

REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE

Union – Discipline – Travail

ANNEE UNIVERSITAIRE 2006-2007

Ministère de l'Enseignement Supérieur
de la Recherche et Scientifique



UNIVERSTE DE COCODY

Numéro d'ordre 502/2007



UFR des Sciences de la Terre et
des Ressources Minières

Laboratoire de Géologie Appliqué/Géomatériaux

THESE

Présentée à l'UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières de

L'UNIVERSITE DE COCODY

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR EN GEOLOGIE APPLIQUEE

Spécialité: GEOMATERIAUX

Par :

ASSANDE Aka Alexandre

VALORISATION DES LATERITES DE COTE
D'IVOIRE : FABRICATION DE BRIQUETTES
DE PAREMENT A BASE DE LATERITE
STABILISEE A FROID A L'AIDE D'UN LIANT
HYDRAULIQUE :
LE CIMENT PORTLAND

Soutenue publiquement le 30 août 2007 devant le jury composé de :

Jury :

Pr. BIEMI JEAN.....Professeur, Université Cocody.....Président

Pr. ASSA AYEMOU..... Professeur, Université CocodyDirecteur

Pr. AKA KOUAME..... Professeur, Université CocodyExamineur

Pr. POTHIN KOFFI BLE.....Maître de Conférences, Université Cocody.....Rapporteur

Dr. EMERUWA EDJIKEME...Maître-Assistant, Université Cocody.....Examineur

DEDICACES

A mon père

KOUADIO Assandé Augustin

A ma mère

AKA Tanoh Martine

A mes fils

ASSANDE oi Assandé Rodrigue-Fernandez

et

ASSANDE Kouadio Jean Romuald-Emmanuel.

« Fais-moi dès le matin entendre ta bonté ! Car je me fie à toi. Fais-moi
Connaître le chemin où je dois marcher ! Car j'élève à toi mon âme. »

Sainte Bible (Louis segond)

Psaumes 143-8.

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce travail a été possible grâce à l'appui et à la compréhension de plusieurs personnes que nous prions de trouver ici, l'expression de notre profonde gratitude.

*Je tiens à remercier le Professeur **ASSA Ayemou**, mon Directeur de thèse, pour sa disponibilité et l'encadrement tout particulier dont je suis l'objet.*

*Mes remerciements vont aussi à l'endroit du Docteur **AGHUI N'guessan**, Directeur du Laboratoire de Pédologie et de Géologie Appliquée dont je suis un étudiant pour sa disponibilité et ses conseils.*

*Je remercie tout particulièrement Docteur **EMERUWA Edjikeme**, mon co-directeur de thèse, chargé de la formation dans l'option géomatériaux. Je lui adresse ces remerciements tout particuliers car il a été durant toute la durée de ce travail, disponible pour l'appréciation des résultats et l'orientation de la suite des travaux. Il n'a en plus, ménagé aucun effort à mettre à notre disposition son entreprise ainsi que son personnel pour les manipulations.*

*Je suis aussi hautement sensible à la marque de fraternité que Docteur **BOFFOUE Moro Olivier** a entretenue et continue d'entretenir avec nous les étudiants de l'équipe de Géomatériaux. Car, il a toujours répondu présent quant nous avons besoin de ses conseils et même pendant les périodes de congés, il n'a pas un seul moment hésité de nous recevoir à domicile pour les travaux et participer lui-même aux manipulations. Nous ne saurions le*

remercier autant pour son aide parce qu'il a su toujours trouver les mots nécessaires pour nous remettre au travail quant il le fallait.

*Mes remerciements vont aussi à l'endroit de Docteur **KOUAKOU Conand Honoré** qui a été tout le temps avec nous malgré ses occupations pendant tout ce travail.*

*J'adresse mes vifs remerciements à tous les professeurs de l'UFR-STRM (Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières) pour leur contribution à l'interprétation et à la rédaction de mon mémoire de thèse. Je voudrais en particulier exprimer ma gratitude au Professeur **BIEMI Jean**, Doyen de l'UFR-STRM, au Professeur **AKA Kouamé** ex-Doyen de l'UFR-STRM, au Professeur **Pothin KABRAN**, pour son aide dans la réalisation de ce mémoire. Je voudrais aussi dire merci à Docteur **COULIBALY Yacouba**, pour son aide au cours de l'exécution de cette étude et la rédaction de ce mémoire de thèse. Je suis particulièrement sensible à l'intérêt qu'ils m'ont toujours témoigné ainsi qu'à la confiance qu'ils m'ont accordée.*

Ce travail doit beaucoup à la collaboration de plusieurs structures :

*- le L.B.T.P. (Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics) ; je remercie son Directeur Docteur **MENIN Messou**, monsieur **SORO Souleymane**, Ingénieur des Travaux Publics, chef du service matériaux, le Docteur **KOUAKOU Amédé** Chef du service recherche et tout son personnel pour leur apport inestimable dans l'exécution des tests sur mes briquettes de parement.*

*- le Laboratoire de Physique des Matériaux à l'Ecole des Mines de Nancy ; je tiens à remercier le Docteur **Anne DAUSCHER**, le Docteur **Bertrand LENOIR** et Monsieur **Olivier DEVISME** au laboratoire*

LSG2M pour leur participation hautement appréciable dans l'exécution de certains essais.

*- l'entreprise SOMATED ; je remercie son Directeur le Docteur **EMERUWA Edjikeme** et son personnel pour avoir mis à ma disposition les presses pour la confection de mes briquettes de parement et m'avoir accepté dans sa structure durant les quatre ans qu'ont duré mes travaux.*

*J'exprime ma profonde gratitude au Docteur **SANDE Oladele**, Enseignant-chercheur à l'INPHB de Yamoussoukro (Institut National Polytechnique Houphouët Boigny), spécialiste du béton pour son jugement scientifique dont il m'a fait profiter lors de discussion.*

*Toute ma gratitude à mes amis étudiants de l'équipe géomatériaux ; **KOUADIO Koffi Clément**, **OUATTARA Souleymane** et **BITTY Kouamé** pour l'ambiance très fraternelle et l'unité qui règnent au sein de l'équipe et qui ont rendu très agréables toutes ces années passées ensemble.*

Je tiens à assurer de ma sincère reconnaissance à tout le personnel et amis de l'UFR-STRM.

*Mes remerciements à mes parents à qui je dédie cette thèse car sans eux cela n'aurait pas été possible. M. et Mme **ASSANDE** ont toujours répondu présent lorsque j'avais besoin d'eux. Ils m'ont soutenu moralement et financé toutes mes études. Je vous aime de tout mon cœur.*

*Toute ma gratitude à mes frères et sœurs **KOUADIO Kouadou Anatole**, **ASSANDE Akassi Rose** et **KOUADIO Photo Valentin**, les enfants **ASSANDE** et **KOUADIO**, à mes cousins et cousines.*

*J'adresse mes vifs remerciements à mesdemoiselles **N'DRI Akalé Joachime** et **GOGOUA Sandrine** qui m'ont soutenu à tous les niveaux durant toute cette période.*

*Mes remerciements spéciaux à **M. ADOMAN Kouamé Jean-Vital**, **M. ASSANVO Georges Ettien** et **M. AKRE Krakou Samson** pour leur encouragement et leur aide durant toutes ces années.*

*Je remercie aussi tous mes amis de la **M.U.P.A.C.** (Mutuelle du Personnel de Aimé Césaire) et de la **MUEPA** (Mutuelle des Enseignants et du Personnel Administratif d'ANADOR-YOPOUGON).*

Enfin, je rends grâce à Dieu pour son Esprit Saint qui m'a donné la force, la sagesse et le courage nécessaires pour mener à son terme cette étude.

TABLE DES MATIERES

	Pages
DEDICACE	i
REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES ABREVIATIONS	x
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES TABLEAUX	xiv
INTRODUCTION GENERALE	1

CHAPITRE I:

I-1- Généralités sur la Côte d'Ivoire.....	6
I-1-1- Bref aperçu de la géologie de la Côte d'Ivoire.....	6
I-1-1-1- Socle.....	7
I-1-1-2- Bassin sédimentaire.....	7
I-2- Définitions.....	8
I-2-1- Géomatériaux.....	8
I-2-2- Quelques exemples.....	8
I-2-2-1- Argiles.....	8
I-2-2-2- Agrégats.....	9
I-2-2-3- Latérites.....	9
I-2-2-3-1- Historique de définition.....	9
I-2-2-3-2- Du point de vue génétique et minéralogique.....	11
I-2-2-3-3- Du point de vue géotechnique.....	11
I-2-2-3-4- Conditions de formation de la latérite.....	12
I-2-2-3-4-1- Climat.....	12
I-2-2-3-4-2- Topographie.....	14
I-2-2-3-4-3- Géologie.....	14
I-2-2-3-5- Caractéristiques des latérites.....	15
I-2-2-3-5-1- Morphologies.....	15
I-2-2-3-5-2- Structure.....	17
I-2-2-3-5-3- Caractéristiques physiques.....	19

I-2-2-3-5-3-1- Granulométrie.....	19
I-2-2-3-5-3-2- Poids spécifique des grains solides	25
I-2-2-3-5-4- Caractéristiques géotechniques.....	26
I-2-2-3-5-4-1- Limites d'Atterberg.....	26
I-2-2-3-5-4-2- Caractéristiques de compactage mécanique.....	27
I-2-2-3-6- Utilisation des latérites.....	28
I-2-2-3-6-1- Dans le domaine minier.....	28
I-2-2-3-6-2- Dans le domaine de la construction.....	28
I-3- Liants hydrauliques.....	32
I-3-1- Ciment.....	32
I-3-1-1- Types de ciment.....	34
I-3-2- Chaux.....	36
I-3-2-1- Types de chaux.....	36
I-3-3- Bitume	37
I-3-4- Résines	37
Conclusion partielle.....	38

CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Introduction.....	40
II-1- Matières premières et technique de caractérisation de la latérite de Dabou.....	40
II-1-1- Matières premières.....	40
II-1-1-1- Ciment.....	40
II-1-1-2- Eau.....	41
II-1-1-3- Latérite.....	42
II-1-2- Techniques de caractérisation de la latérite de Dabou.....	43
II-1-2-1- Examen visuel.....	44
II-1-2-2- Essai de l'odeur.....	44
II-1-2-3- Essai de morsure.....	44
II-1-2-4- Essai de toucher.....	44
II-1-2-5- Essai de lavage.....	45

II-1-2-6- Analyses géotechniques.....	45
II-1-2-6-1- Analyse granulométrique.....	45
II-1-2-6-2- Limites d'Atterberg.....	46
II-1-2-6-3- Poids spécifique et surface spécifique.....	47
II-1-2-7- Analyses chimiques.....	48
II-1-2-7-1- Fluorescence aux rayons X.....	48
II-1-2-7-2- Calcination.....	48
II-1-2-8- Analyse minéralogique.....	49
II-1-2-8-1- Diffraction des rayons X.....	49
II-1-2-8-2- Analyses thermiques (thermogravimétrie et thermodifférentielle).....	50
II-1-2-8-3- Observation au MEB.....	51
II-2- Elaboration des briquettes.....	53
II-2-1- Préparation.....	53
II-2-2- Façonnage.....	54
II-2-2-1- Mélange.....	54
II-2-2-2- Dosage en eau.....	55
II-2-2-3- Gâchage.....	55
II-2-2-4- Malaxage.....	55
II-2-3- Moulage, compactage et démoulage.....	55
II-2-3-1- Moulage manuel.....	55
II-2-3-2- Moulage par vibro-compactage.....	56
II-2-3-3- Moulage par la presse manuelle à compactage statique de type TERSTARAM.....	57
II-2-3-4- Presse à pastille réglable.....	58
II-2-4- Séchage.....	59
II-3- Caractérisation des mélanges latérite-ciment comprimé.....	59
II-3-1- Etude de la pâte de latérite-ciment.....	60
II-3-1-1- Test de consistance.....	60
II-3-1-2- Test de cigare.....	60
II-3-1-3- Test de retrait.....	60
II-3-1-4- Maniabilité.....	61
II-3-2- Caractérisation des briquettes.....	62
II-3-2-1- Essai de variation dimensionnelle.....	63

II-3-2-1-1– Retrait de séchage.....	63
II-3-2-1-2– Evaporation.....	63
II-3-2-2- Essai de caractérisation mécanique.....	64
II-3-2-2-1- Résistance à la flexion.....	64
II-3-2-2-2 – Essai d’usure.....	65
II-3-2-3- Essai de caractérisation physique.....	67
II-3-2-3-1- Mesure de la porosité par saturation à l’eau.....	67
II-3-2-3-2- Essai d’absorption capillaire d’eau.....	68
II-3-2-3-3- Mesure de la perméabilité à l’eau.....	69
II-3-2-3-4- Mesure de la densité hydrostatique.....	70
Conclusion partielle.....	71

**CHAPITRE III : CARACTERISATION DE LA LATERITE
DE DABOU**

Introduction.....	73
III-1- Etude sur le terrain.....	73
III-1-1- Description des couches.....	74
III-1-2- Analyses des résultats d’essais effectués sur le terrain.....	77
III-1-2-1– Examen visuel.....	77
III-1-2-2 – Essai d’odeur.....	78
III-1-2-3 – Essai de morsure.....	78
III-1-2-4 – Essai de toucher.....	79
III-1-2-5 – Essai de lavage.....	79
III-2- Etude au laboratoire.....	79
III-2-1- Analyse granulométrique.....	80
III-2-2- Limites d’Atterberg.....	83
III-2-3- Composition minéralogique.....	86
III-2-3-1- Diffraction aux rayons X.....	86
III-2-3-2- Analyses thermiques.....	87
III-2-3-2-1- A.T.D. (Analyse Thermo-Différentielle).....	90
III-2-3-2-2- T.G. (Thermo-Gravimétrie).....	91
III-3- Propriétés spécifiques de la couche N°2.....	92
III-3-1- Essai Proctor.....	93

III-3-2- Propriétés chimiques.....	94
III-3-3- Teneur en matière organique.....	95
III-3-4- Choix du stabilisant.....	96
Conclusion partielle.....	97

CHAPITRE IV : CARACTERISATION DES BRIQUETTES DE PAREMENT LATÉRITE-CIMENT

Introduction.....	99
IV-1- Influence du rapport eau ciment sur la nature de la pâte de latérite.....	99
IV-1-1- Influence de la quantité d'eau sur la maniabilité des pâtes latérite-ciment...	99
IV-1-2- Détermination de la quantité d'eau à maniabilité constante.....	101
IV-2- Influence du type de presse et du ciment sur les briquettes de parement.....	104
IV-2-1- Etude de la variation dimensionnelle.....	104
IV-2-1-1-Retrait.....	104
IV-2-1-2-Evaporation.....	106
IV-2-2- Etude de la densité hydrostatique.....	108
IV-2-3- Etude de la résistance à la flexion.....	109
IV-3- Influence du ciment sur les performances mécaniques des briquettes de parement à base de latérite-ciment.....	111
IV-3-1- Détermination de la teneur idéale de ciment.....	112
IV-3-1-1- Effet du ciment sur la résistance à la flexion.....	112
IV-3-1-2- Sensibilité à l'eau.....	114
IV-3-1-3- Comportement à l'eau.....	116
IV-3-1-4- Comparaison avec d'autres matériaux.....	118
IV-3-2- Vieillessement des briquettes de parement.....	118
IV-3-2-1- Porosité ouverte.....	119
IV-3-2-2- Coefficient d'absorption.....	120
IV-3-2-3- Observation au Microscope Electronique à Balayage (M.E.B.).....	121
IV-3-2-4- Résistance à l'usure.....	123
IV-3-2-5- Schéma explicatif du rôle du ciment dans la stabilisation des briquettes de parement	125
IV-3-3- Effet du ciment sur la coloration des briquettes de parement.....	126

Conclusion partielle.....	128
CONCLUSION GENERALE.....	130
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	133
ANNEXE.....	142
PUBLICATION	164

LISTE DES ABREVIATIONS

- A.F.N.O.R** : Association Française de Normalisation
- A.I.P.C.R** : Association Internationale Permanente des Congrès de la Route
- C.B.R** : Californian Bearing Ratio
- C.P.A** : Ciment Portland Artificiel
- C.P.O** : Ciment Portland Ordinaire
- F** : teneur en fines
- H.R.B**: Highway Research Board
- I.P**: Indice de Plasticité
- L.A**: Limites d'Atterberg
- L.B.T.P**: Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics
- L.P.C**: Laboratoire des Ponts et Chaussées français
- U.F.R**: Unité de Formation et de Recherche
- S.T.R.M**: Sciences de la Terre et des Ressources Minières
- SODECI**: Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire
- U.S.C.D**: Unifield Soil Classification System
- Wl ou .L.P** : Limite de Liquidité
- Wp ou L.P** : Limite de plasticité
- J.C.P.D**: Joint Committee for Powder Diffraction
- p.c.**: Pourcentage
- L.S.G.2M.** :Laboratoire des Sciences de Génie Mécanique et Métallurgie
- M.E.B.** : Microscopie Electronique à Balayage.

LISTE DES FIGURES

	Pages
<u>Figure 1</u> : Carte du bassin sédimentaire de la Côte d'Ivoire [Yacé, 2002].....	7
<u>Figure 2</u> : Schéma des régions de sols latéritiques [MENIN, 1976].....	13
<u>Figure 3</u> : Coupe type de sol latéritique [MENIN, 1976].....	16
<u>Figure 4</u> : Schéma présentant les formes typiques de grosses pisolithes dans les sols latéritiques [DEGRAFT J. 1970].....	18
<u>Figure 5</u> : Fuseau granulométrique des graveleux naturels [MAMBA Mpéle, 1997].....	20
<u>Figure 6</u> : Fuseau granulométrique des graveleux de Côte d'ivoire : courbes enveloppes [L B T P . 1977].....	21
<u>Figure 7</u> : Fuseau granulométrique des graveleux de Côte d'Ivoire : courbe moyenne [L.B.T.P, 1977].....	21
<u>Figure 8</u> : Répartition du squelette en fonction de la végétation [MAIGNIEN, 1966].....	24
<u>Figure 9</u> : Latérite de Côte d'Ivoire : relation teneur en gravier [MENIN, 1976].....	25
<u>Figure 10</u> : Fuseau granulométrique des latérites à pisé.....	29
<u>Figure 11</u> : Fuseau granulométrique pour une latérite à adobe.....	29
<u>Figure 12</u> : Fuseau granulométrique des terres adaptées à la fabrication de blocs de terre comprimées.....	30
<u>Figure 13</u> : Fuseau granulométrique pour une latérite stabilisable au ciment.....	31
<u>Figure 14</u> : Fuseau granulométrique pour une latérite adaptée à la fabrication de brique cuites.....	31
<u>Figure 15</u> : Carte de situation de la latérite de Dabou [Hinscherberger F et Ponel R., 1972].....	42
<u>Figure 16</u> : Site de prélèvement de la latérite.....	43
<u>Figure 17</u> : Dispositif de diffraction des rayons X.....	50
<u>Figure 18</u> : Dispositif de l'analyse thermique.....	51
<u>Figure 19</u> : Dispositif de l'observation au M.E.B.....	52
<u>Figure 20</u> : Le broyeur à billes.....	54

<u>Figure 21</u> : Moule traditionnelle.....	56
<u>Figure 22</u> : La table vibrante.....	56
<u>Figure 23</u> : Principe de vibro-compactage.....	57
<u>Figure 24</u> : La presse Terstaram.....	58
<u>Figure 25</u> : La presse à pastille.....	59
<u>Figure 26</u> : Planchette rainurée.....	61
<u>Figure 27</u> : Dispositif de maniabilité.....	62
<u>Figure 28</u> : Presse hydraulique pour la résistance à la flexion.....	64
<u>Figure 29</u> : Schéma de flexion trois points.....	65
<u>Figure 30</u> : Usure à la surface d'un mur.....	66
<u>Figure 31</u> : Dispositif de mesure de l'usure.....	66
<u>Figure 32</u> : Dispositif de l'absorption par goutte.....	69
<u>Figure 33</u> : Site de prélèvement de la latérite.....	74
<u>Figure 34</u> : Profil lithologique du site de la latérite.....	75
<u>Figure 35</u> : Eléments constitutifs de la couche N°3.....	76
<u>Figure 36</u> : Couche N°5 a) cavité laissée par l'extraction d'une lentille de sable, b) gamme de couleur de la lentille de sable.....	77
<u>Figure 37</u> : Courbes d'analyse granulométrique.....	80
<u>Figure 38</u> : Superposition des courbes granulométriques de la latérite de Dabou aux fuseaux granulométriques des latérites de MAMBA (1997).....	82
<u>Figure 39</u> : Classification triangulaire de Duriez (1962).....	83
<u>Figure 40</u> : Diagramme de Cassagrande [Philipponnat, 1997].....	85
<u>Figure 41</u> : Courbes de diffraction des rayons X des couches n°1, n°2 et n°4 de la latérite de Dabou.....	86
<u>Figure 42</u> : Courbes d'analyses thermiques des couches de la latérite de Dabou.....	89
<u>Figure 43</u> : Courbe de l'essai Proctor.....	93
<u>Figure 44</u> : Figure indicatrice de stabilisant potentiel.....	96
<u>Figure 45</u> : Etat de la pâte après la chute de 1,5 m ; a) pâte sèche, b) pâte molle, c) pâte mi-ferme ou ferme.....	103
<u>Figure 46</u> : Courbes de la variation du retrait.....	105
<u>Figure 47</u> : Courbes de la variation de l'évaporation.....	106
<u>Figure 48</u> : Courbes de la variation de la densité hydrostatique.....	108
<u>Figure 49</u> : Courbes de la variation de la flexion.....	110

<u>Figure 50</u> : Courbes de résistance à la flexion.....	113
<u>Figure 51</u> : Courbe de variation du rapport flexion humide à la flexion à sec.....	115
<u>Figure 52</u> : Courbe de porosité de briquettes de latérite-ciment en fonction de la teneur en ciment.....	119
<u>Figure 53</u> : Variation du coefficient d'absorption en fonction du temps.....	121
<u>Figure 54</u> : Microfilm montrant l'état de surface des pastilles : a) pastille sans ciment ;b) pastille avec 30 p.c. de ciment ; c) pastille avec 50 p.c. de ciment.....	122
<u>Figure 55</u> : Courbe de résistance à l'usure.....	123
<u>Figure 56</u> : Etat de surface des briquettes après l'usure.....	124
<u>Figure 57</u> : Interprétation schématique de la structure interne de la brique de parement de latérite-ciment.....	126
<u>Figure 58</u> : Image de la variation de la couleur des briquettes en fonction du ciment.....	127

LISTE DES TABLEAUX

	Pages
<u>Tableau I</u> : Différents sols latéritiques.....	11
<u>Tableau II</u> : caractéristiques des grosses fractions identifiées dans quelques sols ouest-africains [Menin, 1976].....	18
<u>Tableau III</u> : Fuseau granulométrique des latérites du sud et du centre du Cameroun [MAMBA Mpéle, 1997].....	21
<u>Tableau IV</u> : Répartition des différents éléments des latérites.....	22
<u>Tableau V</u> : Valeurs extrêmes des éléments des latérites.....	23
<u>Tableau VI</u> : Fourchettes extrêmes des éléments des latérites.....	23
<u>Tableau VII</u> : Comparaison béton en nodules latéritique et béton ordinaire.....	32
<u>Tableau VIII</u> : Les ciments : classification et comparaison [Adrait et Sommer, 1994].....	35
<u>Tableau IX</u> : Caractéristiques mécaniques.....	41
<u>Tableau X</u> : Résultats des essais effectués in situ.....	78
<u>Tableau XI</u> : Répartition des grains des couches.....	81
<u>Tableau XII</u> : Limites d'Atterberg des couches du site de latérite de Dabou.....	84
<u>Tableau XIII</u> : Pics caractéristiques des minéraux de la latérite de Dabou.....	87
<u>Tableau XIV</u> : Tableau récapitulatif des pics exothermiques, creux endothermiques et les pertes de masse.....	90
<u>Tableau XV</u> : Analyse chimique.....	94
<u>Tableau XVI</u> : Effet de la quantité d'eau de gâchage sur la maniabilité.....	100
<u>Tableau XVII</u> : Influence de la quantité d'eau sur le mode D'affaissement des pâtes.....	102
<u>Tableau XVIII</u> : Comportement dans l'eau des briquettes de latérite-ciment.....	117
<u>Tableau XIX</u> : Comparaison des résistances à la flexion de plusieurs matériaux.....	118



**INTRODUCTION
GENERALE**

La latérite est un matériau dont les conditions de formation sont réunies dans les zones intertropicales. C'est donc une matière première qui est présente en Côte d'Ivoire en grande quantité. Depuis la haute antiquité, ce matériau a été utilisé par toutes les civilisations. A partir de l'ère chrétienne, l'utilisation de la latérite explose dans le domaine de la construction. La latérite est un matériau qui est riche en oxyde de fer et d'aluminium. Ainsi, il a la propriété de s'indurer. C'est donc cette propriété qui a favorisé son utilisation pour la construction en terre battue depuis l'ère chrétienne. Dès lors, son utilisation a évolué et s'est étendue à plusieurs domaines (blocs, géobéton, des pavés...).

C'est ainsi que la conférence internationale des Nations Unies-habitats sur les établissements humains insistait sur la nécessité de développer et de promouvoir des matériaux ainsi que des techniques de construction adaptées aux conditions locales. Par ailleurs, la conférence soulignait le fait que la terre, parmi l'ensemble des matériaux utilisés par l'homme au cours de l'histoire, demeurait celui le plus employé par les populations à faibles revenus des pays en voie de développement. Les récentes recherches ont démontré que la terre offre de grandes possibilités de réponses aux fantastiques besoins de logement de millions d'êtres humains. Ce constat milite en faveur du développement d'une connaissance plus approfondie du matériau terre et de sa technologie qui permettra une amélioration progressive et très sensible de ses performances encore trop souvent mal utilisées. Aujourd'hui, tous les efforts de recherches développés au cours de ces dernières années commencent à donner des résultats tangibles.

Ainsi, depuis près de 10000 ans que les hommes bâtissent des villes, la terre crue a été et demeure, à travers les traditions historiques et populaires, l'un des principaux matériaux de construction utilisés sur notre planète. C'est ainsi que plus d'un tiers des habitants du globe vit aujourd'hui dans des habitats en terre. Il existe des terres spécifiques utilisées dans ce domaine. Parmi elles, on peut citer l'argile, la latérite et autres. L'importance de cette latérite dans l'économie, le développement industriel et surtout dans l'industrie de l'habitat pour la production de briques, de pavés, de briquettes de parement est partout bien connue. Pourtant, la situation du logement dans les pays non industrialisés comme la Côte d'Ivoire est alarmante bien que possédant de grandes réserves de latérite. En effet, avec la crise qui affecte l'économie mondiale, le pouvoir d'achat des populations s'est considérablement amenuisé. Or, depuis la dévaluation du franc CFA en 1994, le prix des matériaux de constructions généralement importés a doublé. En conséquence, cette dévaluation a occasionné une flambée du prix des matériaux de construction.

Le prix du sac de ciment a augmenté de plus de 30 p.c. (de 2750 f à 4500 f CFA) ce qui influence les loyers des maisons. Or, les salaires n'ont pas changé depuis quelques années (depuis 1980). Ainsi, il est devenu impossible à une grande partie de la population de s'offrir un habitat décent, ce qui les oblige à s'orienter vers les habitats précaires des bidonvilles.

Ces problèmes de logement deviennent très inquiétants dans les grandes agglomérations telle Abidjan où la demande en logement est en hausse chaque année à cause de l'exode rural et du nombre de jeunes diplômés demandeurs de logements. Cette demande a été estimée à 20 000 logements par an à l'an 2001 [**Fraternité Matin n°11012 du 17 juillet, 2001**]. De plus, cette situation du logement en Côte d'Ivoire s'est dégradée avec la guerre que connaît le pays depuis septembre 2002.

Face à toute cette situation, nous prévoyons à travers ce travail, d'explorer d'autres voies de solution par la valorisation de la latérite en produisant des briquettes de parements stabilisées à froid à l'aide d'un liant hydraulique : le ciment Portland. Nous avons préféré la stabilisation à froid par rapport aux autres procédés tel que la cuisson, afin de réduire le coût de production. En effet, en Côte d'Ivoire, lorsque l'énergie ne provient pas du bois de chauffe (ce qui accélère d'ailleurs la déforestation), elle coûte très cher ; or, la technique de la cuisson, en consomme énormément. Par contre, la stabilisation au ciment présente comme avantages la disponibilité du ciment sur toute l'étendue du territoire national, sa facilité à être mis en œuvre et l'accessibilité de la technologie à des artisans peu formés.

Ainsi, nous nous sommes intéressé au début, à partir d'essais, à caractériser et à comprendre le mode de formation d'un profil de sol latéritique du Sud de la Côte d'Ivoire (Dabou). Cette étude du profil nous a permis de choisir la couche latéritique qui convient le plus à la fabrication des briquettes de parement. Ensuite, une étude de l'influence de trois types de presses sur les performances des briquettes nous a permis de sélectionner le type de presse qui est le plus adapté à la conduite de ce travail. Enfin, la dernière partie du travail a été consacrée à l'étude de l'influence du ciment sur la structure des briquettes de parement à base de latérite.

Le présent travail, s'inscrit dans la nouvelle problématique du laboratoire de pédologie et de géologie appliquée et fait l'objet du second travail de thèse sur la valorisation des matériaux locaux après le premier qui a porté précisément sur les argiles.

Ce rapport qui rend compte de ces travaux de recherche comportera quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à quelques rappels généraux sur la latérite, le ciment et la stabilisation.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons les différents tests de caractérisation de la latérite, de la pâte et des briquettes de parement à base de latérite.

Le chapitre trois traitera de la caractérisation de la latérite, le choix du stabilisant et du type de presse à utiliser.

Le dernier chapitre (IV) quant à lui sera consacré à l'étude de l'influence du ciment sur les performances des briquettes de parement à base de latérite.

Enfin, une conclusion et des références bibliographiques achèveront ce rapport.

CHAPITRE I:
GENERALITES

I-1- Généralités sur la Côte d'Ivoire

La Côte d'Ivoire, pays de l'Afrique occidentale, ayant sensiblement la forme d'un quadrilatère de 322500 km² est comprise sensiblement entre d'une part, le 4^{ème} et le 11^{ème} parallèle Nord et d'autre part entre le 3^{ème} et le 8^{ème} méridiens Ouest. Elle fait frontière au Nord avec les Etats du Burkina Faso et du Mali, à l'Ouest avec la Guinée et le Liberia, à l'Est avec le Ghana. Elle s'ouvre au Sud sur l'Océan Atlantique. C'est un pays de la zone intertropicale dont la caractéristique essentielle est d'être chaud et humide.

On rencontre deux types de régimes climatiques :

- le régime équatorial dans la partie sud avec deux saisons de pluies et deux saisons sèches.
- le régime tropical dans la partie nord avec une saison de pluie et une saison sèche qui dure 6 à 8 mois.

La température moyenne annuelle est pratiquement comprise entre (25 à 28°C) avec des hygrométries variant de 90 p.c au Sud à 60 p.c dans le Nord.

La durée d'insolation annuelle varie de 1800 à 2300 heures.

La végétation évolue de la forêt dense primaire au Sud à la savane au Nord en passant par une zone intermédiaire de savane arbustive.

Le relief de la Côte d'Ivoire est celui d'une pénéplaine dont l'altitude varie entre 400 m et 300 m environ au Nord et 100 m voire 50 m au Sud (seule exception le massif montagneux de Man dans l'Ouest).

I-1-1- Bref aperçu de la géologie de la Côte d'Ivoire

Le bouclier africain est constitué de trois cratons de nature essentiellement granitique [ROCCI G., 1964] ; [ROCCI G., 1965]. Ce sont : le craton ouest-africain, le craton du Congo et le craton du kalahari.

La Côte d'Ivoire appartient au craton ouest-africain, plus précisément à la dorsale de Man [BESSOLES B., 1977]. Ce socle cristallin et métamorphique est recouvert de formations détritiques non métamorphiques, protérozoïques. Il est bordé dans sa partie méridionale par une mince frange sédimentaire d'âge crétacé à quaternaire.

Il existe donc en Côte d'Ivoire deux domaines géologiques : le socle cristallin et le bassin sédimentaire.

I-1-1-1- Socle

Le socle cristallin est constitué de formations d'âge précambrien et se divise en deux grandes périodes : le mégacycle libérien et le mégacycle éburnéen [TAGINI B., 1971].

Les formations libériennes comprennent des migmatites, des gneiss, des amphibolopyroxénites et des quartzites ferrugineuses. Elles sont affectées par un métamorphisme de haut degré de faciès granulite [BESSELES B., 1977].

Les formations birimiennes sont constituées de complexes volcano-sédimentaires (laves diverses, schistes, quartzites...), de conglomérats, de flyschs et de granites. Le métamorphisme qui les a affectés est de faible à moyen degré de faciès amphibolite à schistes verts.

Ces formations cristallines du socle sont recouvertes d'une importante épaisseur de formations détritiques.

I-1-1-2- Bassin sédimentaire

Le bassin sédimentaire s'étend du 2°30' au 6° de longitude ouest.

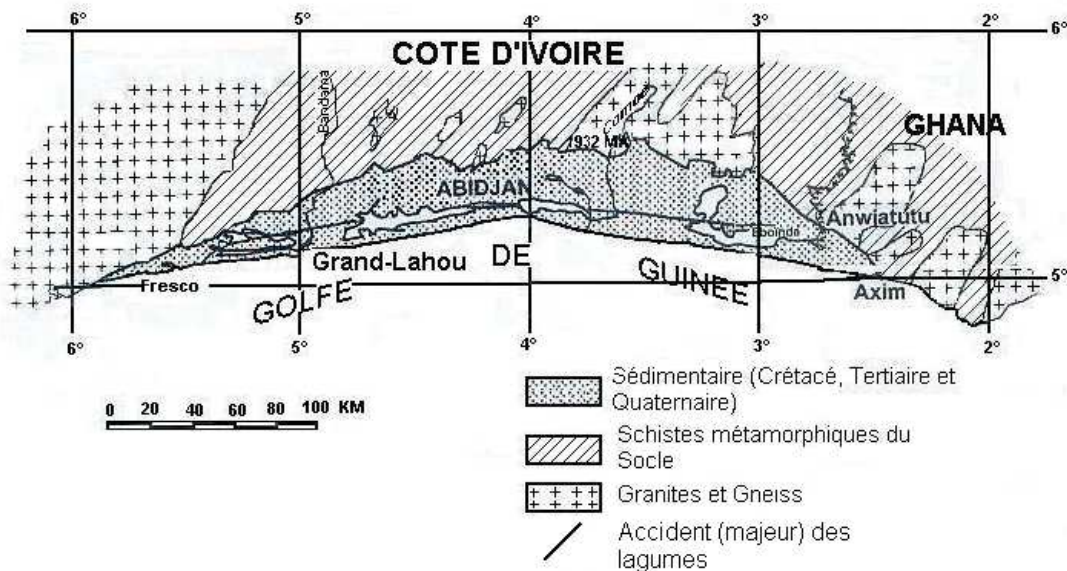


Figure 1 : Carte du bassin sédimentaire de la Côte d'Ivoire [Yacé, 2002]

Il est caractérisé par trois traits morphologiques majeurs : la faille des lagunes, la ride Ghana-Côte d'Ivoire et le canyon du « trou sans fond » [CHIERICI M. A., 1996].

La faille des lagunes divise ce bassin sédimentaire en deux zones distinctes avec des dépôts côtiers d'âges variés [TASTET J. P., 1979] (fig 1) :

- au Nord (zones de hauts plateaux) affleurent les formations du continental terminal d'âge mio-pliocène, constituées de sables argileux, d'argiles et de grès plus ou moins ferruginisés.
- au Sud, la plaine littorale basse, formée de dépôts de l'anté-holocène (bas plateaux) et holocène (cordon sableux).

I-2- Définitions

I-2-1- Géomatériaux

Le terme géomatériaux provient des termes « GEO » c'est-à-dire, qui vient de la terre, et « MATERIAUX » qui signifie doit être mis en valeur. C'est en d'autres termes tout matériau qui est le produit de la valorisation des composants de la terre. Il peut donc être naturel tel que le granite, le sable, l'argile, la latérite...ou transformé tel que le géobéton, les tuiles et les pavés.

Ce faisant, les spécialistes des géomatériaux doivent non seulement pouvoir rendre utiles ces matières premières mais et surtout transformer ces éléments selon leur ingéniosité pour les rendre utiles dans leur vie et celle de leur entourage. C'est ainsi que ces divers éléments ont été produits [EMERUWA E., 1998].

I-2-2- Quelques exemples

I-2-2-1- Argiles

Le terme argile trouve son origine dans le mot grec ARGILOS dont la racine ARGOS signifie blanc, puis dans le mot latin ARGILLAS ;

Ce terme argile désigne actuellement à la fois une roche, une taille granulométrique et un minéral. Ainsi une argile est soit une roche constituée de particules très fines, de taille inférieure à 2 µm et aux propriétés mécaniques particulières notamment en présence d'eau, soit un minéral appartenant à la famille des phyllosilicates ou à une particule formée par une polymérisation de minéral spécifique appartenant à la famille des phyllosilicates.

L'argile est abondamment utilisée en construction, entre autres comme matière première pour la fabrication des briques crues, cuites ou stabilisées à la chaux ou au ciment.

En raison de leur plasticité et de leurs propriétés réfractaires élevées, les argiles kaoliniques sont particulièrement recherchées pour la fabrication de divers produits cuits :

- briques pleines ou perforées destinées à la construction de murs
- tuiles de toiture
- tubes guide-fil
- tuyaux d'ajout.

I-2-2-2- Agrégats

Le terme agrégat désigne un éventail très large de matériaux. Les plus importants sont les sables et les concassés de roches (ou gravier). On les considère comme des agrégats primaires. L'industrie de la construction consomme la plus grande quantité de sable, gravier et concassés de roche.

I-2-2-3- Latérites

La latérite est un matériau meuble né de l'altération des roches sous un climat tropical. Elle est riche en oxyde de fer (Fe_2O_3) et en alumine (Al_2O_3), ne contient presque pas d'éléments basiques et peut cependant renfermer d'énormes quantités de silice (SiO_2). Il faut noter que les latérites sont caractérisées par un rapport $R = \text{SiO}_2 / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ inférieur ou égal à 2.

I-2-2-3-1- Historique et définition

Le nom de « latérite » a été vulgarisé pour la première fois par **BUCHANAN F., (1980)** pour désigner la couche de dépôt ferrugineux qui recouvre de vastes surfaces en Inde méridionale. Le mot latérite a été suggéré par BUCHANAN pour désigner un matériau servant à la construction et exploité dans les régions montagneuses de Malabar (Inde). Ce matériau présente l'aspect d'un dépôt ferruginisé, à morphologie vasculaire. Il est apparemment non stratifié et se situe à faible profondeur dans les sols. Lorsqu'il est frais, il peut être facilement découpé en blocs réguliers à l'aide d'un instrument tranchant. Exposé à l'air, il durcit rapidement et résiste alors remarquablement aux agents météorologiques.

De ces propriétés résulte son emploi fréquent comme matériau de construction, emploi comparable à celui des briques. Dans les dialectes locaux, ces formations sont dénommées

« terre à briques ». Le nom latérite n'est donc que la traduction latine d'une terminologie vernaculaire. Latérite a pour racine « Later » qui signifie brique en latin, ceci uniquement par référence à l'utilisation de ces blocs [**PRESCOTT J. A. et PENDLETON R. L., 1952**].

Depuis 1807, le terme latérite a été employé dans des acceptions très diverses selon la finalité des études et des publications (Géologie, Pédologie, Minéralogie, Chimie, Matériaux, Géotechnique, etc.) si bien qu'à l'heure actuelle règne une très grande confusion sur la définition du mot latérite.

Il semble cependant que la communauté scientifique soit d'accord :

- d'une part, le terme latérite lui-même est élargi et remplacé par des mots forgés pour désigner des objets ou des phénomènes précis. C'est la tendance en géologie et en pédologie où l'on parlera de « ferralisation » au lieu de latéritisation, de « sol ferrallitique » (ou « oxysols » ou « latosols ») pour désigner les sols.
- d'autre part, sur l'élargissement du sens et l'utilisation du pluriel « les latérites » pour désigner les sols résiduels d'altération de la zone intertropicale, fortement altérés, riches en oxyde et hydroxyde de fer et/ou d'alumine. Ces matériaux sont pauvres en bases (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+) et silicates primaires, mais pouvant contenir de grandes quantités de quartz résiduels de l'argile de néoformation (principalement la kaolinite). Ils peuvent être durcis en place ou s'indurer seulement après humification et dessèchement successifs.
- enfin sur la conservation du mot comme adjectif dans les désignations telles que :
 - Graveleux latéritiques,
 - Cuirasses latéritiques,
 - Carapaces latéritiques,
 - Argiles latéritiques (= argile d'altération),

L'aspect géographique de la définition doit être souligné, (zone intertropicale) ainsi que la notion d'horizon et de profil. En effet, les latérites ne constituent pas une formation autonome mais représentent un terme d'un processus d'altération comme le souligne Pendleton [**PENDLETON R.L., 1936**] par une vérité de la Palice : « Une latérite est un sol qui possède dans son profil un horizon de latérite, c'est-à-dire un horizon induré ou en voie d'induration ». En conclusion on pourra adopter la définition suivante :

I-2-2-3-2- Du point de vue génétique et minéralogique

Les latérites sont des sols d'altération de la zone intertropicale, formés sur place aux dépens de roches mères diverses, parfois remaniées par transport sur de faibles distances. Elles se caractérisent par leur richesse en oxyde ou hydroxyde d'alumine et de fer, ce dernier donnant aux latérites leur coloration caractéristique, couleur de rouille. Ces matériaux sont pauvres en composés basiques et en silicates primaires mais, selon la nature de la roche-mère, et le degré d'altération, ils peuvent contenir de grandes quantités de quartz résiduel et une matrice argileuse où domine la kaolinite. Il faut noter que les latérites sont caractérisées par un rapport $R = \text{SiO}_2 / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ inférieur ou égal à 2 [L.B.T.P., 1977]. Selon les valeurs données par les rapports, du pourcentage des limons à celui des argiles d'une part, puis de la silice à celui de l'alumine d'autre part, on peut distinguer comme l'indique le tableau I, trois types de sols latéritiques :

- les sols ferrugineux tropicaux,
- les sols ferrallitiques,
- les ferrisols.

Tableau I : Différents sols latéritiques [LBTP, 1977]

Sols latéritiques	Limon / Argile	SiO ₂ / Al ₂ O ₃
Sols ferrugineux tropicaux	< 0,15	> 2
Sols ferrallitiques	< 0,25	< 2
Ferrisols	> 0,2	≈ 2

I-2-2-3-3- Du point de vue géotechnique

Les propriétés géotechniques sont conditionnées par les caractéristiques génétiques exposées ci-dessous :

- les latérites présentent en général une granulométrie étalée due à la présence simultanée d'une matrice argileuse et de concrétions ferrugineuses et / ou de quartz résiduel ;
- la prédominance de la kaolinite dans la matrice argileuse leur confère le plus souvent une plasticité limitée.

- la tendance naturelle à l'induration se traduit soit par une induration spontanée sur place (carapace ou cuirasse latéritique), soit par une induration secondaire après extraction, humification et dessiccation à l'air.

I-2-2-3-4- Condition de formation de la latérite

Certains auteurs font remarquer que le mot latérite ne décrit pas un matériau avec des propriétés relativement constantes mais plutôt une famille de différents matériaux rencontrés dans diverses parties du monde. Nous retenons la suggestion de MAIGNIEN de parler plutôt des latérites que de la latérite [MAIGNIEN R., 1966]. Le caractère « famille » est lié à l'existence d'un certain nombre de conditions nécessaires à leur formation. Ces conditions qui font l'unanimité chez différents chercheurs ont été résumées par DEGRAFT J. du Ghana à la conférence asiatique sur les propriétés physiques des latérites [DEGRAFT J., 1970].

Ce sont :

- l'existence de saison pluvieuse et de saison sèche plus ou moins longue et alternée.
- le climat : la pluviométrie, la température et la végétation.
- la géologie : la roche-mère et la topographie.

La combinaison variable de ces différents paramètres crée nécessairement des matériaux à texture et à composition minéralogique et chimique variable.

I-2-2-3-4-1- Climat

Le rôle du climat sur la formation des latérites est diversement apprécié. La température intervient dans les réactions physiques et chimiques nécessaires à la formation des sols. Cependant, aucune étude poussée ne permet de donner une température limite : MAIGNIEN R., (1966) fait remarquer que la majorité des sols latéritiques contemporains se développent sous des températures moyennes annuelles qui avoisinent 25°C et en même temps, il constate l'existence des sols latéritiques profonds sur les hauts plateaux malgaches où la température moyenne annuelle est de 18°C.

On peut conclure que les latérites se trouvent soit là où la température est chaude, soit aux endroits où on estime qu'elle a été chaude au temps de la formation, l'effet de la température étant alors indirect.

Les valeurs de précipitations nécessaires à la formation relevée dans la bibliographie sont très variables. MAIGNIEN R., (1966) remarque que la valeur de précipitations peut être

différente selon que l'on considère un sol sous climat tropical à saison peu étalée ou bien un sol sous climat équatorial à saison étalée comme l'indique la figure 2.

Le rôle de l'eau étant surtout de lessiver le matériau, l'efficacité de son action dépend de la roche. En Afrique de l'Ouest, la latéritisation peut se réaliser sur roches basiques sous une pluviométrie de 1100 mm/an alors que sur des granites riches en quartz cette limite s'élève à 1250-1300 mm/an. Il n'existe pas de limite supérieure de précipitations car l'on rencontre en basse Guinée des sols latéritiques très bien caractérisés sous une pluviométrie moyenne de 6000 mm/an.



Figure 2 : Régions de sols latéritiques [MENIN M., 1976]

Le rapport entre le climat et les latérites débouche nécessairement sur le rapport entre le type de végétation et les latérites.

MAIGNIEN R., (1966) soutient que la latérite ne peut se former que sous végétation forestière et que l'induration suivrait la disparition du couvert forestier.

C'est ainsi que les latérites durcies sont plus répandues dans la région de savane. Les formes nodulaires sont très courantes dans la région forestière.

La végétation influe sur la teneur en éléments grossiers des horizons superficiels des sols latéritiques (débris de quartz, gravier) qui se concentrent à la suite d'entraînement de

matériaux frais par les eaux de ruissellement mais aussi une certaine homogénéisation de ces matériaux par action mécanique des racines.

I-2-2-3-4-2- Topographie

Le type de relief conditionne le drainage (détermination de la quantité d'eau s'écoulant à travers la zone d'altération) et contrôle la vitesse de l'altération.

Ainsi, les nombreux auteurs ayant étudié la relation entre les différentes formes de latérites sont d'accord pour affirmer que ces formations et surtout les latérites indurées se rencontrent sur des topographies sub-horizontales et les plateaux élevés ou ayant des ondulations douces, mais très rarement avec des pentes raides.

I-2-2-3-4-3- Géologie

Il apparaît à travers une importante documentation de recherche que les latérites peuvent se rencontrer sur différents types de roches.

Les processus de l'altération (altération et cuirasse) semblent plus intenses et plus généralisées sur roches basiques (basaltes, gabbros, dolérites) que sur roches acides riches en quartz. Cependant, ajoute **MAIGNIEN R., (1966)**, d'autres facteurs, en particulier des facteurs géographiques et des facteurs de températures, interfèrent pour marquer ces tendances. **LYON ASSOCIATES (1970)** fait état de sols latéritiques sur des schistes et des grès et sur d'autres roches sédimentaires associées à une nappe phréatique. Le problème pratique pour essayer de comprendre le processus de formation n'est-il pas de savoir si nécessairement les latérites dérivent toujours des sols sus-jacents ?

MAIGNIEN R., (1966) fait remarquer que dans le cas d'enrichissement en aluminium (Cuirasse d'aluminium), on constate une relation moins nette entre la cuirasse et le matériau sus-jacent et que manifestement la cristallisation s'est réalisée après un transport plus ou moins long.

I-2-2-3-5- Caractéristiques des latérites

I-2-2-3-5-1- Morphologie

Le point certainement le plus important pour l'ingénieur est de savoir dans une région donnée où les conditions de formation des latérites existent, où pourrait-on rencontrer ces matériaux ?

De l'étude des facteurs du milieu sur la genèse des sols latéritiques, il apparaît que ces sols se rencontrent sur les topographies sub-horizontales et avec des plateaux élevés ou ayant des ondulations douces [MAIGNIEN R., 1966].

Un certain nombre de chercheurs dont MAIGNIEN R., (1966) affirment l'existence d'un profil caractéristique de sols latéritiques marqué par un horizon concrétionné ou cuirassé ; d'autres tels que PENDLETON R., (1936) in MAIGNIEN R., (1966), indiquent plutôt que l'horizon concrétionné et cuirassé que l'on rencontre résulte du lessivage des horizons supérieurs.

De toute façon, un profil est dit latéritique s'il existe un horizon latérisé ou bien si les conditions de développement d'un horizon latérisé sont favorables avec le temps étant entendu que les matériaux que l'on rencontre dans les différents profils peuvent être très différents aussi bien morphologiquement que chimiquement ou minéralogiquement. La formation de ces horizons est liée aux relations existantes entre les divers facteurs de formation, tels que la pluviométrie, la température, les conditions de drainage et la nature de la roche-mère pour ne citer que ceux là.

Une coupe de terrain laisse apparaître une succession d'horizons plus ou moins différenciés désignés par les lettres A-B-C-D de haut en bas. (Fig. 3) :

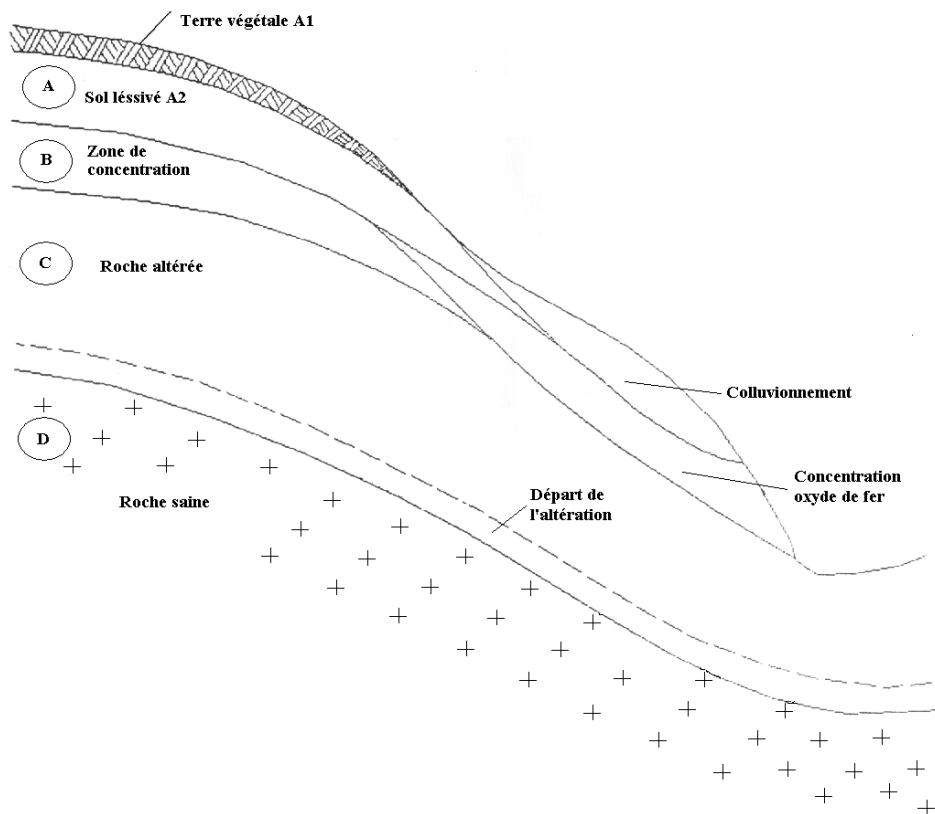


Figure 3 : Coupe type de sol latéritique [MENIN, 1976]

- l'horizon A : où la matière organique très évoluée, est lié à la matière minérale,
- l'horizon B : le plus souvent épais, où les minéraux primaires autres que le quartz sont rares, constitue la zone d'accumulation,
- l'horizon C : zone de lessivage le plus souvent très épaisse, variable en fonction de la roche-mère, est caractérisé par des minéraux altérés et friables,
- l'horizon D : le niveau de la roche saine.

La méthode de désignation des profils latéritiques par la pédogenèse (altération, accumulation, lessivage) est basée sur existence soit d'un horizon concrétionné ou cuirassé en voie d'induration, ou qu'un au moins de leurs horizons est riche en oxyde de fer ou d'aluminium [$(\text{SiO}_2)/(\text{Al}_2\text{O}_3) < 2$] tout en restant meuble, soit qu'il possède à la fois l'un ou l'autre de ces caractères.

Le processus d'induration dans les sols latéritiques présente des aspects variés. Il existe des horizons uniquement concrétionnés ou des horizons cuirassés ou les deux ensemble.

Les horizons concrétionnés sont proches de la surface du sol avec une épaisseur dépassant rarement deux (2) mètres. Ces horizons comportent un mélange de matériaux terreux et de matériaux indurés de forme généralement arrondie. On distingue des concrétions vraies,

formées de dépôts successifs de filon de ces oxydes le plus souvent ferrugineux. Le maillon de ces couches est généralement en grain de quartz tandis que les concrétions sont constituées de débris de roches altérées puis imprégnées de solutions ferrugineuses.

Les sols à horizon cuirassé dits pisolithiques ou alvéolaires proviennent de la concentration de ces oxydes à un niveau donné.

I-2-2-3-5-2- Structure

Les latérites présentent des structures très variées ; cependant, les modes d'assemblage peuvent se réduire à trois (3) :

- 1/ les éléments indurés forment un squelette cohérent et continu ;
- 2/ les éléments indurés sont des concrétions ou des nodules libres au milieu d'un matériau terreux ;
- 3/ les éléments indurés cimentent des matériaux préexistants.

Ce dernier type d'assemblage, compte tenu de la forme, de la grosseur des éléments et des degrés d'induration, se présente sous des formes diverses :

- a- des structures homogènes ou continues ;
- b- des structures hétérogènes ou discontinues ; ce sont des formes les plus communes ;

on y distingue :

- 1-les structures de roches meubles généralement graveleuses, c'est le cas fréquent des horizons concrétionnés ou gravillonnaires ;
- 2-les structures de roches cohérentes à aspect varié (conglomératiques, vacuolaires, scoriacés ou spongieux) ;
- c- des structures ordonnées (lamellaires, pisolithique et oolithiques).

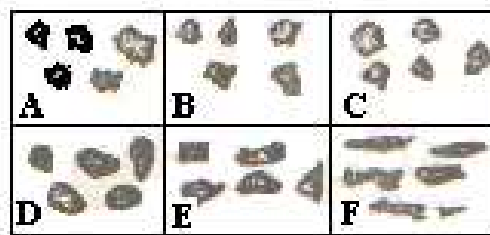
Le matériau comporte donc une succession d'éléments de diverses grosseurs et de formes variant des rondes aux anguleuses.

MENIN M. (1976) a donné les caractéristiques de forme de la fraction gravier, c'est-à-dire supérieur à 2 mm de diamètre de quelques sols latéritiques de l'Ouest africain (tableau II).

Tableau II : Caractéristiques des grosses fractions identifiées dans quelques sols ouest-africains [MENIN M.,1976]

Groupe principal	Sous-groupe	Autres noms	Forme des grosses particules	Structure des grosses particules	Couleur des grosses particules
Graviers concrétionnés	Gravier risiforme	-latérites nodulaires -latérite concrétionnée -gravier pisolithique	Arrondie	Croûte dure ,quelque fois entourant un centre tendre, surface polie	Rouge, brun , jaune
	Latérite durcie	Latérites à nappe superficielle	Irrégulière	Vacuolaire et/ou agrégations des plus petites particules	Rouge, brun, jaune, tacheté

La figure 4 présente les formes typiques des pisolithes



A: Anguleux

B: Sub-anguleux

C: Sub-arrondie

D: Arrondie

E: Ecailleuse

F: Allongée

Figure 4 : Schémas présentant les formes typiques de grosses pisolithes dans les sols latéritiques [DEGRAFT J. 1970]

- Caractéristiques chimique et minéralogique

La formation des sols latéritiques résulte de la transformation des roches par action physique et chimique. Les principales étapes de l'action chimique, intervenant soit simultanément, soit successivement sont :

- la dissolution ;
- l'hydratation ;
- l'oxydation et la réduction ;
- l'hydrolyse.

Les analyses chimiques ont permis de déterminer les principaux composants chimiques. Il s'est avéré que des latérites présentant des compositions chimiques comparables pouvaient posséder des propriétés physiques très différentes. Un certain nombre de chercheurs au début du siècle, ont cherché à compléter les analyses chimiques par des études minéralogiques.

Cette voie a permis aujourd'hui de classer les éléments principaux : oxydes, hydroxydes d'aluminium et de fer, la silice des argiles, qui ont un rôle essentiel dans la formation des horizons indurés et les éléments secondaires : quartz et autres représentant la trace de la texture du matériau en place.

Un trait caractéristique des sols latéritiques est la proportion élevée de ces oxydes de fer ou d'aluminium par rapport aux autres constituants.

I-2-2-3-5-3- Caractéristiques physiques

Les latérites présentent des couleurs variées mais de teinte vive. Les teintes les plus courantes rencontrées sont brunes, rouge, ocre, beige.

La couleur permet surtout d'apprécier le degré d'évolution et le milieu de formation : les cuirasses ferrugineuses rouges ou ocres dans leur jeune âge deviennent brunes et parfois noires avec le temps, les cuirasses alumineuses s'éclaircissent avec l'âge. Dans les zones mal drainées, les cuirasses ferrugineuses sont plus foncées (brunes) qu'en milieu oxydant.

I-2-2-3-5-3-1- Granulométrie

La compilation des résultats des différents essais granulométriques effectués sur les latérites du Sud et du Centre du Cameroun, par exemple, montre que ces sols ont une

granulométrie fort variée. Leur courbe granulométrique se trouvant à l'intérieur d'un fuseau représenté par la figure 5.

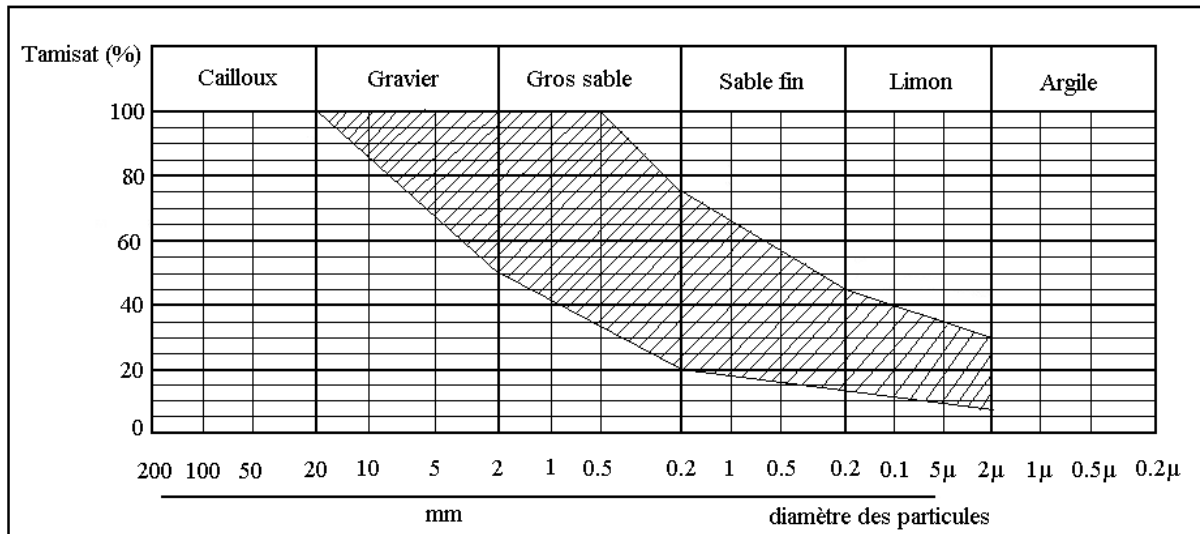


Figure 5 : Fuseau granulométrique des graveleux naturels [MAMBA M., 1997]

Les valeurs numériques données du tableau III, représente en fait les courbes limites de ce même fuseau. Certains de ces sols peuvent contenir plus de 35 p.c. de matériaux argileux alors que d'autres ne contiennent au maximum que 5 p.c. de limons. Sur le même site et pour des prélèvements distants d'environ 10 m, il a été constaté la forte variabilité des sols latéritiques ; ceci pourrait avoir une incidence très importante sur la qualité des produits fabriqués. A la lumière de ces résultats, l'on peut dire que la gamme des sols latéritiques rencontrés dans le Centre et le Sud du Cameroun va des graveleux latéritiques aux latérites argileuses.

Tableau III : Fuseau granulométrique des latérites du Sud et du Centre du Cameroun [MAMBA M., 1997]

Ouverture des tamis (en μm)	Courbe inférieure (tamisât en %)	Courbe supérieure (tamisât en %)
40000	100	100
5000	45	100
1000	26	100
200	10	85
20	2	50
5	0	40
2	0	35

En Côte d’Ivoire, les courbes granulométriques enveloppes des graveleux naturels sont illustrées sur les figures 6 et 7 difficilement différenciables. Lorsque le paramètre testé est le type de végétation, une distinction a pu néanmoins être faite en fonction de la roche-mère par le **L.B.T.P. (1977)**.

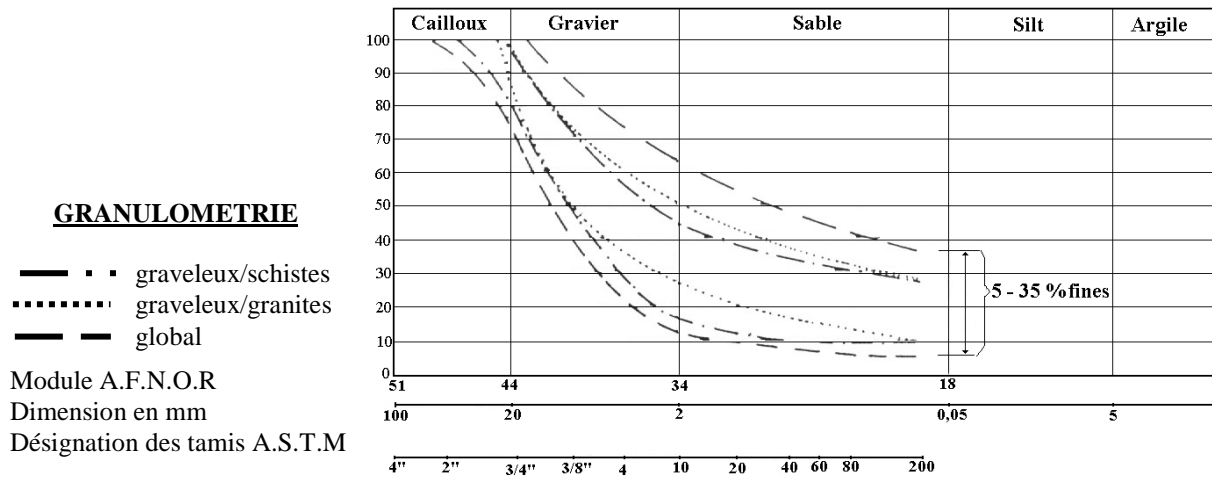


Figure 6 : Fuseau granulométrique des graveleux de Côte d'Ivoire : courbes enveloppes [L B T P . 1977].

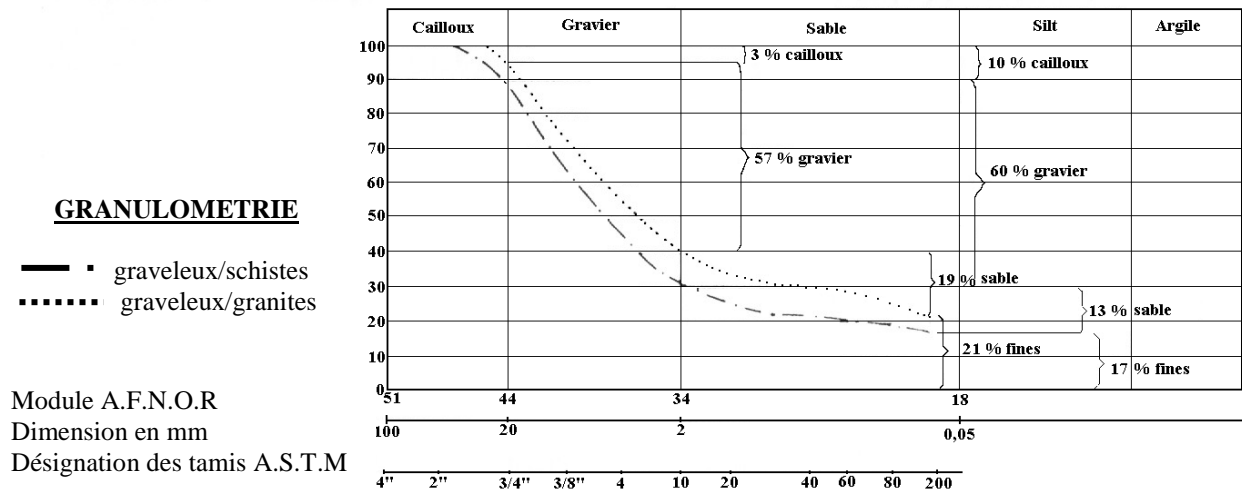


Figure 7: Fuseau granulométrique des graveleux de Côte d'Ivoire : courbe moyenne [L.B.T.P, 1977].

Lorsque les graveleux sont dérivés de roches granitiques, la teneur en éléments sableux est plus importante que dans le cas des roches-mères schisteuses. Ce résultat n'est pas surprenant puisque l'on sait que ces dernières sont de constitution essentiellement argileuses.

L'examen des fuseaux obtenus montre qu'il s'agit de matériaux de granularité relativement continue, la seule discontinuité caractéristique de ces latérites se situant au niveau des particules sableuses de diamètre compris entre 0,2 et 0,5 mm et que l'on appelle couramment la « bosse du sable ».

Les éléments de différentes grosseurs sont repartis en quatre classes comme suit :

Tableau IV : Répartition des différents éléments des latérites

	Graveleux/schistes	Graveleux/granite
- p.c de cailloux : 20 mm	10 p.c	3 p.c
- p.c de graviers : 2-20 mm	60 p.c	57 p.c
- p.c de sable : 0,080-2 mm	13 p.c	19 p.c
- p.c de fines : < 0,080 mm	17 p.c	21 p.c

Les fuseaux granulométriques sont représentés par les valeurs extrêmes suivantes (pour 80 p.c des résultats analysés) :

Tableau V: Valeurs extrêmes des éléments des latérites

Tamis en mm	Graveux/schistes		Graveux/granites	
	Fourchette	Moyenne	Fourchette	Moyenne
20	80-100	90	90-100	95
10	50-75	65	50-80	75
6	30-60	45	35-65	58
2	15-45	30	25-50	40
1	12-38	25	20-45	32
0,5	10-35	22	17-38	30
0,2	8-30	20	12-32	28
0,08	7-27	17	9-28	21

Les fourchettes extrêmes représentant la quasi-totalité des échantillons testés sont les suivantes :

Tableau VI : Fourchettes extrêmes des éléments des latérites

Dimensions	p.c de passant
20 mm	75-100
10 mm	45-90
5 mm	25-80
2 mm	10-60
0,5 mm	7-50
0,08 mm	5-3

Comme nous l'avons dit plus haut, les différences dans l'allure générale des courbes granulométriques sont pratiquement imperceptibles lorsque l'on passe des zones de forêt aux zones de savane. Nous avons dû constater cependant que la proportion de squelette (défini ici comme les particules de diamètre supérieur à 4 mm) était sensiblement plus élevée dans les premières comme l'indique la figure 8.

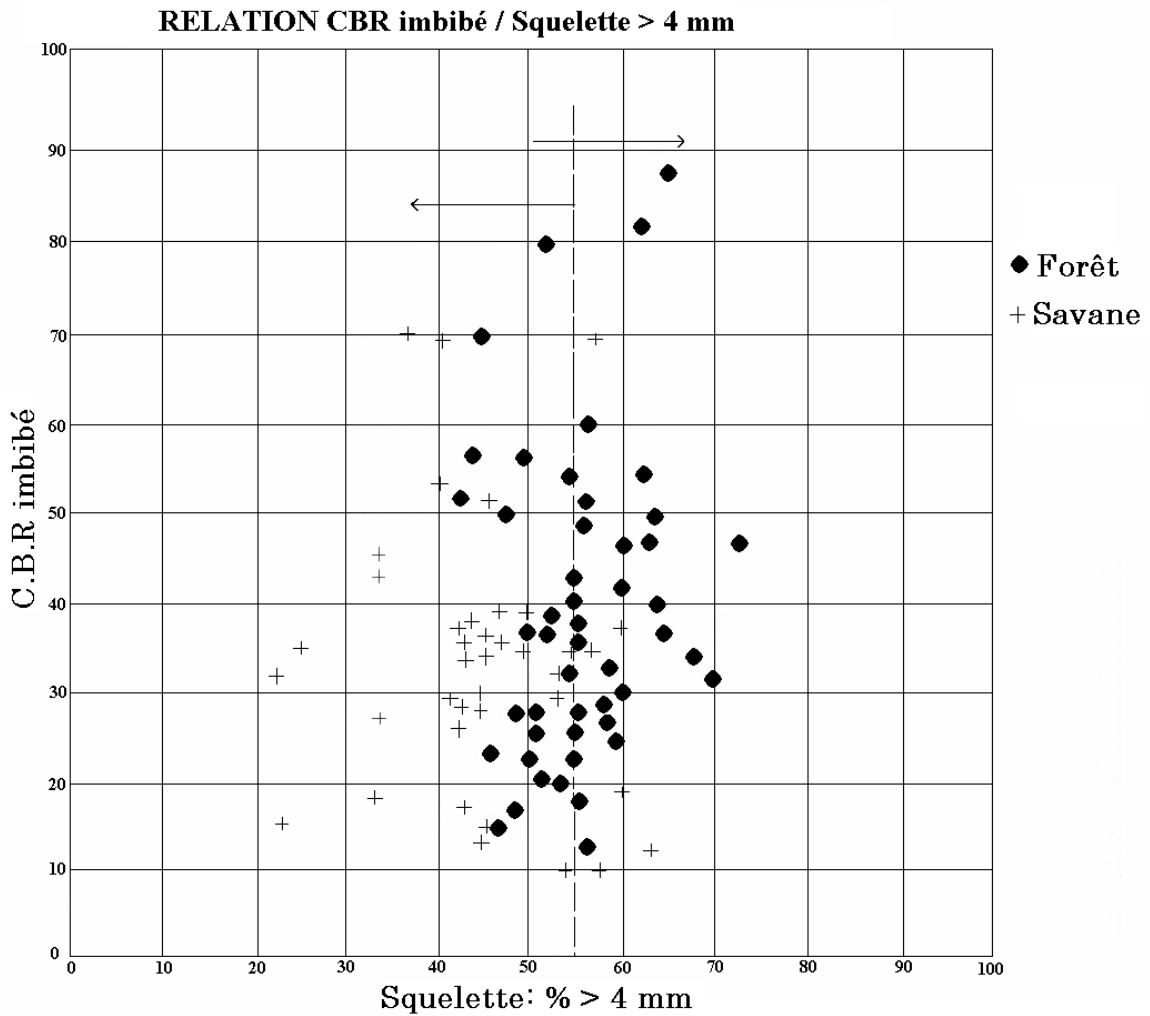


Figure 8 : Répartition du squelette en fonction de la végétation [MAIGNIEN R., 1966]

La figure 8 montre en effet que cette proportion correspond généralement à plus de 50% en zone de forêt (valeurs extrêmes 40–70 p.c) alors qu'en savane elle est le plus souvent inférieure à 50 p.c (valeurs extrêmes 30–60 p.c). Cette même observation peut être faite à l'examen de la figure 6 qui illustre le fuseau de correspondance trouvé entre la teneur en gravier (éléments de diamètre compris entre 2 et 20 mm) et la teneur sable (éléments de diamètre compris entre 0,80 mm et 2 mm) : en forêt, la proportion de gravier est de l'ordre de 60 p.c en moyenne, alors qu'en savane elle est de 55 p.c. L'écart est un peu moins marqué ici, du fait de la prise en compte des éléments compris entre 2 et 4.

Enfin, il est intéressant de constater que conformément à la définition conventionnelle des sols « grenus », la teneur maximale en fines des graveleux latéritiques est précisément de l'ordre de 35 p.c [MAGNIEN R., 1966].

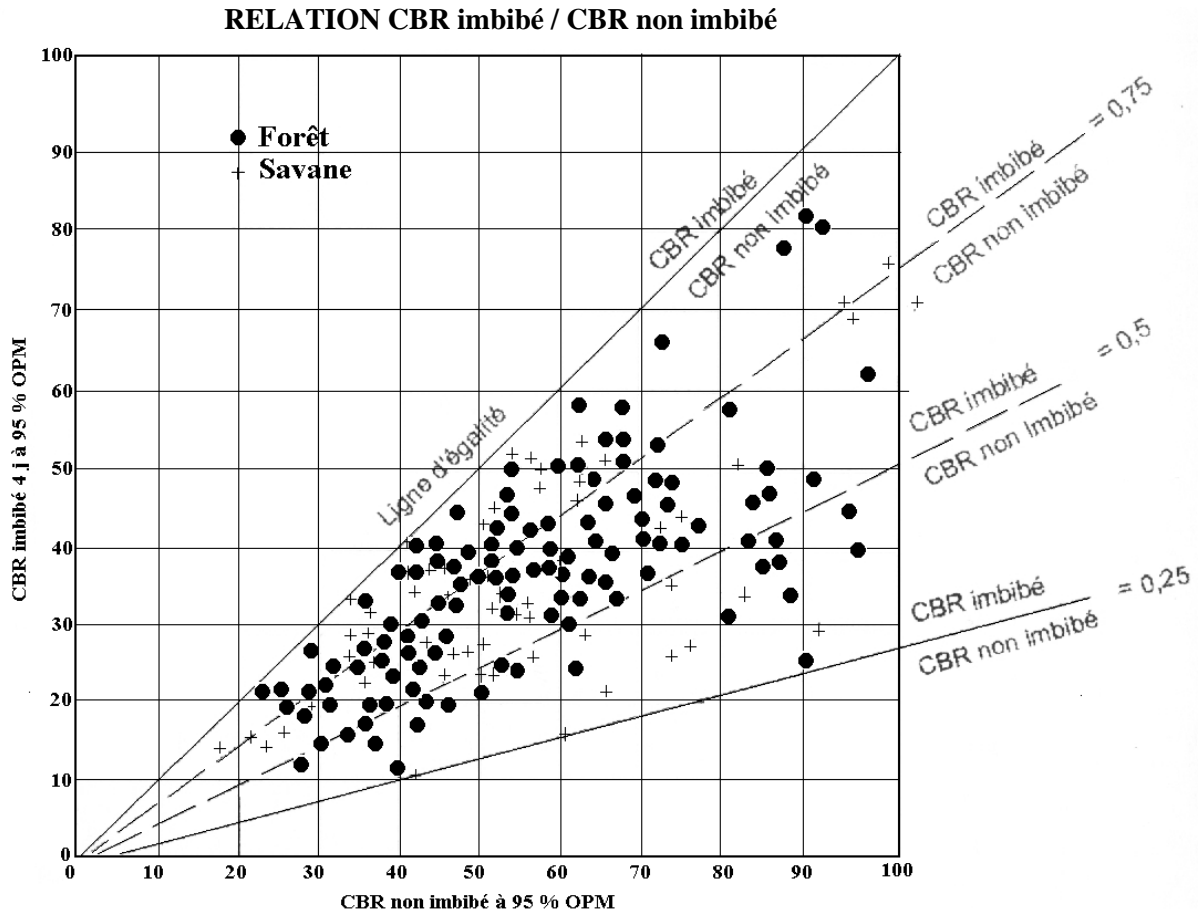


Figure 9 : Latérite de Côte d'Ivoire : relation teneur en gravier [MENIN M., 1976]

I-2-2-3-5-3-2- Poids spécifique des grains solides

Le poids spécifique des sols latéritiques varie dans de larges proportions de 2,5 à 3,5 T/m³ en fonction de la composition chimique. Ce poids spécifique augmente avec la teneur fer et diminue avec le pourcentage d'aluminium ; ainsi l'étude de la variation des poids spécifiques permet d'apprécier le degré d'évolution de la latérisation du matériau.

I-2-2-3-5-4- Caractéristiques géotechniques

Des études faites sur des échantillons de latérite, il apparaît que la courbe granulométrique obtenue dans une analyse sur un même matériau dépend des différentes méthodes de prétraitement : tamisage sous eau, séchage à l'étuve ou à l'air. Les principales caractéristiques des graveleux latéritiques sont :

- la forte proportion d'éléments fins (inférieur au tamis de 0,080 mm) de 10 à 40 p.c.
- la dureté variable des graviers : dans un même gisement et ce en fonction de la maturité des particules latéritiques concrétionnées. **ACKROYO** in **MAIGNIEN R., (1966)** a introduit en 1960 la distinction entre les graviers latéritiques durs, moyens et faibles, basée sur la résistance à l'écrasement des refus de 10 %. Différents modes opératoires sont utilisés pour apprécier la dureté de ces graviers : la méthode de Los Angeles ou celle de **NOVAIS-FERRETA** et **CORRETA** du laboratoire d'Angola.

Les courbes granulométriques ont souvent un palier ou un creux dénotant l'absence de certaines fractions. Ce palier se situe pour certains auteurs, entre 4 et 0,4 mm, pour d'autres entre 0,5 et 0,2 mm et parfois même entre 6 et 0,2 mm.

Il a été constaté que seuls des matériaux avec des agrégats durs ont généralement des courbes stables.

I-2-2-3-5-4-1- Limites d'Atterberg

Les Limites d'Atterberg sont des seuils conventionnels de teneur en eau de passage d'un état à l'autre des trois états physiques considérés : état liquide, état plastique et état solide.

Ces limites permettent d'apprécier surtout le niveau de plasticité ou les paramètres de croissance. Certains auteurs **REMILLON C. et al, (1970)** font remarquer en ce qui concerne les résultats de leurs essais de Limites d'Atterberg sur les sols latéritiques :

- que les conditions climatiques et les roches de départ par leur influence sur les formations des minéraux prédominants conditionnent le niveau de plasticité des sols ;
- que pour la majorité des sols à grains d'Afrique, les points figuratifs se situent au-dessus de la ligne A du diagramme de **CASSAGRANDE** avec une limite de liquidité en général inférieure à 60 ;
- que le mode de traitement et le processus d'essais avaient une influence sur les résultats.

REILLY O et al, (1960) trouvèrent tous que les limites changeaient en fonction du séchage et des manipulations.

Ces différentes remarques dénotent la difficulté qu'il y a d'une part à comparer les limites des matériaux à partir des essais et d'autre part à définir des critères de choix à partir des essais caractéristiques.

En Côte d'Ivoire, pour les essais de limites d'Atterberg, la floculation du mortier est obtenue par utilisation du catalyseur Aluminate de potassium.

I-2-2-3-5-4-2- Caractéristiques de compactage mécanique

Les caractéristiques de compactage des graveleux naturels – teneur en eau optimale, densité sèche maximale, sont généralement obtenues par l'essai Proctor Modifié.

Sans qu'il ait été possible d'obtenir une droite de corrélation précise entre ces deux paramètres, un fuseau de correspondance a pu être établi. Pour l'ensemble des échantillons testés, les fourchettes de valeurs obtenues pour ces paramètres sont les suivantes :

- densité sèche optimale γ_{max} OPM : 1,90-2,40 T/m³;
- teneur en eau optimale W_{opt} : 5-13 p.c avec la grande majorité des résultats (80 p.c) comprises respectivement entre 2-2,3 p.c et 7-11 p.c.

Aucune relation n'a pu être vérifiée entre les résultats obtenus d'une part, en zone de forêt et en zone de savane ou d'autre part, en zone schisteuse et en zone granitique. Il est toutefois certain que si la densité maximale est liée à la granulométrie et à la plasticité des graveleux, sa valeur est d'autant plus élevée que les nodules latéritiques sont riches en ces oxydes de fer. Ainsi, le graveleux contenant une forte proportion de grains quartzeux faiblement latérisés ont un poids spécifique et une densité sèche maximale moins élevée que ceux constitués par les concrétions bien évoluées.

Le poids spécifique sec, γ_d , d'une manière générale est fonction non seulement de la proportion de gravier mais aussi de la maturité des concrétions, le poids spécifique de grains solides de pisolithes variant de 2,5–3,60 T/m³, les concrétions les moins résistantes s'effritent au compactage.

De nombreuses études y ont été faites tendant à apprécier les effets du séchage sur les caractéristiques du compactage [**LYON ASSOCIATES, 1970**].

Les principales conclusions aussi bien sur les sols latéritiques fins que sur les sols graveleux révèlent que le séchage à l'étuve donne toujours des densités sèches maximum les plus

faibles, tandis que les sols à teneur en eau naturelle donnent des densités sèches maximum et des teneurs en eau optimum les plus élevées pour une énergie donnée.

I-2-2-3-6- Utilisation des latérites

I-2-2-3-6-1- Dans le domaine minier

Autrefois, le résidu latéritique perçu comme une couverture d'obstruction et un masque recouvrant la roche-mère, est actuellement vu comme un atout précieux et utile. En effet, l'exploration géochimique dans les latérites (la géochimie des latérites) s'est montrée hautement efficace dans la recherche de tout dépôt minéral caché et procure une trace sur « papier buvard », des relations entre la roche-mère et la minéralisation qui peut être présente [ANAND R. SMITH R. E., 1993]. Ainsi la recherche extensive et son application durant les deux dernières décades a influencée positivement l'exploration minière et a changé les perspectives des explorateurs de couverture de latérite. Par conséquent, de nombreux gîtes minéraux ont été découverts et des prospectus minéralisés ont été élaborés parmi ces latérites. La géochimie des latérites a donc joué un rôle substantiel dans l'exploration.

I-2-2-3-6-2- Dans le domaine de la construction

L'utilisation de la latérite dans le domaine de la construction date de très longtemps. Son utilisation a subi beaucoup d'amélioration depuis le pisé au géobéton et autres.

-Le pisé [MAMBA M., 1997] :

La technique du pisé consiste à verser une terre (dont la teneur en eau est inférieure à 16 %) à l'intérieur d'un coffrage puis à damer ou à la compacter ; le coffrage étant déplacé (dans le sens vertical ou horizontal) de façon à réaliser un mur. Concrètement l'élévation d'un mur en pisé de longueur égale à la longueur utile du coffrage, se fait de la façon suivante :

- pose du coffrage sur la fondation pour la mise en place de la première assise ;
- mise en place de la terre et compactage de celle-ci.

La première assise étant en place, on procède au décoffrage et au déplacement vers le haut de celle-ci.

On fixe solidement le coffrage à la structure précédente et l'on effectue la mise en place de la deuxième assise du pisé. L'on procède ainsi jusqu'à hauteur définitive du mur. Le matériau

adapté à cette technique ne doit pas contenir beaucoup de matières argileuses et sa courbe granulométrique doit être à l'intérieur du fuseau donné par la figure 10.

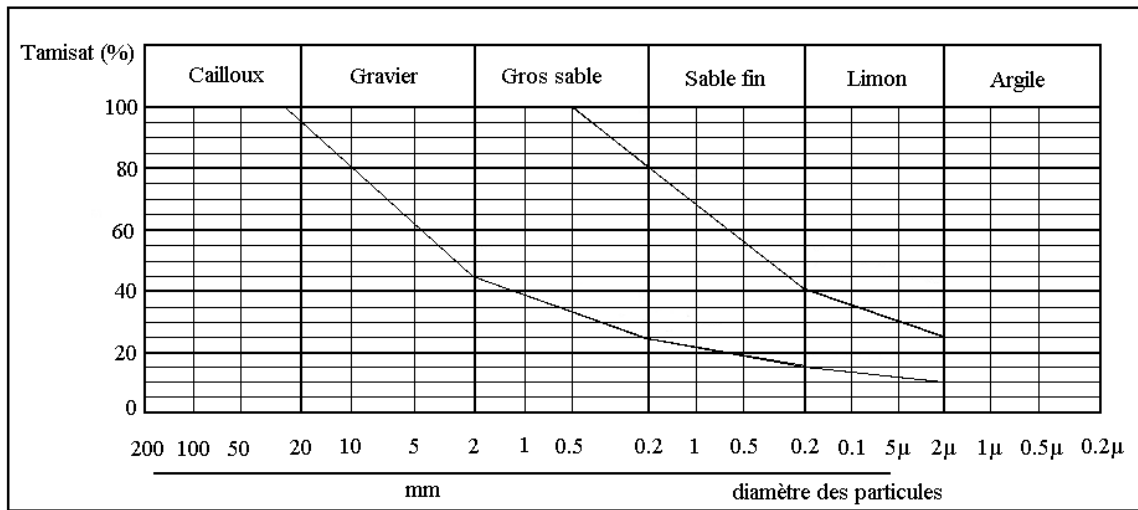


Figure 10 : Fuseau granulométrique des latérites à pisé.

- Les adobes [MAMBA M., 1997] :

Dans ce cas, la terre est homogénéisée avec plus de 13 p.c d'eau, puis façonnée à la main ou avec un moule en bois et enfin séchée. Le compactage ici est sommaire, car réalisé avec une simple pression à la main. La résistance des blocs ainsi fabriqués n'est pas élevée, mais elle est suffisante pour être utilisée dans la construction des murs pour bâtiments. Du fait de ce mode de fabrication ; une terre à adobes doit pouvoir contenir assez de matières argileuses, dont la courbe granulométrique doit être à l'intérieur du fuseau de la figure 11.

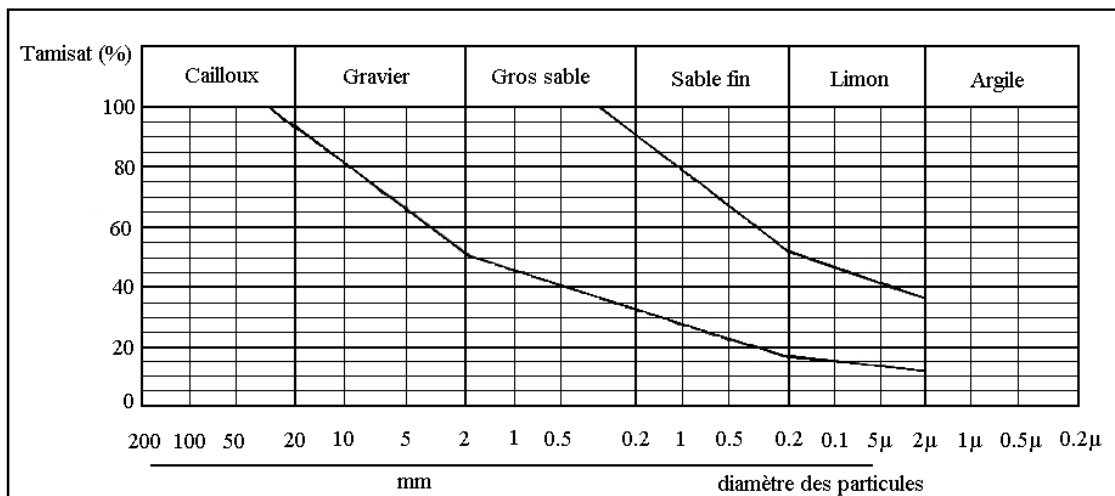


Figure 11 : Fuseau granulométrique pour une latérite à adobes

- Les blocs de terre comprimée [MAMBA M., 1997] :

Ici, la terre est mélangée à une quantité d'eau inférieure à 16 p.c du poids des terres et homogénéisée. Elle est placée dans des moules, comprimée puis démoulée. Contrairement aux adobes, les blocs de terres comprimés présentent des résistances à la compression plus élevée. A la lumière de l'expérience acquise dans ce domaine, les matières premières les mieux adaptées à la fabrication des blocs de terre comprimés doivent avoir leur indice de plasticité comprise entre 25 et 30. Leurs courbes granulométriques doivent être étalées et à l'intérieur du fuseau donné par la figure 12.

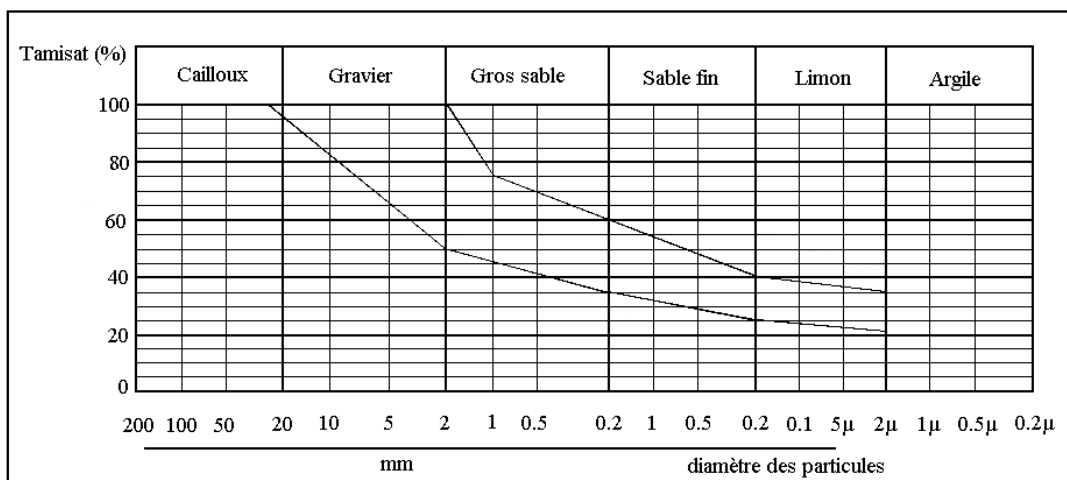


Figure 12 : Fuseau granulométrique des terres adaptées à la fabrication de blocs de terre comprimés.

- Blocs de terre stabilisée au ciment [MAMBA M., 1997] :

Quand on veut fabriquer des blocs de terre plus résistants, ou lorsqu'on ne dispose pas de terre comportant des matières argileuses, on est parfois obligé de stabiliser la terre avec un liant par exemple de type hydraulique et pour ce qui nous concerne ici, avec du ciment. Ainsi, les pisés, les blocs, les adobes, les blocs de terre comprimée et stabilisée (au ciment) s'appelleront : pisés stabilisés, adobes stabilisés ou blocs de terre stabilisée au ciment (géobéton). Les terres stabilisées doivent avoir leur limite de plasticité inférieure à 20. Leurs courbes granulométriques doivent être à l'intérieur du fuseau donné par la figure 13.

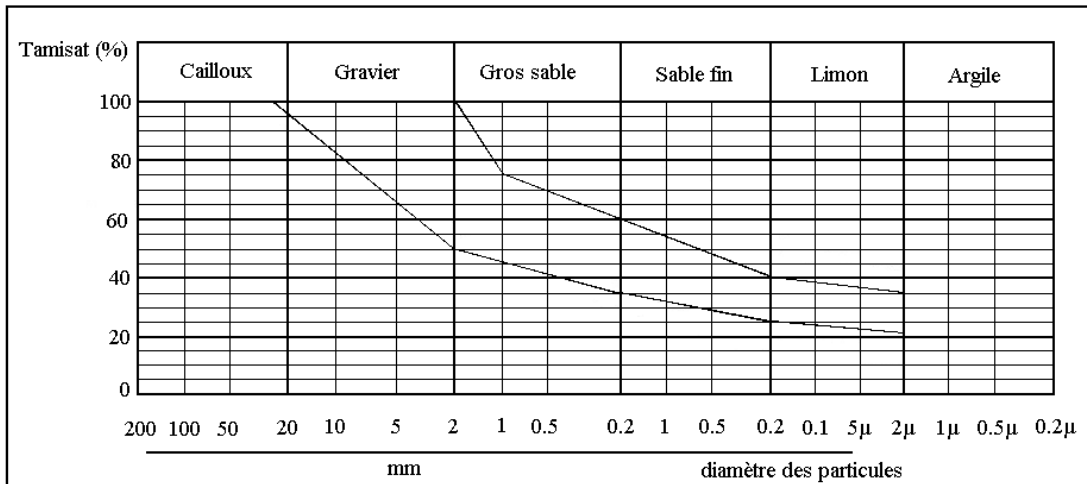


Figure 13 : Fuseau granulométrique pour une latérite stabilisable au ciment

– Les briques cuites [MAMBA M., 1997] :

Les adobes, les blocs de terres comprimées peuvent subir une stabilisation thermique qu'on appelle vulgairement cuisson. Les adobes et les blocs de terre ayant subi cette stabilisation prennent le nom de briques cuites. Les matières premières les mieux adaptées à la production des briques cuites sont celles qui contiennent entre 8 % et 25 % des matières argileuses et dont la courbe granulométrique étalée est à l'intérieur du fuseau donné par la figure 14.

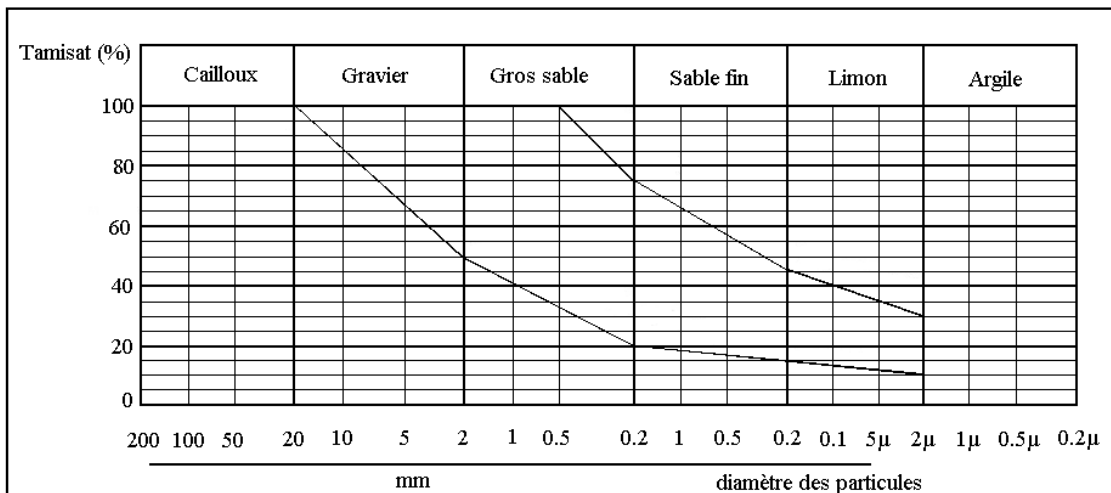


Figure 14 : Fuseau granulométrique pour une latérite adaptée à la fabrication de brique cuites.

– Les nodules latéritiques [MAMBA M., 1997] :

La latérite lavée et tamisée permet d'obtenir des nodules qui sont utilisées dans le béton mais ces nodules, du fait de leur grande porosité, vont absorber l'eau du mélange du béton. Pour remédier à cela, on procède par un pré-mouillage des nodules pendant 12 heures puis égouttées pendant 15 minutes avant la réalisation du béton. Cela donne de bons résultats comparés au béton ordinaire. Voir tableau VII.

Tableau VII : Comparaison béton en nodules latéritique et béton ordinaire

Type de béton	Dosage en ciment F C 28-A (kg/m ³)	Affaissement au cône (cm)	Résistance en compression à 28 j (Mpa)
Béton ordinaire	300	6	21,5
	350	5	23,8
	400	6	28,9
Béton en nodules latéritiques	300	4	17,2
	350	78	24,0
	400	8	27,6

La petite réduction de la résistance aux compressions du béton en nodules latéritiques est grandement compensée par le prix qui de loin est très petit.

I-3- Liants hydrauliques

I-3-1- Ciment

La dénomination « ciment » a été autrefois employée dans le commerce pour désigner de nombreux matériaux dont la propriété essentielle était de pouvoir servir de liant. Afin d'éviter les malentendus, la commission allemande de normalisation a fixé pour le ciment la dénomination suivante : « Les ciments sont des liants durcissants à l'air et sous l'eau, et résistants à cette dernière après durcissement. Il consiste essentiellement en une combinaison d'oxyde de calcium et de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, et remplit les

conditions fixées par les normes pour leur durcissement et leur stabilité. La matière première crue ou au moins la plus grande partie des éléments constituant les ciments, aura été chauffée jusqu'à clinkérisation ».

Jadis, on faisait habituellement du mortier en mélangeant de la chaux cuite et du sable. Ce mortier n'était pas résistant à l'eau, on y incorporait des matériaux à propriétés hydrauliques tels que le treass, la pouzzolane, la terre de Santorin, l'argile cuite, propriétés hydrauliques déclenchées grâce à la chaux ou bien on employait directement de la chaux hydraulique.

Les chaux hydrauliques sont obtenues à partir de marnes calcaires que l'on cuit au-dessus de la température de clinkérisation (1400-1480°C), que l'on éteint ensuite par hydratation et que l'on broie finement.

On appelle hydrauliques, les liants qui, gâchés avec de l'eau, durcissent à l'air et à l'eau et sont insolubles dans celles-ci après avoir fait prise.

Les adjuvants hydrauliques sont des matériaux qui possèdent la propriété de durcir, lorsque, mélangés à de la chaux et gâchés avec de l'eau.

On a trouvé que, par cuisson, du calcaire argileux, on obtenait un liant qui durcissait à l'abri de l'air et sous l'eau et n'y était pas soluble. Ce produit étant par sa couleur et sa nature semblable à la pierre à bâtir employée en Angleterre et appelée « portlandstone », on lui a donné le nom de ciment Portland.

On remarquera bientôt que le rapport chaux-argile dans le ciment, ainsi que la température de cuisson étaient des facteurs déterminants de la résistance obtenue.

Tous les composants capables de réagir, contenus dans le clinker de ciment portland, sont des composants anhydres, qui s'hydratent au contact de l'eau.

Les premiers ciments n'étaient que faiblement cuits, en deçà de la température de cuisson de clinkérisation. Mais on a vite remarqué que par une cuisson plus poussée, au-dessus de la carbonisation et jusqu'à clinkérisation c'est-à-dire jusqu'à commencement de fusion, on obtenait de meilleures résistances. Cette capacité de réaction du ciment, résultant de la cuisson de la farine crue, est encore augmentée par de hautes températures. L'argile perd d'abord son eau, et le calcaire son acide carbonique entre 700°C et 1000°C, se transformant en chaux vive (= CaO). Celle-ci est une base forte, qui au fur et à mesure que s'accroît la température, entre aussitôt en réaction avec les autres constituants de la farine crue pour donner des silicates et des aluminates de chaux. L'ensemble prend alors une couleur jaunâtre et possède de faibles propriétés hydrauliques donnant ainsi ce qu'on appelle le ciment « hongrois ». Si l'on augmente la température au-dessus de 1200°C, la matière devient grise et s'apparente en propriétés hydrauliques au ciment romain.

Vers 1300°C, commence l'agglomération du produit qui normalement se contracte et se clinkérise fortement vers 1400-1480°C par formation d'aluminoferrites de chaux. Ainsi se forme le « clinker ».

I-3-1-1- Types de ciment

On distingue le plus souvent, les ciments suivants :

a/ le ciment Portland qui est fabriqué à partir d'un mélange approprié de calcaire et d'argile ou de combinaisons intermédiaires telles que les marnes, mélange que l'on obtient par un broyage poussé, qui est ensuite clinkérisé puis broyé ;

b/ le ciment naturel qui est fabriqué à partir des marnes naturelles de composition approprié qui sont clinkérisées puis broyées ;

c/ le ciment métallurgique. On distingue :

- le ciment portland de fer, fabriqué par la monture combinée d'un mélange d'au moins 70 p.c de clinker et au plus 30 p.c de laitier.
- le ciment de haut-fourneaux est en règle générale un mélange de 30 p.c de clinker et 70 p.c de laitier broyés ensemble, la limite inférieure pour le clinker est de 15 p.c ;

d/ les ciments mixtes qui sont obtenus par montures simultanées de liants hydrauliques tels que la chaux hydratée ou le ciment portland avec des produits d'addition à propriétés hydrauliques tels que pouzzolanes, scories, tréass, etc ;

e/ le ciment alumineux qui se différencie totalement du ciment Portland par sa composition. Les composants alumineux en forment la structure essentielle d'où son nom.

Le tableau VIII est un récapitulatif des différents types de ciments ainsi que leurs constituants. La Côte d'Ivoire ne dispose pas de gisement de calcaire permettant l'installation d'une véritable usine cimentière, le clinker est importé d'Europe et broyé sur place par trois usines, deux à Abidjan et la troisième à San-Pedro [SANDE O. et DEMBELE S., 1992]. Ces cimentières livrent essentiellement du ciment Portland Artificiel (C.P.A 350) qui représente 98 % de leur production, le reste étant des ciments spéciaux employés pour la fondation, ou pour des travaux en mer ou en lagune.

Actuellement, ces cimentières fabriquent en plus du C.P.A 350, des Ciments Portland Composés :

C.P.J. 425 selon la norme française

C.P.O. 350 selon la norme ivoirienne.

Ces résistances sont mesurées conformément à la **NORME NI.05.06.035**.

Pour nos manipulations, nous allons travailler avec le ciment Portland composé (C.P.O 350) pour le simple fait qu'il est plus facile de s'en approvisionner mais et surtout parce qu'il a pratiquement les mêmes caractéristiques que le C.P.A (du point de vue résistance).

Tableau VIII : Les ciments : classification et comparaison (ADRAIT et SOMMER, 1994)

Appellation	Constituants en pourcentage								
	Symbol e	Clinker	Laitier	Pouzzolane	Cendres volantes	Fillers	SO ³	Alumine	Chaux
Ciment Portland artificiel	CPA	97	0	0	0	3	0	0	0
Ciment Portland composé	CPJ	65	0	35		0	0	0	0
Ciment de Haut fourneau	CHF	25 à 60	40 à 75	0	0	0 à 3	0	0	0
Ciment de laitier au clinker	CLK	17 à 20	80	0	0	0 à 3	0	0	0
Ciment de laitier et aux cendres	CLC	25 à 60	20 à 45	0	20 à 45	0 à 3	0	0	0
Ciment à maçonner	CM	> 50	< 50	0	0	0	< 1,7	0	0
Ciment naturel	CN	Dépend de la carrière					< 5	0	0
Ciment de laitier à la chaux	CLX	0	67	0	3	< 5	0	30	
Ciment sursulfaté	CSS	20	75	0	0	0	> 5	0	0
Ciment pouzzolanique		60 à 70	0	30 à 40	0	0	0	0	0
Ciment de laitier à pouzzolane		< 65	> 35	0	0	0	0	0	
Ciment alumineux fondu		10	0	0	0	0	0	30	60
Ciment prompt.		Calcaire naturel							

I-3-2- Chaux

Tout comme le ciment pour les particules grossières du sol, la chaux agit avec les particules argileuses dans le sol. La chaux possède un effet de cimentation, mais elle réagit avec les minéraux argileux et l'eau produisant un effet de cimentation, augmente la force du sol et réduit la susceptibilité de l'eau. Ce qui est connu sous le nom de « réaction pouzzolanique ». La chaux est de ce fait le plus grand stabilisant avec une haute teneur en argile du sol. Mais la réaction de la chaux avec les minéraux argileux est lente, ce qui la rend difficile à l'utilisation comme un stabilisant.

I-3-2-1- Types de chaux

- Chaux aériennes [HOUBEN H., 1989].

Elles sont produites par cuisson de calcaires très purs et constituent les principales chaux utilisables en stabilisation. Ce sont :

- **Chaux vive (CaO)** : directement produite par la cuisson de la pierre à chaux. A poids égal, elle est plus efficace que la chaux éteinte car elle apporte plus d'ions de calcium. Dans les sols humides, elle pourra absorber l'eau nécessaire à son hydratation.

- **Chaux éteinte (CaOH)₂** : elle est obtenue par hydratation de la chaux vive. Couramment utilisée en stabilisation, elle ne présente pas les inconvénients de la chaux vive.

- Chaux hydrauliques [HOUBEN H., 1989].

Elles se rapprochent des ciments. Leur emploi n'est envisageable que si l'on ne dispose pas d'autres qualités de chaux. Les chaux hydrauliques naturelles (XHN) sont plus efficaces en stabilisation que les chaux hydrauliques artificielles (XHA).

- Chaux agricoles [HOUBEN H., 1989].

Elles sont utilisées pour l'amendement des terres agricoles et n'ont généralement aucun effet stabilisant.

I-3-3- Bitume [HOUBEN H., 1989].

L'emploi du bitume comme stabilisant est très ancien, l'historien grec Hérodote évoque son emploi à Babylone au V^{ème} siècle avant notre ère pour la confection de mortier de pose de briques crues moulées. Mais l'application du bitume, au cours de l'histoire, est restée limitée. Ce n'est que très récemment que ce produit a été développé par les grandes industries pétrolières, à partir des années quarante, aux Etats Unis d'Amérique (U.S.A).

Des briques stabilisées furent commercialisées sous le nom de "Bitudobe" ou "Asphadobe". Le domaine des travaux publics exploitait ce procédé de stabilisation pour la construction de routes. En Algérie, près de 28000 km de routes ont été réalisés avec cette technique. Aujourd'hui aux Etats Unis, l'adobe stabilisé au bitume est un matériau de construction très développé ainsi qu'en Amérique centrale et latine. Des tentatives récentes de transfert de cette technologie en Afrique n'ont pas connu de succès même dans les pays producteurs de pétrole. L'emploi du bitume, qui était considéré il y a quelques années comme un produit miracle capable de résoudre définitivement les problèmes de stabilisation, est aujourd'hui en régression du fait de la hausse des produits pétroliers.

Les cut-back ou les émulsions bitumineuses se présentent sous la forme de globules microscopiques en suspension dans un solvant ou dans l'eau.

Le stabilisant est mélangé à de la terre puis, lorsque le solvant ou l'eau s'évapore, les globules de bitume s'étirent en films solides très fins qui adhèrent aux particules de la terre et les enrobent. Le bitume améliore la résistance de la terre à l'eau (moins d'absorption des argiles) et peut apporter une cohésion aux sols naturellement peu cohésifs, en jouant le rôle de liant.

I-3-4- Résines [HOUBEN H., 1989].

Une grande partie des récents travaux de recherche s'est polarisée sur la stabilisation chimique par l'emploi de résines synthétiques, notamment dans le domaine des travaux publics. Les buts poursuivis visaient une augmentation de la résistance aux charges tout en réduisant l'épaisseur des couches de terre stabilisée. On recherchait une meilleure

performance de résistance aux cisaillements et une plus grande élasticité des couches de surface. Ces buts qui correspondent aux applications des travaux publics ne sont pas nécessairement intéressants pour les applications en construction de bâtiments, sauf pour certaines surfaces horizontales : pavements, dalles stabilisées. On a pu obtenir des performances assez extraordinaires avec la stabilisation aux résines mais il demeure un grand handicap.

Conclusion partielle

Des généralités sur les géomatériaux, nous retenons que les matières premières non métalliques sont indispensables dans le développement économique, l'amélioration des infrastructures ainsi que la croissance de l'habitat.

La latérite est un matériau non métallique très utilisé. Elle est constituée en général de particules grossières et de particules fines qui lui confèrent un domaine d'utilisation très étendu. Elle est utilisée pour la fabrication de divers matériaux de construction tels que les pisés, les adobes, les briques comprimées, les briques et briquettes cuites, les briques stabilisées au ciment, les pavets ainsi que dans la construction routière où elle est utilisée comme matériau de soubassement.

En Côte d'Ivoire, les réserves de matériaux non métalliques en général et particulièrement les réserves de latérites sont très énormes et réparties sur toute l'étendue du territoire. Cependant, leur utilisation est limitée à la construction des cases et des routes. Ainsi, dans nos travaux suivants, nous proposerons une nouvelle voie d'utilisation des latérites afin d'élever l'utilité des matériaux locaux dans notre pays.

CHAPITRE II :
TECHNIQUES
EXPERIMENTALES

Introduction

La confection d'un matériau nécessite une matière première et une méthodologie de confection bien définie. La qualité du matériau est fonction de son mode de réalisation et des propriétés intrinsèques de la matière première.

La détermination de cette qualité repose sur une série de tests interdépendants qui permettront d'attester de la valeur du matériau et d'établir une confiance entre le matériau et ses futurs utilisateurs. L'optimisation des propriétés du matériau passe nécessairement par une bonne caractérisation de la matière première utilisée.

C'est ainsi que différents tests ont été effectués sur la latérite de Dabou et sur les briquettes de parement obtenues par la stabilisation à froid de cette latérite avec du ciment portland. Dans ce chapitre, nous présenterons brièvement ces essais et la méthodologie d'élaboration des briquettes. Il comportera trois parties :

- la première traitera des matières premières et de la technique de caractérisation de la latérite ;
- la seconde s'intéressera au procédé de stabilisation à froid et à la méthode d'élaboration des briquettes ;
- enfin, la troisième présentera les tests employés pour la caractérisation des briquettes.

II-1- Matières premières et technique de caractérisation de la latérite de Dabou

II-1-1- Matières premières

Pour la réalisation des travaux, la matière première est constituée de ciment portland, de l'eau et de la latérite. L'eau et le ciment ayant fait l'objet de nombreuses caractérisations dans la littérature, nous allons rappeler seulement quelques unes ici.

II-1-1-1- Ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui, mélangé à l'eau, fait prise et durcit. C'est aussi un stabilisant physico-chimique car ajouté à un sol, il en modifie les propriétés mécaniques et physiques.

Le ciment utilisé dans la confection des briquettes de parement est du type CPJ 325 (Ciment Portland Composite) de la société « SOCIMAT ». Il ne doit pas contenir des mottes c'est-à-

dire des grumeaux. Il a été caractérisé par le L.B.T.P. conformément aux normes [CODINORM NI.05.06.001, 1985] et [CODINORM NI.05.06.004, 1995].

Son poids spécifique est de 1,13 [CODINORM NI.05.06.035, 1985]. Sa surface spécifique mesurée au Blaine est de 2250 cm²/g avec un temps de prise de 4 heures à 20°C [CODINORM NI.05.06.036, 1985]. Ses caractéristiques mécaniques sont consignées dans le tableau IX.

Tableau IX : Caractéristiques mécaniques

	2 jours	7 jours	28 jours
Résistance à la compression (bars)	154	284	385
Résistance à la flexion (bars)	37,5	52,5	60

Du point de vue chimique et minéralogique, le ciment « Bélier » a des caractéristiques variables dues au fait qu'il est obtenu à partir de clinker provenant de divers horizons.

II-1-1-2- Eau

L'eau intervient dans le gâchage. Elle assure l'hydratation du ciment et établit une cohésion entre les particules anhydres. L'eau convenable est l'eau potable car les eaux stagnantes contenant des matières humiques provenant de la décomposition des végétaux sont susceptibles de retarder ou d'empêcher la prise du ciment. De même, les eaux riches en sel et avec une teneur élevée en sulfate sont à exclure car elles ont aussi des effets néfastes sur la prise et le durcissement du ciment [CODINORM NI 05.06.036, 1985] et [CRATerre, 1994]. La qualité de l'eau de gâchage en Côte d'Ivoire a fait l'objet d'étude afin de déterminer leur agressivité [SIMONNET J et N'DRI K., 1983].

L'eau utilisée dans le cadre de nos travaux provient du réseau de distribution d'eau potable SODECI car elle est facilement accessible. Cependant, l'eau potable des puits, rivières et fleuves est aussi utilisable.

II-1-1-3- La latérite

La latérite qui nous a servi pour les travaux provient du gisement situé derrière la prison civile de Dabou plus précisément à $5^{\circ}19'70''\text{N}$ et $4^{\circ}22'80''\text{W}$ (Fig.15).

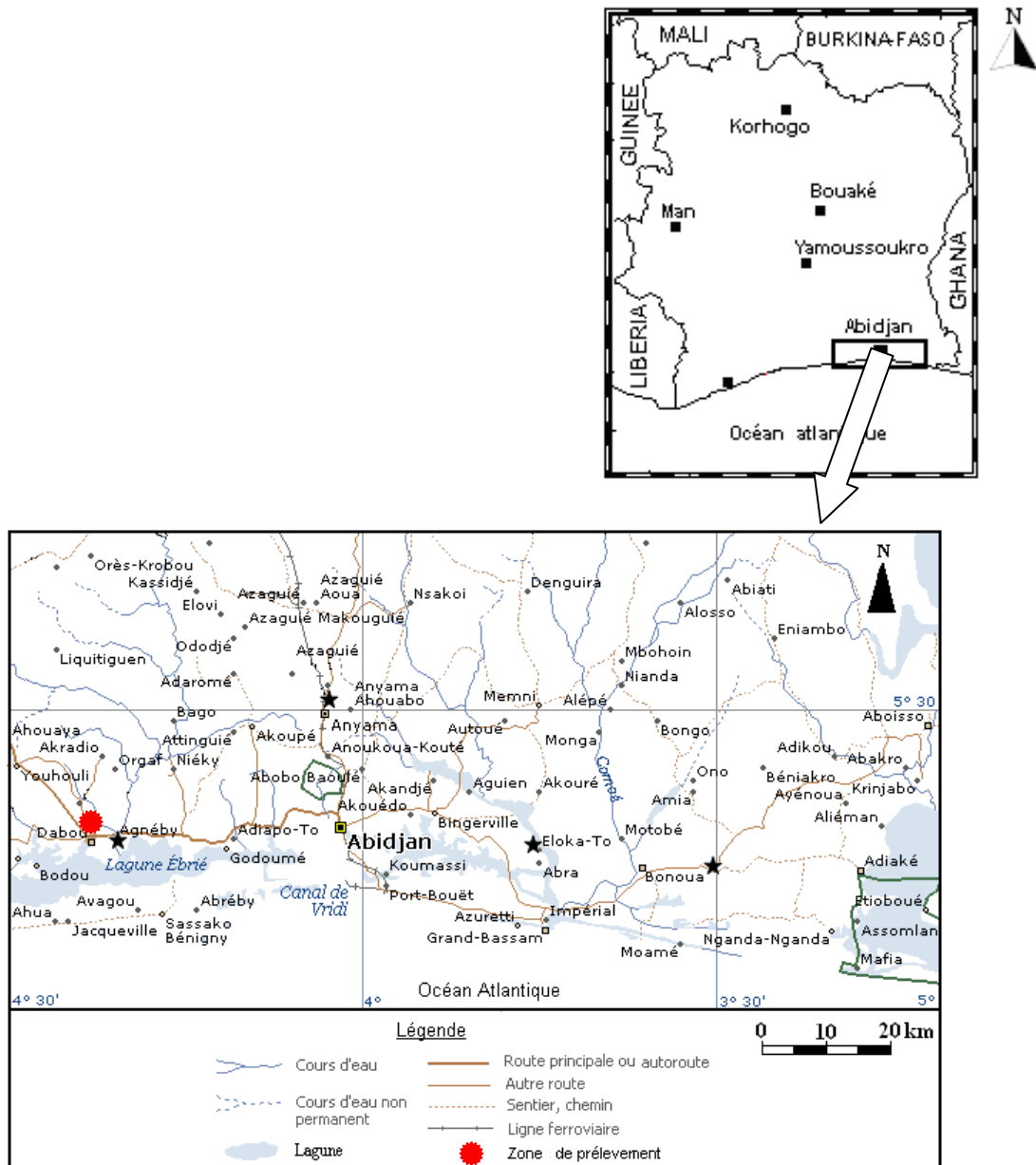


Figure 15 : Carte de situation de la latérite de Dabou
[Hinschberger F. et Pomel R., 1972]

Les prélèvements ont été effectués dans un canyon d'environ 20 m de profondeur à Dabou. Il s'agit en fait d'une entaille faite dans une colline comme l'indique la figure 16.



Figure 16 : Site de prélèvement de la latérite

Le prélèvement est réalisé sur le flanc taillé de la colline.

II-1-2- Techniques de caractérisation de la latérite de Dabou

Les techniques de caractérisation de la latérite de Dabou sont multiples à cause de sa composition complexe. Sur le terrain, en prenant connaissance de la terre susceptible d'être employée pour construire, il importe de pratiquer quelques essais rapides d'identification. Ces essais de terrain, simples, permettent d'apprécier certaines caractéristiques du matériau et de confirmer, ou d'infirmer, l'aptitude de la terre à être employée en construction. Ces essais sur le terrain sont :

- examen visuel
- essai de l'odeur
- essai de morsure
- essai de toucher
- essai de lavage.

II-1-2-1- Examen visuel

On examine à l'œil la terre sèche pour apprécier l'importance de la fraction fine. Dans la pratique, on enlève les gros cailloux, les graviers et les gros sables pour faciliter l'évaluation (cette opération est également applicable à tous les essais qui suivent sur le terrain). La fraction fine est constituée par les grains d'un diamètre inférieur à 0,08 mm. Ce diamètre se trouve à la limite de la visibilité à l'œil nu.

II-1-2-2- Essai de l'odeur

Ce test permet de mettre en évidence la présence de matière organique dans le sol. On sent la terre que l'on vient d'extraire. Elle est de nature organique si l'odeur évoque le « moisi ». Cette odeur est amplifiée si l'on chauffe ou humidifie la terre.

II-1-2-3- Essai de morsure

Cet essai de morsure permet d'apprécier la texture du sol. On mord une pincée de terre et on l'écrase légèrement entre les dents. La terre est sableuse si elle crisse avec une sensation désagréable. La terre est silteuse si le crissement ne donne pas une sensation désagréable. Elle est argileuse si l'on éprouve une sensation lisse ou farineuse, ou si une pastille de terre sèche est collante quand on y applique la langue. On fera attention à la qualité hygiénique de l'échantillon prélevé.

II-1-2-4- Essai de toucher

Cet essai permet de confirmer la nature granulométrique du sol révélée par le test précédant. On triture la terre débarrassée de ses plus grosses particules en effritant un échantillon entre les doigts et la paume de la main. La terre est sableuse si l'on éprouve une sensation de rugosité et si elle ne présente aucune cohésion. Elle est silteuse si l'on a l'impression d'une faible rugosité et si l'échantillon humidifié devient moyennement plastique. La terre est argileuse si, à l'état sec, elle présente des mottes ou concrétions qui résistent à l'écrasement et si elle devient plastique et collante lorsqu'elle est humidifiée.

II-1-2-5- Essai de lavage

Ce test permet de connaître non seulement la texture du sol, mais il donne aussi une idée de sa plasticité. On se lave les mains avec de la terre légèrement mouillée. La terre est sableuse si les mains se rincent facilement, la terre est silteuse si elle paraît pulvérulente et si les mains ne sont pas trop difficiles à rincer. La terre est argileuse si l'on a une sensation savonneuse et si les mains sont difficiles à rincer.

Les échantillons de latérite prélevés sur le terrain ont été soumis à une série de tests au laboratoire :

- des analyses géotechniques,
- des analyses chimiques,
- des analyses minéralogiques.

II-1-2-6- Analyses géotechniques

Ces analyses géotechniques se composent d'analyses granulométriques, des limites d'Atterberg, et du poids spécifique.

II-1-2-6-1- Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est réalisée dans le but de déterminer la répartition en poids des différentes fractions qui composent notre échantillon de latérite. C'est une caractéristique intrinsèque du sol dont dépendent ses propriétés mécaniques.

Elle permet de déterminer la texture du sol et même déduire sa structure. Cette granulométrie renseigne encore sur la perméabilité du sol et la nature de la roche mère.

Les échantillons tout venant sont séchés. Après y avoir éliminé les débris organiques et calcaires, ce matériau est séparé sur une colonne de tamis. Pour les éléments supérieurs à 80 μm , le tamisât de chaque tamis est récupéré et pesé [AFNOR NF P 94-056, 1996]. La fraction inférieure ou égale à 80 μm a été analysée au sédigraphe des rayons X afin d'obtenir la granulométrie de la fraction fine [AFNOR NF P 94-057, 1992]. Son fonctionnement est basé sur la loi de Stokes :

La vitesse de décantation d'une particule solide dans un liquide est fonction de son diamètre et est exprimée par la relation :

$$V = \frac{g(Y_s - Y_w)}{(18 \times n)D} \quad [1]$$

où

V : vitesse de décantation de la particule,

D : densité de la particule en cm,

Y_s : poids spécifique de la particule g/cm³,

Y_w : poids spécifique du liquide en g/cm³,

G : accélération de la pesanteur,

n : viscosité du liquide en poise.

Les particules les plus grosses ont la plus grande vitesse de décantation.

II-1-2-6-2- Limites d'Atterberg

Les Limites d'Atterberg qui ont été mesurées au LBTP sont des teneurs en eau exprimées en pourcentage du poids de matériau sec [AFNOR NF P 94-051, 1993].

Ils se composent de :

- la limite de liquidité W_l (L₁) qui sépare l'état liquide de l'état plastique.
- la limite de plasticité W_p (L_p) sépare l'état plastique de l'état solide.
- l'indice de plasticité I_p=W_l-W_p définit l'étendue du domaine plastique.

Les limites d'Atterberg permettent la classification des sols et nous renseignent sur leur consistance. En effet, lorsque varie la quantité d'eau interstitielle que contiennent les pores d'un sol, la consistance de ce sol peut varier. Ainsi, les limites d'Atterberg nous renseignent fort bien sur le comportement d'un sol. Elles sont en outre en bonne liaison avec le pourcentage d'éléments fins contenus dans le sol. Cependant, il n'y a de Limites d'Atterberg et donc d'indice de plasticité que pour des sols contenant des éléments fins c'est-à-dire des particules argileuses.

En pratique, la limite de liquidité d'un mortier est la teneur en eau exprimée en pourcentage du matériau sec pour laquelle un gâteau de sol, divisé en deux parties par rainure, placée dans une coupelle, arrive à se rejoindre sur une longueur déterminée sous l'influence d'un nombre de chocs imprimé à la coupelle.

La limite de plasticité d'un mortier est la teneur en eau exprimée en pourcentage du poids du matériau sec du fuseau de sol qui se brise en petits tronçons au moment où son diamètre atteint 3 mm.

L'indice de plasticité est donné par l'expression.

$$I_p = WI - Wp \quad [2]$$

ou

WI : limite de liquidité

Wp : limite de plasticité

II-1-2-6-3- Poids spécifique et surface spécifique

Le poids spécifique réel d'une particule est par définition la masse par unité de volume de la particule solide.

$$\gamma_s = \text{masse de la particule sèche} / \text{volume de la particule}$$

Le poids spécifique d'un matériau est une caractéristique intrinsèque de ce matériau qui nous renseigne sur sa quantité de matière et sur sa nature. Sa mesure est réalisée au pycnomètre.

La surface spécifique est la surface exprimée en cm^2 d'un gramme du corps considéré dont les grains seraient développés. Elle permet la compréhension de l'étude de nombreux phénomènes tels que la fixation des colorants sur les tissus, la force de liaison et de frottement entre les particules, le filtrage, les réactions entre phase solide et l'attaque des particules solides par un flux vitreux. Elle nous renseigne aussi sur la finesse du sol.

La surface spécifique a été mesurée par la méthode d'absorption gazeuse : physisorption et calculée à l'aide de l'équation B.E.T. [LATOUCHE M., 1964]. L'appareil utilisé est un micrométrique 2100, et les mesures ont été effectuées sur la partie inférieure à $40 \mu\text{m}$ [HARRISON D., 1993].

II-1-2-7- Analyses chimiques

Les analyses chimiques réalisées permettent de déterminer la composition chimique et la teneur en matière organique de la latérite. Elle renseigne aussi sur les constituants majoritaires et les constituants minoritaires. L'échantillon est d'abord séché à l'étuve, puis broyé finement et est enfin passé au tamis 0,1 mm. Les techniques de la fluorescence aux rayons X et la calcination à 450°C ont été utilisées.

II-1-2-7-1- Fluorescence aux rayons X

La fluorescence aux rayons X est une technique non destructive qui permet de déterminer et de quantifier les éléments chimiques majeurs, mineurs et en traces. La préparation des échantillons consiste en une dilution par fusion avec adjonction d'alourdissant mise au point par **SAHORES J., (1964)**. Le dosage a porté sur les éléments majeurs et le résultat est exprimé en pourcentage d'oxyde des éléments chimiques.

II-1-2-7-2- Calcination

L'essai de calcination consiste à déterminer la perte de masse d'un échantillon préalablement séché, après calcination dans un four à une température de 450 °C [**AFNOR XP P 94-047, 1998**]. Elle renseigne sur la teneur en matière organique. Cette teneur en matière organique permet de classer les sols et de se faire une idée de leur acidité.

La détermination du taux de matière organique s'effectue sur la fraction passant au tamis de 2 mm et est donnée par la formule :

$$MO = \frac{M - M_c}{M} \times 100 \quad [3]$$

où

MO = teneur en matière organique ;

M = masse du matériau sec ;

M_c = masse du matériau après calcination.

II-1-2-8- Analyse minéralogique

Les analyses minéralogiques effectuées concernent la diffraction aux rayons X, les analyses thermiques (A.T.G. et D.T.G.) et l'observation au microscope électronique à balayage (MEB).

II-1-2-8-1- Diffraction des rayons X

Le principe repose sur l'interaction entre un faisceau de rayons X de longueur d'onde donnée et les atomes ou groupe d'atomes qui se répètent de manière périodique dans les trois dimensions de l'espace du réseau cristallin observé. Les rayons X de longueur d'onde λ peuvent se réfléchir sur les plans réticulaires déterminés par la loi de Bragg suivant un angle θ :

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

Avec d la distance inter-réticulaire

avec n l'ordre de diffraction

La diffraction des rayons X permet de déterminer la composition minéralogique et la structure cristalline des dépôts à partir des raies constituant le spectre. Cette reconnaissance minéralogique s'appuyant sur la loi de Bragg stipule que les rayonnements diffractés par les matériaux analysés sont orientés selon des angles liés à la longueur d'onde caractéristique de chaque espèce minérale [HOLTZAPFFEL T., 1985]. Ces différents pics sont identifiés grâce aux fiches JCPDS.

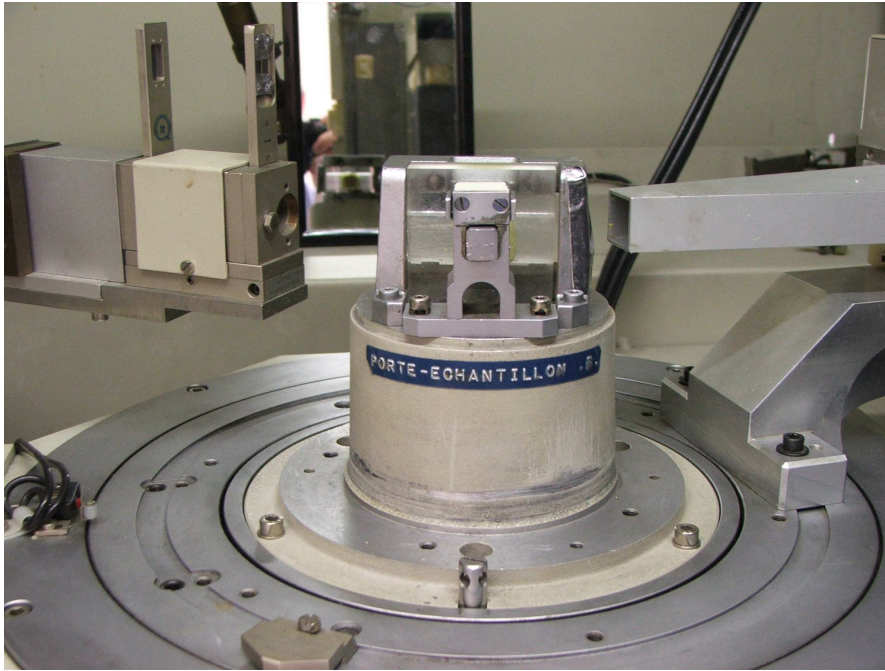


Figure 17 : Dispositif de diffraction des rayons X

A l'aide du dispositif de la figure 17, ces essais ont été réalisés à l'Université Henri Por Nancy I, au laboratoire des Sciences et Génie des Matériaux Métalliques à l'École des Mines de Nancy.

Les sources de rayon X sont des rayonnements monochromatiques d'une anticathode de Cuka de longueur d'onde $\lambda = 1.540599800 \text{ \AA}$ provenant de la raie $K_{\alpha 1}$.

II-1-2-8-2- Analyses thermiques (thermogravimétrie et thermodifférentielle)

Les analyses thermiques sont basées sur le principe qu'une substance soumise à un traitement thermique peut subir des changements de ses propriétés chimiques ou physiques dus par exemple à un passage de phase, à une modification cristalline, une décomposition, une perte de masse,...

Ainsi, l'analyse thermodifférentielle (A.T.D.) détermine les variations en fonction de la température, en enregistrant les discontinuités en correspondance avec les phénomènes endothermiques et exothermiques alors que l'analyse thermogravimétrie (T.G.) détermine en fonction de la température, des discontinuités en correspondance avec les variations de masse.

Ces deux essais sont effectués conjointement par le moyen d'un thermocouple pour l'A.T.D. et d'une thermobalance pour la T.G. Les analyses ont été réalisées à l'Ecole des Mines de Nancy au Laboratoire de Physique des Matériaux (LPM) et renseignent sur la constitution minéralogique des échantillons selon le dispositif expérimental de la figure 18 :



Figure 18 : Dispositif de l'analyse thermique

II-1-2-8-3- Observation au MEB

Le microscope électronique à balayage permet l'étude de la surface d'un échantillon massif. Lorsqu'un échantillon est bombardé par des électrons primaires de faible énergie, la pénétration de ces derniers est peu importante et est limitée à un petit volume. Dans ce volume, les électrons subissent des pertes énergétiques et provoquent l'excitation d'autres électrons, ceux-ci de faible énergie sont appelés électrons secondaires. Ces électrons permettent l'observation de la surface, laquelle donne l'impression d'une vue en trois dimensions.

Lorsque l'énergie des électrons primaires est grande, d'autres électrons peuvent être arrachés au matériau. Ce sont des électrons rétrodiffusés qui possèdent une grande énergie (50 keV), cette méthode donne une information sur la densité de l'échantillon. Plus les éléments étudiés sont lourds, plus la quantité des électrons renvoyés est importante. A l'écran, ce phénomène se traduit par une intensité de lumière plus importante dans les zones les plus denses, c'est-à-dire

où les éléments sont les plus lourds. Cette densité est proportionnelle à une coloration entre niveaux de gris, on utilise cette méthode pour quantifier la repousse osseuse dans des céramiques. Plus le matériau est dense plus la couleur blanche prédominera et inversement. Pour une céramique, la couleur sera blanche alors que l'os néoformé sera gris. Ceci permet une quantification par niveaux de gris. Le microscope électronique à balayage utilisé est un XL 30S FEG de type Philips couplé avec un ordinateur OXFORD (LINK EXL2) permettant la prise d'image, l'émission d'électrons se fait grâce à un filament de tungstène (Fig. 19).



Figure 19 : Dispositif de l'observation au M.E.B.

Nous avons observé les pastilles réalisées à différents teneurs de ciment. Cette observation nous a donné une idée sur la taille et la forme des grains. Elle a été réalisée sur les échantillons bruts après métallisation. Les résultats obtenus sont présentés sous forme d'image des minéraux. La latérite de Dabou a été soumise à tous ces tests de caractérisation afin de déterminer ses propriétés particulières. Les résultats de ces tests ont permis de choisir une technique d'élaboration de briquettes à base de latérite stabilisée à froid avec du ciment portland.

II-2- Elaboration des briquettes

Pour la fabrication des briquettes, il nous faut préparer la matière première. Nous disposons pour cela d'une broyeuse à billes (6 billes) dont les rayons varient entre 3 et 4 cm (Fig. 20). Elle est constituée par une table sur laquelle se trouve fixé un moteur électrique. Ce moteur fait tourner un arbre à l'extrémité duquel se trouve la chambre de broyage contenant les billes. Cette chambre est constituée de deux parties :

- une partie solidaire à l'arbre ; la chambre de broyage ;
- et une deuxième partie représentée par un couvercle qui se fixe à la première par deux vis.

Elle est en acier avec une épaisseur de dix millimètres. Le moteur alimenté par le courant électrique fait tourner la chambre à broyer par l'intermédiaire de l'arbre. La chambre dans ses mouvements de rotation broie son contenu par la chute des billes qu'elle contient. (Fig. 20).

II-2-1- Préparation

La préparation se fait en trois phases. La latérite est au départ séchée à la température ambiante du laboratoire pendant quelques jours après son extraction de la carrière.

Ensuite elle est broyée à l'aide du broyeur à billes de diamètre variable (Fig. 20).

Le broyage est effectué par friction entre les parois de la chambre de broyage et les billes. Le broyage dure une heure et demie avec une vitesse de rotation du moteur de 1390 tr/min. Ce type de broyeur peut être construit localement.



Figure 20 : Le broyeur à billes

Enfin on tamise la poudre de latérite obtenue à l'aide d'un tamis de 1 mm et le tamisât obtenu est employé pour le façonnage.

II-2-2- Façonnage

Le façonnage des briquettes fait intervenir de la latérite, de l'eau et un liant hydraulique (le ciment) dans des proportions variables. Il comprend plusieurs étapes : le mélange, le gâchage, le malaxage, le moulage et enfin le démoulage.

II-2-2-1- Mélange

Le mélange s'effectue à sec dans un bol dans le souci d'être le plus proche possible des conditions dans lesquelles travaille un artisan, c'est-à-dire ne disposant pas d'un malaxeur. Le ciment est ajouté progressivement à la latérite à l'aide d'un tamis de 0,5 mm puis avec une truelle, le mélange est réalisé. L'ensemble latérite ciment est plusieurs fois tourné pendant trois (3) à quatre (4) minutes afin d'obtenir un mélange homogène [CHINJE M., 2001].

Selon MALHERBE J et ADDIS B. (1996), la résistance des blocs dépend de la teneur en liant hydraulique. Ainsi la quantité de liant hydraulique (ciment) utilisé pour le façonnage des briquettes varie entre 0 et 50 p.c. de la masse du mélange latérite ciment à sec. Pour faciliter la suite du travail, nous avons effectué tous les calculs sur 5 Kg de mélange.

Le mélange homogène ainsi obtenu est gâché avec l'eau.

II-2-2-2- Dosage en eau

La quantité d'eau de gâchage a été fixée à 85 ml pour les 5 kg de mélange. Cette quantité d'eau a été déterminée à partir du test de Norton qui fixe la teneur en eau approximativement pour la réalisation du géobéton.

II-2-2-3- Gâchage

Le gâchage est effectué dans un bol de la manière suivante : avec le mélange argile ciment, on réalise une structure en forme de cratère volcanique où on y renverse l'eau

préalablement dosée. Ensuite on mélange le tout doucement en faisant tourner et retourner la pâte plusieurs fois à l'aide d'une truelle.

II-2-2-4- Malaxage

Le malaxage se fait à la main dans le bol de mélange. L'ensemble latérite-ciment-eau est plusieurs fois tourné et retourné pendant 5 à 10 minutes afin d'obtenir un mélange homogène. La latérite gâchée avec l'eau forme des boulettes. Le mélange obtenu est ensuite introduit dans le moule de la presse pour être compacté.

II-2-3- Moulage, compactage et démoulage

Pour la confection des briquettes de parement, nous avons utilisé trois techniques de moulage qui sont :

II-2-3-1- Moulage manuel

Le bol est introduit dans un moule de dimension 16x4x2 cm puis est comprimé par simple pression manuelle à l'aide d'une truelle (Fig.21)

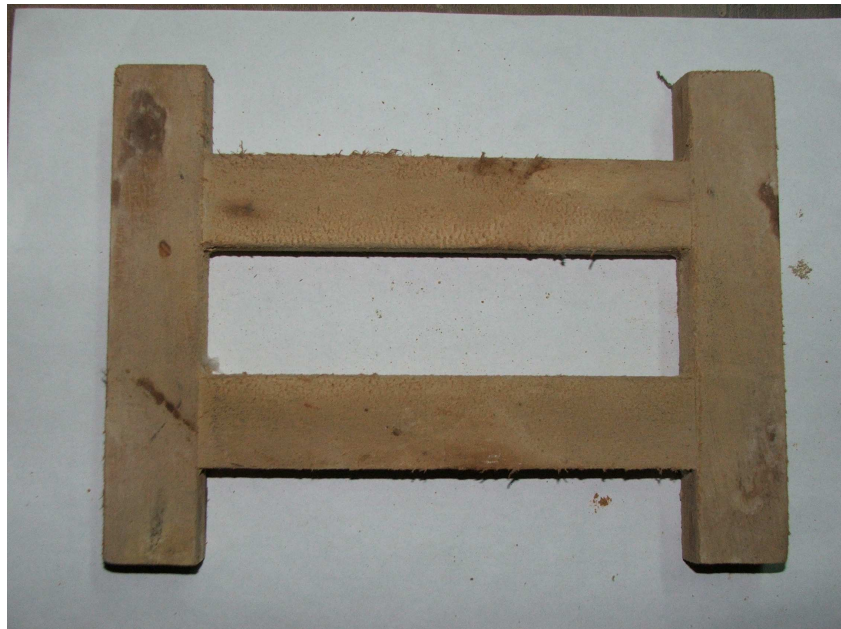


Figure 21 : Moule traditionnelle

II-2-3-2- Moulage par vibro-compactage

Le bol est introduit dans un moule de dimension 16x4x2 cm monté sur une table vibrante (Fig.22)



Figure 22 : La table vibrante

Cette table vibrante est constituée :

- d'une plaque métallique de 1 m de long et 0,5 m de large ;
- d'un moteur de 3000 tr/min, de marque CASADIO, de type MVS/3/100-890 avec une puissance de 0,18 KW qui assure la vibration de la plaque métallique. Ce moteur est fixé à un support à quatre pieds ;
- d'un moule monté sur la plaque métallique par l'intermédiaire d'une pommelle.

NGUYEN D. et MULDER J. (1999) ont indiqué que la machine de vibro-compactage a pour principe, une vibration horizontale et une compression axiale. Ainsi, lors du compactage, le matériau subit simultanément une vibration horizontale et une pression axiale. La vibration permet l'arrangement et la pression axiale (P_z) un serrage des grains (Fig.23).

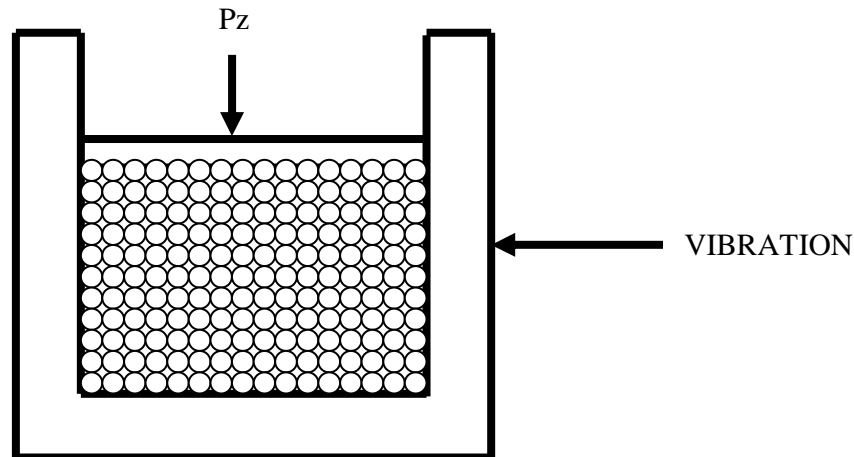


Figure 23 : Principe de vibro-compaction

II-2-3-3- Moulage par la presse manuelle à compactage statique de type TERSTARAM

Elle est constituée :

- d'une manivelle d'une longueur de 65 cm reliée par une chaîne à un levier ;
- d'un levier de longueur 93 cm, en contact avec le piston. Le levier fait au cours de la rotation de la manivelle un angle β avec l'horizontal ;
- d'un piston de longueur 25 cm ;
- d'un moule qui a pour dimension 23x12x8 cm ;
- d'un couvercle qui permet de fermer le moule au moment du compactage (Fig.24).



Figure 24: La presse Terstaram

Pendant le compactage, la manivelle décrit un angle α d'amplitude 360° et la force f appliquée à son extrémité est transmise au piston par l'intermédiaire du levier. Le mode de compactage est donc statique.

La force de compactage est comprise entre 2 et 10 bars. Le taux de réduction est de 1,88.

II-2-3-4- Presse à pastille réglable

Elle est constituée :

- d'une manivelle qui permet d'actionner le piston. Cette manivelle est animée d'un mouvement de va-et-vient ;
- D'un manomètre de lecture de la pression de compactation (Fig.25).

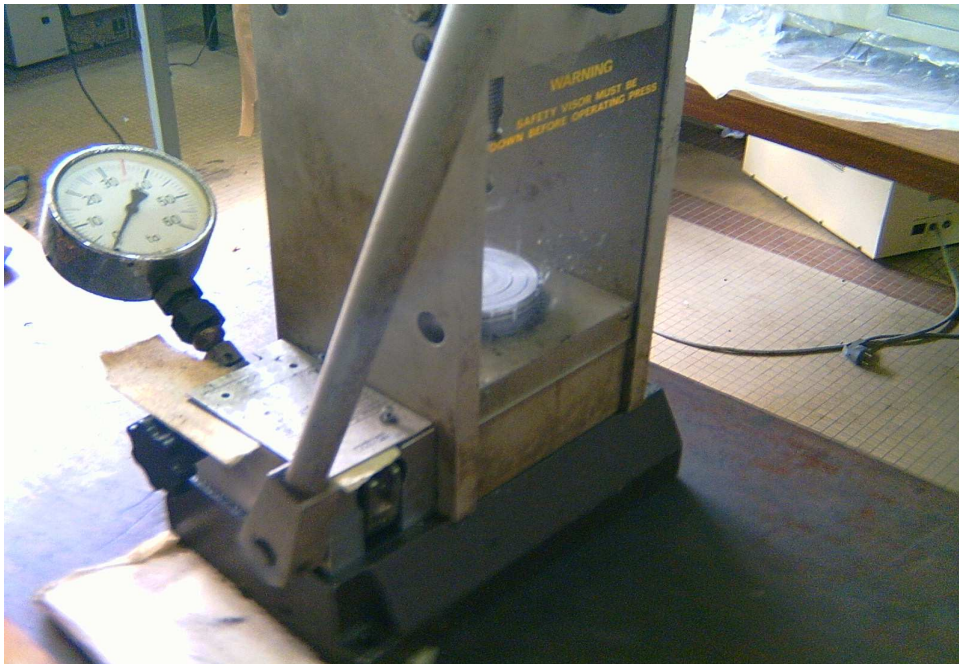


Figure 25 : La presse à pastille

Le compactage se fait entre deux plateaux dans une chambre prévue à cet effet.

II-2-4- Séchage

Le séchage constitue une des étapes les plus délicates dans la fabrication des briquettes de parement en latérite stabilisée au ciment. Car au cours du séchage, il peut naître des

fissures qui pourraient fragiliser la briquette. Sa bonne conduite donc conditionne en grande partie la qualité des produits en fin de la chaîne de production.

Aussi pour respecter les exigences de ce travail, le séchage a eu lieu dans les conditions ambiantes, sous un hangar, à une température moyenne de 29 °C et une humidité moyenne de 72 p.c. Le séchage a duré 28 jours car la majeure partie du ciment portland cristallise avant le 28^{ème} jour après son gâchage. La pâte obtenue de même que les pastilles et les briquettes ont été soumises à des études de caractérisation.

II-3- Caractérisation des mélanges latérite-ciment comprimé

La caractérisation du mélange latérite-ciment a été menée dans le but de déterminer ses performances et ses propriétés. Cette étude a porté d'abord sur la pâte latérite-ciment ensuite sur les briquettes et enfin sur les pastilles.

II-3-1- Etude de la pâte de latérite-ciment

Les tests de consistance, de cigare, de retrait et de maniabilité ont été réalisés sur la pâte de latérite-ciment. Ces différents tests ont été effectués dans le but de comprendre les influences de l'état hydrique sur les caractéristiques telles que la cohésion, la compacité, la compressibilité et le retrait.

II-3-1-1- Test de consistance

La consistance d'une pâte consiste à déterminer la fermeté de cette pâte. Elle nous renseigne sur l'aptitude à la compaction de la pâte.

Sa mesure se fait sur une boule de la pâte de la taille d'une balle de ping-pong. A partir de cette boule, nous essayons de façonner sur une plaque de verre, un colombin le plus long et le plus mince possible sans qu'il ne se casse. Puis, nous déterminons sur chaque colombin, le diamètre juste avant sa rupture.

II-3-1-2- Test de cigare

Le test de cigare nous renseigne sur la cohésion et l'aptitude de la pâte à se déformer sans se rompre.

Pour ce test, nous fabriquons un boudin de la grosseur d'un cigare, c'est-à-dire de diamètre environ 20 mm et d'environ 25 cm de long et nous avançons le boudin lentement dans le vide. Nous notons le comportement de l'échantillon comparativement au témoin que constitue la pâte de latérite sans ciment.

II-3-1-3- Test de retrait

Le test de retrait nous renseigne sur le comportement de la pâte pendant le séchage. Il nous permet de prévoir les déformations et les fissures éventuelles qui peuvent apparaître dans la pâte pendant son séchage.

Pour effectuer ce test de retrait, nous utilisons les planchettes rainurées de la figure 26.



Figure 26 : Planchette rainurée

Les rainures ont 15 cm de largeur, 6 mm de profondeur et 50 cm de longueur. Nous remplissons chaque rainure avec un échantillon de la pâte en arasant la surface de la planchette. Au bout de 24 heures, nous notons le retrait et le nombre de cassure dans chaque rainure.

II-3-1-4- Maniabilité

La maniabilité d'une pâte nous renseigne sur la rhéologique, sa manière de se déformer ou de s'affaisser sous son propre poids. Pour déterminer la maniabilité, nous avons conçu le dispositif de la figure suivante



Figure 27 : Dispositif de maniabilité

Il est constitué par un tuyau fixé sur un support à l'intérieur duquel peut glisser un tube cylindrique de hauteur 14 cm et de diamètre 6,3 cm. Ce tube est terminé par une tige métallique de forme cylindrique de 5 cm de hauteur et de 3 mm diamètre.

Son principe de fonctionnement est le même que celui de l'aiguille de VICAT. La hauteur d'enfoncement de la tige métallique de masse donnée, dans une pâte de forme cylindrique de hauteur 4 cm et de 3,7 cm de diamètre placées sous celle-ci est fonction de leur consistance, pour une durée de l'essai fixée.

Or, la consistance d'une pâte de latérite est fonction de sa teneur en eau. Aussi pour déterminer sa teneur en eau qui correspondrait à une même maniabilité pour les différents mélanges, avons-nous considéré la consistance de la pâte de latérite gâchée avec 85 ml d'eau (pour 5 kg de mélange) comme témoin.

II-3-2- Caractérisation des briquettes

Les briquettes que nous avons confectionnées ont été caractérisées par différentes méthodes que nous décrivons succinctement parce qu'elles ont fait l'objet de nombreuses publications.

II-3-2-1– Essai de variation dimensionnelle

Les essais de variation dimensionnelle se composent du retrait de séchage, de l'évaporation et du gonflement à l'eau.

II-3-2-1-1– Retrait de séchage

Pendant le séchage, certains produits humides comme l'argile ont la propriété de se rétracter. Ce rétrécissement entraîne dans le produit, des déformations et des fissures. Pour contrôler ces modifications qui affectent les briquettes de latérite stabilisée au ciment et noter l'influence du ciment sur sa stabilité, nous avons mesuré au cours du séchage, des variations journalières du volume des briquettes pendant 28 jours. Le volume est calculé à partir des mesures de longueur, de largeur et de hauteur de la briquette. La mesure est réalisée avec un pied à coulisse de précision 0,02 mm. Le retrait est donné par la formule :

$$R = \frac{V - V_o}{V_o} \times 100 \quad [4]$$

Où,

R le retrait;

V le volume en mm³ au jour considéré ;

V_o le volume en mm³ au 28^{ème} jour.

II-3-2-1-2– Evaporation

Au cours du séchage, une partie de l'eau contenue dans le matériau humide s'évapore. Le départ de cette eau est à l'origine du retrait et des conséquences qui lui sont imputables.

Pour contrôler le départ de l'eau dans les briquettes et comprendre l'influence sur l'excès d'eau, nous avons déterminé les variations journalières de la masse des briquettes. Les mesures sont effectuées avec une balance électrique de précision 2 g.

L'évaporation est donnée par la formule :

$$H = \frac{M - M_o}{M_o} \times 100 \quad [5]$$

Où,

H : l'évaporation

M : la masse

M_0 : la masse le 28^{ème} jour.

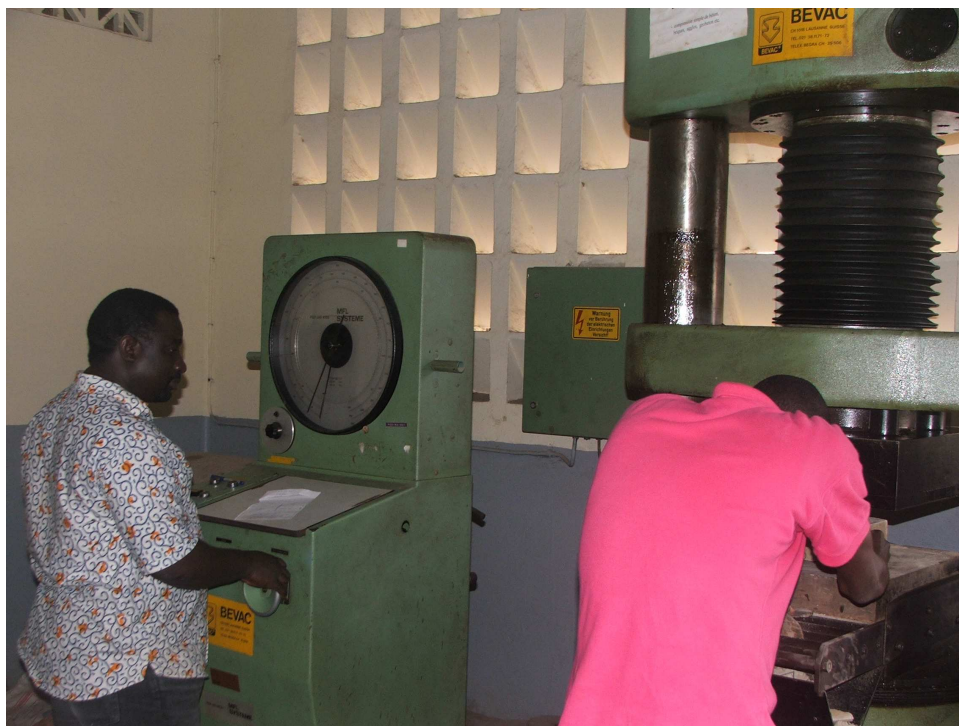
II-3-2-2- Essai de caractérisation mécanique

Les essais mécaniques se composent de la résistance à la flexion et l'étude.

II-3-2-2-1- Résistance à la flexion

La résistance à la flexion d'un produit traduit son comportement lorsqu'il subit des forces mécaniques extérieures. C'est le résultat de la résistance des composants minéralogiques et de leurs liaisons intra-cristallines. Elle consiste en la détermination de la charge à la rupture des échantillons.

Les résistances à la flexion ont été déterminées grâce à une presse hydraulique de 500 t (Fig.28).



**Figure 28 : Presse hydraulique pour la résistance à la flexion
(à gauche le tableau de manipulation ; à droite la presse).**

Pour la mesure des résistances à la flexion, les briquettes sont posées sur des appuis entre les plateaux de la presse hydraulique selon le dispositif de la figure 29. La précision de lecture de la contrainte développée par la presse est de 0,1 KN et la vitesse de la charge est de 2 KN.s⁻¹.

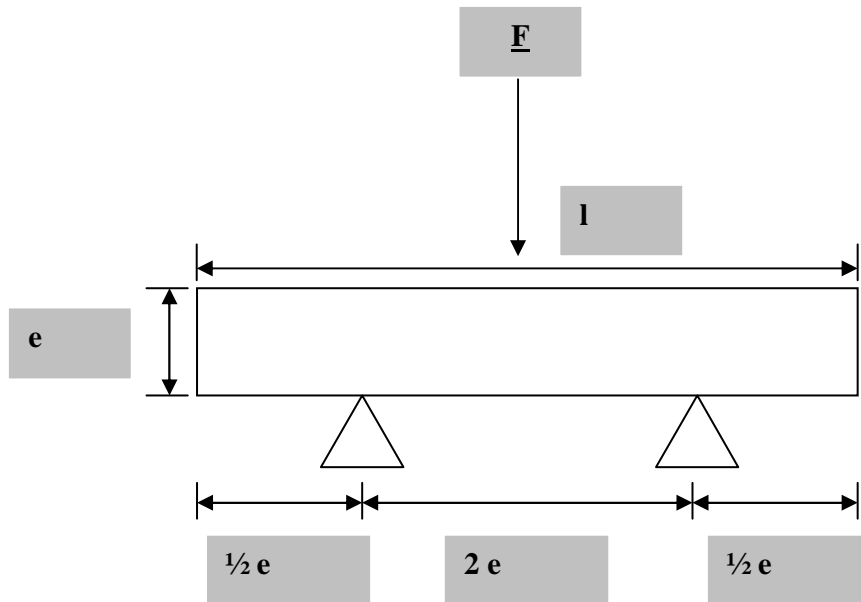


Figure 29 : Schéma de flexion trois points

La résistance à la flexion est donnée par la formule :

$$\tau = \frac{3 F}{e l} \quad [5]$$

où :

F est la lecture en déca Newton

e est l'épaisseur de l'échantillon en cm

l est la longueur de l'échantillon en cm.

Les résistances à la flexion ont été déterminées sur les briquettes sèches et sur les briquettes humides après 4 jours d'immersion dans de l'eau. La valeur de la résistance obtenue est une moyenne calculée sur 5 briquettes.

II-3-2-2-2 - Essai d'usure

La dureté d'un corps est la propriété qu'il possède de rayer un autre corps ou d'être rayé par lui. La dureté superficielle permet de caractériser la durabilité d'un matériau, d'établir le

profil de résistance des couches superficielles ; d'évaluer l'ampleur de certains types de dégradation et d'apprécier la capacité des matériaux à résister à l'érosion de surface. En effet, sous l'action répétée de la pression, du ruissellement de l'eau de pluie et des courants d'air, les murs extérieurs finissent par se dégrader et présentent des crevasses à sa surface (Fig. 30).

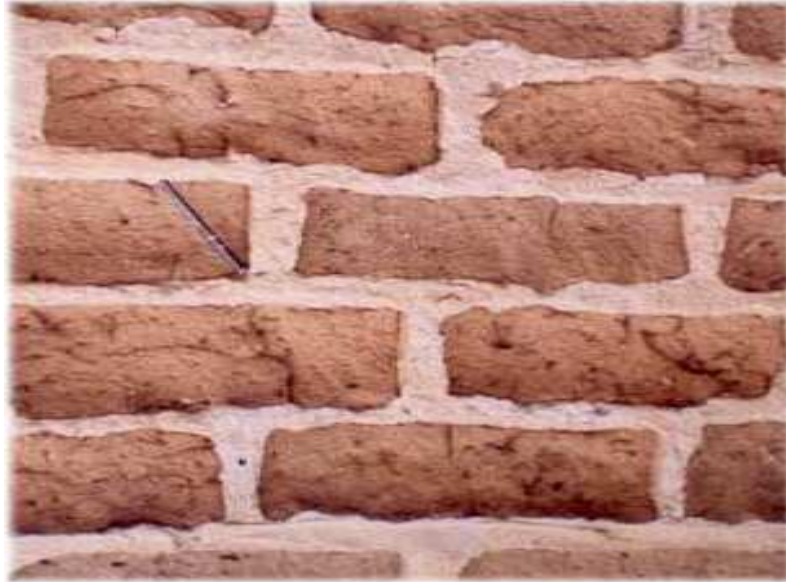


Figure 30 : Usure à la surface d'un mur

Pour la mesure de l'usure, nous avons conçu le dispositif de la figure 31.



Figure 31 : Dispositif de mesure de l'usure.

Il est constitué d'un petit chariot reposant sur quatre roues, en dessous duquel se trouve fixée une brosse métallique. Le chariot est monté sur deux rails qui s'emboîtent par leurs deux extrémités. Le dispositif est fixé au support à travers les tiges métalliques. Les roues ont un mouvement de translation le long des tiges métalliques. Les balais de la brosse métallique sont en acier de longueur 2,9 cm et de diamètre 0,5 mm.

Le chariot est chargé avec une masse de 6 kg. Un poignet permet de tirer le chariot qui se déplace sur les roues. La brosse métallique raye la surface de la briquette sur laquelle elle est placée.

Nous caractérisons l'usure de la briquette par la perte de masse au bout de 25 cycles d'application sur les faces de la briquette constituant les façades internes et externes du futur mur. Ce test est une adaptation de la norme ASTM D 559-44 et D 560-44.

Le mode opératoire employé dans la conduite de ce test a consisté en une immersion des briquettes dans l'eau pendant 48 heures puis leur séchage au soleil pendant 72 heures enfin au brossage des deux faces. Les briquettes sont pesées avant et après chaque brossage. La précision de la balance utilisée est de 2 g.

L'usure est donnée par la formule :

$$\mu = \frac{M - M_f}{S_f} \times 100 \quad [6]$$

Où

M est la masse (kg) de l'échantillon sec avant le brossage ;

M_f est la masse (kg) de l'échantillon après brossage des deux faces ;

S la surface brossée (m²).

II-3-2-3- Essai de caractérisation physique

Les essais de caractérisation physique de la briquette de latérite-ciment ont consisté à :

II-3-2-3-1- Mesure de la porosité par saturation à l'eau

La porosité accessible à l'eau correspond à la mesure du volume des pores contenus dans un matériau accessible à l'eau. C'est une propriété fondamentale d'un matériau qui

influence sa durabilité. Elle permet d'évaluer l'ampleur de certains types de dégradation et de prévoir la durabilité d'une pierre.

La porosité accessible à l'eau a été déterminée suivant le mode opératoire recommandé par l'**AEPC-AFREM, (1997)**. L'appareil utilisé est une balance pour les pesées hydrostatiques de précision 0,1.

La porosité est donnée par l'expression :

$$n = \frac{M_3 - M_1}{M_3 - M_2} \times 100 \quad [7]$$

où

n est la porosité ;

M₃ la masse de l'échantillon saturé en eau pesé dans l'air ;

M₂ masse de l'échantillon saturé en eau pesé dans l'eau et

M₁ masse de l'échantillon séché.

II-3-2-3-2- Essai d'absorption capillaire d'eau

La pénétration d'eau dans un matériau a lieu par absorption d'eau. L'eau absorbée est responsable de nombreux dommages (moisissures, tâches, papiers peints qui se décollent, cloquage des enduits et peintures).

L'absorption capillaire d'eau est déterminée selon le mode opératoire prévu par la commission 25-PEM protection et érosion des monuments, (1980).

L'appareil utilisé est une balance de précision 2 g. Le coefficient d'absorption est donné par la formule :

$$M = A\sqrt{t} \quad [8]$$

Où

m est la quantité d'eau absorbée (kg)

A le coefficient d'absorption (kg.m⁻².s^{-1/2}),

t le temps (s).

II-3-2-3-3- Mesure de la perméabilité à l'eau

L'absorption par gouttes est définie comme le temps d'absorption d'une quantité d'eau limitée et définie par surface du matériau.

Il s'agit d'une mesure simple des modifications des propriétés de la surface des pierres, dues soit à l'altération du matériau, soit à un traitement.

A l'aide d'une burette ordinaire de laboratoire remplie d'eau (fig. 32), 1 ml d'eau tombe goutte à goutte d'une burette sur la surface horizontale de l'échantillon d'une hauteur de 1 cm. On détermine le temps nécessaire à l'absorption totale de l'eau : (a) t_x pour les échantillons traités, et (b) t_n pour les échantillons de référence non traités.

Pour déterminer le temps d'évaporation de la goutte (t_e) pendant l'essai, on fait tomber goutte à goutte d'une façon analogue 1 ml d'eau sur une surface de verre rugueuse (Fig. 32).

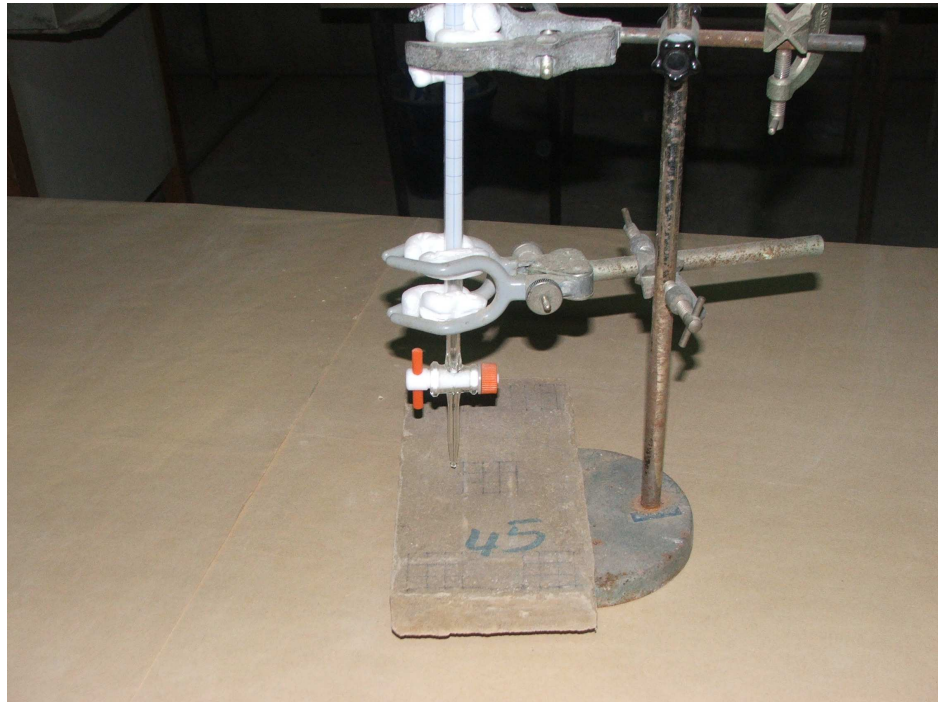


Figure 32 : Dispositif de l'absorption par goutte

L'absorption de la goutte d'eau (WA) par des surfaces traitées ou altérées est calculée en pourcentage selon la formule :

$$WA(\%) = \left(1 - \frac{t_x - t_n}{t_x} \right) \times 100 \quad [9]$$

Où

t_x temps d'absorption par une surface traitée ou altérée;

t_n temps d'absorption par la surface de référence.

II-3-2-3-4- Mesure de la densité hydrostatique

La densité hydrostatique est la mesure de la masse volumique absolue par rapport à l'eau. Elle sert aux calculs de charge et au dimensionnement des ouvrages. La mesure de la densité hydrostatique est réalisée à l'aide d'une balance à pesée hydrostatique et est calculée grâce à la formule :

$$\rho = \frac{M}{\rho_e(M_p - M_e) - \rho_p(M_p - M)} \quad [10]$$

où

ρ est la densité hydrostatique;

ρ_e est la masse volumique de l'eau;

ρ_p est la masse volumique de la paraffine;

M_p est la masse de l'échantillon paraffiné pesé dans l'air ;

M est la masse de l'échantillon pesé dans l'air et

M_e la masse de l'échantillon paraffiné pesé dans l'eau.

- Comportement des briquettes dans l'eau

La tenue dans l'eau d'un matériau est un test qui consiste en l'appréciation de la stabilité dans l'eau du matériau. En effet, certains matériaux lorsqu'ils sont immergés dans de l'eau se dissolvent ou se dégradent. Ainsi cet essai permet de comprendre le comportement dans l'eau du matériau. Pour sa réalisation, les briquettes après 28 jours de séchage sont immergées dans l'eau. Leur comportement et leur état de surface sont appréciés au bout de 24 heures. Après séchage, leur surface est encore appréciée.

Conclusion partielle

En somme, le ciment, l'eau et la latérite sont les matières premières utilisées pour la réalisation de ces travaux. Le ciment de marque Bélier et l'eau sont produits respectivement par SOCIMAT et la SODECI tandis que la latérite a été prélevée dans la localité de Dabou. Une étude de la carrière de prélèvement a été effectuée sur le terrain afin de reconstituer l'histoire de ce gisement. De plus, des prélèvements ont été réalisés dans chacun des différents niveaux latéritiques en vue des tests d'identification.

Ainsi les essais d'analyse granulométrique, limites d'Atterberg, surface et densité spécifique, chimique, calcination, diffraction des rayons X, thermodifférentiel et thermogravimétrie ont été réalisés sur les échantillons prélevés. Ces analyses vont permettre de déterminer les propriétés physiques, mécaniques, chimiques et minéralogiques de la latérite afin de choisir des procédés de valorisation qui lui correspondent le mieux.

La technique de stabilisation avec les presses et du ciment a été retenue. Une presse manuelle traditionnelle à compactage dynamique, une table vibrante à vibro-compactage et une presse de type TERSTARAM ont été employées pour la production de briquettes de parements de latérite stabilisée au ciment. L'élaboration de ces briquettes se fait en plusieurs phases : broyage, mélange gâchage, malaxage moulage, démoulage et séchage à température ambiante à température moyenne de 29°C et une humidité moyenne de 72 p.c. Les dosages en ciment varient entre 0 et 50 p.c. de la masse du mélange. Le gâchage s'est fait d'abord à dosage en eau constant ensuite à maniabilité constante et enfin à teneur en eau fixe de 850 ml pour 5000 g de mélange. La pâte obtenue de même que les briquettes séchées après 28 jours ont été testées. Une autre partie de cette pâte a servi à la réalisation de pastilles pour des analyses micro-structurales.

Sur la pâte, il s'agit de test de consistance, du cigare, de maniabilité et de retrait. Sur les briquettes des essais de retrait, d'évaporation, de résistance à la flexion, de porosité, de perméabilité, d'absorption d'eau, de densité hydrostatique, d'usure et de stabilité à l'eau ont été effectués. La conductivité thermique, la microscopie électronique à balayage (M.E.B.) ont été effectuées sur les pastilles.

Toutes ces analyses de caractérisation de la pâte, des briquettes et des pastilles permettront après interprétation, d'optimiser la teneur en eau et en ciment des briquettes à partir de la définition de leur performance. Elles permettront aussi de connaître le matériau latérite-ciment et de comprendre son comportement.

CHAPITRE III :

**CARACTERISATION
DE LA LATERITE DE
DABOU**

Introduction

Les latérites sont des sols qui par leur mode de formation sont très répandus dans les zones intertropicales. Elles ont été l'objet de nombreuses études et travaux [MENIN M., 1976 ; AMADOU C., 1978]. Ces travaux ont porté surtout sur leur caractérisation minéralogique, chimique ainsi que sur leur classification [L.B.T.P., 1977]. Ils ont permis en outre de préciser leurs domaines d'utilisation. Dans le domaine de la construction par exemple, l'utilisation de la latérite date de très longtemps ; depuis les constructions en terre battue au géobéton en passant par les adobes et les pavets.

En Côte d'Ivoire, cette matière première est insuffisamment exploitée malgré son volume important. Aussi, avons-nous décidé de la valoriser en l'utilisant dans la fabrication des briquettes de parement qui, jusque là, sont fabriquées uniquement avec de l'argile et stabilisées par cuisson. Cette cuisson nécessite beaucoup d'énergie. Or, en Côte d'Ivoire, le coût élevé de l'énergie rend difficile voire impossible l'utilisation de cette technologie.

Ainsi, dans le but de contourner ce handicap, l'équipe de Géomatériaux de l'Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (U.F.R.–S.T.R.M.) de l'Université d'Abidjan-Cocody prévoie, par la présente étude de fabriquer ces briquettes de parement à base de latérite, mais stabilisées à froid à l'aide d'un liant hydraulique. Pour mener à bien cette étude, il nous faut connaître la matière première (la latérite) par sa caractérisation. Cette caractérisation permettra d'identifier les constituants et les propriétés de la latérite. Elle permettra aussi de choisir le stabilisant le mieux adapté pour la latérite. De plus, la caractérisation permettra d'adopter une technologie de confection des briquettes de parement adaptée à la latérite.

Par conséquent, ce chapitre qui traite de la caractérisation de la latérite comportera deux parties : les études sur le terrain et les études au laboratoire.

III-1- Etudes sur le terrain

Les études sur le terrain ont été réalisées le long d'une falaise. Elles ont constitué en la description des différentes couches identifiées.

III-1-1- Description des couches

La latérite étudiée est prélevée juste après la terre arable sur le site de Dabou. Cette ville de Dabou est située dans l'étroite zone sédimentaire côtière de la Côte d'Ivoire [YACE I., 2002]. La figure 33 présente une vue générale du site de l'étude de la latérite qui a pour coordonnées 05°19'805''N et 004°21'920''W.



Figure 33 : Vue générale du site de la latérite

La photo de la figure 33 montre une falaise de plus de 10 m avec de nombreux éboulis. Ce site est exploité par la population qui vient en extraire du sable et de la latérite pour ses constructions.

Les observations sur le terrain nous ont permis de distinguer sur le talus six couches présentées de manière schématisée sur le profil lithologique de la figure 34.

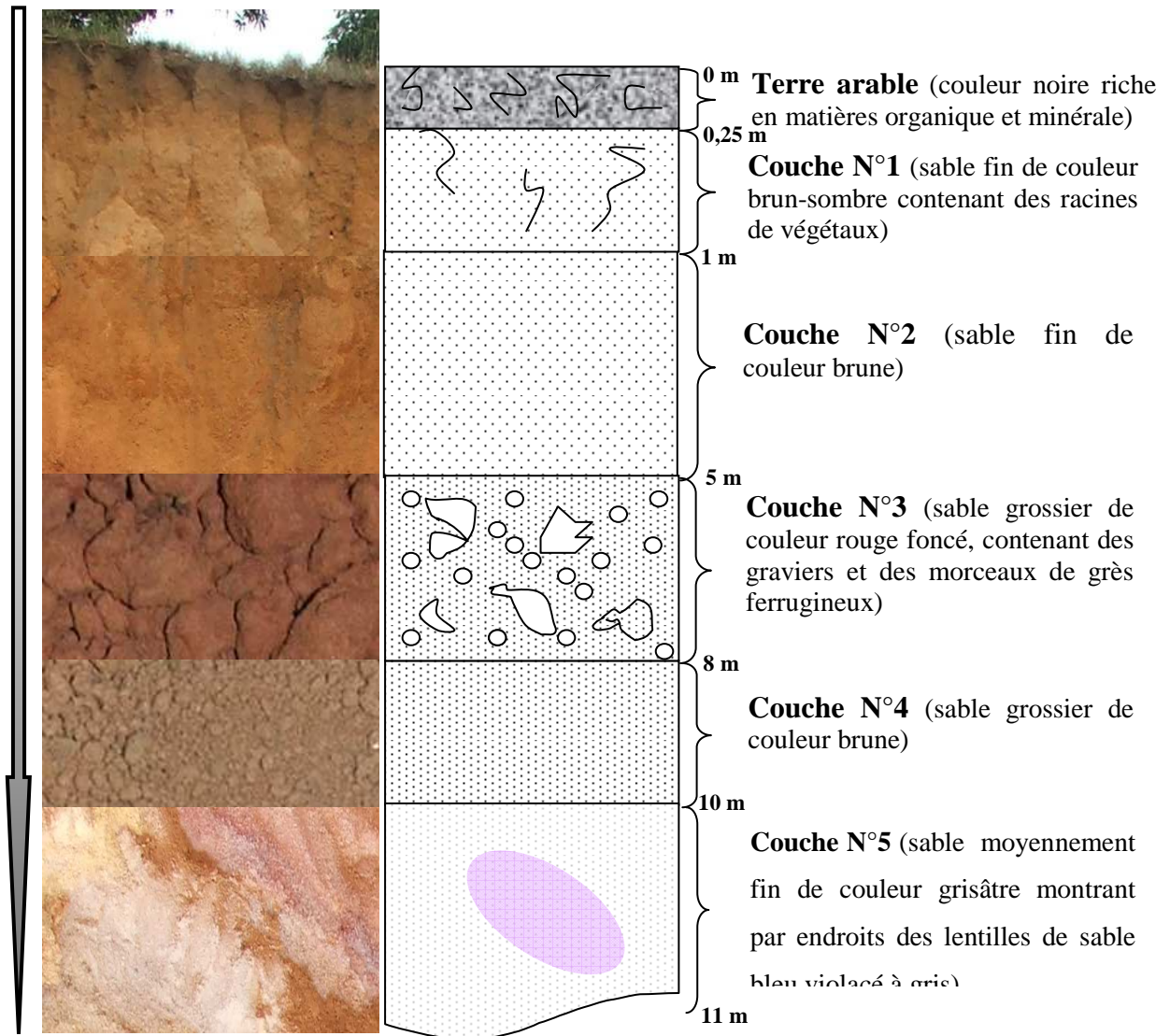


Figure 34 : Profil lithologique du site de la latérite de Dabou

Ce profil lithologique montre une succession de plusieurs couches de couleurs différentes. Nous avons du haut vers le bas :

- la couche N°1 ; elle se trouve juste en dessous de la terre arable. Elle est de couleur brun-foncé et constituée de grains de sable fin. Cette couche contient aussi beaucoup de matières organiques (des débris de végétaux).
- la couche N°2 ; elle est de couleur brune et composée de grains de sable très fins. Elle contient peu de matières organiques.
- la couche N°3 ; elle est de couleur rouge foncé et contient des graviers (Fig 35a) et des morceaux de grès ferrugineux qui sont à la base de la coloration rouge-foncé de cette couche (Fig 35b).



Figure 35 : Eléments constitutifs de la couche N°3
a) gravier b) morceau de grès ferrugineux

- la couche N°4 ; elle est de couleur brune et est constituée de grains de sable grossier.
- la couche N°5 ; c'est un niveau de sable grisâtre avec des lentilles de sable de couleur variant du blanc au violet en passant par le bleu et le rouge ocre (Fig. 36). Le sable qui contient ces lentilles est constitué de grains moyennement fin.

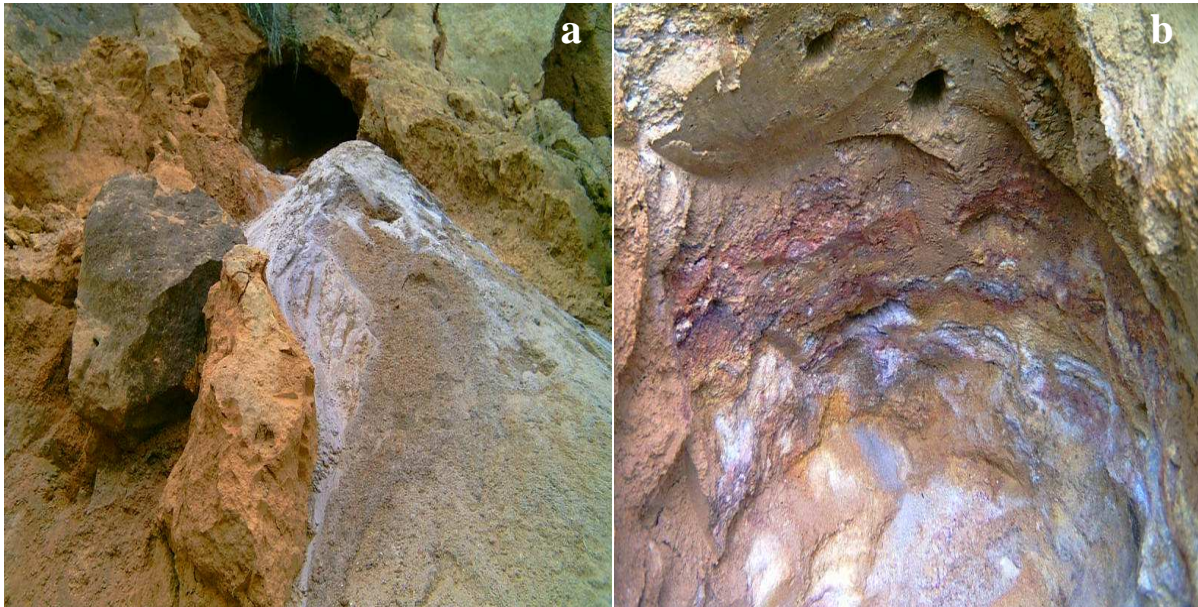


Figure 36 : Couches N°5
a) cavité laissée par l'extraction d'une lentille de sable
b) gamme de couleur de la lentille de sable

L'exploitation de ces niveaux de sables par les entreprises de construction de la ville de Dabou donne lieu par moments à des galeries qui représentent de véritables dangers pour leur personnel et la population environnante.

Afin de confirmer les descriptions faites le long du profil, nous allons nous intéresser aux résultats des analyses préliminaires effectuées sur le terrain.

III-1-2- Analyses des résultats d'essais effectués sur le terrain

Le tableau X indique les résultats des observations et analyses effectuées sur le terrain. Ce tableau montre que :

III-1-2-1- Examen visuel

Les couches N°1 et N°2 contiennent une abondance de fines tandis que les couches N°3 ; N°4 et N°5 en sont pratiquement dépourvues. Ainsi les couches N°1 et N°2; seraient riches en particules argileuses alors que les couches N°3, N°4 et N°5 en seraient très peu pourvues.

Tableau X : Résultats des essais effectués in situ

	Essai visuel	Essai d'odeur	Essai de morsure	Essai de toucher	Essai de lavage
Couche N°1	Abondance de fines	Odeur de moisi	Crisse très peu	Mottes peu rugueuses et plastiques	Se rince difficilement ; sensation savonneuse
Couche N°2	Abondance de fines	Odeur de moisi	Crisse très peu	Mottes peu rugueuses et plastiques	Se rince difficilement ; sensation savonneuse
Couche N°3	Très peu de fines	Odeur de terre mouillée	Crissé sous les dents	Mottes très rugueuses et non plastiques	Se rince facilement
Couche N°4	Peu de fines	Odeur de terre mouillée	Crissé sous les dents faiblement	Mottes rugueuses et peu plastiques	Se rince moins difficilement
Couche N°5	Peu de fines	Odeur de terre mouillée	Crissé fortement sous les dents	Mottes rugueuses et peu plastiques	Se rince moins difficilement
Lentille de sable	Peu de fines	Odeur de terre mouillée	Crissé fortement sous les dents	Mottes rugueuses et peu plastiques	Se rince moins difficilement

III-1-2-2 – Essai d'odeur

Les couches N°1 et N°2 dégagent une odeur qui évoque le « moisi » par contre, toutes les autres couches ont une odeur de terre mouillée. Cette odeur de moisi selon **CRATerre (1985)** serait la preuve de la présence de matière organique dans les terres. Par conséquent, les couches N°1 et N°2 contiendraient de la matière organique.

III-1-2-3 – Essai de morsure

Quand on mord une pincée de chacune des couches et qu'on l'écrase légèrement entre les dents, nous remarquons que les couches N°5, N°3 et N°4 crissent sous les dents avec une sensation désagréable tandis que les couches N°1 et N°2 crissent très peu et on éprouve une sensation lisse. Ces couches N°1 et N°2 seraient plus argileuses que les autres qui sont sableuses. Ces résultats sont en harmonie avec ceux de l'essai visuel.

III-1-2-4 – Essai de toucher

Lorsqu'on effrite un échantillon de chacune des couches, on éprouve une sensation de rugosité pour toutes les couches. Cependant, au niveau des couches N°1 et N°2, les mottes deviennent plastiques et collantes lorsqu'elles sont humidifiées. Ce constat témoignerait selon **CRATerre (1985)** de la présence d'une importante quantité d'argile dans les couches N°1 et N°2.

La rugosité constatée au niveau de la couche N°3 est très forte et nous notons une absence de cohésion entre les grains. Cela confirme que cette couche est graveleuse.

III-1-2-5 – Essai de lavage

Quand on se lave les mains avec des échantillons légèrement mouillés des couches N°1 et N°2, les mains se rincent difficilement et nous éprouvons une sensation savonneuse. Par contre avec les couches N°3, N°4 et N°5 la sensation savonneuse est absente et les mains se rincent facilement. Ceci indique que les couches N°1 et N°2 sont plus argileuses que toutes les autres couches. Cela confirme les résultats des essais de morsure et de toucher.

En somme, l'analyse des résultats des essais effectués sur le terrain montre que les couches N°1 et N°2 sont toutes deux argileuses et contiennent de la matière organique. La couche N°3 est graveleuse tandis que les couches N°4, N°5 et la lentille de sables sont sableuses. La couche N°5 et la lentille de sable qui donnent les mêmes résultats d'analyse de terrain sont identiques. Leur différence se situe au niveau de leur couleur.

Ces résultats confirment la description faite sur le profil. Cependant pour une meilleure différenciation de ces couches, et une connaissance plus approfondie de leurs propriétés, nous avons soumis des échantillons de chacune des couches à des analyses au laboratoire.

III-2- Etudes au laboratoire

Les analyses au laboratoire ont porté sur les couches N°2, N°3 N°4 et N°5 car les études sur le terrain ont montré que les couches N°1 et la lentille de sable sont respectivement identiques aux couches N°2 et N°5. Pour ces différentes couches, les essais que nous avons effectués sont : l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg, l'analyse chimique la diffraction aux rayons X et les analyses thermiques.

III-2-1- Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est réalisée dans le but de déterminer la répartition des différentes fractions qui composent nos échantillons de latérite, ainsi nous pourrions déterminer la texture du sol. Cette granulométrie renseigne encore sur la perméabilité du sol et la nature de la roche mère. Les échantillons provenant de chacune des couches sont séchés et, après avoir éliminé les débris organiques et calcaires respectivement à l'eau oxygénée et aux acides légèrement dilués, le matériau est séché à nouveau puis séparé sur une colonne de tamis. Le tamisât de chaque tamis est récupéré et pesé. La fraction inférieure à 0,008 mm a été analysée par sédimentométrie. Les résultats obtenus ont permis de construire les courbes granulométriques de la figure 37 ci-dessous.

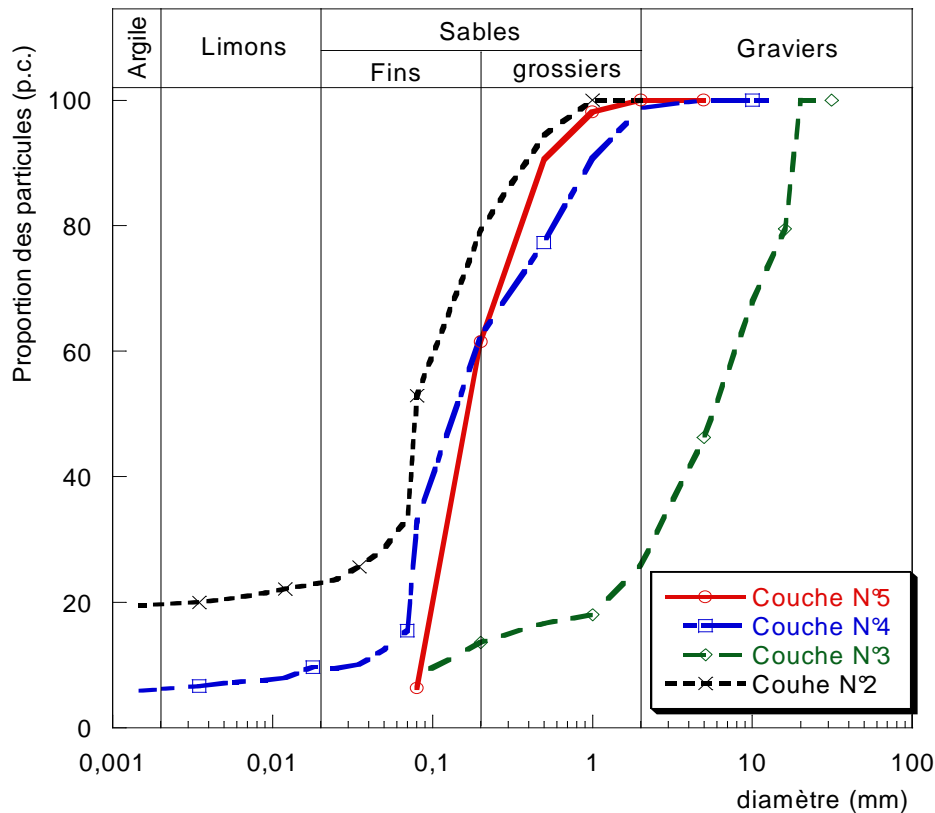


Figure 37 : Courbe d'analyse granulométrique cumulée

Ce graphique montre l'évolution du pourcentage cumulé des grains issus du tamisage et de la sédimentométrie, en fonction de leur diamètre. La répartition des grains de chacune des couches est représentée dans le tableau XI.

Ce tableau montre qu'à l'exception de la couche N°3 qui contient 74 p.c. de gravier, toutes les autres couches n'en contiennent pas. Cette couche contient en plus des graviers des

sables (gravier et sables). Cette couche pourrait être utilisée comme couche de base pour la construction des routes [L.B.T.P., 1980]. Par contre, les couches N°2 et N°4 en plus des sables contiennent des particules fines contrairement à la couche N°5 qui en est dépourvue. Le tableau XI récapitule les différentes proportions des grains des différentes couches en fonction de leur classe granulaire.

Tableau XI : Répartition des grains des couches

COUCHES	PARTICULES (p.c)					Fines (p.c.)
	Graviers (p.c.)	Sables (p.c.)		Limons (p.c.)	Argile (p.c.)	
		Grossiers	Fins			
Couche N°2	0	21	56	3	20	23
Couche N°3	74	13	13	0	0	0
Couche N°4	0	39	51	3,8	6,2	10
Couche N°5	0	39	61	-	0	0

Ce tableau montre bien que les couches N°5 et N°3 ne contiennent pas de fines mais la couche N°3 est très riche en gravier. Elle pourrait servir à la réalisation d'assise de route. Ces deux couches permettraient la réalisation de produits poreux car leur répartition granulométrique est serrée. Cependant les couches N°2 et N°4 qui ne contiennent pas de gravier mais, ont une proportion de fines supérieure ou égale à 10 p.c. avec une répartition granulométrique étalée, donneraient de matériaux peu poreux.

La superposition des courbes granulométriques à celles des fuseaux granulométriques des graveleux naturels, des latérites à pisé et des latérites à adobes de MAMBA (1997) est représentée sur la figure 38.

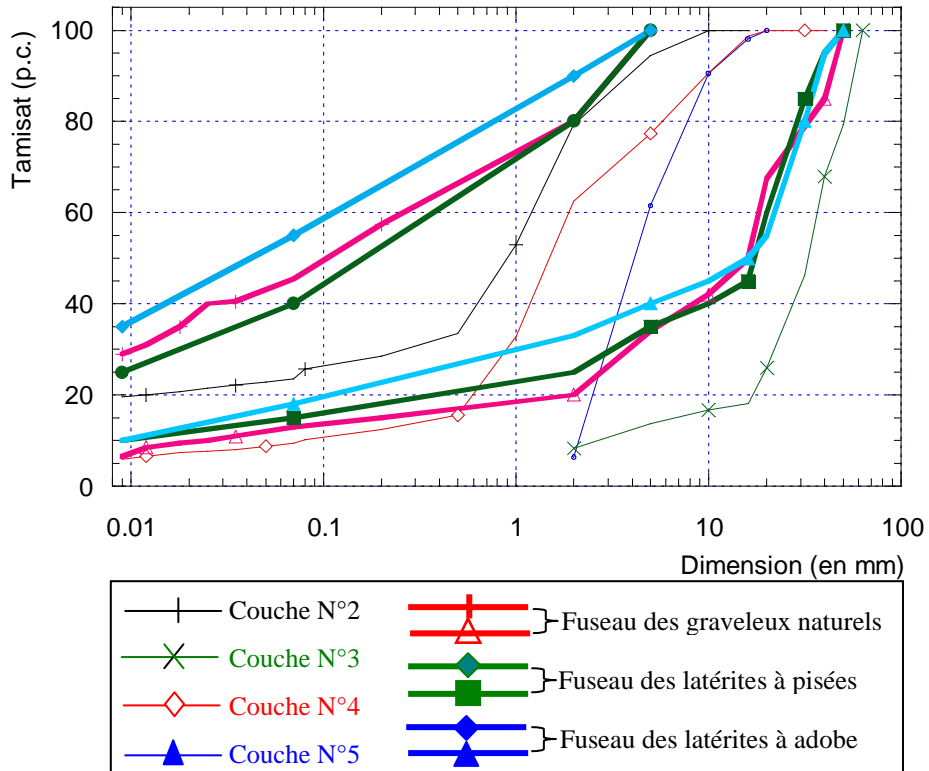


Figure 38 : Superposition des courbes granulométriques de la latérite de Dabou aux fuseaux granulométriques des latérites de MAMBA M. (1997)

Cette figure 38 montre que seule la couche N°2 est totalement comprise dans les fuseaux des graveleux naturels, des latérites à pisé et des adobes. La couche N°2 pourrait donc être utilisée pour la fabrication de matériaux de construction à base de latérite.

Par ailleurs la projection des pourcentages de sables, de limons et d'argile dans le triangle de **DURIEZ M. (1962)** est présentée sur la figure 39.

Il ressort de cette présentation que les couches N° 3 et N°5 qui ne contiennent pas de limons et d'argile n'entrent pas dans ce diagramme. Par contre, la couche N°2 est un sable argileux et la couche N°5 est un sable.

Les résultats de cette étude confirment les observations effectuées sur le terrain. Les couches N°2 et N°4 sont classées respectivement comme des sables argileux et des sables.

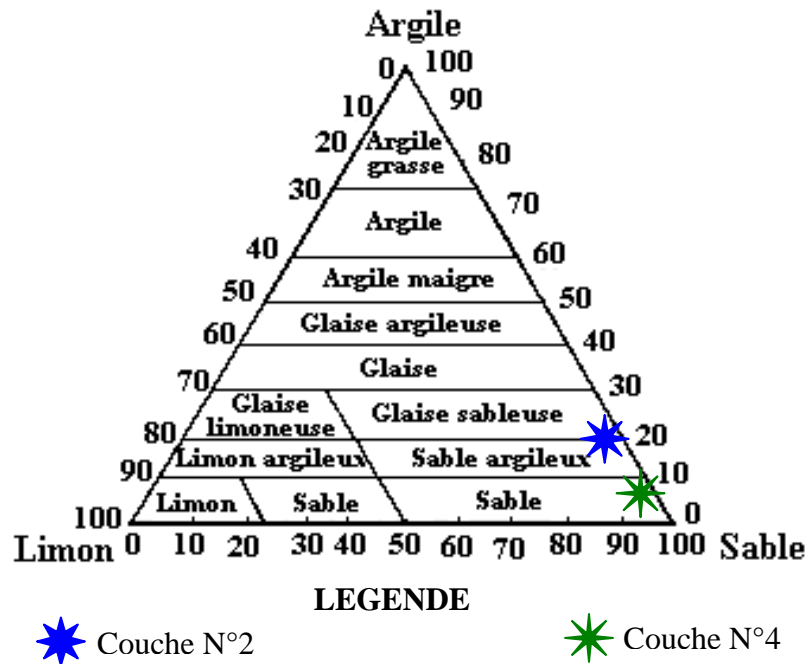


Figure 39 : Classification triangulaire de Duriez M. et Arrambide J. (1962)

Selon YACE (2002), le continental terminal, formation de fin du bassin sédimentaire ivoirien, est constitué de bas en haut de sables grossiers, d’argiles bigarrées puis des sables argileux latéritiques ferrugineux de colorations diverses. Notre étude a porté sur ces sables argileux latéritiques. Elle a montré que ce niveau latéritique est formé d’une succession de couches de sable de granulométrie et de coloration différente. Certaines de ces couches contiennent une proportion importante de fines. Ces fines, suivant la teneur en eau du sol, pourraient influencer leurs propriétés mécaniques [CRAterre, 1987]. Aussi nous sommes – nous intéressés aux Limites d’Atterberg de ces différentes couches.

I-2-2- Limites d’Atterberg

Les Limites d’Atterberg ont été effectuées sur la fraction fine des échantillons des couches selon la méthode définie par la norme [AFNOR NP P 94-051, 1993]. Les résultats obtenus sont contenus dans le tableau XII.

Tableau XII : Limites d'Atterberg des couches du site de latérite de Dabou.

ECHANTILLONS	LIMITES D'ATTERBERG		
	Limite de Liquidité (p.c.)	Limite de Plasticité (p.c.)	Indice de Plasticité
Couche N°2	28	13	15
Couche N°3	19	13	6
Couche N°4	20	8	12
Couche N°5	Non déterminable		

Ce tableau montre que les limites d'Atterberg varient d'une couche à l'autre. Les Limites d'Atterberg des différentes couches varient dans l'ordre suivant les couches N°2, N°4 et N°3. Par contre, Les limites d'Atterberg des couches N°5 ne sont pas mesurables car elles sont essentiellement constituées de sable (plus de 90 p.c.).

De même, les différentes valeurs des limites d'Atterberg des couches N° 2 à N°4 peuvent s'expliquer par la variation de leur granulométrie. La couche N°2 contient des particules limoneuses et argileuses en abondance (23 p.c.). Elle a les Limites d'Atterberg les plus élevées que la couche N°4 qui contient moins de particules fines (10 p.c.). Par contre les valeurs des limites d'Atterberg obtenues à la couche N°3 qui est constituée en majorité de particules de grande taille, n'ayant pas de propriétés colloïdales peuvent se justifier par la nature minéralogique de ses particules.

Pour une meilleure appréciation de l'influence de cette nature minéralogique sur l'état physique des couches, nous avons projeté les valeurs des Limites d'Atterberg dans le diagramme de Cassagrande (Fig. 40).

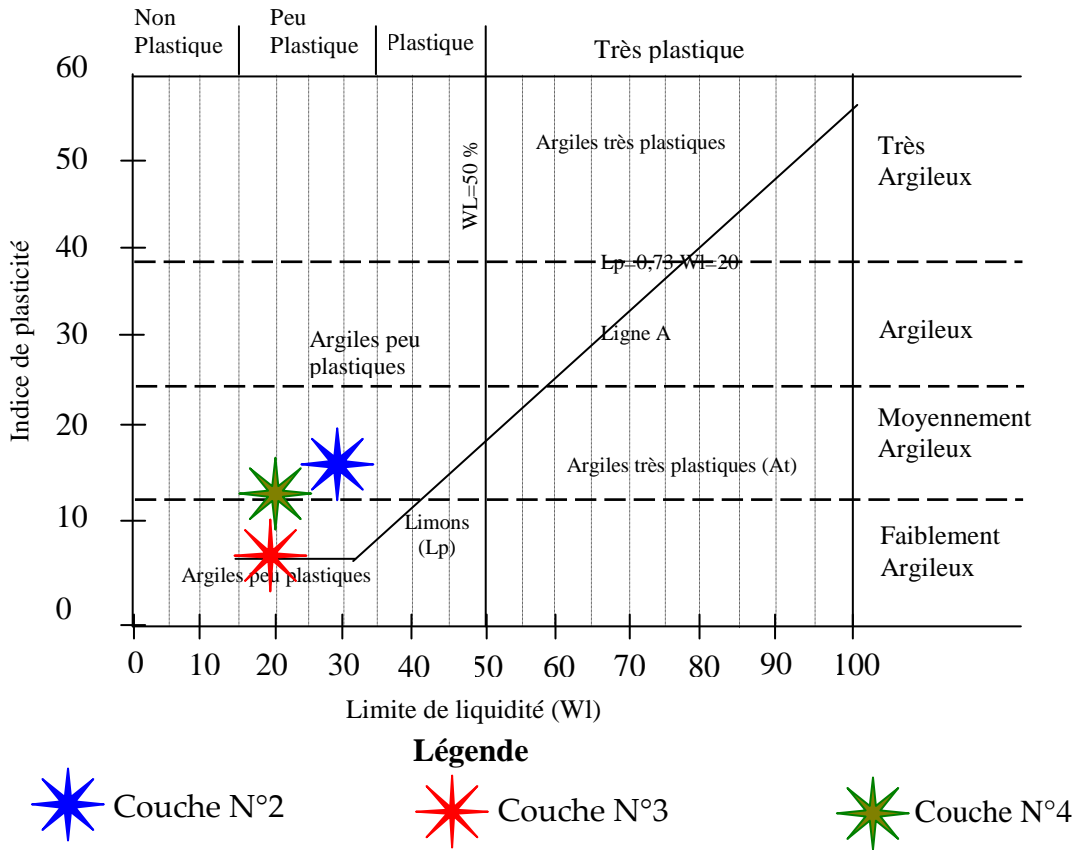


Figure 40 : Diagramme de Cassagrande [PHILIPONNAT G., 1997]

La projection des valeurs de limites d'Atterberg dans le diagramme de Cassagrande montre que les couches N°2, N°3 et N°4 sont toutes peu plastiques.

Ce diagramme montre encore que les couches N°2 et N°4 sont de nature moyennement argileuse tandis que la couche N°3 est de nature faiblement argileuse.

Les couches N°2, N°3 et N°4 sont peu plastiques et contiennent des particules argileuses. Elles sont dotées de propriétés telles que la plasticité et l'adsorption. Ces propriétés leur confèrent la capacité d'être plus ou moins malléable quand elles sont humides et de durcir lorsqu'elles sont sèches. Cependant, la présence des minéraux argileux peut, selon leur nature, être à la base des phénomènes de gonflement et de retrait très important au séchage. Aussi avons-nous déterminé dans le paragraphe suivant la nature de ces minéraux argileux.

I-2-3- Composition minéralogique

Les Limites d'Atterberg ont montré que certaines couches du sol de notre zone d'étude contiennent des minéraux argileux. Pour identifier ces minéraux nous avons procédé à la diffraction aux rayons X et fait les analyses thermiques.

I-2-3-1- Diffraction aux rayons X

La diffraction aux rayons X a été effectuée sur la fraction fine des échantillons de latérite. Elle a donné les diffractogrammes de la figure 41.

Ces courbes présentent la variation de l'intensité de diffraction des différentes couches en fonction de l'angle d'incidence. Elles montrent des pics qui ont été identifiés à l'aide des fiches JCPD (Joint Committee for Powder Diffraction) comme les raies caractéristiques du feldspaths, du quartz, de l'illite, de la kaolinite et du mica (tableau XIII).

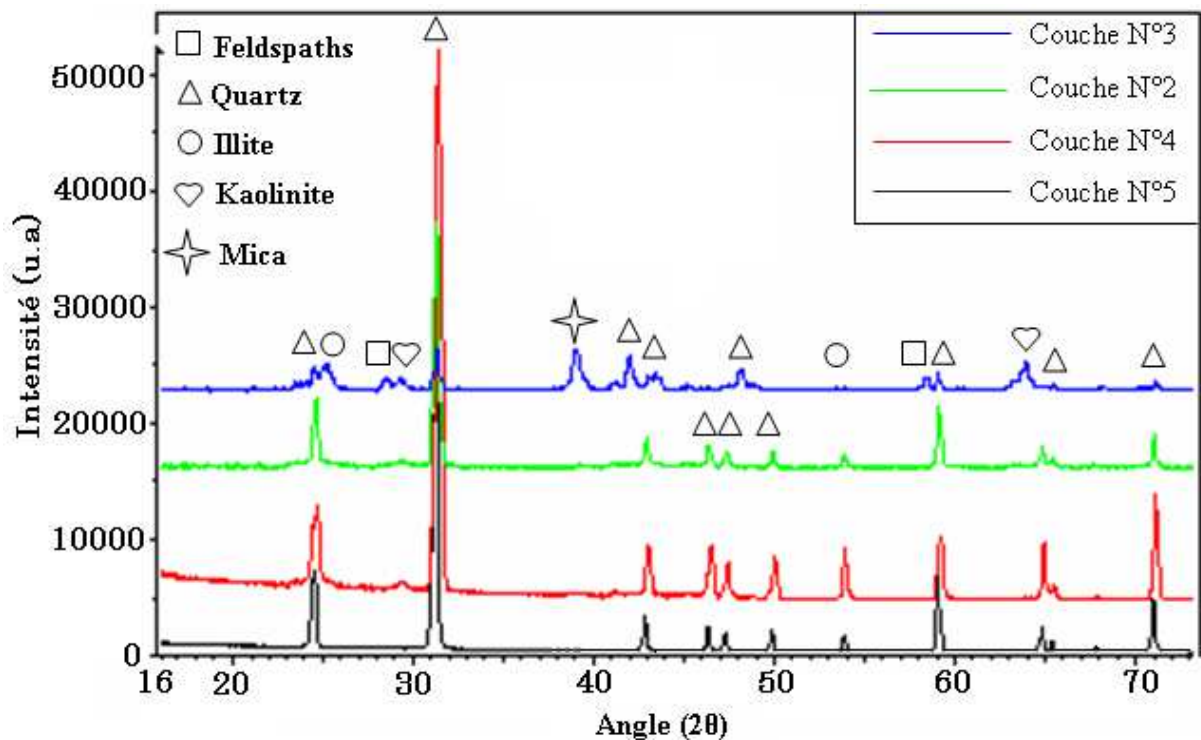


Figure 41 : Courbes de diffraction des rayons X des couches N°2, N°3, N°4 et N°5 de la latérite de Dabou.

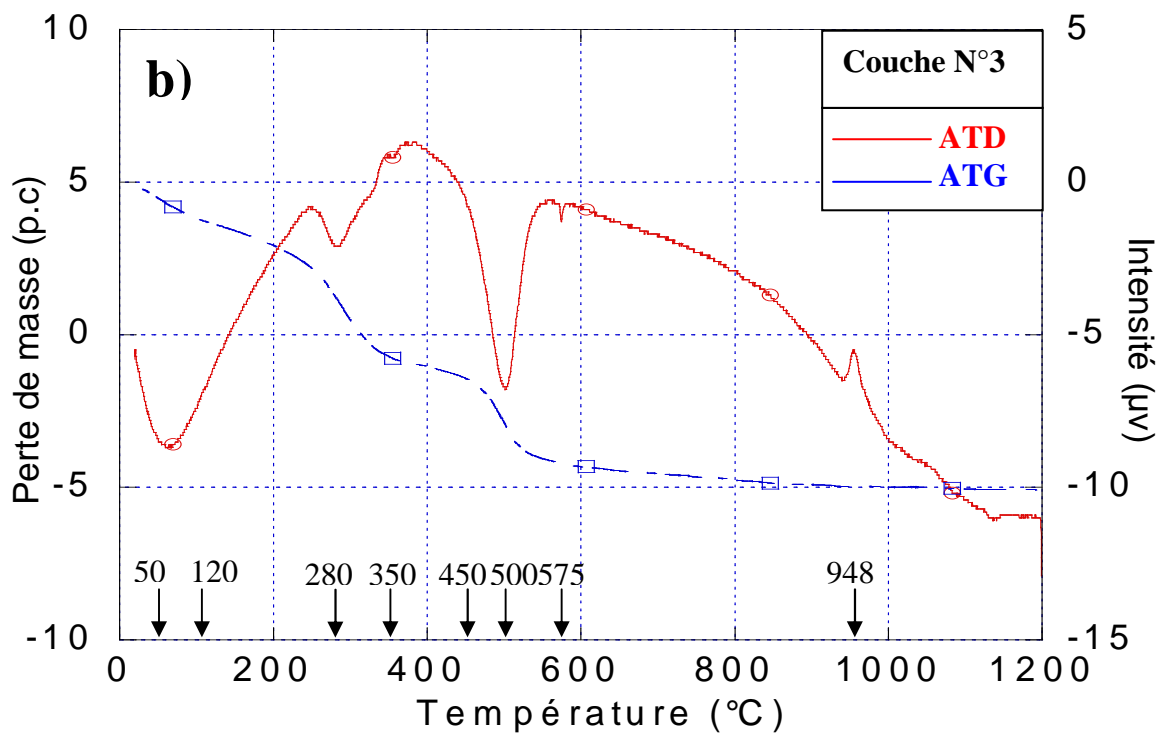
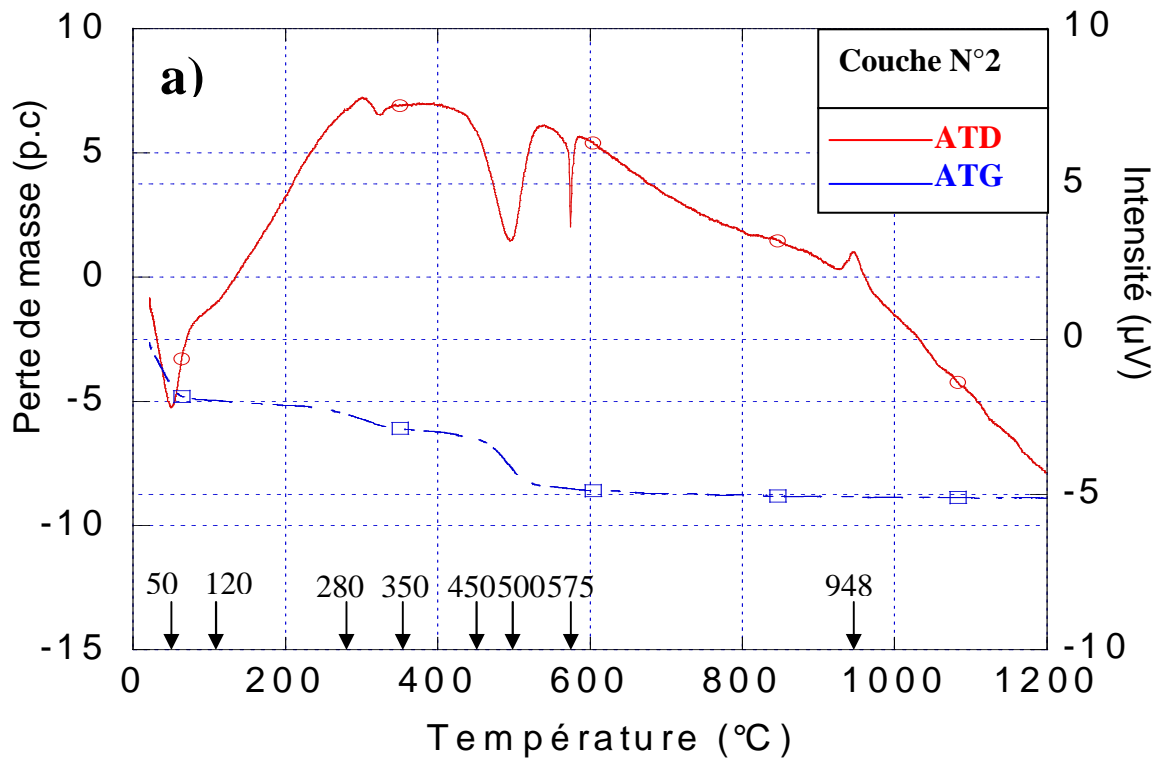
Tableau XIII : Pics caractéristiques des minéraux de la latérite de Dabou

L'angle d'incidence (2θ)	Distance réticulaire (Å)	Minéral
23,50	4,439	Quartz
24,25	4,247	
31	3,341	
43	2,456	
59	1,817	
71	1,540	
14,50	7,155	Kaolinite
29	3,577	
41,90	2,512	
10,50	9,883	Mica
20,90	4,974	
53,50	1,993	
28,45	3,643	Feldspaths
58,5	1,832	Illite
25,142	4,120	

Ainsi nous notons que le quartz et la kaolinite sont deux minéraux que nous rencontrons dans toutes les couches du site de latérite. A ces deux minéraux sont associés de l'illite aux niveaux des couches N°2 et N°4. La couche N°3 est celle qui contient le plus grand nombre de minéraux. Elle contient en plus des trois minéraux de la couche N°2 et N°4, du Feldspaths et du mica. Ces résultats confirment bien ceux des limites d'Atterberg ; la latérite contient des minéraux argileux tels la kaolinite et l'illite tandis que la couche N°5 n'en contient pas. Cependant, pour confirmer la présence effective de minéraux argileux de nature illite et kaolinite, examinons les courbes d'analyse thermique.

I-2-3-2- Analyses thermiques

Les résultats des différentes analyses thermiques sont présentés sur la figure 42. Cette figure montre les courbes d'analyse Thermo-différentielle (A.T.D.) et Thermogravimétrique (T.G.) obtenues sur la latérite de Dabou.



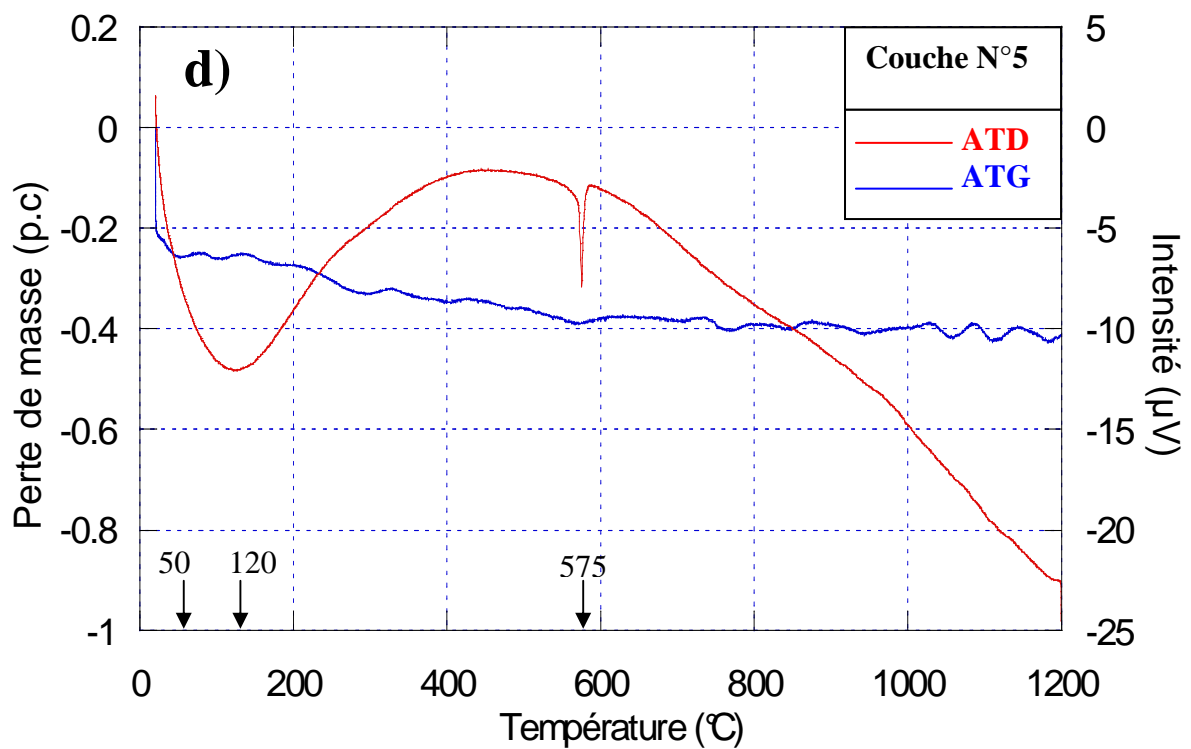
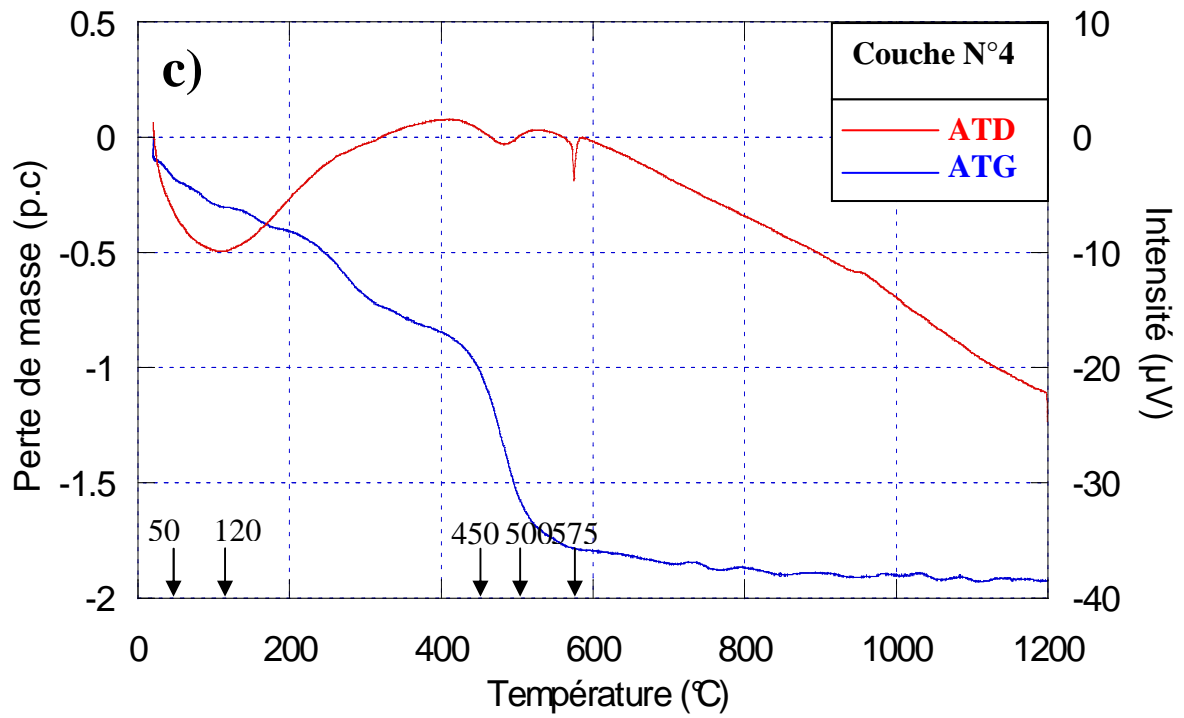


Figure 42 : Courbes d'analyses thermiques des couches de la latérite de Dabou
a) couche N°2, b) couche N°3, c) couche N°4, d) couche N°5.

Le tableau XIV récapitule les températures des différents pics exothermiques, creux endothermiques et les pertes de masse qui les accompagnent.

Tableau XIV : Tableau récapitulatif des pics exothermiques, creux endothermiques et les pertes de masse

Couches	ATD	TG	Observations
Couche N°2	50 °C	2,4	départ de l'eau hygroscopique et résiduelle des minéraux d'illite de l'échantillon.
	298 °C	1,15	départ de l'eau des hydroxydes de fer
	315 °C	0	combustion des substances volatiles issues de la matière organique
	494 °C	2,5	départ de l'eau de constitution de la kaolinite et formation de la méta kaolinite
	575 °C	0	passage du quartz α au quartz β
	947 °C	0	formation de la mullite à partir de la kaolinite
Couche N°3	59 °C	1,1	départ de l'eau hygroscopique et résiduelle des minéraux d'illite de l'échantillon.
	280 °C	3,7	départ de l'eau des hydroxydes de fer
	375 °C	0	combustion des substances volatiles issues de la matière organique
	501 °C	2,7	départ de l'eau de constitution de la kaolinite et formation de la méta kaolinite
	575 °C	0	passage du quartz α au quartz β
	954 °C	0	formation de la mullite à partir de la kaolinite
Couche N°4	105 °C	0,2	départ de l'eau hygroscopique et résiduelle des minéraux d'illite de l'échantillon.
	418 °C	0,4	combustion des substances volatiles issues de la matière organique
	480 °C	1,5	départ de l'eau de constitution de la kaolinite et formation de la méta kaolinite
	575 °C	0	passage du quartz α au quartz β
Couche N°5	120°C	0,18	départ de l'eau hygroscopique et résiduelle des minéraux d'illite de l'échantillon.
	571°C	0,17	passage du quartz α au quartz β

III-2-3-2-1- A.T.D. (Analyse Thermo-Différentielle)

Quel que soit le niveau considéré, nous notons sur les courbes :

- un creux endothermique entre 50°C et 120°C traduisant le départ de l'eau hygroscopique et résiduelle des minéraux d'illite de l'échantillon.

- un creux endothermique entre 280°C et 350°C au niveau des courbes des couches N°2 et N°3 pourrait correspondre au départ de l'eau des hydroxydes de fer qui a lieu entre 200°C et 350°C [BLOT A., 1980]. Ce creux est absent au niveau des couches N°4 et N°5.
- un pic exothermique qui part de 350°C à 400°C correspondant à la combustion des substances volatiles issues de la matière organique. Cette combustion se produit entre 200 et 450°C [AFNOR XP P 94-047, 1998]. Ce crochet est observé sur les courbes ATD des couches N°2 et N°3.
- un creux endothermique compris entre 450°C et 500°C sur les courbes des couches N°2, N°3 et N°4 traduisant le départ de l'eau de constitution de la kaolinite et sa transformation en méta kaolinite et/ou marquant la présence d'illite ou de montmorillonite [ALIPRANDI G., 1979]. Il est absent au niveau de la couche n°5.
- un creux endothermique à 575°C correspondant à la transformation allotropique du quartz, celui du passage du quartz α au quartz β .
- un pic exothermique autour de 948°C pour les courbes N°2 et N°3 indiquant la formation de la mullite à partir de la kaolinite. Cependant, au niveau de la couche N°4 ce pic n'est pas visible. Cette absence pourrait s'expliquer par le fait que selon JOUENNE C., (1984) et ROLLET A., BOUAZIZ R., (1972) la présence de la matière carbonneuse issue de la transformation de la matière organique (humique) peut raboter l'amplitude du pic exothermique à 945°C.

En somme, les différents diagrammes ATD montrent que la latérite de Dabou est constituée, pour toutes les couches, de quartz et de matière organique. Quant à la kaolinite et l'illite elles sont présentes seulement au niveau des couches N°2, N°3 et N°4. Cependant la couche N°5 ne contient ni illite, ni kaolinite. En plus de ces minéraux argileux, les couches N°2 et N°3 contiennent de l'hydroxyde de fer. Ces courbes confirment les résultats de la diffraction des rayons X.

III-2-3-2-2- T.G. (Thermo-Gravimétrie)

Sur les courbes T.G de la figure 42 a, b, c et d des différentes couches, nous constatons :

- une perte de masse entre 60°C et 110°C (observée au niveau de toutes les couches) est due au départ de l'eau zéolitique des minéraux amorphes. Selon MURAT M., (1996) la perte de masse entre 100°C et 400 °C est liée au processus de pré-déshydratation

résultant de la réorganisation des couches octaédriques, affectant en premier l'hydroxyde sur la surface.

- la perte de masse entre 200°C et 400°C (observée également au niveau de toutes les couches) est due à la combustion de la matière organique.
- la perte de masse entre 400°C et 650°C (observée sur toutes les couches) est liée au départ de l'eau de constitution de la kaolinite et à la formation de la métakaolinite selon la réaction :

$Al_2Si_2O_5(OH)_4 \rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_xO_{2-x} + (2-x/2)H_2O$ avec une faible valeur de x (jusqu'à 10 p.c. du résidu du groupe hydroxyle en métakaolinite).

La perte de masse totale est respectivement de 5 p.c., 10 p.c., 1,8 p.c. et 0,4 p.c. pour les couches N°2, N°3, N°3 et N°4.

En somme, les courbes TG montrent la présence de kaolinite, d'hydroxyde et de matières organiques dans toutes les couches de la latérite de Dabou. Ces résultats confirment ceux obtenus précédemment par l'analyse thermo-différentielle.

Ces couches latéritiques sont constituées de quatre minéraux essentiels que sont le quartz, la kaolinite, le mica et le feldspath.

Dans le cadre de la valorisation de cette latérite, nous choisissons la couche N°2 pour la fabrication des briquettes de parement car elle est une couche située à faible profondeur, ce qui facilite le prélèvement. Par ailleurs, elle est sans élément grossier et dispose d'une forte teneur en fines. Elle est peu plastique. En fin, c'est une couche qui contient des oxydes à des teneurs acceptables. Ces caractères confèrent à cette couche une bonne stabilisation au ciment [ARS 675, 1996]. Ainsi, pour une bonne utilisation de cette matière première, nous avons mené une étude des propriétés spécifiques en vue de compléter sa caractérisation.

III-3- Propriétés spécifiques de la couche N°2

La caractérisation spécifique de la couche N°2 a porté sur l'essai Proctor, l'analyse chimique et la teneur en matière organique. Ces essais ont été menés dans le but de nous faire une idée correcte sur l'aptitude à la stabilisation de cette couche et de déterminer la nature du stabilisant idéal.

III-3-1- Essai Proctor

L'essai Proctor est conduit dans le souci de déterminer pour un matériau, la teneur en eau optimale pour obtenir le meilleur compactage, c'est-à-dire la densité sèche maximale. Les résultats de l'essai Proctor sont représentés sur la figure 43. Cette figure présente l'évolution de la densité sèche du matériau en fonction de la teneur en eau en pourcentage.

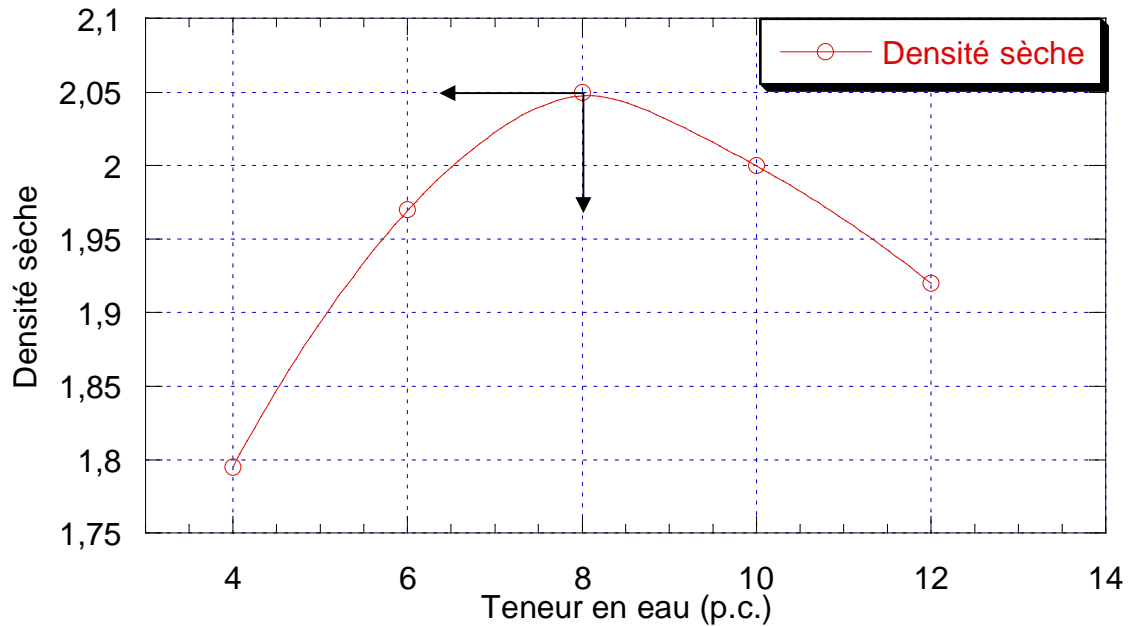


Figure 43 : Courbe de l'essai Proctor

Nous constatons que la densité sèche augmente avec la teneur en eau jusqu'à un maximum de 2,05 pour une teneur en eau de 8 p.c. Lorsque la teneur en eau augmente de 8 à 12 p.c., la densité sèche diminue de 2,05 à 1,97.

La densité sèche optimale (Y max. OPM) de la couche N°2 est de 2,05 avec une teneur en eau optimale (Wopm) de 8 p.c. Ainsi pour obtenir un gâchage optimal d'une certaine masse sèche de la couche N°2, il faut une quantité d'eau d'environ 8 p.c. de cette masse. De plus, ce résultat indique que cette couche N°2 est stabilisable mécaniquement grâce aux procédés de compaction ou de vibration qui conduisent à une augmentation de la densité de la couche.

Ces valeurs de densité sèche 2,05 et d'optimum Proctor 8 p.c. confirment une fois de plus la nature latéritique de la couche N°2 car elles se situent bien dans la marge définie par **LYON ASSOCIATES, (1970)**.

En somme, la couche N°2 est une latérite dont on peut modifier la structure par densification. Cette latérite pourrait aussi être stabilisée à l'aide des divers stabilisants chimiques qui

existent sur le marché. Le choix d'un tel stabilisant dépend de la composition chimique du matériau

III-3-2- Propriétés chimiques

Les résultats de cette analyse chimique par spectrométrie de fluorescence aux rayons X sont consignés dans le tableau XV suivant :

Tableau XV : Analyse chimique de la couche N°2

Eléments chimiques dosés	Concentration (En pourcentage)
SiO₂	66,82
Al₂O₃	22,30
Fe₂O₃	8,42
TiO₂	0,98
P₂O₅	0,37
Cr₂O₃	0,26
K₂O	0,25
SO₃	0,21
Na₂O	0,18
CaO	0,13
ZrO₂	0,08

Ce tableau présente la répartition en proportions des différents oxydes dosés dans les échantillons de la couche N°2.

Nous constatons que ces éléments chimiques peuvent être regroupés en trois ensembles :

- les éléments majoritaires (SiO₂, Fe₂O₃ et Al₂O₃) dont la teneur représente plus de 97,5 p.c. de l'ensemble ;
- les éléments minoritaires (TiO₂, P₂O₅, Cr₂O₃, K₂O, SO₃, Na₂O, et CaO) ;
- les éléments en traces tels que ZrO₂.

L'abondance de la silice et de l'alumine confirme que cette couche est riche en minéraux alumino-silicatés

Le rapport caractéristique « R » ($\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$) de la couche N°2 est de 2,2. Cette valeur est très voisine de la valeur caractéristique des latérites qui est de 2 [COUGNY G., 1970]. Ce rapport confirme une fois de plus la nature latéritique de la couche N°2.

Les résultats de l'analyse chimique indiquent que cette couche N°2 ne contient pratiquement pas de sulfate car sa teneur n'a pu être déterminée. Elle est donc très inférieure à la teneur limite définie par la norme. Cette teneur limite doit être inférieure à 3 p.c. [ARS-680, 1996] pour que le sol soit efficacement stabilisable avec du ciment. Ainsi, la couche N°2 peut être stabilisée avec du ciment.

Ce tableau montre aussi que la couche N°2 a une forte teneur en oxydes et hydroxydes métalliques (Fe_2O_3 et Al_2O_3 ; plus de 30 p.c.). Cette forte teneur en oxydes métalliques serait un atout pour l'obtention de produits de fortes résistances dans le cas d'une stabilisation au ciment de cette couche.

La couche N°2 de la latérite de Dabou présente des atouts qui indiquent qu'elle peut être efficacement stabilisée avec du ciment. Cependant, l'action du ciment pourrait être inhibée par la présence de matière organique, dont nous allons déterminer la teneur.

III-3-3- Teneur en matière organique

Le dosage de la matière organique de la couche N°2 a été effectué par la méthode de calcination. Ce dosage montre que la couche N°2 a une teneur en matière organique de 1,6 p.c. La présence de matière organique dans cette couche est due au transport par lessivage depuis la couche de terre arable de surface.

Cette teneur en matière organique est inférieure à la valeur définie par la norme qui est de 2 p.c. [CRAterre, 1994]. La couche N°2 peut donc être stabilisée avec du ciment.

L'analyse chimique et la teneur en matière organique nous ont montré que la couche N°2 peut être stabilisée avec du ciment Portland. Néanmoins, pour nous rassurer de l'efficacité de l'utilisation d'un tel stabilisant, nous avons projeté les propriétés particulières de cette couche dans le diagramme de NORTON J., (1986) afin de déterminer le stabilisant le mieux indiqué pour cette dernière.

III-3-4- Choix du stabilisant

La figure 45 présente les résultats de la projection des valeurs des Limites d'Atterberg de la couche N°2 dans le diagramme de **NORTON J., (1986)**.

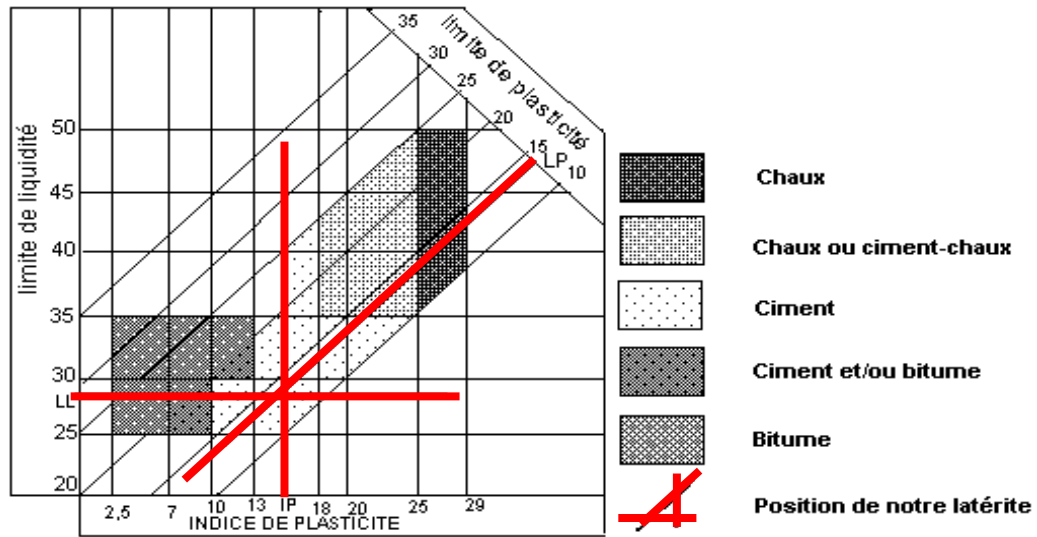


Figure indicatrice de stabilisant potentiel

Figure 45 : Figure indicatrice de stabilisant potentiel

Cette figure indique que le stabilisant adapté à la couche N°2 est le ciment. Ainsi, pour la confection de nos briquettes de parement, nous allons utiliser le ciment pour la stabilisation à froid. Ce liant permettra non seulement d'assurer la cohésion entre les particules par des liaisons chimiques entre les cristaux, mais permettra aussi d'imperméabiliser les briquettes de parement. En effet, le ciment Portland comme stabilisant cumule plusieurs procédés de stabilisation : physiques et chimiques.

Conclusion partielle

Les études sur le terrain et les analyses au laboratoire permettent d'affirmer que la latérite de Dabou fait partie de la couche d'argile et sable fluvio-lagunaire du bassin sédimentaire de l'Afrique occidentale (nigéro-éburnéen) décrite par **HINSCHBERGER F. (1972)**. Ce profil de sédimentation est constitué de bas en haut comme suit :

- un sable fin contenant des lentilles de sable de couleur variées ;
- un sable fin contenant des particules argileuses ;
- un sable grossier riche en gravier ;
- un sable argileux contenant un peu de matière organique ;
- un sable argileux de couleur brune due à sa forte teneur en matière organique ;
- et la terre arable.

Du point de vue minéralogique, ces couches latéritiques sont constituées de cinq minéraux essentiels que sont le quartz, l'illite, la kaolinite, le mica et le feldspath.

La couche N°2, à cause de sa richesse en particules argileuses, de ses valeurs des Limites d'Atterberg, de sa composition minéralogique et de son aptitude à être compactée sera utilisée pour la réalisation de la suite de nos travaux.

Cette couche N°2 va être employée pour la fabrication des briquettes de parement car elle est une couche située à faible profondeur ce qui facilite le prélèvement. Elle est sans éléments grossiers et dispose d'une forte teneur en fines. C'est une couche qui contient des oxydes à des teneurs acceptables ce qui lui confèrent une bonne aptitude à la stabilisation avec du ciment portland. De plus, sa forte teneur en oxyde colorant pourrait permettre d'éviter l'utilisation des colorants artificiels.

CHAPITRE IV:
**CARACTERISATION
DES BRIQUETTES DE
PAREMENT
LATERITE-CIMENT**

Introduction

La latérite de Dabou a été utilisée pour la réalisation des briquettes de parement. Cependant, l'emploi d'un tel matériau en construction exige qu'il respecte certaines spécifications. Aussi ces briquettes ont-elles été soumises à des tests de caractérisation. Dans ce paragraphe, nous nous attèlerons à examiner les résultats de ces différents tests.

Il comportera donc trois parties :

- dans la première, nous parlerons de l'influence du rapport eau-ciment sur la nature de la pâte à compacter ;
- dans la deuxième, nous traiterons de l'influence du type de presse sur les briquettes de parement ;
- dans la troisième, nous examinerons l'influence du ciment sur les performances mécaniques et physiques des briquettes de parement.

IV-1- Influence du rapport eau ciment sur la nature de la pâte de latérite

Selon **HOUBEN H *et al*, (1989)** la quantité d'eau optimale pour obtenir un meilleur compactage et une bonne densification de la latérite se situe à l'optimum Proctor. Cependant, la pratique recommande que cette teneur soit dans la fourchette de plus ou moins 3 p.c. de l'optimum Proctor (OPM). Dans le cas de la latérite de Dabou, elle est comprise entre 5 et 11 p.c.

Dans le cas d'un mélange latérite ciment, en plus de l'hydratation de la latérite, celle du ciment nécessite une quantité suffisante d'eau pour sa bonne prise. Cette quantité d'eau de gâchage affecte le comportement du mélange. Ainsi, dans ce paragraphe, nous examinerons l'influence de la quantité d'eau de gâchage sur le comportement d'une pâte de latérite-ciment plus précisément sur sa maniabilité.

IV-1-1- Influence de la quantité d'eau sur la maniabilité des pâtes latérite-ciment

La quantité d'eau de gâchage est un paramètre important dans la production de béton de haute performance. Il permet une bonne hydratation du ciment. Il permet aussi d'obtenir des pâtes qui présentent une même aptitude à se mettre en place c'est-à-dire la même ouvrabilité. Pour ce faire, nous allons analyser les résultats de mesure de la consistance et de

la hauteur d'affaissement de pâtes de latérite-ciment obtenues à différentes quantités d'eau de gâchage. Les résultats obtenus sont contenus dans le tableau XVI.

Tableau XVI : Effet de la quantité d'eau de gâchage sur la maniabilité

Quantité d'eau (g)	Pâte sans ciment		Pâte avec 20 p.c de ciment		Pâte avec 50 p.c de ciment	
	Consistance	Taux d'affaissement (p.c.)	Consistance	Taux d'affaissement (p.c.)	Consistance	Taux d'affaissement (p.c.)
40	Mi-ferme	Indéterminé	Humide	Indéterminé	Peu humide	Indéterminé
55	Ferme	fracture	Mi-ferme	fracture	Humide	Indéterminé
60	Mi-molle	15	Ferme	18	Mi-ferme	Indéterminé
70	Molle	23	Mi-molle	20	Ferme	fracture
80	Très molle	-	Molle	25	Mi-molle	17

Ce tableau indique que pour une même teneur en ciment, les propriétés de la pâte varient avec l'augmentation de la quantité d'eau. L'augmentation de la quantité d'eau entraîne une baisse de la consistance tandis que le taux d'affaissement augmente. Ce changement de propriété de la pâte est lié à l'excès d'eau de gâchage.

Le tableau XVI indique aussi que lorsque la quantité d'eau de gâchage est constante, les propriétés de la pâte changent avec la teneur en ciment. La consistance de la pâte augmente avec la teneur en ciment tandis que l'affaissement baisse. Ces changements sont dus à la modification des propriétés de surface de la fraction fine (argile) [KOUAKOU C., 2005]. Les particules d'argile ont deux propriétés essentielles : la capacité d'échange d'ions et d'adsorption d'eau. La portlandite $[Ca(OH)_2]$ libérée par l'hydratation du ciment est rapidement absorbée par les particules d'argile. Cette absorption modifie les propriétés des argiles et affecte donc leur plasticité et leur viscosité. Selon MOREL M. *et al*, (1974) les réactions provoquées par Ca^{2+} et OH^- engendrent :

- une augmentation de la limite de plasticité et une diminution de l'indice de plasticité ;
- une augmentation de la teneur en eau optimale ;
- la formation de grumeaux au malaxage, ce qui rend le sol beaucoup maniable et favorise les manipulations. Le sol devient en effet nettement moins collant.

Le comportement d'une pâte de latérite-ciment varie avec son degré d'hydratation de même qu'avec la teneur en ciment.

Les pâtes obtenues vont servir à la réalisation de briquettes de parement par deux méthodes de densification : la compaction statique et le vibro-compactage. Ces deux méthodes de densification nécessitent des pâtes d'ouvrabilité différente. Aussi avons-nous adopté le test de Norton afin de nous assurer qu'en fonction de la teneur en ciment les pâtes employées pour chaque méthode ont la même maniabilité.

IV-1-2- Détermination de la quantité d'eau à maniabilité constante

Le test de **NORTON J. (1986)**, stipule que la teneur en eau de gâchage pour une terre à brique est déterminée en laissant tomber une boule réalisée avec le matériau d'une hauteur de 1,50 m environ. Suivant son mode d'affaissement, la boule contient peu, beaucoup ou la teneur en eau idéale. Les résultats des tests de Norton réalisés sur différentes pâtes de latérite ciment ont donné les résultats contenus dans le tableau XVII.

Ce tableau montre que lorsque la quantité d'eau augmente, le mode d'affaissement passe d'un état de fracture en de nombreux petits morceaux à un étalage pâteux sur le support. Cette variation du mode d'affaissement est due à la variation de la maniabilité de la pâte pour une hauteur de chute constante. En effet, sous une pression constante, une pâte se déforme de façon variable en fonction de son taux d'hydratation. Ainsi lorsqu'elle est très peu hydratée elle ne se déforme pratiquement pas. C'est ce qui explique que lors de la chute, elle se fractionne en de nombreux petits morceaux (Fig. 46a). Cependant, quand la quantité d'eau est trop importante, elle se déforme facilement et épouse la forme de l'espace mise à sa disposition. C'est la raison pour laquelle elle s'étale latéralement sur le support et y adhère totalement (Fig. 46c).

Selon Norton, la teneur en eau est acceptable pour une compaction statique correspondant à un morcellement de la boule en 3 ou 4 parties (Fig.46b).

Pour la latérite, cela est obtenu à 55 ml pour 500 g de mélange. Ce qui correspond à l'optimum Proctor plus 3 p.c. d'eau. De même, cette teneur idéale est obtenue avec 20 p.c. de ciment à 60 ml pour 500 g de mélange. Cela correspond à un rapport eau/ciment de 0,6.

Tableau XVII : Influence de la quantité d'eau sur le mode d'affaissement des pâtes

Nature du mélange	Volume d'eau pour une masse de 500 g de mélange (en ml)	Mode d'affaissement	Méthode de mise en forme adaptée
Pâte de latérite sans ciment	40	Se fracture en de nombreux morceaux	
	55	Se fracture en 3 ou 4 morceaux	Compactage statique
	60	S'affaisse peu	
	70	S'affaisse et colle légèrement	
	80	S'étale entièrement et adhère	Vibro-compactage
Pâte de latérite contenant 20 p.c. de ciment	40	Se sépare en petits morceaux	
	55	Se sépare en de nombreux petits morceaux	
	60	Se fracture en 3 ou 4 morceaux	Compactage statique
	70	S'affaisse et colle légèrement	
	80	S'étale entièrement et adhère	Vibro-compactage

Ces deux pâtes ont le même mode d'affaissement et donc la même maniabilité.

Pour la méthode de densification par vibro-compactation, la pâte convenable est obtenue entre 80 et 85 ml d'eau pour 500 g de mélange.

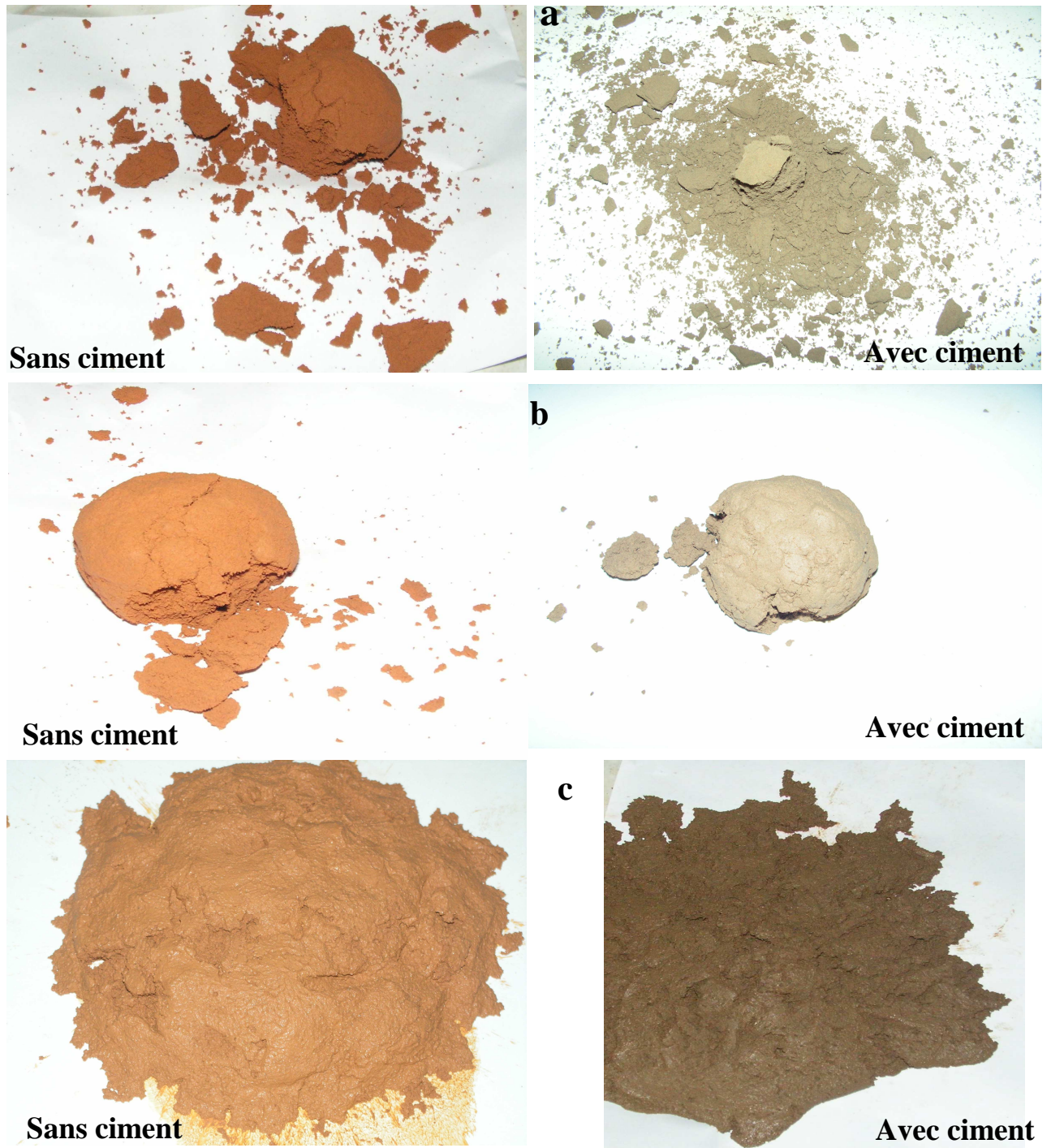


Figure 46 : Etat de la pâte après la chute de 1,5 m ; a) pâte sèche, b) pâte mi-ferme ou ferme, c) pâte molle

En conclusion, l'étude de la détermination de la teneur en eau de gâchage montre que le comportement des différentes pâtes de latérite-ciment en présence de l'eau est très complexe. Cette complexité est due à l'hydratation du ciment, à la variation de la quantité de ciment et surtout à la modification des propriétés de surface de la fraction argileuse. Cependant, la pâte

idéale pour confectionner des briquettes esthétiquement parfaites doit être ferme ou mi-ferme c'est-à-dire le taux d'affaissement est compris entre 18 et 22 p.c. pour les presses à compaction statique. Pour la méthode de densification par vibro-compaction, la pâte convenable est obtenue entre 15 et 16 p.c. d'eau pour la masse du mélange.

Avec cette quantité d'eau, nous avons confectionné des pâtes que nous avons utilisées pour la fabrication des briquettes de parement.

IV-2- Influence du type de presse et du ciment sur les briquettes de parement

Dans le souci de confectionner des matériaux plus performants et qui répondent aux normes dans le domaine de la construction, il devient impératif de trouver la technique qui permet d'atteindre cet objectif. Pour ce faire, nous avons sélectionné trois types de presse les plus répandus sur le marché national afin de comparer leurs effets sur les briquettes de parement. Les trois presses utilisées sont : la presse manuelle artisanale, la table vibrante et la presse manuelle mécanique de type Terstaram. Ces matériels utilisent la méthode de densification soit par vibro-compaction, soit par compaction statique à l'aide d'un piston mobile.

Sur les briquettes obtenues à partir de chacun de ces appareils, nous avons mesuré les variations dimensionnelles, la densité hydrostatique et les résistances à la flexion.

IV-2-1- Etude de la variation dimensionnelle

Les variations dimensionnelles se composent du retrait de séchage et de l'évaporation. Elles ont été mesurées pendant 28 jours sur les briquettes après le démoulage.

IV-2-1-1-Retrait

La figure 47 présente les résultats de cette étude du retrait de séchage des briquettes de parement.

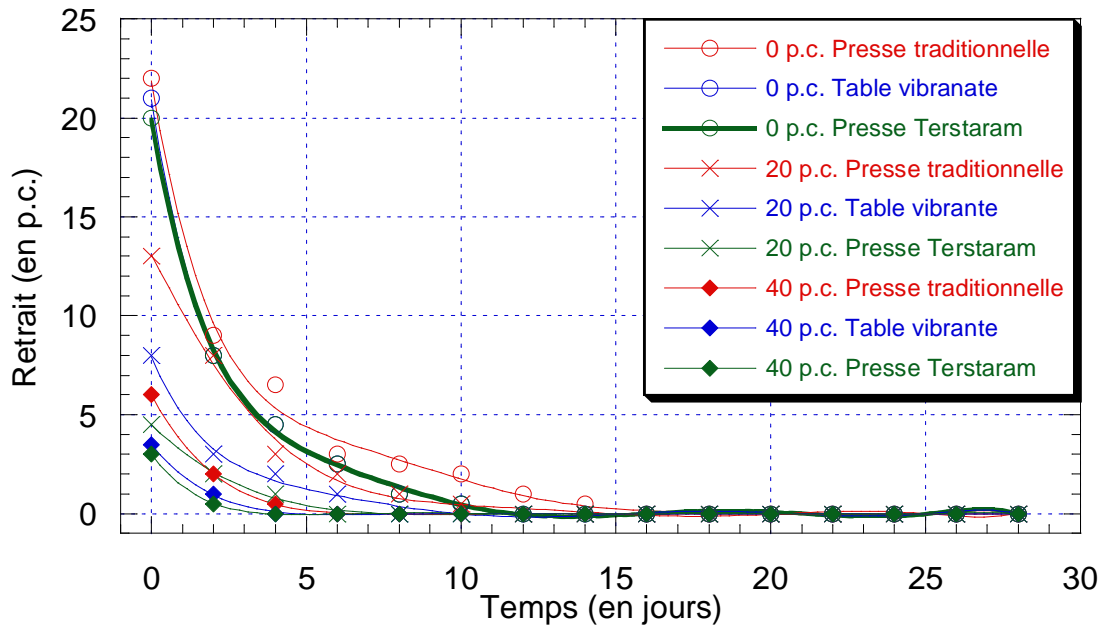


Figure 47 : Courbes de la variation du retrait

Les graphes montrent que le retrait au séchage des briquettes de parement à base de latérite-ciment varie avec le type de presse d'une part et d'autre part, chute avec le temps et le pourcentage de ciment.

Le retrait obtenu avec la presse manuelle artisanale (presse traditionnelle) est supérieur à celui obtenu avec la table vibrante qui lui aussi est légèrement supérieur à celui de la presse Terstaram. Par exemple à 20 p.c. de ciment, le retrait est de 13 p.c. pour la presse traditionnelle, 8 p.c. pour la table vibrante et de 4 p.c. pour la presse Terstaram. Cette variation du retrait suivant le type de presse utilisée pour la réalisation des briquettes pourrait être due à l'importance de la densification. Cette densification semblerait augmenter lorsque l'on part de la presse artisanale à la presse Terstaram en passant par la table vibrante.

Pour toutes les techniques, les courbes à 0 p.c. de ciment présentent les trois parties de la courbe

classique définies par **BOURRY (1897)** qui sont :

- la première, entre le premier et le quatrième jour, correspond à une droite où le retrait est proportionnel au temps. La pente de cette droite représente la vitesse du retrait. Elle est constante et forte;
- la deuxième, entre le quatrième et le dixième jour, équivaut à la concavité de la courbe. La vitesse du retrait diminue avec le temps ;
- la troisième après le dixième jour correspond à la partie constante de la courbe. La

vitesse du retrait est nulle.

Pour les briquettes qui contiennent du ciment, la première partie de la courbe de Bourry est réduite à cause du ciment qui modifie la durée du retrait dans son ensemble. Ceci s'explique par le fait que le ciment hydraté cristallise entre les particules de latérite dans la briquette (la surface spécifique du ciment est plus importante que celle de la latérite). Ainsi, les pores sont réduits, ce qui diminue le rapprochement des particules donc le retrait. De même, la chute du retrait avec la teneur en ciment serait due à la cristallisation de ce dernier entre les particules de la latérite.

Par contre, la chute du retrait avec le temps est due à la diminution de la quantité d'eau susceptible de pouvoir s'évaporer.

En somme, au cours du séchage des briquettes de parement, l'importance du retrait semble être due à l'évaporation de l'excès d'eau de gâchage. Ce départ de l'eau se produirait de façon simultanée au retrait et serait influencé par la teneur en ciment. Pour mieux expliquer ces phénomènes, examinons l'évaporation de l'eau en fonction du temps.

IV-2-1-2-Evaporation

Les résultats de la mesure de l'évaporation sont donnés par la figure 48.

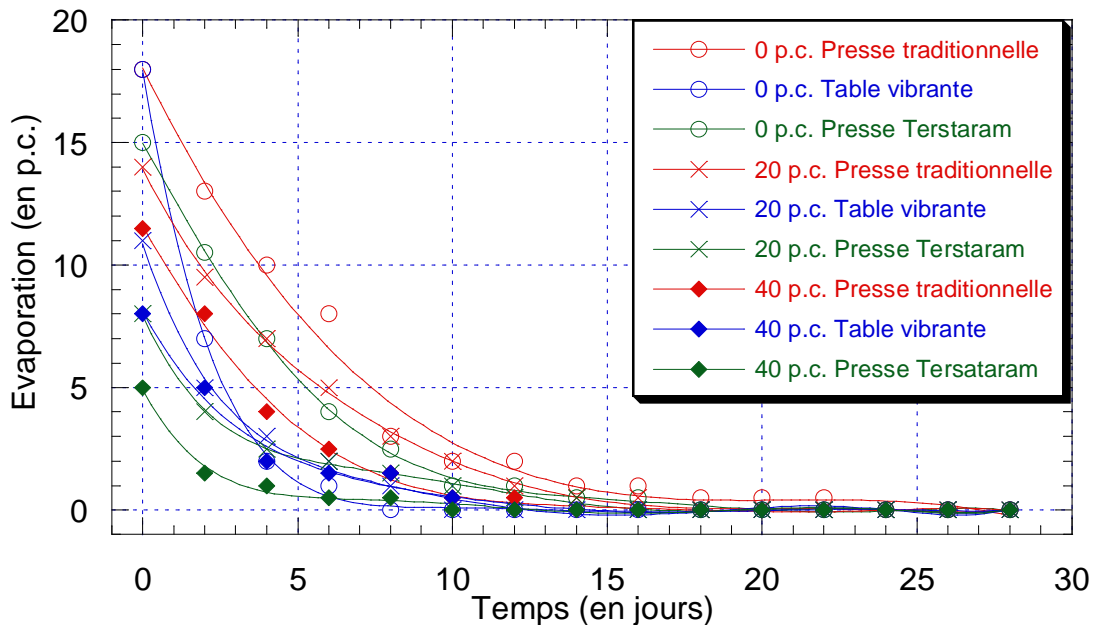


Figure 48 : Courbes de la variation de l'évaporation

Les courbes présentent la variation de masse des briquettes de parement réalisées avec les trois types de presse énumérés plus haut en fonction du temps, pour différentes teneurs en ciment. Ces courbes montrent que l'évaporation baisse avec le temps quelque soit la

technique employée.

A 0 p.c. de ciment, pour les briquettes confectionnées avec la presse artisanale par exemple, l'évaporation est de 18 p.c. le premier jour et 3 p.c. le huitième jour. Cette chute de l'évaporation est due au départ progressif de l'eau libre des briquettes au cours du séchage. En effet, avec la prolongation de l'exposition des briquettes au séchoir, la quantité d'eau libre dans cette dernière baisse. De plus, les forces d'attractions exercées par le ciment sur l'eau pour son hydratation continue deviennent très importantes. Ainsi, la quantité d'eau susceptible d'être arrachée par l'air du séchoir de la briquette baisse, d'où la chute de l'évaporation.

Les courbes montrent aussi que l'évaporation est fonction de la teneur en ciment. Pour les briquettes confectionnées avec la table vibrante par exemple, dès le premier jour, l'évaporation est de 11 p.c à 20 p.c. de ciment, tandis qu'elle est de 8 p.c. à 40 p.c. Cette diminution de l'évaporation en fonction de la teneur en ciment est due à l'augmentation de la quantité d'eau mobilisée pour l'hydratation et le durcissement du ciment lorsque sa teneur augmente. En fait, une partie de l'eau de gâchage est utilisée pour l'hydratation du ciment car pour faire prise et durcir le ciment à besoin d'eau. Or, plus la quantité de ciment augmente, plus il faut de l'eau pour son hydratation.

Ces courbes montrent encore que quelle que soit la teneur en ciment, l'évaporation des briquettes réalisée avec la presse Terstaram est plus faible que celle réalisée avec la table vibrante qui, elle-même est plus faible que celle obtenue sur les briquettes confectionnées avec la presse artisanale. Cette variation de l'évaporation avec le type de presse utilisée est due à l'importance de la compaction produite par la presse de compactage. En effet, l'eau libre dans les mélanges latérite-ciment gâchés est autour des particules. Avec le compactage et la réduction des espaces entre ces particules, cette eau adsorbée pourrait :

- soit en partie être chassée des briquettes lorsque le taux de compaction est important ; dans ce cas, l'évaporation de l'eau serait moins importante due à la perte préalable d'une partie de l'eau de gâchage.
- soit s'accumuler dans les interstices des briquettes quand le taux de compaction est faible ; ainsi l'évaporation serait importante de même que le retrait.

Selon les normes **ARS 575 (1996)**, pour réduire les risques de fissuration, le retrait et l'évaporation doivent être respectivement inférieur ou égale à 5p.c. et 8 p.c.. Ces valeurs sont obtenues avec la presse Terstaram à 20 p.c. de ciment et avec la table vibrante et la presse artisanale à 40 p.c. de ciment. L'appareillage qui donne les meilleurs résultats est donc la presse Terstaram car elle pourrait permettre donc de réduire d'une manière considérable les

pores et les micro-fissures que pourraient occasionner une sortie trop rapide de l'eau au cours du séchage. Néanmoins, l'effet de ces différents appareils sur les briquettes serait mieux appréciable au niveau de leur densité hydrostatique.

IV-2-2- Etude de la densité hydrostatique

En vue d'apprécier l'effet de chaque type de presse sur les briquettes, nous avons déterminé leur densité hydrostatique après 28 jours de séchage. Les résultats de cette étude de la densité hydrostatique sont représentés par la figure 49.

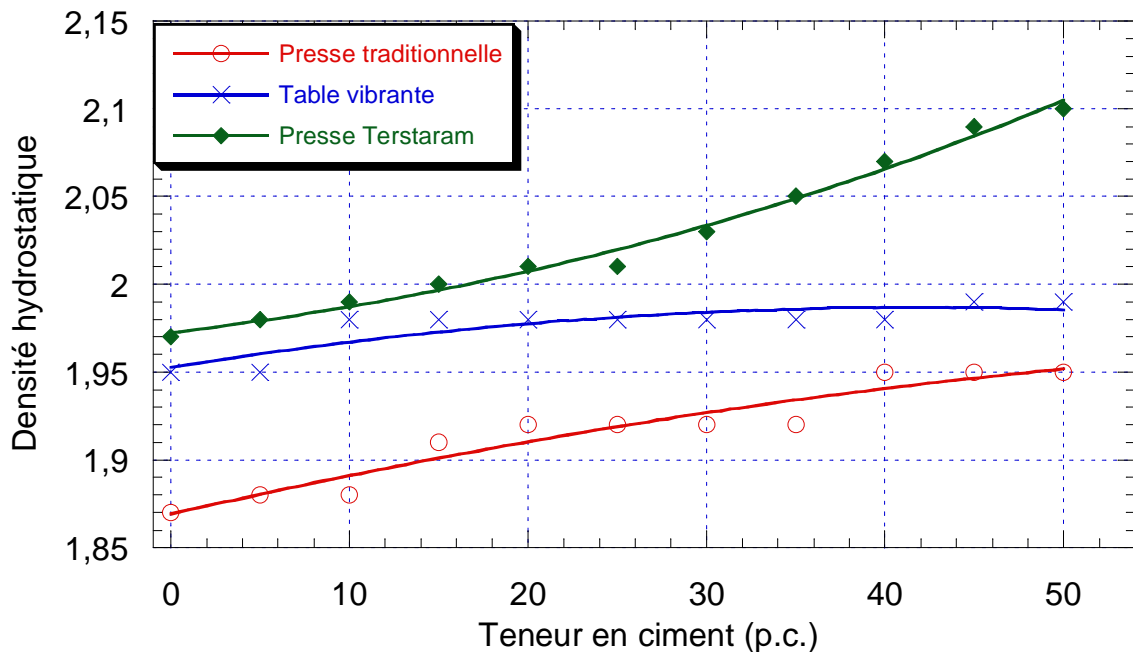


Figure 49 : Courbes de la variation de la densité hydrostatique

Ces résultats montrent que lorsque l'on augmente la teneur en ciment, les briquettes deviennent de plus en plus denses quel que soit le type de presse. Cette augmentation de la densité avec la teneur en ciment est due à la cristallisation de ce dernier entre les particules de latérite. En effet, lorsque le taux de ciment augmente, le taux d'hydrate formé entre les particules se multiplie, ainsi la densité hydrostatique augmente. Néanmoins, nous notons qu'avec la table vibrante, l'augmentation de la densité de 0 à 50 p.c. de ciment est de 0,04. Cette faible variation de la densité pourrait être due à l'épaisseur des briquettes qui ne permet pas une bonne densification.

Nous constatons aussi sur la figure 49 que lorsque la teneur en ciment augmente, la densité des briquettes augmente lorsque nous allons de la presse artisanale à la presse Terstaram en

passant par la table vibrante. Cette augmentation de la densité est liée au degré de compaction de la latérite par la presse. En effet, lorsque le compactage est important, les vides entre les particules sont très faibles. La densité de l'échantillon devient donc importante. Ainsi, la presse traditionnelle qui donne une faible densité hydrostatique conduit à un faible compactage et une importante évaporation de l'eau tandis que la presse Terstaram assure une forte compaction et une faible évaporation. Ces résultats sont en harmonie avec ceux obtenus lors de l'étude de la variation dimensionnelle.

La presse Terstaram, par sa technique de compaction en association avec le ciment, contribue à réduire les pores et entraîne donc une meilleure densification des briquettes. Cependant, plus les matériaux sont denses, moins ils renferment des pores et plus leur résistance à la rupture est élevée. Aussi, avons-nous examiné la résistance des briquettes de parement.

IV-2-3- Etude de la résistance à la flexion

Les briquettes de parement étant utilisées pour le revêtement des murs, elles sont en général soumises aux impacts des projectiles. L'impact de ces projectiles sur les briquettes se fait en des points précis. Elles sont donc sollicitées en flexion. Aussi, dans le but d'avoir des briquettes qui répondent efficacement à ces forces, avons-nous déterminé pour chaque type de presse les résistances à la rupture en flexion des briquettes. Les résultats obtenus sont représentés par la figure 50. Ils sont les moyennes calculées sur 5 échantillons après 28 jours d'âge.

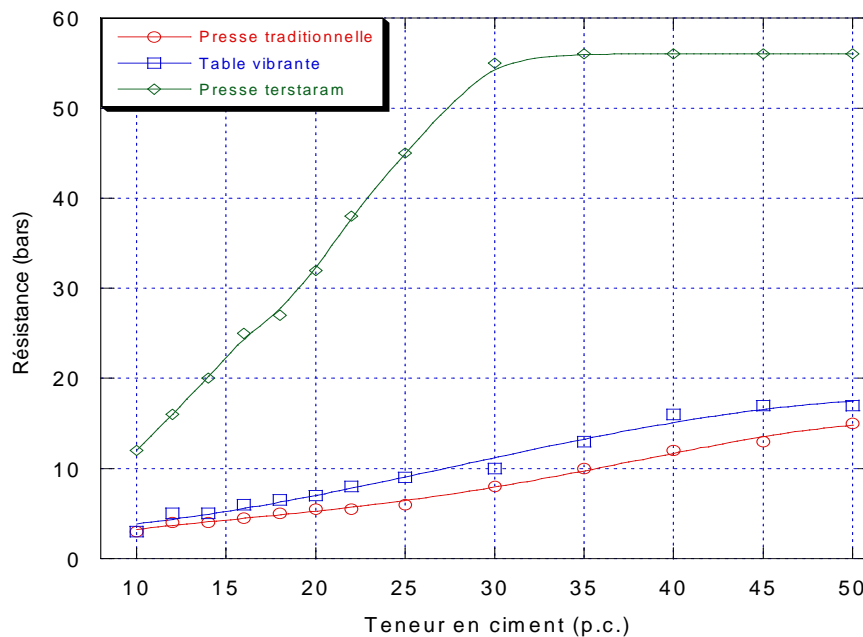


Figure 50 : Courbes de la variation de la flexion

Ces courbes montrent que les résistances à la flexion des briquettes quel que soit le type de presse utilisé augmente en général avec la teneur en ciment. Cette augmentation est due à la prise et au durcissement du ciment. Cependant, la courbe de la résistance à flexion des briquettes confectionnées avec la presse Terstaram présente un plateau à 30 p.c. de ciment. A partir de cette teneur, l'augmentation en ciment n'a plus d'effet sur la résistance à la flexion. La teneur de 10 à 30 p.c. est suffisante pour former la matrice cimentaire des briquettes qui assure leur résistance à la rupture. Ainsi, l'excès de ciment ne participe pas à la mise en place de cette matrice cimentaire, d'où les valeurs constantes des résistances. L'absence de partie constante sur les courbes de résistance à la flexion au niveau des briquettes réalisées avec la presse artisanale et la table vibrante est due au fait que la matrice cimentaire qui constitue le squelette des briquettes se met en place à travers les pores du matériau. Ceci est dû au fait qu'avec la table vibrante et la presse artisanale, les degrés de compaction sont faibles et les pores qui en résultent sont très larges. Par conséquent, il faudrait beaucoup plus de ciment pour les fermer et constituer un squelette plus résistant.

Le gain en résistance lorsque nous passons de la presse artisanale à la table vibrante est supérieur à 33,33 p.c. au delà de 20 p.c. de ciment tandis que le gain de la presse artisanale à la presse Terstaram est supérieur à 200 p.c. au delà de 10 p.c. de ciment. Ces grandes différences de gain au niveau des différentes presses sont dues à l'importance du compactage. En effet, plus le degré de compaction est important, plus le gain de résistance sera important et donc la résistance à la rupture sera forte. Ainsi, la presse Terstaram qui permet un meilleur compactage donnera les résistances les plus élevées, suivie de la table vibrante et de la presse artisanale. Ces résultats confirment ceux de la densité hydrostatique.

De cette étude de l'influence du type de presse sur les briquettes de parement, nous faisons les remarques suivantes :

Le type de presse utilisé pour la réalisation des briquettes de parement influence leur retrait de séchage, leur densité hydrostatique et leur résistance à la flexion. Les retraits les plus faibles, les densités hydrostatiques les plus élevées et les valeurs des résistances à la flexion les plus importantes sont obtenues avec **la presse Terstaram**. Cette presse conduit à la meilleure densification des produits quelle que soit la teneur en ciment.

Ainsi, pour la suite de nos travaux, nous allons utiliser la presse Terstaram pour confectionner les briquettes de parement. Nous nous essayerons à déterminer la teneur idéale de ciment pour que ces briquettes de parements à base de latérite soient utilisables en construction. Pour ce faire, nous nous intéresserons aux caractéristiques physiques et mécaniques des briquettes

stabilisées à froid afin qu'elles concurrencent les briquettes stabilisées à chaud.

IV-3- Influence du ciment sur les performances mécaniques des briquettes de parement à base de latérite-ciment

Les performances mécaniques et physiques d'un matériau dépendent non seulement des constituants de ce matériau et leur teneur mais aussi de l'environnement dans lequel il sera utilisé. Ainsi, dans ce paragraphe, nous déterminerons d'abord la teneur idéale en ciment pour obtenir des briquettes performantes, ensuite nous examinerons leur vieillissement sous les effets conjugués des précipitations et du soleil et enfin nous analyserons les variations de leur coloration.

IV-3-1- Détermination de la teneur idéale de ciment

Pour la réalisation de cette étude, après 28 jours de séchage, les briquettes confectionnées à des teneurs variables en ciment avec la presse Terstaram ont été soumises à des essais de flexion et de comportement à l'eau.

IV-3-1-1- Effet du ciment sur la résistance à la flexion

Les résultats obtenus de l'étude de la résistance à la flexion des briquettes de parement latérite-ciment sont présentés sur la figure 51.

Cette figure montre que la résistance à la flexion des briquettes sèches varie avec la teneur en ciment. De 0 à 10 p.c. de ciment, il est impossible d'obtenir des résultats sur les briquettes à cause de la sensibilité des appareils de mesure et de trop faibles résistances de celles-ci. De 10 à 30 p.c. de ciment, les résistances à la flexion augmentent et à partir de 30 p.c. de ciment, elles se stabilisent autour de 60 bars pour les briquettes sèches. Il y a même une proportionnalité entre la résistance et la teneur en ciment.

Cette variation de la résistance avec la teneur en ciment selon **TURANLI L. et al, (2003)** peut s'expliquer par la cohésion entre les différents complexes formés (argile-ciment ; sable-ciment et argile-sable). En fait, en présence du ciment, la latérite forme avec ce dernier des complexes grâce à la réaction pouzzolanique entre la fraction argileuse de la latérite et le ciment.

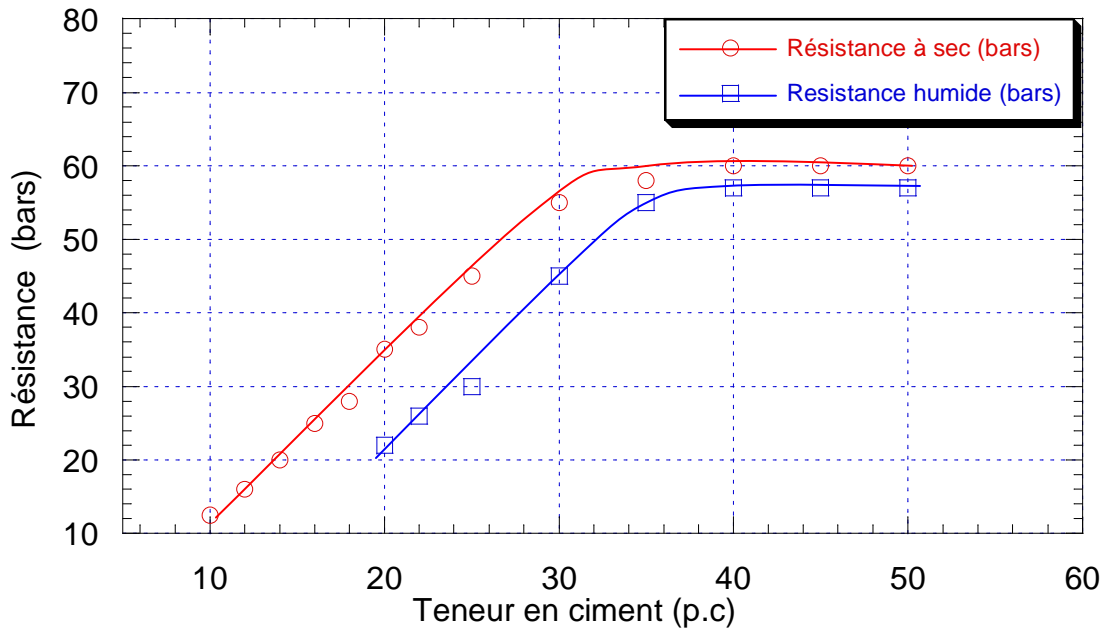


Figure 51 : Courbes de résistance à la flexion

Lorsque la teneur en ciment est au-delà de 10 p.c., la quantité de liaisons entre les différents complexes conduit à la formation d'une matrice de plus en plus stable. La mise en place de ce squelette de la briquette contribue à l'augmentation de la résistance à la flexion.

De 0 à 5 p.c. de ciment, la résistance est nulle car les briquettes se dissolvent dans l'eau à cause de l'absence de liaisons stables entre toutes les particules de latérite.

Par contre, l'augmentation de la résistance à partir de 10 p.c. de ciment est due à l'établissement de liaisons entre les complexes grâce à l'importante quantité de ciment qui assure la formation du squelette des briquettes.

La stabilisation de l'évolution de la résistance à la flexion à partir de 30 p.c. de ciment montre qu'à partir de cette teneur en ciment, tout apport supplémentaire de ciment est inutile car, cette augmentation ne contribue plus à l'amélioration de la résistance des briquettes de latérite ciment. Ceci s'explique par le fait qu'à partir de 30 p.c. de ciment, le volume de ciment est suffisant pour former suffisamment de liens entre toutes les particules de la latérite et donc, son augmentation devient sans utilité.

Avant cette teneur limite de ciment, la courbe de la résistance à la flexion des briquettes de latérite-ciment est une droite. Cet aspect de la courbe traduit l'augmentation progressive de l'amélioration de la résistance des briquettes de parement en liaison avec l'évolution du volume de ciment. Ceci confirme les résultats des travaux de **SIMONNET J. et SERRY P., (1980)** étudiant la stabilisation au ciment des sols latéritiques (géobéton) en fonction de la teneur en ciment.

Au vu de ces résultats, pour confectionner des briquettes de parement acceptables au niveau des résistances à la flexion, la teneur en ciment doit être comprise entre 10 et 30 p.c.

La figure 51 montre aussi que sur les briquettes humides, les résistances à la flexion augmentent avec la teneur en ciment.

Nous remarquons aussi que les briquettes ne supportent pas les 24 heures d'immersion qu'impose le principe du test à la flexion humide aux teneurs inférieures à 20 p.c. de ciment.

En dessous de 20 p.c. de ciment, la mesure est impossible. Mais au delà de 20 p.c., nous observons une proportionnalité identique au cas des échantillons secs. Cela nous amène à déduire un coefficient d'amélioration de la résistance à la flexion des briquettes de parements en latérite : K_b . Ce coefficient est donné par la pente de la partie linéaire des courbes de la figure 51.

$$K_b = \frac{\Delta T_c}{\Delta R_f} \quad [11]$$

Avec :

K_b le coefficient d'amélioration de la résistance

T_c la variation de la teneur en ciment

R_f la variation de la résistance à la flexion

K_b n'est déterminé que entre 10 et 30 p.c. de ciment pour les briquettes sèches, et entre 20 et 35 p.c. de ciment pour les briquettes humides.

Ce coefficient K_b permettra de prévoir à tout moment, la teneur en ciment nécessaire pour atteindre une résistance donnée.

Nous avons donc déterminé aussi la sensibilité des briquettes de parement en latérite à l'eau.

IV-3-1-2- Sensibilité à l'eau

L'étude de la sensibilité à l'eau envisagée sur le géobéton par **SIMONNET J. et SERRY P., (1980)**, **DON MELLO A. et N'DRI M., (2000)** sur les géopavés a montré qu'elle se stabilise autour de 0,5 tandis que celle du béton et du mortier de sable ciment tend vers 1. Ainsi, nous cherchons à savoir l'évolution de la sensibilité à l'eau des briquettes de parement latérite-ciment car cette valeur de 0,5 peut être liée à la teneur en fines (argile) de la latérite.

Nous avons donc calculé le rapport résistance à la flexion humide sur la résistance à la flexion à sec. Sur la figure 52 sont représentés les résultats obtenus.

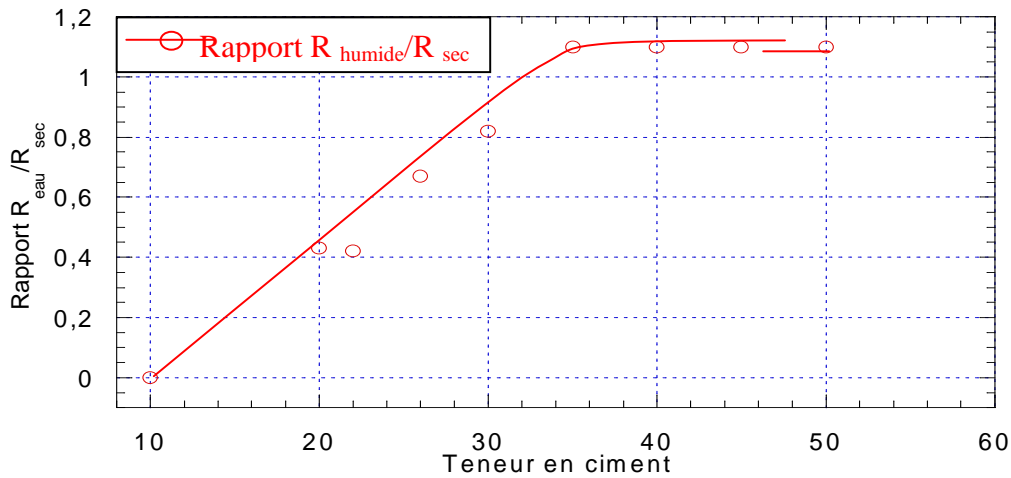


Figure 52 : Courbe de variation du rapport flexion humide par la flexion à sec

Cette courbe montre que le rapport résistance humide sur résistance à sec varie avec la teneur en ciment. Entre 10 et 35 p.c. de ciment, la croissance du rapport flexion humide par la flexion sèche ($R_{\text{humide}} / R_{\text{sec}}$) est due à l'augmentation de la teneur en ciment car il modifie les propriétés et le comportement des particules de latérite. Ainsi progressivement, les briquettes deviennent moins sensibles à l'eau. Au-delà de 35 p.c. de ciment, le rapport $R_{\text{hum}}/R_{\text{sec}}$ est constant car toutes les particules de la latérite et particulièrement celle d'argile ont totalement perdu leur sensibilité à l'eau. La sensibilité à l'eau des briquettes pourrait aussi être due au renforcement des liaisons latérite-ciment par la fermeture des pores par le ciment lorsque sa teneur augmente. Ce renforcement empêcherait l'eau de générer à l'intérieur de celle-ci des micro fissures qui contribueraient à fragiliser la briquette.

La sensibilité à l'eau de 0,5 du géobéton est obtenue à 22 p.c. de ciment pour les briquettes de parement à base de latérite. De même, au-delà de 35 p.c. de ciment, la sensibilité à l'eau est de 1 ce qui correspond aux valeurs obtenues sur les mortiers de sable ciment.

Cette étude montre que la teneur en ciment à partir de laquelle les briquettes de parement en latérite ont une faible sensibilité à l'eau est comprise entre 20 et 25 p.c.

Le rapport résistance humide sur résistance sèche admis en construction avec le géobéton est supérieur ou égal à 0,4 [CODINORM NI 05.11.002, 1994]. Il est obtenu dans le cas des briquettes de parement à base de latérite pour une teneur en ciment supérieure ou égale à 20 p.c.

IV-3-1-3- Comportement à l'eau

L'étude de la stabilité à l'eau a consisté en une appréciation de l'état des briquettes à la fin d'un séjour de 24 heures dans l'eau et un séchage au soleil de 72 heures. Les constats faits sont consignés dans le tableau XVIII.

Ce tableau récapitule l'état des briquettes en fonction de leur teneur en ciment après un séjour de 24 heures dans l'eau. Nous constatons que de 0 à 3 p.c. de ciment, la briquette est totalement dissoute dans l'eau ; à 5 p.c. de ciment elles sont fissurées ; de 5 à 8 p.c. elles sont toujours fissurées mais cette fois-ci partiellement. Leurs surfaces présentent des endommagements après séchage. A partir de 10 p.c. de ciment, elles sont stables et ne présentent pas d'endommagement.

La dissolution totale des briquettes de 0 à 3 p.c. de ciment est due à l'adsorption d'eau de la fraction fine (particules d'argile) car ces particules ont la capacité de s'entourer d'une importante couche d'eau. Cette couche d'eau rompt les liaisons électrostatiques entre particules et assure leur dispersion dans l'eau.

Tableau XVIII : Comportement dans l'eau des briquettes de latérite-ciment

SERIES (p.c de ciment)	COMPORTEMENT DES BRIQUETTES
0	Dissolution.
3	Dissolution.
5	<i>Briquettes fissurées</i>
8	<i>Briquettes partiellement fissurées</i>
10	Briquettes intactes
12	Briquettes intactes
15	Briquettes intactes
18	Briquettes intactes
20	Briquettes intactes
25	Briquettes intactes
30	Briquettes intactes
35	Briquettes intactes
40	Briquettes intactes
45	Briquettes intactes
50	Briquettes intactes

La fissuration à 5 p.c. est liée à l'absorption d'eau des briquettes. L'eau pénètre dans la briquette par les capillaires. Sa pression à l'intérieur des capillaires entraîne la dislocation des liaisons faibles tandis que les liaisons fortes formées entre le ciment et l'argile résistent. La matrice formée par les complexes latérite-ciment est discontinue.

L'endommagement à 8 p.c. de ciment est dû aux fissures qui se forment dans la briquette suite à l'immersion et au séchage. Pendant l'immersion, les briquettes absorbent de l'eau et gonflent. Ce gonflement entraîne l'apparition de micro fissures. Au cours du séchage, l'évaporation de l'eau entraîne l'apparition sur les briquettes d'écailles, de surface d'arrachement et/ou de fissures.

A partir de 10 p.c. de ciment, la briquette est stable dans l'eau car la teneur en ciment est suffisante pour maintenir toutes les particules de latérite dans une matrice rigide et continue. Les liaisons entre les particules de latérite et le ciment sont assez fortes pour assurer la stabilité de la structure de la briquette.

En somme, à 10 p.c. le ciment suffit selon ce test à assurer la stabilité de la briquette dans l'eau. Mais pour garantir la qualité du produit et être conforme aux résultats précédents, nous conseillons 20 p.c. de ciment

IV-3-1-4- Comparaison avec d'autres matériaux

Les briquettes de parement latérite-ciment sont des matériaux qui sont destinés à la construction. Dans ce domaine, de nombreuses études ont été effectuées. Pour une bonne compétitivité de notre matériau, il est important de le comparer aux autres. Les résultats sont représentés dans le tableau XIX.

Tableau XIX : Comparaison des résistances à la flexion de plusieurs matériaux

	Brique latérite- ciment	Fibres de verres	Fibres d'amiante	Géopavés	Norme ARS 675 B.T.C. de parement
Résistances en MPa	10 p.c.=1,5 20 p.c.=3,5 30 p.c.=5,5	3,5	2,5	2,2	≥ 0,6

Lorsque la résistance à la flexion des briquettes se stabilise à partir de 30 p.c. de ciment, les résistances sont deux fois supérieures à celle des briquettes de terre comprimées. Cette résistance est toujours supérieure à celle des fibres d'amiante qui se situe à 2,5 Mpa (toxique, utilisée avant par ignorance) [GUILLAUD H. *et al*, 1995]. Ces valeurs sont toujours supérieures aux valeurs observées dans le cas des fibres de verre, (3,9 Mpa) nettement plus coûteuses [DORLOT J. *et al*, 1995]. A 20 p.c. de ciment, la valeur de résistance à la flexion est plus ou moins égale à celle des fibres de verre.

La teneur minimale de ciment pour que les briquettes de latérite-ciment soient utilisables en construction est de 10 p.c. par comparaison des résistances prévues par la **Norme ARS 675 (1996)** du géobéton. Mais en associant les résultats des tests précédents, la teneur idéale serait 20 p.c. de ciment.

IV-3-2-Vieillessement des briquettes de parement

Les briquettes de parement sont des matériaux destinés au revêtement extérieur des murs. Il est donc nécessaire de comprendre leur comportement (vieillessement) vis à vis d'une exposition prolongée au soleil et à la pluie. Ainsi, nous avons étudié les propriétés des briquettes qui influencent leur vieillessement c'est-à-dire leur porosité ouverte, leur coefficient d'absorption et leur résistance à l'usure.

IV-3-2-1- Porosité ouverte

Dans une briquette, peuvent coexister à la fois des pores ouverts et des pores fermés. Ces pores constituent des passages par lesquels les briquettes sont exposées aux éléments agressifs du ciment. Aujourd'hui, une des techniques de lutte contre ces éléments est la fermeture totale de ces pores. Or, le ciment a, selon **CRATerre (1994)**, la propriété de favoriser la fermeture des pores. Ainsi, nous cherchons à comprendre l'évolution de la porosité dans les briquettes de latérite-ciment avec la teneur en ciment afin de les mettre en relation avec leurs performances mécaniques.

La porosité a été déterminée par la méthode de saturation à l'eau. Les valeurs de porosité représentées sur la figure 53 correspondent à la moyenne mesurée sur trois briquettes de même teneur en ciment.

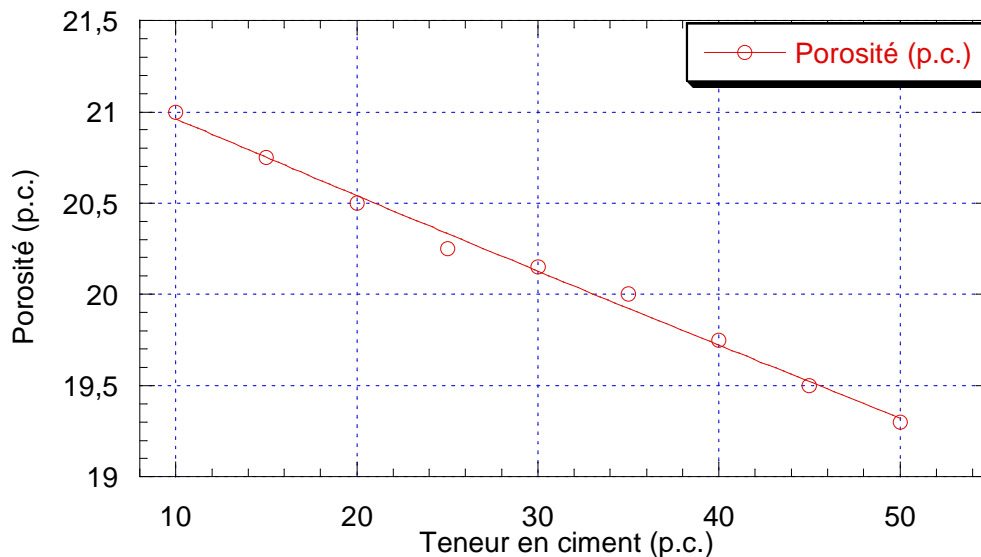


Figure 53 : Courbe de porosité de briquettes de latérite-ciment en fonction de la teneur en ciment

Cette figure présente la variation de la porosité en fonction de la teneur en ciment. Elle montre que pour des teneurs en ciment inférieure à 10 p.c., la porosité n'est pas mesurable parce que les briquettes sont totalement ou partiellement dissoutes dans l'eau.

De 10 à 50 p.c. de ciment, la porosité baisse de 21 à 19,30 p.c. La chute de la porosité est liée à la cristallisation du ciment entre les particules de la latérite. Le ciment, se dissolvant dans l'eau, occupe naturellement l'espace entre les particules de la latérite et contribue à la fermeture des pores accessibles à l'eau.

La capacité d'absorption d'eau des matériaux étant liée à la porosité, examinons les coefficients d'absorption des briquettes car il est en général responsable de la plus part des dégâts dans le bâtiment.

IV-3-2-2- Coefficient d'absorption

L'absorption d'eau est à l'origine de nombreux dégâts constatés dans les bâtiments à savoir humidité du mur, moisissures, taches, papiers peints qui se décollent, claquage des enduits et peintures, formation de rouille [RUBSON, 2001]. Cependant, elle présente des avantages : permet d'éviter à l'eau de dégouliner sur le sol, de laisser des stries salissantes sur les murs et d'éviter les problèmes causés par les traitements hydrofuges. L'absorption est un mal nécessaire. Aussi avons-nous déterminé les coefficients d'absorption afin de cerner l'influence du ciment sur l'absorption.

La figure 54 présente la variation du coefficient d'absorption en fonction de la teneur en ciment.

Elle montre que le coefficient d'absorption baisse avec la teneur en ciment. Il chute de 0,08 à 0,055 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ lorsque la teneur de ciment augmente de 10 à 30 p.c. Au-delà de 30 p.c. de ciment, il se stabilise à 0,055 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$.

La chute du coefficient d'absorption de 10 à 30 p.c. de ciment est due à la fermeture progressive des capillaires. Au-delà de 30 p.c. de ciment, le coefficient d'absorption est pratiquement constant car la porosité serait devenue constante.

Le coefficient d'absorption d'eau optimale en construction imposé par la norme [AFNOR NFP 14 301, 1983] mesuré suivant l'essai HALLER doit être inférieur ou égal à 15 $\text{g/dm}^2 \cdot \text{mn}^{1/2}$. Cela correspond à une valeur de 0,1936 $\text{Kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ avec notre méthode de calcul.

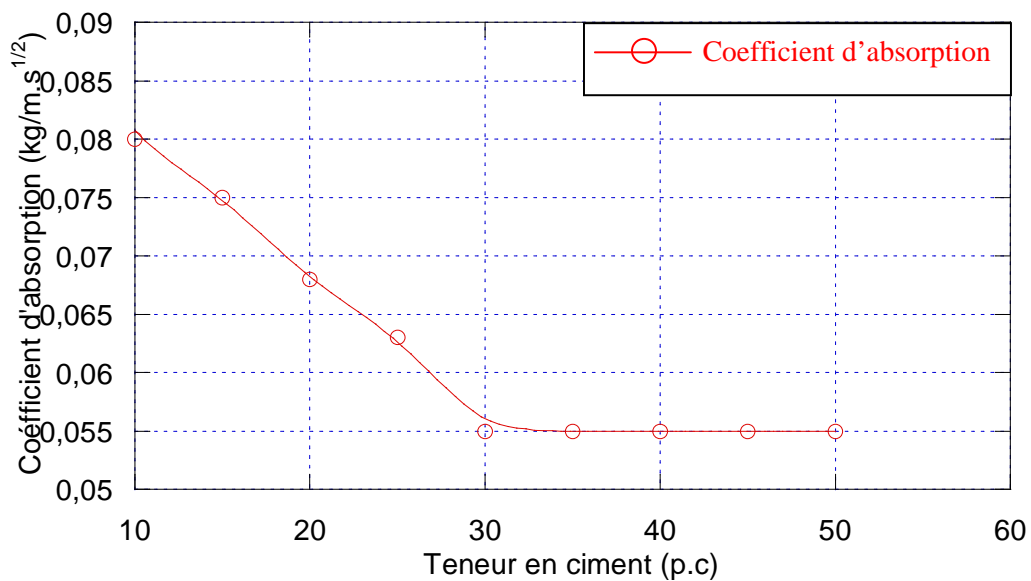


Figure 54 : Variation du coefficient d'absorption en fonction du temps

Conformément à cette norme, 10 p.c. de ciment serait la teneur idéale en ciment pour que les briquettes aient un coefficient d'absorption acceptable c'est-à-dire capable de résister au vieillissement causé par l'eau. Ces résultats confirment encore qu'au delà de 30 p.c. de ciment, son augmentation est sans effet sur les propriétés des briquettes de latérite ciment.

Pour comprendre les raisons pour lesquelles la porosité baisse au-delà de 30 p.c. de ciment tandis que le coefficient d'absorption reste constant et pour avoir une idée sur la porosité en deçà de 10 p.c. de ciment, nous avons observés la surface des briquettes au MEB.

IV-3-2-3- Observation au Microscope Electronique à Balayage (M.E.B.)

L'analyse au microscope électronique à balayage (M.E.B) a été réalisée sur les pastilles fabriquées dans les mêmes conditions que les briquettes après avoir métallisé leur surface. Les résultats obtenus sont présentés par la figure 55.

Cette figure présente l'état de surface des pastilles à 0 p.c.; 30 et 50 p.c. de ciment aux grossissements de 500 nm. Ces microfilms montrent que le diamètre des pores dans les pastilles et la cohésion entre les particules varie avec la teneur en ciment.

A 0 p. c. de ciment (Fig.55a), la surface des pastilles présente de grands pores de diamètre très voisin (de l'ordre de 170 nm) répartis de façon très homogène. La densité de la structure est très faible. Au cours du séchage, l'évaporation de l'eau s'est faite de manière homogène d'où la répartition des pores.

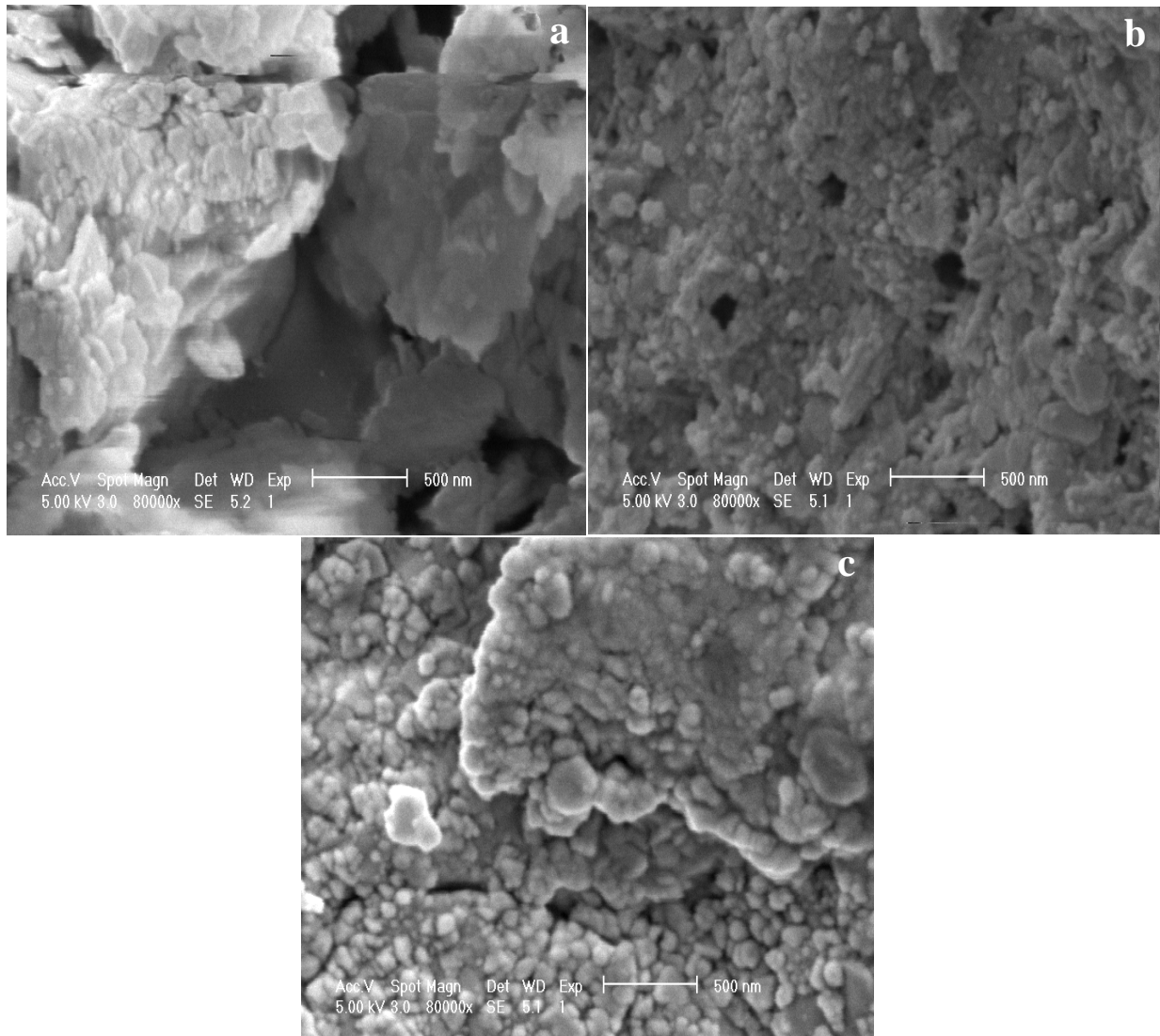


Figure 55: Microfilm montrant l'état de surface des pastilles :
a) Pastille sans ciment ; b) pastille avec 30 p.c. de ciment ;
c) pastille avec 50 p.c. de ciment

A 30 p.c. de ciment (Fig.55b), la surface des pastilles présente toujours des pores mais en nombre et en diamètre réduit (environ 50 nm) répartis de façon aléatoire.

A 50 p.c. de ciment (Fig.55c), la surface des pastilles présente encore des pores. Mais leur diamètre est plus petit (environ 35 nm) que celui des briquettes sans ciment et à 30 p.c. de ciment.

Au-delà de 30 p.c. de ciment, les briquettes ont une porosité qui diminue tandis que leur coefficient d'absorption est constant à cause de la finesse des pores. En effet, les pores dans les briquettes sont remplis d'air. Avant d'être occupés par l'eau, l'air doit s'échapper. Or, la finesse des pores rend pratiquement impossible cette évacuation de l'air, d'où la valeur constante du coefficient de perméabilité. Cependant, la porosité par saturation d'eau est

mesurable.

En somme, la formation des complexes latérite-ciment influence la structure des briquettes de parement suivant la teneur en ciment. Quand la teneur en ciment augmente de 10 à 30 p.c., la répartition des complexes devient homogène. La structure des briquettes s'organise, les pores se ferment et la structure devient plus dense.

IV-3-2-3- Résistance à l'usure

Exposé à la succession de pluie et d'ensoleillement, la surface des briquettes s'érode progressivement. Ainsi, dans ce paragraphe, nous allons évaluer la dureté de surface des briquettes.

Les briquettes sont immergées dans de l'eau durant 48 heures et séchées au soleil pendant 72 heures puis la face opposée devant constituer la façade extérieure du futur mur est brossée à l'aide d'une brosse métallique pendant 25 cycles. Les résultats obtenus sont représentés par la figure 56.

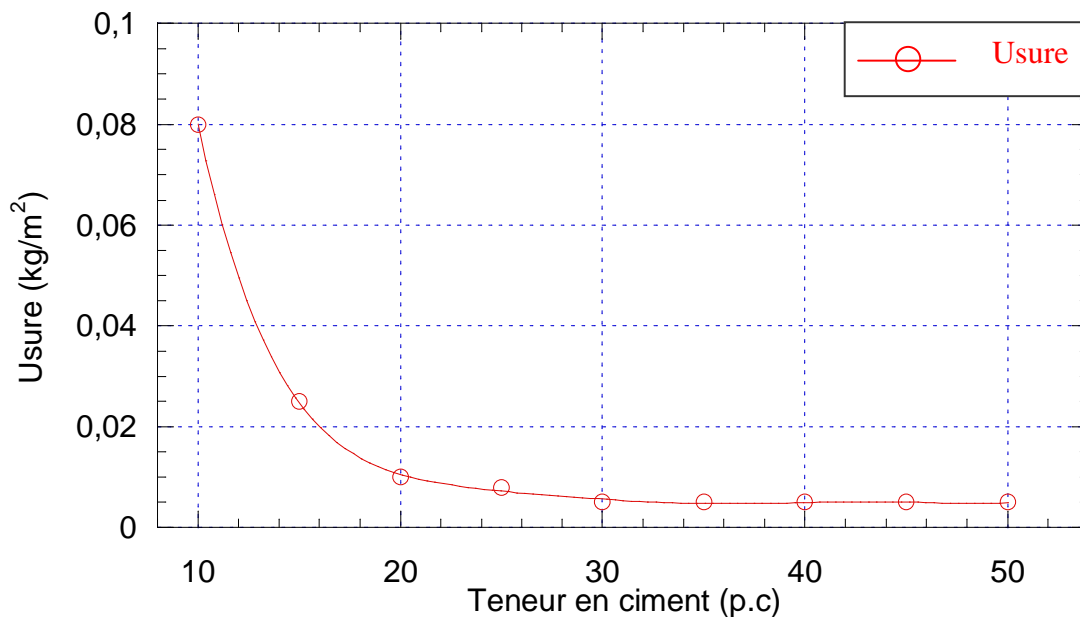


Figure 56: Courbe de résistance à l'usure

Cette figure montre que pour des teneurs inférieures à 10 p.c, il est impossible de déterminer la résistance à l'usure, car les briquettes se dissolvent totalement dans l'eau à l'immersion pendant les 48 heures.

Cette figure montre aussi que l'usure baisse avec la teneur en ciment. En effet, elle chute très rapidement entre 10 et 20 p.c. de ciment puis elle tend vers une stabilisation à 0,005 kg/m² au-delà de 30 p.c. de ciment.

Au-delà de 30 p.c. de ciment, l'usure devient constante car le gonflement dû à l'eau et le rétrécissement lié au séchage sont nuls. La cohésion entre les particules est très forte. Ainsi au brossage, la perte de masse de la briquette est très faible.

La figure 57 montre l'état de surface des briquettes après mesure de l'usure. La profondeur des raies laissées par le brossage diminue avec l'augmentation de la teneur en ciment. A 20 p.c. de ciment, la profondeur s'annule.



Figure 57 : Etat de surface des briquettes après l'usure

Le ciment incorporé dans les briquettes a donc pour effet de limiter cette érosion de surface. En Côte d'Ivoire, la pression exercée par les conditions atmosphériques sur une surface produirait une érosion de surface de $2,5 \text{ kg/m}^2$ [KOUAKOU, 2000]. Notre étude montre que pour des teneurs en ciment inférieures ou égales à 20 p.c., on a une perte de masse à l'usure inférieure à $2,5 \text{ Kg/m}^2$. Ainsi 20 p.c. de ciment est la teneur en ciment idéale et minimale à partir de laquelle les briquettes de latérite-ciment peuvent être utilisées en construction sans que leurs surfaces ne soient protégées.

Pour cet essai de résistance à l'usure, il nous a été aussi impossible d'obtenir des résultats sur

les briquettes aux teneurs inférieures à 10 p.c. car les briquettes se dissolvent totalement dans l'eau à l'immersion pendant les 48 heures.

IV-3-2-4- Schéma explicatif du rôle du ciment dans la stabilisation des briquettes de parement

La figure 58 présente un schéma explicatif du rôle du ciment dans la briquette de parement à base de latérite. En absence de ciment (Fig.58a), les particules d'argile se comportent en ciment naturel. Elles occupent les espaces entre les grains de sable et les graves puis les maintiennent ensemble par l'intermédiaire de l'eau adsorbée. Avec l'évaporation progressive de cette eau et le durcissement de l'argile, il se met en place dans la briquette des pores et des capillaires. Le matériau est donc très poreux (Fig.58b).

En présence de ciment, une partie de l'eau retenue par l'argile est utilisée par cette dernière pour sa réaction d'hydratation et de cristallisation entre les particules d'argile, de sable et de graviers. Ainsi, la quantité d'eau évaporée est faible. Les pores et les capillaires qui apparaissent sont peu nombreux et de faible diamètre. La porosité du matériau baisse (Fig.58c).

Lorsque la quantité de ciment est très importante, il faut plus d'eau pour l'hydratation et la cristallisation de ce dernier, par conséquent, l'évaporation de l'eau sera très faible. Les pores et les capillaires formés seront de diamètre très faible. Le matériau est très peu poreux (Fig.58d).

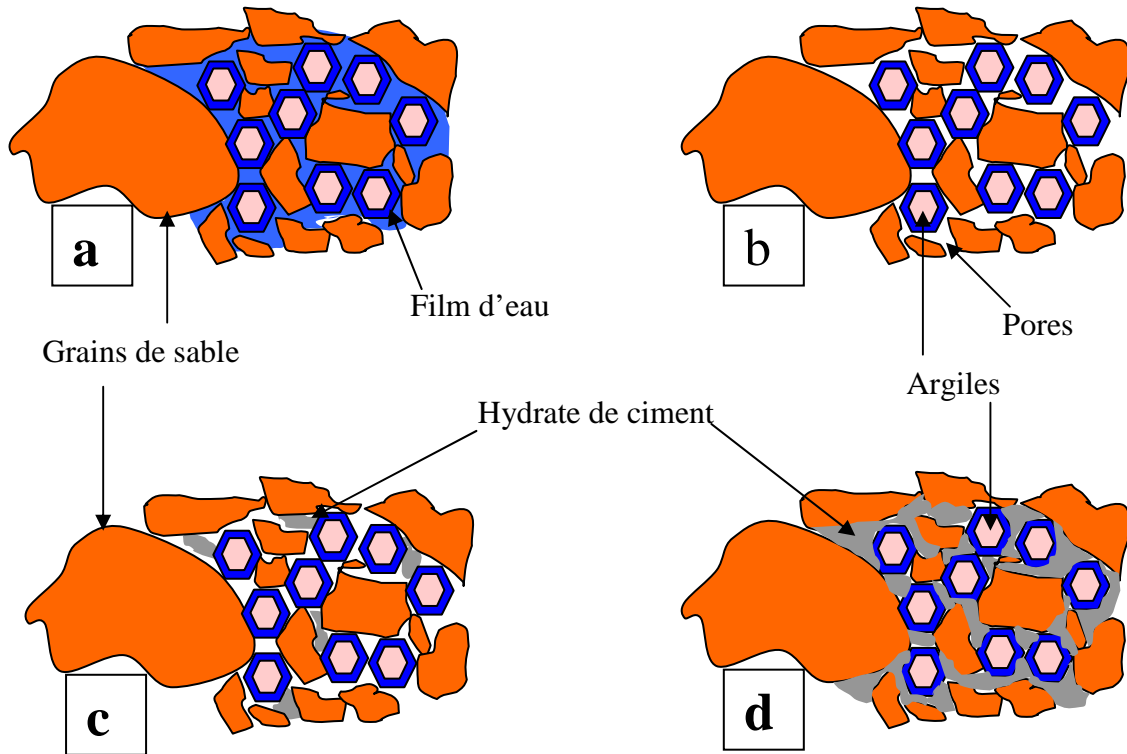


Figure 58 : Interprétation schématique de la structure interne de la briquette de parement latérite-ciment

IV-3-3- Effet du ciment sur la coloration des briquettes de parement

La stabilisation des briquettes de parement de latérite-ciment met en compétition deux couleurs ; la couleur rouge de latérite et la couleur grise du ciment. La couleur de la briquette ainsi fabriquée est la composée de la couleur de ces deux matières premières. De ce fait, lorsque la teneur en ciment augmente, la couleur des briquettes tend vers celle du ciment (Fig. 59).



Figure 59 : Image de la variation de la couleur des briquettes en fonction du ciment

De 0 à 10 p.c de ciment, les briquettes ont la couleur rouge de la latérite. La quantité de ciment n'est pas suffisante pour faire virer la couleur des briquettes.

Entre 20 et 30 p.c. de ciment, les briquettes prennent une coloration intermédiaire entre la couleur rouge de la latérite et la couleur grise du ciment.

A partir de 40 p.c de ciment, les briquettes prennent la couleur du ciment à cause de sa teneur élevée.

Conclusion partielle

Au terme de cette étude de caractérisation des briquettes de parement à base de latérite stabilisée au ciment, nous faisons plusieurs observations.

La stabilisation de la latérite de Dabou est optimale à 8,5 p.c (OPTIM PROCTOR) d'eau.

Mais l'addition de ciment modifie cette teneur en eau car le ciment utilise une partie de cette eau de gâchage pour sa prise et durcir. Nous notons aussi que le mode de mise en forme influence la teneur en eau. Ainsi, dans le souci d'obtenir des résultats comparables, nous avons travaillé à maniabilité constante avec le rapport de 0,6.

L'étude de l'influence du type de presse nous a conduit au choix de la presse Terstaram pour la confection de nos briquettes car comparée aux autres, elle permet d'obtenir un retrait et une évaporation les plus faibles. Elle permet en outre d'obtenir une meilleure densification ce qui se traduit par la résistance à la flexion de 55 bars à 30 p.c de ciment largement au dessus de la norme. Aussi, l'utilisation de cette presse a permis de limiter l'apport de ciment à 30 p.c.

A la lumière de toutes ces résultats et la comparaison de notre briquette de parement à base de latérite à d'autres matériaux du domaine de la construction, nous retenons la teneur de 20 p.c de ciment comme valeur idéale pour qu'elle soit utilisée en construction.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La Côte d'Ivoire regorge d'une multitude de réserve de matériaux parmi lesquels on pourrait citer la latérite. Les sols latéritiques se rencontrent pratiquement dans toutes les régions du pays. La nature granulométrique de ces sols latéritiques varie des graveleux latéritiques aux sables argileux latéritiques.

Les études de caractérisation de ce site de latérite ont révélés que la latérite de Dabou est un sable argileux latéritique. Son profil lithologique est constitué de cinq couches de granulométrie comprise entre les graviers et l'argile. Elle présente de bas vers le haut la succession suivante :

- un sable fin contenant des lentilles de sable de couleur variées ;
- un sable fin contenant des particules argileuses ;
- un sable grossier riche en gravier ;
- un sable argileux contenant un peu de matière organique ;
- un sable argileux de couleur brune due à sa forte teneur en matière organique ;
- et la terre arable.

La **minéralogie** de cette latérite de Dabou est constituée essentiellement de **quartz, d'illite, de kaolinite, de mica et de feldspath**. En plus de ces minéraux, ce sol contient des doses importantes **d'oxyde de fer, d'alumine et de silice**.

La **couche N°2** du profil de ce site latéritique a été choisie pour les avantages qu'elle présente pour la fabrication de matériau destinés à la construction (faible profondeur, teneur en oxydes colorants que sont le fer (Fe_2O_3) et le titane (TiO_2)). De plus, la latérite de Dabou se prête bien à la stabilisation au ciment.

Afin de produire des matériaux de qualité et de minimiser la teneur de stabilisant à utiliser, une étude d'influence du type de presse sur les performances mécaniques des briquettes est réalisée. Les résultats de cette étude ont montrés que la **presse Testaram** est la technique de confection qui permet d'obtenir les meilleures caractéristiques des briquettes de parement latérite-ciment. L'utilisation de cette presse permet par exemple d'obtenir **un gain en résistance d'environ 40 bars** par rapport aux autres techniques.

Les essais de caractérisation des briquettes ainsi fabriquées ont révélé que la **teneur idéale en ciment** pour laquelle les briquettes sont utilisables en construction est de **20 p.c**. A cette teneur, elles présentent des résistances à la flexion de **3,5 Mpa** à sec et de **2,5 Mpa** en flexion

humide largement supérieur à la norme (supérieur ou égale à 0,6 Mpa).

L'incorporation du ciment portland dans la latérite permet de limiter les variations dimensionnelles liées au départ de l'excès d'eau de gâchage. Le ciment assure aussi la résistance des briquettes à l'absorption d'eau et à l'érosion de surface. A côté de ce rôle important du ciment, ces résultats indiquent que le ciment provoque aussi la chute de l'évaporation par rapport à celle de la briquette de latérite sans ciment.

Au niveau de la résistance à l'usure, la teneur de ciment qui permet une bonne tenue des briquettes conformément à la norme et les autres facteurs est de 20 p.c.

Cette étude nous a permis de comprendre qu'aux teneurs en ciment inférieures à 10 p.c., la dissolution des briquettes dans l'eau est due à la mauvaise, voire l'absence de cohésion entre les particules de la briquette. La présence du ciment en des teneurs supérieures à 10 p.c. permet par sa cristallisation la formation d'hydrates de ciment qui vont occuper les espaces laissés libres entre les particules de la latérite, ce qui donne une bonne cohésion entre les particules. Ces résultats confirment une fois de plus que les briquettes de parement à base de latérite-ciment **sont utilisables en construction à 20 p.c. de ciment.**

Au terme de cette étude, et malgré l'ampleur des essais réalisés, il reste quelques points de détails qu'il serait intéressant d'éclairer. A savoir :

- l'influence de la quantité d'eau de gâchage sur les performances mécaniques et physiques des briquettes à base de latérite-ciment ;
- la distribution de la taille des pores en fonction de la teneur en ciment et la variation de la porosité des briquettes en fonction de la teneur en ciment ;
- la composition du mortier de pose (ou de cloisonnement) puisqu'il est généralement admis que pour avoir une meilleure résistance sur mur, il faut avoir des briquettes de meilleures résistances et aussi des mortiers de pose appropriés ;
- l'isolation thermique et acoustique ;
- l'amélioration de la coloration.

De plus, des essais complémentaires sont nécessaires pour approfondir la qualité de ce matériau intéressant.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

ABU-HAMDEH N. H., (2001). Measurement of the thermal conductivity of sandy loam and clay loam soils single and dual probes, *Journal of Agricultural Engineering Research* Volume 80, Issue 2 pp 209 216.

ACI, (1992). State-of-the-Art report on soil-cement, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.

AFNOR NF P 14-301, (1983). Agglomérés, Blocs en béton pour des granulats courant pour murs et cloison, Afnor, 1^{er} tirage, 13 p.

AFNOR NP P 94-051, (1993). Sol : reconnaissance et essais-détermination des Limites d'Atterberg-limite de liquidité à la coupelle-limite de plasticité au rouleau, Normalisation Française, Paris, 6 p.

AFNOR NP P 94-056, (1996). Sol : reconnaissance et essais-Analyse granulométrique des sols-Méthode par tamisage à sec après lavage, Normalisation Française, Paris, 16 p.

AFNOR NP P 94-057, (1992). Sol : reconnaissance et essais-Analyse granulométrique de sols-Méthode par sédimentation, Normalisation Française, Paris, 20 p.

AFNOR XP P 94-047, (1998). Sol : reconnaissance et essai-Détermination de la teneur pondérale en matière organiques d'un matériau, Méthode par calcination, Normalisation Française, Paris, 6 p.

ALIPRANDI G., (1979). Matériaux réfractaires et céramiques techniques, éléments de céramique et de technologie, Edition Septima, Paris, 612 p.

AMADOU C., (1978). "Contribution à l'étude des graveleux latéritiques au Niger". 86 p.

ANAND R., SMITH R. E., (1993). "La géochimie des latérites". pp. 15-22.

- ATLAN Y., (1974).** "Classification géotechnique routière des sols latéritiques ivoiriens".
Revue Générale des Routes et Aérodrôme n° 170, pp 15-17.
- AUTRET P., (1983).** Etude des latérites et des graveleux latéritiques. LCPC, 38 p.
- BALEK and MURAT M., (1996).** The emanation thermal analysis of kaolinite clay minerals. *Thermochim. Acta.* 282-283, pp. 385-397.
- BARRIERE P., (1979).** Optimisation de la mise en œuvre du pisé. Université de Clermont-Ferrand II, Clermont-Ferrand pp 22-40.
- BESOLE B., (1977).** Géologie de l'Afrique, le Craton Ouest-Africain, Mém. Bur. Rech. Géol. Min., 888,402 p.
- BERGHOLZ A. et FERBER C., (1991).** Relevance of flow technology for the ceramic products, *Tile & Brick Int.* Volume 7 n° 4, Germany, pp 231-235.
- BLOT A., (1980).** L'altération climatique des massifs de granite du Sénégal, Travaux et documents de l'O.R.S.T.O.M. n°114, Paris, 434 p.
- BUCHANAN F., (1980).** "A journey from Malabar through the countries of Mysore, canara and Malabar". 95 p.
- BULLMANN N., (1972).** Soil stabilization in Africa. TRRL conference IRF Rabat Maroc, pp 1-22.
- CHIERICI M. A., (1996).** Stratigraphy, paleoenvironnements and geological evolution of the Coast-Ghana basin, In: Jardiné S., Klasz I. (de) Debanay J. P. (Eds), *Géologie de l'Afrique et de l'Amérique sud*, Actes des colloques d'Angers, 16*20 Juillet 1994, Mém. 16, Elf-Aquitaine pp. 293-303.
- CHINJE M. U., (2001).** Production of granito-concrete tiles, *African Journal of Building Materials*, Volume 05, n° 1pp.23-28.

CODINORM NI 05.06.001, (1985). Ciments – Définitions – Classification, 1^{ière} éditions, Abidjan, 6 p.

CODINORM NI 05.06.035, (1985). Ciments – Méthodes d’essais mécaniques – flexion et compression, 1^{ière} édition, Abidjan, 5 p.

CODINORM NI 05.06.036, (1985). Ciments – Méthodes d’essais – Détermination du temps de prise et de stabilité, 1^{ière} édition, Abidjan, 8 p.

CODINORM NI 05.06.037, (1985). Ciments – méthodes d’essais – Mesure de la surface spécifique, 1^{ière} édition, Abidjan, 8 p.

CODINORM NI 05.11.002, (1994). Définition et spécification, bloc de terre comprimée et stabilisée au ciment « géobéton » Abidjan, 4 p.

CODINORM NI 05.06.004, (1995). Ciment CPJ – Définitions – Spécifications, 1^{ière} édition, Abidjan, 3 p.

CRATerre, DOAT P., HAYS A., HOUBEN H., MATUK S., VITOUX F., (1985). Construire en terre, 3^{ième} édition alternatives, Colletion AnArchitecture, Paris, 287 P.

CRATerre, (1987). Marrakech 87 habitation en terre, Guirémond, Grenoble, 253 p.

CRATerre, MUKERJI K., (1994). product information: Stabilisation and Moctars, Gate, German.

DEGRAFT J., (1970). “Engeneering properties of laterite Soils”. General report BANKOK Vol.2, 16 p.

DON MELLO A. et N’DRI M., (2000). Caractéristiques de résistance et comportement des géopavés. African journal of building materials, volume 4, n°1 et 2, Yaoundé, Caméroun, pp 19-24

- DORLOT J. M.; BAÏLOT J.P. et MASOUNAVE J., (1995).** Des matériaux, 2^e Ed., Edition de l'Ecole Polytechnique de Montréal, Canada, 467p.
- DURIEZ M. et ARRAMBIDE J., (1962).** Nouveau traité des matériaux de construction, Tome II, 2^{ième} édition DUNOD, Paris, pp.1-17 et 214-262.
- EMERUWA E., (1998).** Coloration des tuiles en micro-béton avec une altérite rouge, African Journal on Building Materials, Vol. 2, n°1, pp22-25.
- GOUDOT A., SCHLICKLIN P. M., STOCKHOLM J. G., (1984).** Thermoelectric material characterization at 300 K, International conference on thermoelectric energy conversion, session II-4-, France 7 p.
- GUILLAUD H., OGUNSUSI V. and JOFFROY T., (1995).** **Earth Construction Technology : Materials, Techniques and Know-how for New Architectural Achievements, Cectech, CRATerre-EAG, Jos.**
- HARRISON D. J., (1993).** Limestones, industrial minerals laboratory manual mineralogy and petrology, Sery bristish Geological Survey, 45 p.
- HINSCHBERGER F. et POMEL R., (1972).** Grands traits topographiques et géologiques : Carte de la dérive littorale in Environnement et ressources aquatique de la Côte d'Ivoire, Tome I, le milieu marin, Editions de l'ORSTOM, pp 23-63.
- HOLTZAPFFEL T., (1985).** Les minéraux argileux, préparation. Analyse diffractométrique et détermination, Société Géologique du Nord, Publication n° 12, Paris p.136.
- HOUBEN H., GUILLAUD H. DAYRE M., BARD J-P., DATH F., (1989).** Traité de construction en terre, l'encyclopédie de la construction en terre, Volume 1, Collection dirigée par le comité scientifique de CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille 355 p.
- JOUENNE C.A., (1984).** Traité de céramiques et matériaux minéraux, édition Septima, Paris 657 p.

- KOUAKOU. C. H., (2005).** Valorisation des argiles de Côte d'Ivoire : étude de stabilisation à froid de l'argile de DABOU à l'aide d'un liant hydraulique. Thèse Unique soutenue à l'université de Cocody-Abidjan. 189 p.
- L.B.T.P., (1977).** Etude actualisée de la classification des graveleux latéritique en Côte d'Ivoire. Rap. de Rech. RR1, 52 p.
- LATOUCHE M., (1964).** Méthodes de travail, in bilan des études géologiques effectuées au titre de la convention de recherche n° 66.00.451 Océanographie dans le golf de Gascogne, bulletin de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine, n° 6, 60 p.
- LE DOUSSAL H., (1985).** Les produits réfractaires et céramiques techniques, Elément de céramiques et de technologie, Septima, Paris, 612 p.
- LIVIER M., MESBAH A., (1991).** Choix de la technique de construction en terre, la plus appropriée à un site donné. Journées Scientifiques sur l'Habitat Economique en Zone Tropicale. Bamako Mali, 18-20 nov. 10 p.
- LYON ASSOCIATES, (1970).** "Laterite and lateritics soils and other problem soils of Africa". Study from AID/CSD, 2124, USA-Ghana, 180 p.
- MALHERBE J.S. et ADDIS B. J., (1996).** How to make concrete brick and blocs, Concrete and Concrete Institute, Midrand, 7 p.
- MAIGNIEN R., (1966).** "Compte rendu de recherches sur les latérites". UNESCO ; coll. Rech. Les ressources naturelles; vol. IV ; p 11.
- MAMBA M., (1993).** Fiche techniques sur les matières premières utilisables en construction en terre. ENSP, 25 p.
- MAMBA M., (1989).** Résistance au cisaillement des enrochements et matériaux grossiers : application aux calculs des barrages. Thèse de doctorat soutenue le 1^{er} Dec. 1989 à l'Université des Sciences et Techniques de Lille I, 250 p.

MAMILLAN M., (1976). Nouvelles connaissances pour l'utilisation et la protection des pierres de construction, Annales de l'I.B.T.P.n°335, série matériaux n°48 pp 17-48.

MENIN M. (1976). Constructions routière en Côte d'Ivoire". L.B.T.P., 61 p.

MENIN M., (1980). Comportement mécanique d'une couche de base en graveleux latéritiques améliorés au ciment : cas des routes en Côte d'Ivoire, LBTP, Rapport de recherche RR30, Abidjan, 197 p.

MOREL M. M., (1974). Emploi des sols fins plastiques traités aux liants hydrauliques en assises de chaussées. Journée d'information assise traitée aux liants hydrauliques, Nantes, pp. 35.

MORIN R., AÏTCIN P. C. et HADDAD G., (2002). Des structures en béton à haute performance sans fissures ? Bulletin du Laboratoire des Ponts et Chaussées 238 REF 4410-Paris, pp 3-12.

NORME NF P 94-051, (1993). Détermination des Limites d'Atterberg, limite de liquidité à la coupelle, limite de plasticité au rouleau, Afnor, Paris 24 p.

NORME ARS 675, (1996). Blocs de terre comprimée. Spécifications techniques pour les blocs de terres comprimées de parement, CDI et CRATERre-EAG, pp 51-55.

NORME ARS 680, (1996). Blocs de terre comprimée. Code de bonne pratique pour la production de blocs de terre comprimée, CDI et CRATERre-EAG, p 71-86.

NORME ARS 681, (1996). Blocs de terre comprimés. Code de bonne pratique pour la préparation des mortiers de terre, CDI et CRATERre-EAG, p 87-98.

NORTON J., (1986). Building with earth a handbook, IT, 65 p.

- OLIVIER M., MESBAH A., ADAM W., (1989).** Influence du malaxage et du type de presse sur la fabrication des briques de terre compressées. Memoria tercer simposio CIB/Rilem 6 al 10 de Nov. Mexico D.F 1989, 10 p.
- PENDLETON R. L., (1936).** "On the use of the term laterite " Amer. Soil surv. Bull. 17, pp 102-108.
- PHILIPONNAT G., (1998).** Fondation et ouvrages en terre, édition Eyrolles paris, 537 p.
- PRESCOTT J. A., PENDLETON R. L., (1952).** "Laterite and lateritic soils". Commonwealth Bureau of soil science. Tech. Comm. 47, 45 p.
- PROJET D.U.T., (1983).** Essais géotechniques et reconnaissance des sols. N° 22, Revue Française de géotechnique, 152 p.
- RABUEL P., (1980).** Matière première, Ecole Nationale de Céramique Industrielle, Paris 30 p.
- ROCCI G., (1964).** Ages absolus, histoire et structure de l'Ouest du bouclier Africain-C.R., Acad. Sc. Paris in MENIN 197 p.
- ROCCI G., (1965).** Essai d'interprétation des mesures géochronologiques. La structure de l'ouest Africain Sc. de la Terre . 10 Paris in MENIN 197 p.
- ROLLET A., BOUAZIZ R., (1972).** L'analyse thermique, Tome 2. L'examen des processus chimiques, Edition Gauthiers-Villards, Paris, pp 361-587.
- RUBSON, (2001).** L'imperméabilisation d'une façade en briques RECHERCHE NET.
- SAHORES J., (1964).** Dosage des éléments majeurs dans les roches par la méthode de rose adler et Flanagan, Colloque Philips Bruxelles V, II, pp 149-153.
- SIMONNET J. et BARRIERE P., (1984).** Construction en terre dans les réserves d'Azagny, LBTP, Abidjan, 67 p.

- SIMONNET J. N'DRI K. M., (1983).** Etude de l'agressivité des eaux en Côte d'Ivoire, Rapport de recherche n°RR50 LBTP, Abidjan, 60 p.
- SIMONNET J. et SERY P., (1980).** Emploi du béton de terre (géobéton) pour la construction économique en Côte d'Ivoire, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics n°386, pp. 105-140.
- TAGINI B., (1971).** Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire, Essai de géotechnique régionale, Thèse, Fac. Sc. Univ. Lausanne, SODEMI, Abidjan.
- TASTET J. P., (1979).** Environnements sédimentaires et structuraux quaternaire du littoral du Golf de Guinée (Côte d'Ivoire, Togo, Bénin). Thèse Doctorat Sci. Nat., Bordeaux I, N°621, 175p.
- TURRANLI L., BEKTAS F. and MONTEIRO P. J. M., (2003).** Use of ground clay brick as a pozzolanic material to reduce the alkali-silica reaction, Cement and concrete Research, Volume 33, Issue 10 pp 1539-1542.
- YACE I., (2002).** Initiation à la géologie, l'exemple de la Côte d'Ivoire et de l'Afrique de l'Ouest, Edition CEDA 160 p.
- ZIMMERMAN R.W., (1989).** Thermal conductivity of fluid-saturated rocks. Journal of Petroleum Science and Engineering 3, pp. 219–227.
- FEATURES, (2002).** Cement stabilized soil block : Economical and environment-friendly, <http://origin.island.ik/2001/10/05/featur02.html>.
- FEDERATION BELGE DE LA BRIQUE (F.B.B), (2002).** La brique, <http://www.brique.be/Brique/FBB-Brique-001-fr.htm>.
- FEDERATION BELGE DE LA BRIQUE (F.B.B), (2002).** Les couleurs de brique <http://www.brique.be>

FEDERATION BELGE DE LA BRIQUE (F.B.B), (2002). La brique... quand l'air, le feu et la terre se rencontrent, <http://www.brique.be>

RUBSON.com, (2001). Humidité: conseil de saison : L'imperméabilisation d'une façade en briques, <http://WWW.rubson.com/public/rubson/html/fr>

RUBSON.com, (2001). Humidité: Origines et conséquences, <http://WWW.rubson.com/public/rubson/html/fr> humidité/origines_conséquences.ph

PUBLICATION