélisation physique et numérique*. PhD thesis, Institut national des Sciences appliquées de Lyon, 2005.
- [81] E. Joussein, S. Petit, J. Churchman, B. Theng, D. Righi, and B. Delvaux. Halloysite clay minerals- a review. *Clay minerals*, 40 :383–426, juillet 2005.
- [82] Nevila Jozja. *Etude de Matériaux Argileux Albanais. Caractérisation Multi-échelle d'une bentonite magnésienne. Impact de l'interaction avec le nitrate de plomb sur la perméabilité*. PhD thesis, Université d'Orléans, 2003.

- [83] K.H.Head. *Manual of Soil laboratory testing : Soil Classification and Compaction Tests*, volume 1. ELE International Limited, 1980.
- [84] K.H.Head. *Manual of Soil laboratory testing : Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests*, volume 2. ELE International Limited, 1981.
- [85] K.H.Head. *Manual of Soil laboratory testing : Effective stress tests*, volume 3. ELE International Limited, 1985.
- [86] K.J.Osinubi and C.M.O.Nwaiwu. Hydraulic conductivity of compacted lateritic soil. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(8) :1034–1041, août 2005.
- [87] Laboratoire central des ponts et chaussées, 58, Boulevard Lefebvre-75732 Paris Cedex 15-France. *Réalisation des remblais et des couches de forme :Principe Généraux*, septembre 1992.
- [88] structures et génie civil Laboratoire d’essais mécaniques. Détermination de la teneur en matières organiques (à l’eau oxygénée) sur un échantillon de sol selon nbn 589-207. Dossier technique, juin 2005.
- [89] structures et génie civil Laboratoire d’essais mécaniques. Essai à l’acide chlorhydrique sur un échantillon de sol selon nbn 589-209. Dossier technique, juin 2005.
- [90] Laboratoire d’essais mécaniques, structures et génie civil, Université Catholique de Louvain. *Dossier Technique*.
- [91] G.L. Lecomte-nana, E. Lesueur, J.P.Bonnet, and G.Lecomte. Characterization of a lateritic geomaterial and its elaboration through a chemical route. *Construction and building materials*, 23 :1126–1132, 2009.
- [92] Philippe Leroy. *Transport ionique dans les argiles. Influence de la micro-structure et des effets d’interfaces. Application aux argilites du site de Bure (Meuse/Haute Marne)*. PhD thesis, Université Paul Cezanne, 2005.
- [93] Gilles Leturcq, Gilles Berger, Thierry Advocat, Jacques Lacombe, and Eric Vance. Altération en présence d’argile humide à 70°de céramiques à base de ti et zr, de type synroc. *Comptes rendus de l’académie des sciences*, 327(12) :827–831, décembre 1998.

- [94] G.G. Litvan. Determination of firing temperature of clay brick. *American Ceramic Society Bulletin*, 63(4) :617–618,627, avril 1984.
- [95] L.Mbumbia, A. Mertens de Wilmars, and J. Tirlocq. Performance characteristics of lateritic soil bricks fired at low temperatures : a case study of cameroon. *Construction and building materials*, 14 :121–131, février 2000.
- [96] L.R.Blots, C.H.Benson, and G.P.Boutwell. Estimating optimum water content and maximum dry unit weight for compacted clays. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 124(9) :907–912, septembre 1998.
- [97] Umarany Mahalinga-Iyer and David J. Williams. Properties and performance of lateritic soil in road pavements. *Engineering Geology*, 46(2) :71–80, mai 1997.
- [98] R. Maignien. Programme de recherche sur la zone tropicale humide : compte-rendu des recherches sur les latérites. UNESCO/NS/HT/125, juin 1964.
- [99] Lucio Di Matteo, Federica Bigotti, and Remo Ricco. Best-fit models to estimate modified proctor properties of compacted soil. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 135(7) :992–996, juillet 2009.
- [100] Benoît Le Maux. Le choix de l'échantillon : statistiques, logiciels et enquête. note de cours / Université de Rennes 1 - CREM - CNRS, 2005-2006.
- [101] Laurent MBUMBIA. *Etude de l'évolution des transformations thermiques des phases minérales des latérites de Yaoundé en vue de la modélisation d'un four à basse température de cuisson*. PhD thesis, Université Catholique de Louvain, 2002.
- [102] O.P. Mehra and M.L. Jackson. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In *Seventh National Conference on clays and clay minerals*, pages 317–327, Washington, USA, octobre 1958.
- [103] Abdessalam Mekhermeche. *Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la*

- restauration des Ksours sahariennes*. PhD thesis, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2012.
- [104] Lakhdar Mekki. *Méthodologie d'étude et techniques d'identification des paramètres de comportement des sols fins soumis à des cycles de secheresse prolongée (Application aux argiles expansives de M'Sila)*. PhD thesis, Université Mohamed Boudiaf de M'Sila, 2002.
- [105] Alain Meunier. *ARGILES*. Scientifiques gb edition, 2002.
- [106] G. Moges, F. Zewge, and M. Socher. Preliminary investigations on the defluoridation of water using fired clay chips. *Journal of African Earth Sciences*, 21(4) :479–482, mars 1996.
- [107] Jean-Claude Morel, Abalo Pkla, and Peter Walker. Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 21 :303–309, 2007.
- [108] M.Perrin. Cours de microscopie électronique à balayage et microanalyse. Université de Rennes 1, 2005-2006.
- [109] Denis Myriam. *Le matériau terre. Compactage, comportement, application aux structures en blocs de terre*. PhD thesis, Institut national des Sciences appliquées de Lyon, 1994.
- [110] El Yakoubi Nadia, Aberkan M'hamed, and Ouadia Mohamed. Potentialité d'utilisation d'argiles marocaines de jbel kharrou dans l'industrie céramique. *Geoscience*, 338 :693–702, 2006.
- [111] Mazen N.Al-Amaireh. Production of fire-clay refractory bricks from local materials. *European Journal of Scientific Research*, 26(3) :386–392, Mai 2009.
- [112] Thê-Duong Nguyen. *Etude du comportement au feu des maçonneries de briques en terre cuite : Approche expérimentale et modélisation du risque d'écaillage*. PhD thesis, Université Paris-Est, 2009.
- [113] Thê-Duong Nguyen, Fékri Meftah, and Thi-Bich-Hâu Nguyen. Etude expérimentale et modélisation du choix de la géométrie des corps d'épreuve en terre cuite sur son comportement mécanique. In *19^{me} congrès Français de la Mécanique*, Marseille, France, août 2009.

- [114] Daniel Njopwouo. *Etude minéralogique comparée de quelques sols tropicaux sur granites*. PhD thesis, Université Paris VII, 1976.
- [115] Marcin Paszkuta, Maria Rosanne, and Pierre M. Adler. Transport coefficients of saturated compact clays. *Comptes Rendus Geoscience*, 338(12-13) :908–916, octobre 2006.
- [116] Lemougna Ninla Patrick. *Contribution à la diminution des casses dans la production des briques de terre cuite à PROMOBAT*. PhD thesis, Université de Yaoundé I, 2004.
- [117] Raymond Peltier. *Manuel du laboratoire routier*. Dunod, Paris, 1959.
- [118] Vimane Phoummavong. Matériaux de construction. Cours en ligne, 2003.
- [119] Abalo P’Kla. *Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée(BTC) :Application aux maçonneries ”BTC-Mortier de terre”*. PhD thesis, Institut national des Sciences appliquées de Lyon, 2002.
- [120] P.Leroy and A.Revil. A triple-layer model of the surface electrochemical properties of clay minerals. *Journal of colloid and interface Science*, 270(1) :371–380, Mai 2004.
- [121] I.N. Prassianakis and N.I. Prassianakis. Ultrasonic testing of non-metallic materials : concrete and marble. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 42(2) :191–198, mars 2004.
- [122] Chantal Proust, Agnès Jullien, and Lydie Le Forestier. Détermination indirecte des limites d’atterberg par gravimétrie dynamique. *Comptes rendus Geoscience/Géomatériaux*, 336(14) :1233–1238, novembre 2004.
- [123] Marc Reinholdt. *Synthèse en milieu fluoré et caractérisation de phyllosilicates de type Montmorillonite. Etude structurale par spectroscopie d’absorption des rayons X et résonance magnétique nucléaire*. PhD thesis, Université de Haute Alsace, 2001.
- [124] El Houssain Rochdi, Vincent Picandet, and Sofiane Amziane. Perméabilité des pâtes de ciment à l’état frais. In *25^e rencontre de l’AUGC*, Bordeaux, 2007.

- [125] Mazen Samara, Zoubeir Lafhaj, and Christophe Chapiseau. Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks : factory scale experiment. *Journal of hazardous materials*, 163(2-3) :701–710, avril 2009.
- [126] Jean Shimatu, Jean-François Thimus, and Jean-Pierre Tshibangu. Caractérisation géotechnique des sols argileux destinés aux matériaux de construction cuits : cas de la province du kasaï oriental en république démocratique du congo. In *2nd International Conference on geotechnical Engineering*, pages 767–776, Hammamet, Tunisie, octobre 2010.
- [127] Jean Shimatu and Krier William. Recherche bibliographique au musée d’afrique centrale à tervuren. Rapport interne/PIC-MCK, 2007.
- [128] Paul Sérgio Lima Souza and Denise C. Dal Molin. Viability of using calcined clays, from industrial by-products, as pozzolans of high reactivity. *Cement and concrete research*, 35 :1993–1998, mars 2005.
- [129] Nabil Sultan, Pierre Delage, and Yu Jun Cui. Comportement thermomécanique de l’argile de boom. *Comptes rendus de l’académie des sciences/Milieus granulaires, sols, milieux poreux*, 328(6) :457–463, mars 2000.
- [130] J.M. Tacnet, PH. Gotteland, A. Bernard, G. Mathieu, and C. Deymier. Mesures des caractéristiques géotechniques des sols grossiers. application aux sols de torrent. *Geoscience*, 335 :175–183, 1999.
- [131] J.M. Tacnet, Ph. Gotteland, A. Bernard, G. Mathieu, and C. Deymier. Mesures des caractéristiques géotechniques des sols grossiers. application aux sols de torrent. mars 1999.
- [132] Yves Tardy, Joëlle Duplay, and Arnault Lassin. Energies d’hydratation et stabilité thermodynamique des minéraux argileux. i. cas d’une argile fictive moyenne. *Comptes rendus de l’académie des sciences/Sciences de la terre et des planètes*, 332(4) :251–257, février 2001.
- [133] Idrissa Tockol. *Contribution à l’étude des graveleux latéritiques dans les pays du sahel : cas des routes non revêtues*. PhD thesis, Université de Moncton : Canada, 1993.

- [134] Carol Tosaya and Amos Nur. Effects of diagenesis and clays on compressional velocities in rocks. *Geophysical research letters*, 9(1) :5–8, janvier 1982.
- [135] Christophe Tournassat, Yves Chapron, Philippe Leroy, Mohamed Bizi, and Faïza Boulahya. Comparison of molecular dynamics simulations with triple layer and modified gouy-chapman models in a 0.1m nacl-montmorillonite system. *Journal of colloid and interface Science*, 339(1) :533–541, Mai 2009.
- [136] Karfa Traoré, Philippe Blanchard, Jean-Paul Jernot, and Moussa Gomina. Caractérisation physicochimique et mécanique de matériaux céramiques obtenus à partir d’une argile kaolinitique du burkina faso. *Comptes Rendus Chimie*, 10(6) :511–517, mars 2007.
- [137] Samuel U.Ejezie. Behavior of laterite in geotechnical engineering practice in tropical africa (nigeria as case study). In *2nd International Conference on geotechnical Engineering*, pages 175–188, Hammamet, Tunisie, octobre 2010.
- [138] G. Vasconcelos, P.B. Lourenço, C.A.S. Alves, and J. Pamplona. Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites. *Ultrasonics*, 48(5) :453–466, septembre 2008.
- [139] Gioacchino Viggiani, Nicolas Lenoir, Pierre Bésuelle, Marco Di Michiel, Stefania Mareello, Jacques Desrues, and Mogens Kretzschmer. X-ray microtomography for studying localized deformation in fine-grained geomaterials under triaxial compression. *Comptes rendus Mécanique*, 332(10) :819–826, octobre 2004.
- [140] M Vincent, J.Bouchut, J-M.Fleureau, F.Masrouri, E.Oppenheim, J-V.Heck, N.Ruaux, S.Le Roy, I.Dubus, and N.Surdyk. Etude de déclenchement du retrait-gonflement des sols argileux et interactions avec le bâti. BRGM/RP-54862-FR, octobre 2006.
- [141] Michel Vénuat. *Le traitement des sols à la chaux et au ciment*. Michel Vénuat, 23, rue de cronstadt-75015 Paris, janvier 1980.

-
- [142] Chih-Huang Weng, Deng-Fong Lin, and Pen-Chi Chiang. Utilization of sludge as brick materials. *Advances in Environmental Research*, 7 :679–685, 2003.
- [143] Millogo Younoussa, Traoré Karfa, Ouedraogo Raguilnaba, Kaboré Kalsibiri, Blanchard philippe, and Thomassin Jean Hugues. Geotechnical, mechanical, chemical and mineralogical characterization of a lateritic gravels of sapouy (burkina faso) used in road construction. *Construction and building materials*, 22 :70–76, 2008.