



N° d'ordre .....

**UNIVERSITE DE OUAGADOUGOU**  
**UFR/ Sciences Exactes et Appliquées**  
*Laboratoire de Physico-Chimie et de Technologie des Matériaux*

# THÈSE

**Présentée pour obtenir le grade de DOCTEUR DE  
L'UNIVERSITÉ DE OUAGADOUGOU**  
**Discipline : Chimie Minérale**  
**Option : *Sciences des Matériaux***

**Par**

**Younoussa MILLOGO**

**Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières  
premières argileuse et latéritique du Burkina Faso  
améliorées aux liants hydrauliques : application au génie  
civil (bâtiment et route)**

***Soutenue publiquement le 8 Janvier 2008 devant la Commission d'Examen :***

**Président :** M. Jean Boukari LEGMA, Professeur, Université de Ouagadougou,

**Examineurs :** M. Mohamed HAJJAJI, Professeur, Université Cadi Ayyad, Marrakech,  
M. Philippe BLANCHART, Maître de Conférences, ENSCI, Limoges,  
M. Moussa GOMINA, Chargé de Recherche, CNRS, ENSI-Caen,  
M. Raguilnaba OUEDRAOGO, Maître de Conférences, Université de  
Ouagadougou,

**Invité:** M. Karfa TRAORE, Maître de Conférences, Université de Ouagadougou,  
M. Kalsibiri Kaboré, Ingénieur d'Etat en Génie Civil, LNBTP,  
Ouagadougou.

*A la mémoire de ma mère M<sup>me</sup> MILLOGO/DAO Korotimi*

*A la mémoire de mon père Mr. MILLOGO Bassabati*

*A la mémoire de ma marâtre M<sup>me</sup> MILLOGO/MILLOGO Sita*

*A la mémoire de mon frère MILLOGO Omar*

*A la mémoire de mon Professeur Tibo Siméon KABRE*

*A la mémoire de Delphine YAMEOGO*

*A mes frères et sœurs*

*A mes neveux et nièces*

*A mes belles sœurs*

*A mes amis*

*A tout ceux qui luttent contre l'injustice et l'ignorance*

## **REMERCIEMENTS**

*Le mémoire que nous présentons ici a été réalisé au Laboratoire de Physico-Chimie et de Technologie des Matériaux (LPCTM) de l'UFR-SEA de l'Université de Ouagadougou, sous la direction du Professeur Raguilnaba OUEDRAOGO.*

*Nous voudrions le remercier très chaleureusement pour avoir accepté de diriger cette thèse. Le Professeur Raguilnaba OUEDRAOGO nous a donné le goût de la recherche ; ses enseignements et les conseils précieux qu'il nous a prodigués tout au long de ces années ont été fort utiles pour la conduite de ce travail à son terme. Enfin, nous voudrions le remercier pour sa compréhension et sa tolérance face aux erreurs de jeunesse que nous avons pue commettre.*

*Le Professeur Karfa TRAORE qui seconde efficacement le Professeur dans la conduite du laboratoire, n'a ménagé aucun effort pour l'aboutissement de cette thèse à travers ses enseignements, encouragements et conseils. Nous lui exprimons nos sincères remerciements.*

*Le travail réalisé s'inscrit dans l'esprit du Laboratoire de Physico-Chimie et de Technologie des Matériaux (LPCTM), à savoir garder en tête l'application potentielle des résultats.*

*Il a été, comme d'autres travaux de l'Université de Ouagadougou, mené dans un contexte particulier. L'insuffisance des équipements scientifiques voir la non existence de beaucoup d'autres permet d'expliquer le fait que de nombreuses expériences aient été menées hors du laboratoire et ce, grâce à des accords multiples et multiformes. C'est le lieu pour nous d'exprimer notre gratitude à tous les partenaires.*

*Le Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP) et tous les directeurs successifs, Messieurs Issa TOE, Amadé OUEDRAOGO et Emile KIENTEGA, nous ont permis de réaliser dans d'excellentes conditions tous les essais géotechniques et une bonne partie des essais mécaniques. Nous leur sommes reconnaissant pour leur soutien inestimable tant sur les plans technique et financier. Leur contribution matérielle dans ce travail mérite d'être citée comme exemple à suivre par d'autres institutions du pays. Nous voulons remercier très particulièrement Mr. Kalsibiri KABORE, Chef du département Géotechnique Routière, qui malgré ses occupations s'est impliqué spécialement pour notre formation dans le domaine de la géotechnique routière. Que tout le personnel administratif et technique du LNBTP qui nous a entouré d'une ambiance propice au travail, trouve ici l'expression de notre gratitude.*

*Impliqués dans une équipe pluridisciplinaire (Equipe Référence), nous nous devons d'exprimer nos vifs remerciements aux responsables de Aire Développement qui en acceptant d'appuyer financièrement l'équipe nous a permis d'enregistrer par ce biais de nombreux spectres.*

*L'Agence Universitaire de la Francophonie nous a permis dans le cadre d'une bourse de mobilité Sud-Sud, de mener les investigations sur les aspects microstructuraux, à l'Université Cadi Ayyad et à la Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech au Maroc. Nous sommes reconnaissant à la coopération française pour son soutien inestimable.*

*Nous sommes très reconnaissant à l'endroit de l'Université Cadi Ayyad et à la Faculté des Sciences Semlalia qui ont accepté nous accueillir en deux stages afin de boucler nos expérimentations au laboratoire. Nos remerciements vont particulièrement à l'endroit de la Présidence de l'Université et au doyen de la faculté. Nous tenons à remercier très vivement le Chef du département de Chimie et tous les enseignants dudit département qui n'ont ménagé aucun effort pour la réussite de ces deux stages.*

*Nous voudrions faire mention spéciale du cas du Professeur Mohamed HAJJAJI, qui sans nous connaître a spontanément accepté de nous accueillir dans son équipe, l'Equipe de Physico Chimie de Matériaux Naturels et de Phénomènes d'Interfaces . Sans son accord, nous n'en serions pas sans doute au bout de nos peines. Nous voudrions le remercier très chaleureusement pour nous avoir guidé avec enthousiasme, rigueur et disponibilité pendant nos séjours. Que notre séjour puisse sceller à jamais une collaboration permanente et fructueuse entre les deux laboratoires et plus entre les deux universités.*

*Nous sommes très reconnaissant au Professeur Jean Hugues THOMASSIN de l'Université de Poitiers pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail à travers ses courtes missions à Ouagadougou ; il nous a enregistré des diffractogrammes et des spectres infra-rouge.*

*Nous voudrions remercier très particulièrement les Professeurs Abdelaziz AMMAR et Abdelkader OUTZOURHIT de la Faculté des Sciences Semlalia (Université Cadi Ayyad) respectivement pour leur aide multiforme dans la réalisation des diffractogrammes et pour les observations au microscope électronique à balayage (MEB) et les analyses EDAX.*

*Nous remercions également Messieurs Hassan ETTALIB et Rachid El MOUTAMANNI, respectivement techniciens du diffractomètre X et du MEB avec qui nous avons travaillé avec enthousiasme et entretenu des relations amicales durant nos stages à l'Université Cadi Ayyad.*

*Nous exprimons toute notre gratitude à Mr. Abdelaziz OUNAS, technicien à la Faculté des Sciences Semlalia pour la réalisation des thermogrammes ATD-ATG.*

*A la Faculté des Sciences Semlalia, nous avons entretenu de bonnes relations avec les Doctorants du Département de Chimie, lesquelles ont contribué à la réussite de ces stages, qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude. Nous remercions particulièrement notre collègue et ami du laboratoire Aziz KHALFAOUI pour son humanisme et sa disponibilité.*

*Le Professeur Khalil EZZINBI du département de Mathématique nous a apporté des aides multiformes pendant nos séjours à la Faculté des Sciences Semlalia ; qu'il veuille bien accepter nos sincères remerciements.*

*Nous avons passé de bons moments pendant nos stages au Maroc, que la communauté Burkinabé du Maroc et particulièrement celle de Marrakech trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.*

*Nous restons très reconnaissant à l'endroit de notre ami Dorian HELSON de Marrakech qui a su nous prodiguer conseils et encouragements et surtout pour les relations amicales qui nous ont permis de nous sentir comme chez nous.*

*Le Professeur Philippe BLANCHART de l'Ecole Nationale Supérieure de Céramique Industrielle (ENSCI) de l'Université de Limoges (France) a bien voulu consacrer du temps pour rapporter la thèse et pour faire le déplacement sur Ouagadougou pour siéger dans notre jury de thèse. Nous en sommes honoré et lui exprimons notre profonde gratitude. Le Professeur BLANCHART n'a jamais ménagé ses efforts pour apporter sa contribution à la formation des cadres de l'Université. Nous lui en sommes reconnaissant.*

*Le Professeur Kacim SALAH, de la Faculté des Sciences Semlalia de l'Université Cadi Ayyad de Marrakech (Maroc), malgré son emploi du temps très chargé a accepté avec plaisir d'être rapporteur de la thèse ; qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.*

*Nous remercions très particulièrement le Professeur Karifa BAYO de l'Université de Ouagadougou pour avoir accepté être rapporteur de la thèse malgré son calendrier très chargé. Nous lui sommes très reconnaissant. Qu'il trouve dans l'aboutissement de cette thèse une récompense à ses multiples conseils et encouragements surtout dans les moments difficiles de la thèse.*

*Le Professeur Moussa GOMINA du CNRS et de l'ENSI-Caen (France) n'a ménagé aucun effort pour apporter son soutien inestimable pour la réalisation de cette thèse. Il a aussi accepté, malgré son calendrier chargé, faire le déplacement sur Ouagadougou pour siéger dans notre jury de thèse. C'est l'occasion pour nous de lui exprimer nos sincères remerciements pour son soutien inestimable.*

*Le Professeur Jean Boukari LEGMA a accepté de présider notre jury de thèse ; qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.*

*Nous remercions très vivement les Professeurs Sié Faustin SIB, Harouna TRAORE, Guy Venance OUEDRAOGO, Mouhoussine NACRO, Adama SABA, Yvonne BONZI, Abdoul SAMATE, Lucien BONOU, Abdramane BARY pour avoir aiguisé notre goût pour la recherche en chimie à travers leurs enseignements.*

*Nous remercions également tous les enseignants de l'UFR/SEA et particulièrement ceux du Département de Chimie.*

*Nous voudrions témoigner notre reconnaissance à nos collègues du Laboratoire de Physico-Chimie et de Technologie des Matériaux à savoir le Dr. Cyrille Beyon BAMA, Mohamed SEYNOU et Lamine ZERBO pour la bonne ambiance qui a régné pendant notre thèse. Nous remercions également tous les Doctorants de Chimie. Nous remercions très particulièrement le Dr. Souleymane KOLOGO pour sa franche collaboration, ses conseils et encouragements pendant cette période de thèse. Nous remercions également tous les techniciens du département de chimie pour leur aide multiforme.*

*Nous tenons à remercier très vivement Monsieur Corantin SOME pour son aide pour la confection des cartes.*

*Les Dr. Séta NABA et Nicolas KAGAMBEGA nous ont apporté leur aide pour la description géologique des sites de prélèvement des échantillons, qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.*

*Nous voudrions exprimer notre profonde gratitude au Dr. Urbain WENMENGA pour ses conseils enrichissants et ses encouragements durant toute la période de préparation de notre thèse.*

*Nous rendons un hommage particulier à Monsieur Victor BOMBIRI, ex-Directeur du Bureau National d'Analyses des Sols qui a quitté ce monde en 2006. Nous lui sommes très reconnaissant pour son aide permanente pour les analyses chimiques de nos échantillons. Que son âme repose en paix.*

*Le TONTON Marcel BONZI malgré son calendrier chargé a pris le temps pour lire le document et apporté ses corrections et aussi durant toute la période de la thèse, il n'a cessé de nous apporter conseils et encouragements, qu'il trouve ici l'expression de nos sincères remerciements.*

*Monsieur Seydou SANOU tout au long de la thèse, nous a apporté son soutien moral et ses encouragements, qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude. Nous remercions également son épouse Suzanne SANOU/PALE pour son soutien moral.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à la Présidence de l'Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (U.P.B.).*

*Nous exprimons notre profonde gratitude également à la Directrice de l'Institut des Sciences de la Nature et de la Vie : le Professeur Chantal Yvette ZOUNGRANA/KABORE et au Directeur Adjoint : le Dr. Aboubacar TOGUYENI.*

*Nous remercions le Dr Sado TRAORE Directeur de l'Institut des Sciences Exactes et Appliquées de l' U.P.B. pour ses conseils précieux et son soutien moral.*

*Nous remercions vivement le personnel enseignant et administratif de l'Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso et plus particulièrement nos collègues de l'Institut des Sciences de la Nature et de la Vie.*

*Nos promotionnaires de la Terminale<sub>3</sub>C, promotion 1993-1994 du Lycée Ouezzin Coulibaly nous ont toujours apporté leur soutien moral et leurs encouragements durant la réalisation de ce travail ; qu'ils trouvent ici l'expression de notre très profonde gratitude.*

*Nous adressons notre profonde gratitude aux Doctorants du Laboratoire de Mathématiques et d' Equations (LAME) avec qui nous avons partagé de bons moments de travail.*

*Nous ne saurions terminer sans remercier nos amis : le Dr. Stanislas OUARO, Madame Bertine OUARO/DABIRE, Gaoussou GANDEMA, Issa OUEMA, Achille DADIOUARI, le Dr. Ismaël Nestor BASSOLE, Yaya BAYANE, Aboudramane GUIRO, le Dr. Ali BAYANE, Innocent YAMEOGO, Serges ZONGO, Sié KAM, le Dr. Malick Niango BA, Yacouba DIE, Dramane SANOU, Clément ZONGO, le Dr. Dramane KANIA, Téné Jocelyne TRAORE, le Pr. Mahamoudou DICKO, Honoré K BAMBARA et Aboubakar Sidiki KONATE qui nous ont toujours soutenu moralement et apporté leurs encouragements et conseils pendant toute la période de cette thèse.*

*Nous tenons aussi à remercier très vivement tous ceux qui de façon anonyme ont contribué à la réussite de cette thèse.*

*A tous merci.*

## RÉSUMÉ

La diffraction des rayons- X (DRX), les analyses thermique différentielle et thermogravimétrique (ATD-TG), la spectrométrie infra- rouge (IR) et l'analyse chimique élémentaire (AC) ont montré que les graveleux latéritiques de Sapouy (Burkina Faso) contiennent 42% de quartz, 26% de kaolinite, 15% de goethite, 3% d'hématite, 6% de rankinite et 4% de matières organiques. Les résultats des études géotechniques et mécaniques et ceux de la minéralogie et de la chimie (particulièrement le ratio silice/sesquioxydes) ont montré que l'échantillon convient pour une couche de fondation en construction routière. En vue de pouvoir utiliser cet échantillon comme matière première de couche de base, du ciment portland CPA45 ( $\leq 8\%$  en masse sèche de la matière première) y est ajouté. Cet ajout engendre la formation de la calcite, de la portlandite, de l'ettringite et de la tobermorite-1,4nm qui est un silicate de calcium hydraté (CSH). Cette tobermorite est essentiellement formée par hydratation de  $C_2S$  et  $C_3S$  qui sont des constituants du ciment. Le développement du CSH à partir de la réaction pouzzolanique impliquant les minéraux argileux semble être insignifiant. La présence de la tobermorite améliore les propriétés géotechniques et mécaniques des mélanges obtenus. Ces mélanges, même en faible teneur en ciment (par exemple 2% en masse) conviennent pour la couche de base en construction routière.

Les études minéralogiques (par DRX, ATD, IR), chimiques et géotechniques (granulométrie, limites d'Atterberg) effectuées sur une matière première argileuse de Nadialpou (Burkina Faso) ont montré que celle-ci est constituée de quartz (65%), de kaolinite (30%) et de faibles quantités (2%) de goethite et de feldspath potassique ; elle convient donc pour l'élaboration des briques crues pour les habitats. En vue d'améliorer les propriétés physiques (résistances à la compression et la flexion, l'absorption d'eau) de ces briques crues, des quantités croissantes de chaux vive broyée ( $\leq 12\%$  en masse) sont ajoutées à la matière première. Cet ajout de la chaux conduit à la formation de la calcite et du silicate de calcium hydraté (CSH) faiblement cristallisé. Ce dernier provient essentiellement de la réaction entre la chaux et le quartz fin. Sa présence contribue à l'amélioration des propriétés physiques des briques. Cependant la présence excessive de la portlandite et de la calcite et la faible formation du CSH a des effets néfastes sur les propriétés physiques. Les briques crues élaborées à partir des mélanges argile- chaux et même celles immergées pendant 4 jours sont admises pour la construction d'habitats.

**Mots Clés :** Microstructure, Propriétés géotechniques et physiques, graveleux latéritiques, argile, construction routière, briques crues, Burkina Faso.

## ABSTRACT

The X-rays diffraction (XRD), the differential thermal and the thermogravimetric analyses (DTA-TG), the infra-red spectrometry (IR) and the elementary chemical analysis (ECA) showed that lateritic gravels of Sapouy (Burkina Faso) contain 42wt.% of quartz, 26wt.% of kaolinite, 15wt.% of goethite, 3wt.% of hematite, 6wt.% of rankinite and 4wt.% of organic matter. The geotechnical and mechanical studies results and those of mineralogy and chemistry particularly the ratio silica/sesquioxides ratio showed that the sample is appropriate for a sub-base in road construction. To use this sample as base course materials, the amounts of Portland cement in the range of 0-8wt. % were added in this raw material. These additions led to the formation of calcite, portlandite, ettringite and 1.4nm-tobermorite which is a calcium silicate hydrate (CSH). This tobermorite is essentially formed by  $C_2S$  and  $C_3S$  (the cement components) hydration. The development of CSH by pozzolanic reaction implying clay minerals seems to be insignificant. The presence of the tobermorite improves geotechnical and mechanical properties of the obtained mixtures. These mixtures, even in feeble cement amounts (for example 2wt. %) are suitable for base course in road construction.

The mineralogical (by XRD, DTA, IR), chemical and geotechnical (particles size distribution, Atterberg limits) studies carried on a clayey raw material from Nadialpou (Burkina Faso) showed that this one which consists of quartz (65wt. %), kaolinite (30wt. %) and feeble amounts (2wt. %) of goethite and of K- feldspar is suitable for adobe bricks elaboration for the habitats. In order to improve the physical properties (compressive and bending strengths, water absorption) of these adobe bricks, crushed amounts of lime ( $\leq 12$ wt. %) are added to the raw material. This lime addition led to the formation of the calcite and poorly crystallized calcium silicate hydrate (CSH). This latter compound is originated from the reaction between lime and fine quartz. Its presence contributes to the improvement of the physical properties of adobe bricks. However the excessive presence of the portlandite and calcite and the feeble formation of CSH have detrimental effects on the physical properties. The adobe clayey lime- bricks manufactured even water immersed during 4 days are suitable for habitats construction.

**Key words:** Microstructure, Geotechnical and Physical Properties, lateritic gravels, clay, road construction, adobe bricks, Burkina Faso.



# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>4</b>
<b>CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>	<b>8</b>
I.1. ARGILES ET LATERITES : CARACTERISTIQUES CHIMICO- MINERALOGIQUES ET PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES .....	9
I.1.1. <i>Les argiles</i> .....	9
I.1.1.1. Définitions.....	9
I.1.1.2. Les minéraux argileux.....	9
I.1.1.2.1. Minéraux de type 1 : 1 (0,7 nm).....	10
I.1.1.2.2. Minéraux de type 2 : 1 (1nm).....	10
I.1.1.2.3. Minéraux de type 2 : 1 : 1 (1,4 nm).....	12
I.1.1.2.4. Les minéraux interstratifiés.....	14
I.1.1.2.5. Les minéraux à pseudo-feuillets.....	15
I.1.1.3. Les minéraux associés.....	16
I.1.1.3.1. La silice.....	16
I.1.1.3.2. Les oxydes et les oxy-hydroxydes de fer.....	16
I.1.1.3.3. Les feldspaths.....	16
I.1.1.3.4. Les carbonates.....	17
I.1.1.3.5. La matière organique.....	17
I.1.1.4. Propriétés physico-chimiques.....	17
I.1.1.4.1. La granulométrie.....	17
I.1.1.4.2. La plasticité.....	18
I.1.1.4.3. La surface spécifique (As) et la capacité d'échange cationique (CEC).....	19
I.1.2. <i>Les latérites</i> .....	20
I.1.2.1. Définitions.....	20
I.1.2.2. Formation des latérites.....	21
I.1.2.3. Classification des latérites.....	22
I.1.2.4. Les graveleux latéritiques et leur utilisation en construction routière.....	24
I.1.2.4.1. Définition.....	24
I.1.2.4.2. Minéralogie des graveleux latéritiques.....	25
I.1.2.4.3. Les principales spécifications.....	25
I.1.2.4.4. Classification géotechnique des graveleux latéritiques.....	26
I.1.2.4.5. Les graveleux latéritiques du Burkina Faso.....	29
I.2. MELANGES LIANTS HYDRAULIQUES (CHAUX ET CIMENT)-ARGILES : REACTIONS CHIMIQUES PROPRIETES GEOTECHNIQUES ET MECANIQUES. ....	29
I.2.1. <i>Introduction</i> .....	30
I.2.2. <i>Réactions argile- chaux</i> .....	32
I.2.2.1. Echange cationique.....	32
I.2.2.2. Flocculation- agglomération.....	33
I.2.2.3. Carbonatation.....	33
I.2.2.4. Réaction pouzzolanique.....	34
I.2.3. <i>Réactions physico-chimiques du ciment</i> .....	35
I.2.3.1. Réactions chimiques.....	36
I.2.3.2. Réactions physiques.....	37
I.2.4. <i>Structure des silicates de calcium hydratés</i> .....	37
I.2.5. <i>Influences des liants hydrauliques (chaux et ciment) sur les propriétés             géotechniques et mécaniques</i> .....	40
I.2.5.1. Sur les propriétés géotechniques.....	41
I.2.5.1.1. La granulométrie.....	41
I.2.5.1.2. La consistance du sol.....	41
I.2.5.1.3. La teneur en eau optimale et la densité sèche maximale.....	43
I.2.5.2. Sur les propriétés mécaniques.....	43

**CHAPITRE II : MATIERES PREMIERES, TECHNIQUES ET PROCEDURES  
EXPERIMENTALES ..... 50**

II.1. MATIERES PREMIERES.....	51
II.1.1. Descriptions, origines et échantillonnages.....	51
II.1.2. Géologie des sites de prélèvement.....	54
II.2. TECHNIQUES ET PROCEDURES EXPERIMENTALES.....	55
II.2.1. Caractéristiques physiques et physico-chimiques.....	55
II.2.1.1. La perte au feu.....	55
II.2.1.2. La densité.....	55
II.2.1.3. L'absorption d'eau (C).....	56
II.2.2. Caractéristiques géotechniques.....	57
II.2.2.1. Analyse granulométrique.....	57
II.2.2.2. Les limites d'Atterberg.....	57
II.2.2.3. L'essai au bleu de méthylène.....	58
II.2.2.4. L'essai Proctor.....	58
II.2.2.5. L'essai de portance California Bearing Ratio (CBR).....	59
II.2.3. Caractéristiques mécaniques.....	60
II.2.3.1. La résistance à la compression simple.....	60
II.2.3.2. Résistance à la flexion « 3 points ».....	60
II.2.3.3. La résistance à la traction par fendage (Essai Brésilien).....	61
II.2.4. La composition minéralogique.....	61
II.2.4.1. La diffraction des rayons X (D.R.X.).....	61
II.2.4.2. L'analyse thermique différentielle (A.T.D.).....	62
II.2.4.3. L'analyse thermogravimétrique.....	62
II.2.4.4. La spectroscopie infrarouge.....	63
II.2.4.5. La microscopie électronique à balayage.....	63
II.2.5. La composition chimique.....	64
II.2.5.1. Mise en solution des échantillons.....	64
II.2.5.2. Dosage des éléments chimiques de la solution.....	64
II.2.5.2.1. Dosage des éléments chimiques par la spectrométrie d'absorption atomique.....	64
II.2.5.2.2. Dosage du titane par la spectrométrie d'absorption moléculaire ou colorimétrie.....	65
II.2.5.2.3. Dosage de l'aluminium par complexométrie.....	66
II.2.5.2.4. Dosage de la matière organique.....	66
II.2.5.2.5. Les bases échangeables et la capacité d'échange cationique.....	67
II.2.5.2.6. La mesure du pH.....	68

**CHAPITRE III : CARACTERISATION GEOTECHNIQUE, MECANIQUE, CHIMIQUE ET  
MINERALOGIQUE DES GRAVELEUX LATERITIQUES DE SAPOUY ..... 71**

III.1. INTRODUCTION.....	72
III.2. TECHNIQUES ET PROCEDURES EXPERIMENTALES.....	72
III.3. PROPRIETES GEOTECHNIQUES ET MECANIQUES.....	75
III.4. COMPOSITION CHIMIQUE.....	78
III.5. COMPOSITION MINERALOGIQUE.....	78
III.5.1. Diffraction des rayons X.....	78
III.5.2. Analyses thermique différentielle (ATD) et thermogravimétrique (ATG).....	80
III.5.3. Composition semi- quantitative des phases minérales cristallisées.....	81
III.6. DISCUSSION.....	82
III.7. CONCLUSIONS.....	87

**CHAPITRE IV : INFLUENCE DU CIMENT SUR LA MICROSTRUCTURE ET LES  
PROPRIETES GEOTECHNIQUES ET MECANIQUES DES GRAVELEUX LATERITIQUES . 91**

IV.1. INTRODUCTION.....	92
IV.2. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU CIMENT UTILISE.....	92
IV.3. TECHNIQUES ET PROCEDURES EXPERIMENTALES.....	93
IV.4. CARACTERISATIONS MINERALOGIQUE ET MICROSTRUCTURALE.....	94
IV.4.1. Composition minéralogique.....	94
IV.4.2. Investigation microstructurale.....	99
IV.5. PROPRIETES GEOTECHNIQUES ET MECANIQUES.....	105
IV.6. CONCLUSIONS.....	111

<b>CHAPITRE V : MICROSTRUCTURE ET PROPRIETES PHYSIQUES DES BRIQUES CRUES ELABOREES A PARTIR D'UNE MATIERE PREMIERE ARGILEUSE AMELIOREE A LA CHAUX.....</b>	<b>115</b>
V.1. INTRODUCTION.....	116
V.2. TECHNIQUES ET PROCEDURES EXPERIMENTALES.....	116
V.3. CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES.....	117
V.3.1. <i>La chaux vive</i> .....	117
V.3.2. <i>La matière première argileuse</i> .....	118
V.3.2.1. Caractéristiques physico-chimiques.....	118
V.3.2.2. Composition chimique et minéralogique.....	119
V.3.2.2.1. Composition chimique.....	119
V.3.2.2.2. Composition minéralogique.....	120
V.3.2.2.2.1. Diffraction des rayons- X.....	120
V.3.2.2.2.2. Analyse thermique différentielle (A.T.D.).....	121
V.3.2.2.2.3. Composition semi- quantitative de la matière première.....	122
V.4. INFLUENCE DE LA CHAUX SUR LA MICROSTRUCTURE ET LES PROPRIETES PHYSIQUES DES BRIQUES CRUES.....	123
V.4.1. <i>Investigation microstructurale</i> .....	123
V.4.2. <i>Propriétés physiques</i> .....	135
V.5. CONCLUSION.....	139
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>142</b>

# **Introduction générale**

Le Burkina Faso, comme d'autres pays de la sous région, dispose d'énormes ressources en matières premières argileuses et latéritiques susceptibles d'être exploitées et valorisées à l'état naturel, ou améliorées par divers ajouts pour des utilisations variées.

Il serait périlleux de vouloir présenter une revue complète du champ d'application de ces matières premières. Celles-ci sont principalement utilisées dans les industries céramiques et pharmaceutiques, dans la construction routière et dans l'habitat économique.

Ces dernières années, notre laboratoire, qui privilégie la recherche appliquée, s'est intéressé à quelques applications des matières premières argileuses, notamment dans le domaine de la céramique, et, surtout, s'est attelé à déterminer pour de nombreux sites argileux du Burkina Faso les compositions chimiques et minéralogiques de même que les propriétés physico- chimiques.

Dans le présent travail, considérant l'enclavement du Burkina Faso et la situation de l'habitat, nous avons résolu de nous intéresser à l'utilisation de l'argile et de la latérite respectivement dans la fabrication des briques crues et dans la construction routière.

L'utilisation de ces matières premières en construction à l'état cru pose souvent des problèmes tant du point de vue de la résistance mécanique que de la durabilité. Ainsi, des études visant à stabiliser ces matières premières par l'ajout de liants hydrauliques (chaux, ciment), de cendres volantes des éruptions volcaniques ou de fibres végétales sont menées.

Dans les études visant à la stabilisation des argiles ou des latérites par la chaux et le ciment, la caractérisation minéralogique des composés de type « ciment », particulièrement le silicate de calcium hydraté (CSH), reste très délicate. Les travaux antérieurs ont certes proposé des approches de caractérisation de ce composé mais il n'existe toujours pas de consensus sur la question. Par exemple, certains résultats indiquent que ce composé de type « ciment » se trouve sous forme faiblement cristallisé ou amorphe, et qu'il résulte essentiellement de la réaction entre l'argile et la chaux ou le ciment. Par ailleurs, il manque des données fiables sur l'effet des ajouts du ciment sur la microstructure des graveleux

latéritiques. Enfin l'amélioration des propriétés physiques des briques élaborées à partir des mélanges argiles-chaux de même que l'effet de la chaux sur la microstructure de ces briques, ont fait l'objet de peu de travaux scientifiques, à notre connaissance.

Bien que les matières premières argileuses et latéritiques du Burkina Faso aient fait l'objet de nombreuses études concernant leur caractérisation (physico-chimique, chimique et minéralogique), leur pédogenèse et leur comportement au frittage, peu de travaux scientifiques ont été consacrés à la stabilisation ou à l'amélioration de ces dernières par des liants hydrauliques et à l'étude du potentiel de leur utilisation comme matières premières de fabrication des briques et de construction routière.

Les argiles et les graveleux latéritiques du Burkina Faso, amendés aux liants hydrauliques, peuvent respectivement servir aussi bien dans l'habitat traditionnel que dans la construction de pistes rurales. Toutefois, leur usage reste tributaire de leurs caractéristiques minéralogique, géotechnique et mécanique.

Le travail présenté dans ce mémoire est composé de cinq chapitres :

Le premier chapitre présente une étude bibliographique de la chimie et la minéralogie des latérites et des argiles, ainsi que de leur aptitude pour la construction routière et l'élaboration de briques et la construction routière. Les réactions entre les argiles ou les latérites et la chaux ou le ciment sont également discutées. L'influence de ces liants hydrauliques sur les propriétés géotechniques et mécaniques des matières premières est aussi abordée.

Le deuxième chapitre est réservé à la description géographique et géologique des deux sites de prélèvement, Sapouy et Nadialpou ainsi qu'aux techniques et procédures expérimentales utilisées dans ce travail.

Le troisième chapitre expose les résultats de la caractérisation physico-chimique, géotechnique, mécanique, chimique et minéralogique des graveleux latéritiques provenant de Sapouy (Burkina Faso) et utilisés en construction routière.

Le quatrième chapitre présente les résultats de l'ajout du ciment aux graveleux latéritiques du point de vue de la microstructure et des propriétés géotechniques et mécaniques. L'utilisation en construction routière des mélanges graveleux latéritiques- ciment est également discutée.

Enfin, le cinquième chapitre discute des effets de l'ajout de chaux sur la microstructure et les propriétés physiques de briques crues élaborées à partir d'une argile locale prélevée à Nadiapou (Burkina Faso). Le mécanisme de formation du silicate de calcium hydraté (CSH) est discuté.

# **Chapitre I**

## **Revue bibliographique**



## **I.1. Argiles et latérites : caractéristiques chimico- minéralogiques et propriétés physico-chimiques**

### **I.1.1. Les argiles**

#### **I.1.1.1. Définitions**

Il n'existe pas de définition unique du terme « argile ». Le mot « argile » englobe deux connotations dont l'une liée à la taille des grains et l'autre à la minéralogie. La définition dépend de la discipline concernée.

Le géologue ou le pédologue considère comme « argile » tout minéral de faible granulométrie, la limite étant fixée à 2 ou 4 microns selon les cas [1].

Les céramistes définissent l'argile comme une matière première qui, en présence d'eau, forme une pâte plastique qui durcit après cuisson [1, 2].

Pour l'ingénieur du génie civil, le sol argileux désigne un sol qui contient un certain pourcentage de minéraux argileux et dont le comportement est influencé par la présence de ces derniers. Un sol argileux est un sol fin, plastique et cohérent, actif sur le plan électrochimique et dont le comportement est très sensible à la présence de l'eau. L'influence de la proportion en argiles sur les propriétés du sol augmente avec la quantité d'eau. Lorsque la quantité d'argile excède 50% en masse, le comportement du mélange est gouverné par l'effet de l'argile [3].

#### **I.1.1.2. Les minéraux argileux**

Les minéraux argileux sont des alumino-silicates plus ou moins hydratés. Ils appartiennent au groupe des phyllosilicates. Ils sont caractérisés par une faible granulométrie (inférieure à 2  $\mu\text{m}$ ) ; les feuillets constitutifs de la structure lamellaire sont formés par l'empilement de couches de tétraèdres siliceux et de couches d'octaèdres alumineux ou magnésiens (**figure I.1**).

Les feuillets élémentaires constitutifs des minéraux argileux, à l'exception des minéraux de type amphibole (comme la palygorskite ou la sépiolite), sont très semblables dans les directions cristallographiques a et b.

En revanche, la distance basale selon  $c^*$  séparant deux feuillets élémentaires, c'est-à-dire l'épaisseur d'un feuillet additionnée de celle de l'espace interfoliaire associé, est caractéristique des différentes familles de minéraux argileux [4-6].

Suivant le nombre de couches de tétraèdres et d'octaèdres constituant le feuillet, on distingue différents groupes de minéraux argileux.

#### **I.1.1.2.1. Minéraux de type 1 : 1 (0,7 nm)**

Ces minéraux sont constitués de feuillets comprenant une couche d'octaèdres et une couche de tétraèdres et dont la distance basale varie entre 0,71 et 0,73 nm. Ce groupe est aussi symbolisé par (T-O). A ce type correspond le groupe de la kaolinite (**figure I. 1**).

Le feuillet est électriquement neutre et l'espace interlamellaire est dépourvu d'espèces chimiques à l'exception de l'halloysite dont des molécules d'eau peuvent s'insérer dans l'espace interfeuillet. Ceci explique le fait que la distance basale de ce minéral soit de 1nm [7].

La cohésion des feuillets est assurée par des liaisons hydrogènes relativement fortes s'établissant entre les ions oxygènes d'un plan et les hydrogènes des groupements hydroxyles du plan qui succède [7].

#### **I.1.1.2.2. Minéraux de type 2 : 1 (1nm)**

Le feuillet de ces minéraux est constitué de deux couches de tétraèdres siliceuses encadrant une couche d'octaèdres alumineuse. La distance basale varie entre 0,91 et 1,5 nm selon le contenu de l'interfeuillet. Il est symbolisé par T-O-T.

A l'exception du talc et de la pyrophyllite, le feuillet élémentaire des minéraux de ce groupe porte une charge négative provenant des substitutions isomorphiques dans les interstices tétraédriques et/ou octaédriques. Ces substitutions correspondent essentiellement au remplacement de  $\text{Si}^{4+}$  par  $\text{Al}^{3+}$  et  $\text{Fe}^{3+}$  dans les tétraèdres et au remplacement de  $\text{Al}^{3+}$  par  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Mn}^{2+}$  (minéraux dioctaédriques) ou de  $\text{Fe}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  par  $\text{Li}^+$  (minéraux trioctaédriques) dans les octaèdres. Le déficit de charge du feuillet lié à ces substitutions est compensé par la présence de cations (par exemple  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{Mg}^{2+}$ ) dans l'espace interfoliaire. Selon l'importance de ces substitutions et les propriétés qui en résultent (exemple le gonflement), il est possible de différencier les phyllosilicates 2 : 1.

Lorsque le déficit de charge est nul, il n'y a pas de cation interfoliaire (l'interfeuillet est inexistant). La distance basale est alors minimale et varie entre 0,91 et 0,94 nm. Il s'agit des cas de la pyrophyllite et du talc.

Lorsque le déficit de charge est maximum (compris entre 0,9 et 1,0 par  $\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ), le cation compensateur n'est pas hydraté et la distance basale varie entre 0,96 et 1,01 nm ; le groupe ainsi défini est celui des micas [8]. L'illite (**figure I. 1**) fait partie de ce groupe. Le potassium présente intimement les feuillets par l'intermédiaire de fortes interactions électrostatiques assurant une grande stabilité de l'illite.

Lorsque la charge interfoliaire est comprise entre 0,0 et 0,9 par  $\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ , les cations interfoliaires sont hydratés. La distance basale dépend alors de la charge et du nombre de molécules d'eau associées à ces cations. Cette distance peut varier de 1,43 nm pour les vermiculites (charge comprise entre 0,6 et 0,9 par  $\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) à 1,55 nm pour les smectites (**figure I. 1**) dont la charge varie entre 0,25 et 0,60 par  $\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ . Les cations interfoliaires des smectites, généralement Ca ou Na, peuvent être échangés par la mise en suspension dans les solutions salines.

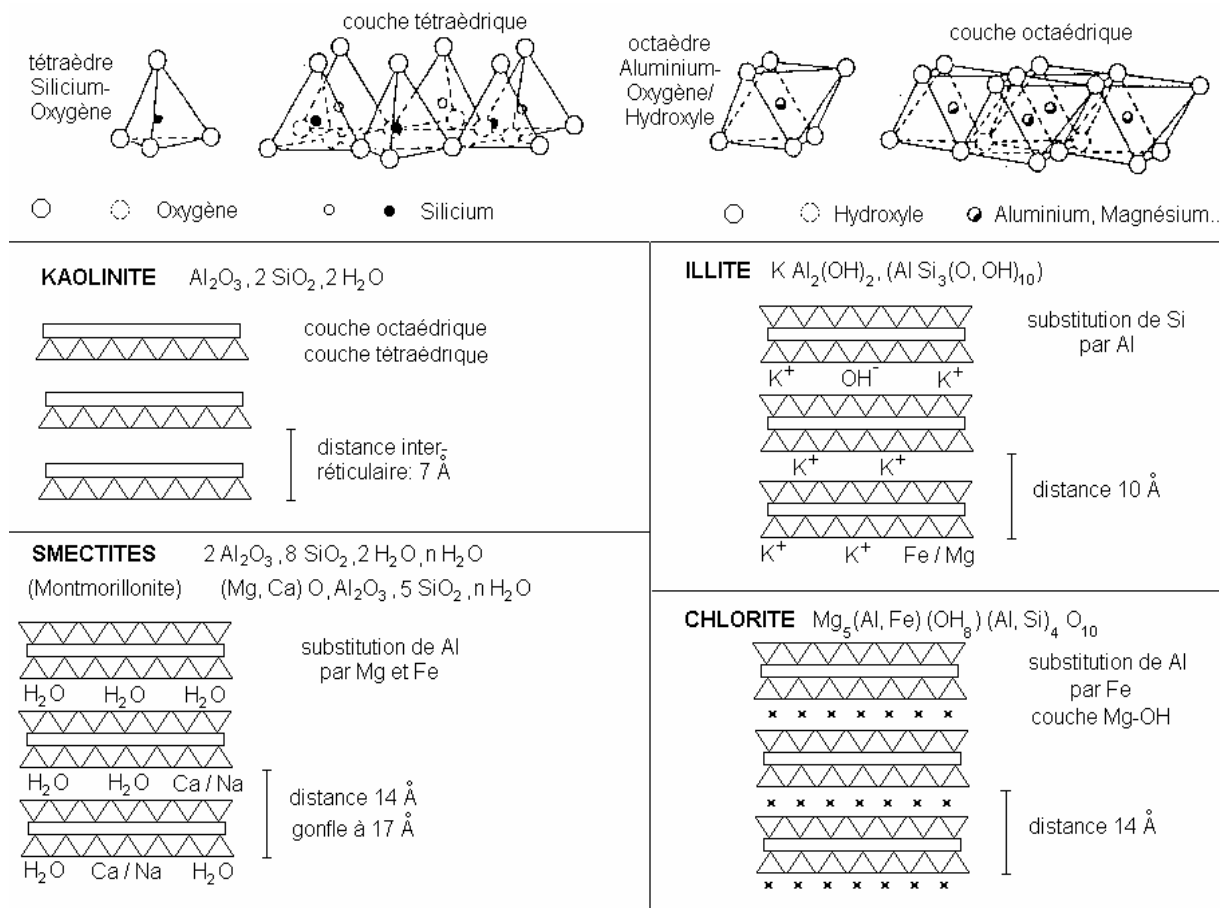
Pour la vermiculite (charge du feuillet supérieure à 0,6), les molécules d'eau formant la sphère de coordination des cations interfoliaires sont fortement associées aux feuillets par le biais des interactions de type ion-dipôle. De telles interactions limitent de façon notable les possibilités d'expansion du minéral. Quant aux smectites (charge du feuillet inférieure à 0,6), elles sont caractérisées par une grande aptitude au gonflement du fait de faibles interactions assurant la liaison entre les feuillets.

### **I.1.1.2.3. Minéraux de type 2 : 1 : 1 (1,4 nm)**

Ils sont constitués par une couche d'octaèdres encadrée par deux couches de tétraèdres et un interfeuillet constitué par une couche d'octaèdres brucitique [9]. Leur équidistance basale est de 1,4 nm. Ils sont représentés par T-O-T-O. A ce type correspond le groupe des chlorites (**figure I. 1**).

Les minéraux de ce groupe sont classés en deux sous-groupes selon la nature du feuillet 2 : 1 [7] :

- les chlorites vraies où le feuillet de type 2 : 1 est identique à celui d'un mica magnésien chargé négativement. Cette charge est neutralisée par la substitution d'un des ions  $Mg^{2+}$  par  $Al^{3+}$  dans la couche brucitique. La liaison entre les feuillets de ces chlorites est assurée par les interactions électrostatiques entre le feuillet de type 2 : 1 et la couche brucitique. Les chlorites vraies ont une équidistance basale stable.
- les chlorites gonflantes (pseudo-chlorites) où le feuillet de type 2 : 1 est semblable à celui d'une smectite. Elles sont gonflantes.



**Figure I. 1 : Structure des minéraux argileux**

Les minéraux argileux sont classés généralement en deux sous-groupes : les minéraux dioctaédriques et les minéraux trioctaédriques. Les minéraux dioctaédriques sont ceux dont les six valences négatives du site octaédrique sont compensées par deux cations trivalents comme  $Al^{3+}$  ou  $Fe^{3+}$ . Enfin les minéraux trioctaédriques sont ceux dont les six valences négatives du site octaédrique sont compensées par trois cations divalents comme  $Fe^{2+}$  ou  $Mg^{2+}$ . Le **tableau I.1** donne un résumé de la classification des phyllosilicates [10].

**Tableau I.1 : Classification des phyllosilicates [10].**

Type	Groupe	Sous-groupe	Espèces	Formules
1 : 1	Kaolinite	Kaolinites	Dickite	$Al_2 Si_2 O_5(OH)_4$
			Nacrite	$Al_2 Si_2 O_5(OH)_4$
			Kaolinite	$Al_2 Si_2 O_5(OH)_4$
Métahalloysite	$Al_2 Si_2 O_5(OH)_4$			
Halloysite	$Al_2 Si_2 O_5(OH)_4 \cdot 4H_2O$			
		Serpentines	Antigorite	$Mg_3 Si_2 O_5(OH)_4$
2 : 1	Talc	Pyrophyllite	Pyrophyllite	$Al_2 Si_4 O_{10}(OH)_2$
		Talc	Talc	$Mg_3 Si_4 O_{10}(OH)_2$
	Smectites	Smectites dioctaédriques	Montmorillonite	$(Al_{1,67} Mg_{0,33}) O_{10}(OH)_2$
		Smectites trioctaédriques	Saponite	$Mg_3 Si_{3,67} Al_{0,33} O_{10}(OH)_2$
	Vermiculites	Vermiculites dioctaédriques	Vermiculite	$(Al, Fe \dots)_2 (Si, Al)_4 O_{10}(OH)_2$
		Vermiculites trioctaédriques	Vermiculite	$(Mg, Fe \dots)_2 (Si, Al)_4 O_{10}(OH)_2$
	Micas	Micas dioctaédriques	Muscovite	$KAl_2 (Si_3 Al) O_{10}(OH)_2$
		Micas trioctaédriques	Phlogopite	$KMg_3 (Si_3 Al) O_{10}(OH)_2$
2 : 1 : 1	Chlorites	Chlorites dioctaédriques	Sudoite	$Al_4 (Si, Al)_4 O_{10}(OH)_8$
		Chlorites trioctaédriques	Espèces différentes	$(Mg, Fe \dots)_6 (Si, Al)_4 O_{10}(OH)_8$

#### **I.1.1.2.4.. Les minéraux interstratifiés**

Cette expression désigne les minéraux formés par l'empilement régulier ou non de feuillets de minéraux argileux simples et différents.

Leur comportement aux Rayons X est intermédiaire entre celui des différents feuillets qui les composent [9].

Il existe principalement trois types de combinaisons : le type régulier dans lequel des feuillets différents alternent suivant une logique bien déterminée (par exemple A-B-A-B-A-B...), le type irrégulier dans lequel aucune logique ne régit l'alternance

des feuillets et enfin le type avec ségrégation de paquets alternants [11]. Le **tableau I. 2** présente les minéraux interstratifiés naturels les plus courants.

**Tableau I. 2 : Les minéraux interstratifiés naturels [12].**

<b>Type d'interstratification</b>	<b>Espèces minérales</b>
<b>Alternance régulière : Système à deux composés</b>	Muscovite-montmorillonite Illite-smectite Chlorite-smectite Chlorite-vermiculite Glauconite-smectite Mica-vermiculite Serpentine-chlorite Kaolinite-smectite
<b>Alternance de type ABAA : Système à deux composés</b>	Illite-smectite Glauconite-smectite
<b>Alternance aléatoire : Système à deux composés</b>	Illite-smectite Glauconite-smectite Mica-vermiculite Mica-chlorite Smectite-chlorite Kaolinite-smectite
<b>Système à trois composés</b>	Illite-chlorite-smectite Illite-smectite-vermiculite

#### **I.1.1.2.5. Les minéraux à pseudo-feuillets**

Ce sont des argiles fibreuses qui se distinguent des autres minéraux argileux par leur structure particulière dite en pseudo-feuillets [7]. Elles se caractérisent par des feuillets argileux discontinus. Elles présentent une structure de base en ruban de type 2 : 1, proche du talc en composition mais avec une structure en chaînes comme dans les pyroxènes ou les amphiboles. Les tétraèdres sont reliés entre les chaînes. Les feuillets tétraédriques sont continus tandis que ceux octaédriques sont discontinus. Il y a de larges espaces entre les chaînes qui sont remplis d'eau (liée ou non, exemple de l'eau zéolitique) et de cations échangeables. La structure en ruban

confère à l'argile un aspect en lattes ou en fibres. La sépiolite comporte essentiellement le Mg comme cation échangeable, rarement le Na tandis que la palygorskite (ou attapulgite) est plus riche en Al que la sépiolite.

### **I.1.1.3. Les minéraux associés**

Dans la nature les minéraux argileux sont généralement associés à d'autres minéraux. La présence de ces minéraux associés joue un rôle non négligeable dans les propriétés physico-chimiques des argiles. Les principaux minéraux associés sont :

#### **I.1.1.3.1. La silice**

Ce tectosilicate se présente sous forme de différentes variétés. Les plus connues sont les trois formes bien cristallisées comme le quartz, la trydimite et la cristobalite. La silice modifie la rhéologie des pâtes plastiques faites à base d'argiles. A l'état très fin, elle réagit aussi avec la chaux en milieu très basique pour donner les silicates de calcium hydratés servant de ponts pour les particules isolées d'une argile ou d'une latérite [13].

#### **I.1.1.3.2. Les oxydes et les oxy-hydroxydes de fer**

Les minéraux de fer les plus couramment rencontrés dans les argiles sont : l'hématite ( $\alpha$   $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), la maghémite ( $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), la magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), la goéthite ( $\alpha\text{FeOOH}$ ), la lépidocrocite ( $\gamma\text{FeOOH}$ ), la limonite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ). Leur densité étant élevée, ils contribuent au renforcement des propriétés mécaniques des argiles.

#### **I.1.1.3.3. Les feldspaths**

Ce sont des tectosilicates avec remplacement partiel des ions  $\text{Si}^{4+}$  par  $\text{Al}^{3+}$  dans les tétraèdres. Ceci entraîne un déficit de charge qui est compensé par l'insertion dans leur structure des ions  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$ . On assiste donc à la formation des feldspaths de type potassique ( $(\text{Si}_3\text{AlO}_8)\text{K}$ , exemples : orthose, microcline et sanidine), sodique ( $(\text{Si}_3\text{AlO}_8)\text{Na}$ , exemple : albite) et calcique ( $(\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_8)\text{Ca}$ , exemple :



l'anorthite). Comme la silice, les feldspaths réagissent avec la chaux en milieu très alcalin pour donner les silicates de calcium hydratés [13].

#### **I.1.1.3.4. Les carbonates**

Les carbonates existent sous plusieurs types dont les plus connus sont : la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), la magnésite ( $\text{MgCO}_3$ ), la dolomite ( $\text{Ca, Mg}(\text{CO}_3)_2$ ), la rhodochrosite ( $\text{MnCO}_3$ ). La calcite et la dolomite sont les plus fréquemment rencontrées dans les argiles.

#### **I.1.1.3.5. La matière organique**

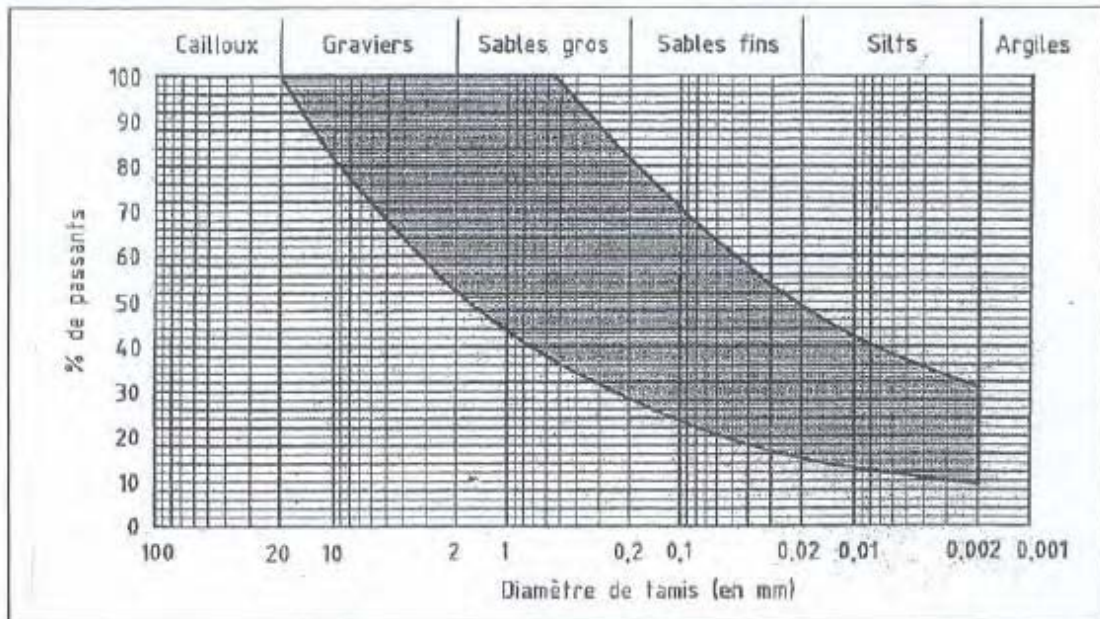
Elle se trouve en général sous forme d'acides humiques. Elle influence la dispersion des argiles. La présence de matières organiques retarde la réaction pouzzolanique car elles enveloppent la surface de l'argile et gênent ainsi la réaction chaux/argile [14].

#### **I.1.1.4. Propriétés physico-chimiques**

Les propriétés physico-chimiques des minéraux argileux sont dues à la petite taille, la structure des feuillets et la charge négative des particules.

##### **I.1.1.4.1. La granulométrie**

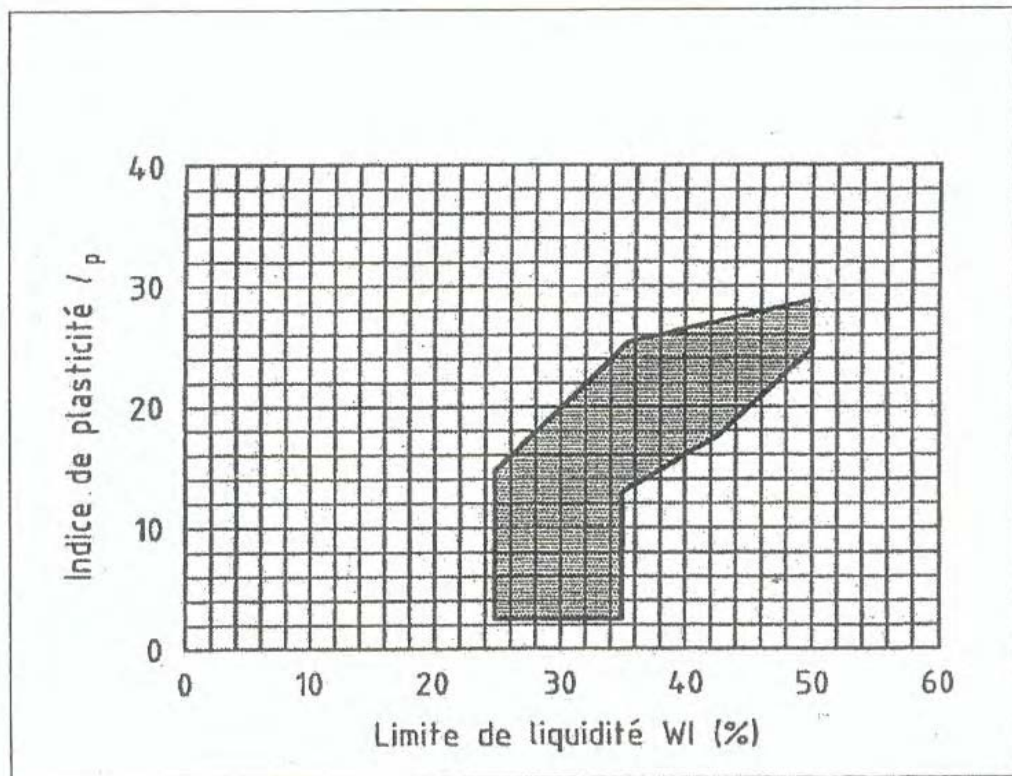
La connaissance de la granulométrie d'un sol donne des orientations sur la qualité des briques crues élaborées à partir de ce sol. Pour avoir des briques de qualité, le sol ne doit pas être trop argileux. La fraction argileuse ( $<2 \mu\text{m}$ ) doit être supérieure à 5% et inférieure à 30% et les gros grains ne doivent pas avoir une taille moyenne de 5mm [15]. Les terres argileuses convenables pour l'élaboration des briques doivent avoir une courbe granulométrique située dans le fuseau granulaire indiqué sur la **figure I. 2** [15].



**Figure I. 2 : Fuseau granulaire des terres utilisables pour les briques [15].**

#### **I.1.1.4.2. La plasticité**

La plasticité d'une argile exprime sa faculté à se déformer lorsqu'elle est mélangée à de l'eau. Elle dépend essentiellement du type et de la structure des minéraux argileux et de la granulométrie. La plasticité est évaluée par la méthode dite « limites d'Atterberg » par l'indice de plasticité ( $I_p$ ) [16]. La plasticité des minéraux argileux varie d'un minéral à un autre. Les minéraux les plus plastiques sont les minéraux fibreux et les smectites. En effet la structure en rubans des minéraux fibreux leur permet la fixation de l'eau zéolitique tandis que l'espace interfoliaire des smectites leur permet de fixer des molécules d'eau. Pour un même minéral, la plasticité peut varier. Ainsi la kaolinite bien cristallisée est moins plastique que celle mal cristallisée [17]. Pour l'élaboration des briques crues améliorées au ciment ou à la chaux, les pâtes d'argiles doivent avoir une certaine plasticité. Il est recommandé que la matière argileuse ait la limite de liquidité et l'indice de plasticité situées dans le fuseau représenté sur la **figure I. 3**.



**Figure I. 3 : Fuseau des indices de plasticité des terres utilisables pour les briques [15]**

#### **I.1.1.4. 3. La surface spécifique ( $A_s$ ) et la capacité d'échange cationique (CEC)**

La fine taille des argiles leur confère une surface importante par rapport au volume des particules [18]. La surface des argiles est supérieure à celles de minéraux de même taille mais de forme différente. Les propriétés des argiles sont essentiellement contrôlées par leur surface. La surface totale comprend la surface externe qui est comprise entre les particules argileuses et la surface interne correspondant à l'espace interterfoliaire. Les minéraux fibreux sont caractérisés par une grande surface spécifique ( $A_s$ ).

La capacité d'échange cationique (CEC) mesure la capacité d'une argile à échanger des cations. Elle mesure la concentration en cations non fixés dans la couche diffuse et dépend de la charge totale (c'est-à-dire la charge de surface et structurale). La CEC est fonction du pH. Elle est généralement donnée pour un pH

neutre (pH=7). Elle est exprimée en milliéquivalent /100g (még/100g). Le **tableau I.3** donne des valeurs de surface spécifique et de CEC de quelques minéraux argileux.

**Tableau I. 3 : Surface spécifique et CEC de quelques minéraux argileux [19].**

<b>Minéral</b>	<b>Surface interne (m<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Surface externe (m<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Surface totale (m<sup>2</sup>/g)</b>	<b>CEC (még / 100g)</b>
Kaolinite	0	10-30	10-30	5-15
Illite	20-55	80-120	100-175	10-40
Smectites	600-700	80	700-800	80-150
Vermiculite	700	40-70	760	100-150
Chlorite	-----	100-175	100-175	10-40

Les argiles gonflantes (smectites, vermiculites et pseudo-chlorites) peuvent être facilement stabilisées par la chaux ou le ciment à cause de leur forte CEC. En effet les réactions d'échange cationique font partie des réactions primordiales dans le processus de stabilisation des sols à la chaux ou au ciment.

### **I.1.2. Les latérites**

#### **I.1.2.1. Définitions**

Le mot latérite vient du latin « *later* » qui veut dire brique. Le terme a été suggéré pour la première fois par le géologue Buchanan (1807) dans le compte-rendu de son voyage à Madras, au travers des provinces du Mysore, Kanabar et Malabar pour désigner un matériau ferrugineux utilisé dans l'Inde pour confectionner des briques de terre destinées à la construction. « C'est un des meilleurs matériaux de construction, rempli de cavités et de pores, possédant de grandes quantités de fer, de coloration rouge et jaune. L'intérieur du matériau, à l'abri de l'air, est si tendre que tout instrument métallique le coupe. Aussitôt taillée à la forme voulue, la masse devient aussi dure qu'une brique et résiste à l'eau et à l'air, bien mieux que toute brique que j'ai vue en Indes [20, 21] ».

La définition du mot latérite ne fait pas l'unanimité chez les auteurs. Plusieurs définitions furent proposées au terme latérite par des auteurs dont les principales sont citées ci-après.

Rinne, Bertrand et Orcel (1949) définissent les latérites comme des argiles et hydroxydes de fer et d'aluminium [22].

Routhier (1963) qualifie de latérite un mélange d'hydroxydes de fer et d'aluminium [22].

Vatan quant à lui, fait appel à la couleur, notamment rouge brique, qui viendrait du mot latin « *later* », terme plutôt utilitaire [22].

Millot (1963) utilise le terme « latérite » pour désigner l'ensemble des produits d'altération de la zone intertropicale [22].

Pour l'ingénieur routier, la latérite est une matière première de structure vacuolaire, très souvent nuancé et de couleur variant du jaune au rouge plus ou moins foncé et même noir, constitué par une croûte plus ou moins continue, d'épaisseur et de dureté variables, ayant beaucoup de vides et l'aspect d'une scorie, ou aussi des concrétions isolées oolitiques et pisolithiques, de plus ou moins grande résistance avec une fraction argileuse [20]. Des distinctions sont faites entre les sols fins latéritiques (ou latérite), les graveleux latéritiques utilisables en technique routière comme couche de forme, de fondation et de base, la carapace ou horizon latéritique très dur et la cuirasse latéritique qui est une couche très dure de matériau aggloméré ressemblant à des scories.

De nos jours, la définition qui semble faire l'unanimité chez les auteurs est celle de Schellman en 1986 [21] car elle s'appuie sur les conditions d'altération de la roche mère et la composition minéralogique. Pour cet auteur : « Les latérites sont des produits d'intense altération météorique et sont constitués d'un assemblage minéral qui peut être fait de goéthite, d'hématite, d'hydroxyde d'aluminium, de kaolinite et de quartz. Le rapport  $\text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  comparé à celui de la roche mère doit être tel que la formation latéritique ne contienne pas plus de silice que celle qui est retenue dans le quartz qui subsiste et celle qui est nécessaire à la formation de la kaolinite ».

### I.1.2.2. Formation des latérites

Le phénomène de latérisation est un processus de formation des sols, spécifique aux régions tropicales chaudes et humides. Il s'agit d'une altération de la roche mère dont la caractéristique essentielle réside dans une mise en solution puis un départ de la silice, phénomène de lessivage, accompagnés d'un enrichissement en fer et en alumine sous forme de sesquioxydes  $Fe_2O_3$  et  $Al_2O_3$  [20]. Les facteurs influençant de façon prépondérante l'altération des roches et la formation des sols latéritiques qui en découlent sont : le climat (pluviométrie, température, bilan hydrique), la topographie (érosion et drainage), la végétation (matières organiques, bactéries, acides humiques), la nature de la roche mère et le temps [23].

### I.1.2.3. Classification des latérites

Les rapports  $\frac{S}{R}$  et  $K_i$  ont été utilisés depuis longtemps pour caractériser les latérites [24-28] avec

$$K_i = \frac{\frac{SiO_2}{60}}{\frac{Al_2O_3}{102}} \text{ et } \frac{S}{R} = \frac{\frac{SiO_2}{60}}{\frac{Al_2O_3}{102} + \frac{Fe_2O_3}{160}}.$$

La règle généralement admise est la suivante :

$$\frac{S}{R} < 1,33 \text{ correspond à des latérites vraies,}$$

$$1,33 < \frac{S}{R} < 2 \text{ roches latéritiques}$$

$$\frac{S}{R} > 2 \text{ matières premières non latéritiques.}$$

Mais cette classification ne fait pas l'unanimité, la controverse venant en partie du fait que si le rapport  $\frac{S}{R}$  sépare les latérites des argiles telles les kaolinites, en revanche, il classe dans les latérites le minerai de fer, la bauxite et de nombreux grès ferrugineux [20].

La controverse pour la classification des latérites en tenant compte de ce rapport est due au fait que ce dernier dépend de la tranche granulométrique utilisée pour sa détermination. Des études sur une cinquantaine d'échantillons en vue de

déterminer le rapport  $\frac{S}{R}$  ont montré des disparités au niveau de la valeur de ce rapport en fonction de la tranche granulométrique [20]. Les valeurs de ce rapport obtenues sont consignées dans le **tableau I.4**.

**Tableau I.4 : Valeurs de  $\frac{S}{R}$  en fonction de la tranche granulométrique utilisée**

<b>Classe granulaire</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	$\frac{S}{R}$
<b>0/20</b>	55,4	15,35	23,9	3
<b>0/2</b>	78,1	12,5	3,1	9
<b>2/20</b>	32,7	18,2	44,7	1,2

Les valeurs de  $\frac{S}{R}$  montrent pourquoi il ne serait pas correct de classer les latérites en fonction de ce rapport.

Quant à Ki, paramètre usité antérieurement au rapport  $\frac{S}{R}$ , il n'a d'intérêt du point de vue géochimique et minéralogique que s'il est évalué à partir des valeurs de silice et d'alumine correspondant aux seuls minéraux secondaires (argile et hydroxyde). Ce qui a conduit Pedro (1966) [20] à proposer deux modes opératoires lorsque la matière première étudiée provient d'une roche entièrement transformée, selon que la formation ne contient que des espèces secondaires cristallisées (argiles et hydroxydes) ou selon qu'elle contient également des constituants amorphes (gels aluminosiliciques) ; il indique en outre que l'évaluation du rapport Ki total n'a jamais de signification sur le plan minéralogique lorsque la transformation de la roche mère n'est pas complète.

Les paramètres  $\frac{S}{R}$  et Ki sont inadéquats pour la classification des latérites. Ainsi l'une des recommandations faite par le BRRI Ghana [23] est l'abandon de classification reposant sur des paramètres tels que Ki ou  $\frac{S}{R}$  au profit d'une classification reposant sur le processus pédogénétique. Les termes plus descriptifs de sol ferrugineux, sol ferralitique et ferrisol sont recommandés à la place du terme latéritique.

- Les sols ferrugineux caractérisent la zone tropicale à saison sèche marquée dont la pluviométrie est en deçà de 1m par an. Elle s'étend de la zone sahélienne à la savane claire. Le cuirassement et les horizons concrétionnés riches en oxydes de fer y sont très fréquents, l'humus faiblement développé. La kaolinite est le minéral dominant. Les minéraux argileux du type 2 :1 y sont souvent présents. La CEC de la fraction argileuse varie entre 16 et 25 mEq/100g.
- Les sols ferrallitiques se développent sous les climats chauds et humides et à forêt dense. La pluviométrie annuelle est supérieure à 1500 mm et la température moyenne est supérieure à 25°C. Tous les minéraux primaires sauf le quartz sont hydrolysés et une forte quantité de la silice et des bases sont mises en solution. La silice restante se combine à l'aluminium pour former la kaolinite. L'excès de l'aluminium forme la gibbsite. La fraction argileuse a une CEC inférieure à 16 mEq/100g.
- Les ferrisols ressemblent aux sols ferrallitiques. La différence est due au fait que l'érosion superficielle empêche le développement normal des profils et les forces à se développer en profondeur dans les matières premières de départ moins altérés [20].

#### **I.1.2.4. Les graveleux latéritiques et leur utilisation en construction routière**

##### **I.1.2.4. 1. Définition**

Le graveleux latéritique est un sol meuble de granulométrie 0/20 à 0/40 mm comportant de 10 à 35% de fines passant au tamis de 80 µm et un « squelette » (refus sur le tamis de 2 mm) de 20 à 60%. Le mortier passant au tamis de 0,425 mm a une plasticité (IP = indice de plasticité) variant entre 10 et 35%. La courbe granulométrique montre très généralement un palier entre 0,080 et 2 mm qui traduit bien la dualité d'origine des composants du mélange naturel qu'est ce matériau [29]. Ils sont abondants dans la zone intertropicale et sont utilisés en construction routière comme matériau de couche de fondation ou de base.



#### **I.1.2.4.2. Minéralogie des graveleux latéritiques**

Les graveleux latéritiques sont caractérisés par leur forte teneur en oxydes et hydroxydes de fer et/ou d'aluminium qui peut atteindre 80% du produit dû à la ferrallisation. Le fer est présent sous forme de goéthite ( $\alpha\text{FeO}(\text{OH})$ ) ou d'hématite ( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). L'aluminium est contenue dans la gibbsite ( $\gamma\text{Al}(\text{OH})_3$ ) et dans la boehmite ou diaspore ( $\text{AlO}(\text{OH})$ ). Les minéraux argileux couramment rencontrés dans les graveleux latéritiques sont la kaolinite, l'halloysite, la montmorillonite, les chlorites mais rarement l'illite. A ces minéraux, il faut ajouter les oxydes de titane dont l'anatase et une de ses variétés allotropiques qui est la brookite, les oxydes de chrome dont la chromite et la chromopicotite. Les silices cristallisées (quartz) et amorphes sont à des teneurs appréciables dans les graveleux latéritiques.

#### **I.1.2.4. 3. Les principales spécifications**

De nombreuses normes d'utilisation des graveleux latéritiques en technique routière existent. Il s'agit de règles empiriques valables aussi bien pour les routes revêtues que celles non revêtues. Elles se basent essentiellement sur les résultats de l'analyse granulométrique, des limites d'Atterberg, les essais de compactage (Proctor modifié) et la portance CBR (Californian Bearing Ratio). D'un pays à un autre, les spécifications peuvent être différentes [30]. Les caractéristiques suivantes (**tableau I. 5**) sont recommandées par le manuel de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. La caractéristique clé pour ce dimensionnement est la portance CBR. Cette caractéristique est généralement déterminée après 4 jours d'imbibition d'éprouvettes de compacité égale à 95% de la densité sèche maximale. Si cette durée d'imbibition sied pour la zone tropicale humide, elle est critiquable pour la zone sahélienne où le sol est rarement imbibé et les teneurs en eau naturelle dépassent rarement celle de l'optimum Proctor modifié [20].

**Tableau I.5 : Guide pratique du dimensionnement des routes pour les pays tropicaux [30].**

<b>Graveleux latéritique</b>	<b>Couche de base</b>	<b>Couche de fondation</b>
<b>Densité sèche OPM<sup>a</sup></b>	2,00 minimum	1,90 minimum
Limite de liquidité	35 maximum	50 maximum
Indice de plasticité	25 maximum	15 maximum
Gonflement linéaire	0,3% maximum	1% maximum
<b>Granulométrie- passant à :</b>		
38 mm	85-100	80-100
19 mm	70-100	65-100
10 mm	50-95	50-100
5 mm	40-90	35-100
2,5 mm	30-80	25-80
0,7 mm	15-45	15-55
0,080 mm	5-20	5-35
<b>CBR- après 4 jours d'imbibition</b>		
pour 100% OPM	80 minimum	
pour 97% OPM		30 minimum

<sup>a</sup> : Optimum Proctor Modifié

#### **I.1.2.4.4. Classification géotechnique des graveleux latéritiques**

La classification géotechnique des graveleux latéritiques a pour objectif de regrouper ces derniers en familles à caractéristiques géomécaniques voisines ayant un comportement similaire suite aux sollicitations extérieures. Cette classification devrait permettre une utilisation efficiente des graveleux latéritiques en construction routière. Les différents paramètres utilisés pour cette classification sont :

- la granulométrie et plus précisément le pourcentage des fines (<0,080 mm),
- les limites d'Atterberg,

- la portance CBR
- les caractéristiques de compactage (Proctor) [29].

On distingue 4 types de classifications.

#### **- Classification HRB (Highway Research Board)**

Plusieurs classes sont couvertes par les graveleux latéritiques. Les plus graveleux sont les classes A-2-4 à A-2-7 tandis que les plus argileux (passant à 0,080 mm > 35%) sont des A-7-5 à A-7-6 [29].

#### **- Classification USCS (Unified Soil Classification System)**

Les graveleux latéritiques entrent en général dans la catégorie des sols grenus. Ils se répartissent entre les GC (gravier argileux) et les SC (sable argileux) lorsque leur granulométrie maximale est réduite [29].

#### **- Nouvelle classification française des sols**

La quasi-totalité des graveleux latéritiques sont situés dans la classe B6 (D < 50 ; f : 12 à 35% ; IP > 10%) [29].

#### **- Autre classification : classification ivoirienne**

Cette classification retient trois types de graveleux latéritiques ; elle est basée sur le pourcentage des fines (f), l'indice de plasticité (IP) et le produit f.IP. Les trois types de graveleux latéritiques sont : G11, G12 et G13 [29].

Les graveleux latéritiques de type G11 sont caractérisés par f=15% et f.IP < 250 (quand IP > 16%). Ce sont les meilleurs graveleux dont le CBR est généralement supérieur à 30%, la densité sèche de l'OPM est supérieure à 2,1 et la teneur en eau optimale de compactage est comprise entre 5 et 8%.

Quant aux graveleux latéritiques de type G12, ils sont limités par les courbes (f.IP) 250 et 600 (quand IP > 24) et dont f est compris entre 15 et 25%. Le CBR est

généralement compris entre 15 et 40%, la densité sèche maximale OPM est comprise entre 2 et 2,25 et la teneur en eau optimale de compactage est comprise entre 7 et 10%.

Enfin, les graveleux latéritiques de type G13 sont limités par les courbes (f.IP) 600 et 1000 (quand  $IP > 28\%$ ) et dont f est compris entre 25 et 35 %. Le CBR est systématiquement inférieur à 30%, la densité sèche maximale de l'OPM est comprise entre 1,9 et 2,2 et la teneur en eau optimale de compactage varie de 7 à 10%.

Les matières premières G13 sont utilisables comme matières premières de remblai ou pour les couches de forme ; celles G11 sont de bonnes matières premières pour les couches de fondation et peuvent être parfois utilisées à l'état naturel pour les couches de base mais alors elles devront le plus souvent être améliorées aux liants hydrauliques ou aux concassés car les  $CBR > 80\%$  ne sont pas fréquents. Quant aux matières premières G12, leurs propriétés sont intermédiaires entre les celles des G11 et G13 ; elles ne pourront que rarement être utilisées pour les couches de fondation [29].

Les normes de dimensionnement des routes dépendent beaucoup de l'intensité du trafic. Le **tableau I.6** donne des valeurs tolérées du CBR pour les couches de fondation et de base en fonction de la classe du trafic.

**Tableau I.6 : Valeurs du CBR (en %) en fonction de la classe du trafic (T) [31]**

Valeur du CBR à 95% OPM après 96 heures d'imbibition	Classe de trafic				
	T1	T2	T3	T4	T5
Fondation	25	30	30	30	35
Base	60	80	80	-	-

T1 : 100 - 300 véhicules par jour  
T2 : 300 - 1000 véhicules par jour  
T3: 1000 - 3000 véhicules par jour  
T4 : 3000 - 6000 véhicules par jour  
T5 : 6000 - 12000 véhicules par jour

Le choix d'un graveleux latéritique pour une couche donnée sur la base des caractéristiques géotechniques et mécaniques n'est pas souvent judicieux compte

tenu du fait que les graveleux latéritiques n'ont pas une structure stable. Compte tenu du caractère évolutif de ces sols, il a été constaté que leur comportement sur le terrain est différent de celui prévu par les essais géotechniques classiques [32]. A cet effet des analyses chimiques et minéralogiques devraient systématiquement compléter les essais géotechniques et mécaniques. Le paramètre important admis est le ratio silice/sesquioxydes [33]. Pour une couche de base qui requiert une bonne performance mécanique, ce ratio est compris entre 2,5 et 6. La composition minéralogique est aussi un critère important. En effet les graveleux latéritiques contenant des espèces minérales argileuses gonflantes telles que les smectites ne sont pas recommandables pour des couches de chaussées.

#### **I.1.2.4.5. Les graveleux latéritiques du Burkina Faso**

Les graveleux latéritiques du Burkina Faso ont fait l'objet de peu de travaux scientifiques. Cependant des études réalisées par Lompo [34] révèlent que ces graveleux latéritiques constituent une matière première très variable tant dans l'épaisseur des gisements qu'en ce qui concerne la nature argileuse ou sableuse du mortier (<0,425 mm), les dimensions des pisolithes et leur granulométrie d'une manière générale. Ils sont caractérisés par un pourcentage de particules fines variant entre 5 et 30% en masse, un refus à 2 mm entre 50 à 80% en masse, un indice de plasticité compris entre 10 et 30%, une densité sèche maximale de l'OPM comprise entre 1,90 et 2,30, une teneur en eau optimale variant entre 7 et 12% et une portance CBR à 95% de l'OPM variant entre 15 et 100 [29, 34]. Ces matières premières sont de classe A-2-4(0) à A-2-6(0). Elles sont généralement de bonnes matières premières de couche de fondation. Toutefois leur utilisation comme matières premières de couche de base requiert des améliorations. Les types d'améliorations pratiques pour cette couche, et ce depuis fort longtemps, sont ceux au « lithostab » qui est un concassé de granite et au ciment pour un tronçon de 15 km sur la route Ouagadougou- Pô- Frontière Ghana [34]. L'amélioration des graveleux latéritiques à la chaux pour leur utilisation en tant que matière première de couche de base n'a jamais fait l'objet de travaux scientifiques au Burkina Faso, bien que le pays dispose d'une réserve de chaux dolomitique à Tiara exploitée et commercialisée par la société COVEMI à Bobo-Dioulasso.

## **I.2. Mélanges liants hydrauliques (chaux et ciment)-argiles : Réactions chimiques, propriétés géotechniques et mécaniques**

### **I.2.1. Introduction**

L'ajout de la chaux au sol en vue de l'améliorer pour des projets de construction, a une très longue histoire datant d'environ 5000 ans [35]. D'après McDowell (1959), les routes en terres stabilisées à la chaux étaient utilisées dans l'ancienne Mésopotamie ; les Egyptiens, les Grecs et Romains utilisaient des mélanges sols-chaux [36]. Aux Etats-Unis d'Amérique, la stabilisation des routes à la chaux a été utilisée pour la première fois en 1920 [35]. La chaux éteinte fut utilisée d'abord comme agent stabilisant pour les constructions modernes dans les années 1924 sur de courts tronçons de route. Son utilisation fut répandue pendant la deuxième guerre mondiale pour les routes et les pistes d'atterrissage des avions [36]. De nos jours la stabilisation des sols argileux par ajout de la chaux en vue d'améliorer leur utilisation en construction est une technique largement répandue dans le monde. Elle est utilisée pour améliorer les couches de base et de fondation des chaussées et pour la construction des voies ferrées et des pistes d'atterrissage des aéroports. Aux USA, en 1971, près de 500 millions de m<sup>2</sup> de surface de route étaient améliorées à la chaux [35].

Bien que la chaux soit largement utilisée pour améliorer les couches des chaussées, à notre connaissance, peu de travaux scientifiques font allusion à l'amélioration des performances mécaniques des briques à base d'argile par ce liant hydraulique.

En Afrique, des améliorations des couches de chaussées à la chaux ont été réalisées au Ghana, Nigeria, Kenya, Mozambique, Zimbabwe, en Algérie, Angola, Gambie, Afrique du Sud, Tanzanie et Zambie [20]. Pour ce qui est du Burkina Faso, à notre connaissance, des travaux sur l'amélioration à la chaux des sols destinés à des couches de chaussées et à la fabrication des briques crues n'ont jamais été faits ; pourtant, les graveleux latéritiques pour les couches de base deviennent rares et la qualité des briques produites à base d'argile brute laisse à désirer.

Le terme « ciment » est issu du latin *coementum* qui signifie mortier, liant des maçonneries. Ce sens étymologique a donc été à peu près conservé. Il est toutefois aujourd'hui restreint aux seuls liants dits hydrauliques parce qu'ils sont capables

de faire prise en présence d'eau. Le durcissement est dû aux réactions chimiques d'hydratation des silicates et des aluminates de chaux.

Dans la préhistoire et au début de l'Antiquité, les maçonneries étaient soit liées à l'argile, soit réalisées sans liant comme les murs pélasgiques de Grèce ou les murs incas. A Babylone, les maçonneries de briques étaient liées au bitume. Les Égyptiens utilisèrent pour les pyramides un plâtre grossier produit par cuisson d'un gypse (sulfate de calcium) impur. Les Grecs furent parmi les premiers constructeurs employant la chaux obtenue par cuisson du calcaire (carbonate de chaux). Les Romains se servirent beaucoup de la chaux dans leurs constructions, mais améliorèrent ce liant dès le premier siècle avant J.-C. en l'additionnant de pouzzolane soit naturelle comme les cendres volcaniques actives, soit artificielles comme les briques pilées. Ils obtinrent ainsi un liant hydraulique, appelé ciment romain, qui est en fait intermédiaire entre une chaux et un véritable ciment. Celui-ci permit de construire de grands ouvrages hydrauliques, tel le pont du Gard, ou maritimes tels les ports. Au XVIII<sup>e</sup> siècle, avec l'amélioration des procédés de cuisson, les chaux hydrauliques, intermédiaires entre les chaux et les ciments, furent produites. En 1756, l'Anglais Smeaton, en mélangeant celles-ci avec des pouzzolanes, obtint un mortier aussi dur que la pierre de Portland. Cette technique d'élaboration fut reprise par ses successeurs. Ainsi, fut introduite progressivement dans le langage l'appellation « ciment Portland ». En 1817, le Français Louis Vicat, étudiant scientifiquement et non plus empiriquement, comme ses prédécesseurs, les chaux hydrauliques, découvrit les principes chimiques des ciments et définît leurs règles de fabrication. Aussi en est-il considéré comme l'inventeur. En 1824, l'Anglais Aspdin prit un brevet pour la fabrication d'un ciment de Portland, mais celui-là comportait encore beaucoup de points obscurs. C'est seulement en 1845 que l'Anglais Johnson indiqua de façon précise les règles de fabrication de ce produit. À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, en France, Le Chatelier étudia la composition chimique des divers constituants des ciments ; son œuvre fut perfectionnée et achevée par l'Américain Bogue au XX<sup>e</sup> siècle. En 1890, on comprit l'intérêt du laitier granulé ajouté au ciment, et, après 1945, celui des cendres volantes. Les ciments spéciaux sont d'invention plus récente : le ciment alumineux fut découvert par Bied, en 1908.

Le ciment est généralement fabriqué en cuisant vers 1 450 °C des mélanges de calcaire et d'argile ; on obtient alors des nodules durs, appelés clinkers. Le ciment

Portland est obtenu en broyant très finement le clinker auquel on ajoute un peu de gypse. D'autres types de ciment peuvent être obtenus en mélangeant ce clinker broyé avec des constituants broyés également, qui présentent des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques : ce sont soit des laitiers de hauts fourneaux granulés, soit des cendres volantes ou encore des pouzzolanes, naturelles ou artificielles. Il existe, en outre, des ciments spéciaux, tels les alumineux ou les sursulfatés. La principale utilisation du ciment est le béton, dont il est le composant actif, mais il entre aussi dans la composition des mortiers pour maçonneries ou pour enduits. Le ciment est très utilisé comme additif aux argiles et latérites en vue d'élaborer des matériaux aux bonnes tenues mécaniques [20, 31, 37, 38].

Si le ciment a été largement utilisé dans certains pays d'Afrique dont ceux cités plus haut et en Côte d'Ivoire en vue d'améliorer les propriétés géotechniques et mécaniques des latérites, cela n'est pas le cas du Burkina Faso où quelques tentatives d'amélioration des graveleux latéritiques au ciment n'ont concerné que quelques petites portions de routes [34].

La littérature révèle beaucoup de travaux sur l'influence de la chaux et du ciment sur les propriétés géotechniques et mécaniques des latérites [20, 29, 31, 39-42]. A notre connaissance peu de travaux ont concerné l'étude corrélative entre ces propriétés et la microstructure des mélanges obtenus.

### **I.2.2. Réactions argile- chaux**

L'ajout de la chaux à un sol argileux ou latéritique déclenche quatre principales réactions : l'échange cationique, la floculation- agglomération, la réaction pouzzolanique et la réaction de carbonatation.

#### **I.2.2.1. Echange cationique**

L'ajout de la chaux à un sol argileux a un effet immédiat sur les propriétés de celui-ci. Il y a libération des ions  $\text{Ca}^{+2}$  produits par la chaux en présence d'eau, et ceci s'accompagne d'une augmentation du pH du sol. Il se produit un échange cationique entre les ions métalliques liés aux surfaces des particules argileuses et



les ions  $\text{Ca}^{+2}$  produits par la chaux [38]. La valence et la taille de l'ion jouent un rôle primordial dans cette réaction d'échange cationique. Les cations de valence élevée remplacent facilement ceux de faible valence. Pour des cations de même valence, le plus gros peut être facilement remplacé. On peut donc dresser une liste des cations par ordre approximatif de capacité de remplacement. Cet ordre dans la réalité dépend du type d'argile, de la nature des cations à remplacer et de la concentration des ions dans l'eau. L'ordre croissant de capacité de remplacement des cations est le suivant :  $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{H}^+ < \text{K}^+ < \text{NH}_4^+ < \text{Mg}^{+2} < \text{Ca}^{+2} < \text{Al}^{+3}$  [43]. La réaction d'échange cationique est responsable de la baisse de plasticité des sols argileux quand ils sont traités à la chaux. Elle a peu d'influence sur les sols riches en kaolinite compte tenu du fait que la kaolinite ne dispose pas d'interfeuille où les cations pourraient s'insérer. Par contre pour des sols riches en smectites (exemple la montmorillonite), la réaction d'échange cationique contribue fortement à la baisse de leur plasticité.

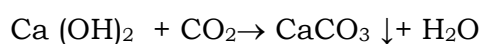
#### **I.2.2.2. Flocculation- agglomération**

Après la réaction d'échange cationique, les particules argileuses se trouvent entourées par une double couche diffuse qui peut être modifiée par l'échange ionique du calcium. Cela altère la densité de la charge électrique autour des particules argileuses qui s'attirent et se regroupent en formant des flocons. Ce processus s'appelle la flocculation [36]. Ce phénomène peut changer la texture des particules argileuses aboutissant à la formation des particules de plus grande taille. Il s'ensuit une réduction de la plasticité et une augmentation de la portance du sol argileux.

L'agglomération est causée par l'attraction du restant des particules du sol qui portent encore des charges négatives par celles de la surface chargée positivement. Elle est affectée par l'échange cationique ou la flocculation des particules.

#### **I.2.2.3. Carbonatation**

Il s'agit de la réaction entre la chaux éteinte et le dioxyde de carbone de l'air qui conduit à la formation de la calcite qui précipite sous forme de cristaux. La réaction chimique est la suivante :



Les cristaux de calcite formés sont des liants de cimentation très fragiles et par conséquent connectent faiblement les particules du sol argileux. Ces cristaux renforcent seulement à court terme le sol. La réaction consomme une partie de la chaux destinée à la réaction pouzzolanique entre l'argile et la chaux, retarde celle-ci et contribue à la baisse du pH des sols traités [13, 44, 45]. Paige-Green (1984) [46] a montré que la présence du dioxyde de carbone induit initialement une résistance mécanique qui diminue avec le temps de cure. La carbonatation est néfaste pour le traitement des sols argileux à la chaux.

#### **I.2.2.4. Réaction pouzzolanique**

La chaux, l'eau, la silice et l'alumine réagissent pour donner divers composés de cimentation. La silice et l'alumine peuvent provenir des minéraux argileux, du quartz, des feldspaths, des micas, des minéraux alumino-silicatés et même de certains composés amorphes [14].

L'ajout d'une quantité importante de chaux à un sol fait augmenter de manière significative le pH du mélange jusqu'à 12,4, valeur correspondante au pH d'une solution saturée de chaux. Les solubilités de la silice et de l'alumine croissent donc avec ces valeurs de pH élevées.

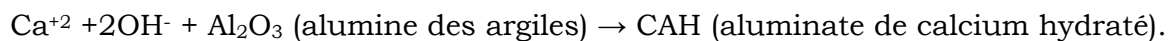
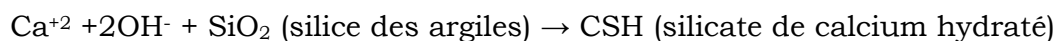
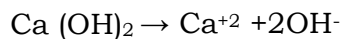
Divers mécanismes de formation des produits de la réaction entre la silice ou l'alumine avec la chaux ont été proposés par des chercheurs.

Selon l'étude de Eades [47], sur les réactions sol-chaux, la forte valeur de pH est à l'origine de la dissolution de la silice des minéraux argileux. Cette silice dissoute se combine aux ions  $\text{Ca}^{+2}$  libérés par la chaux pour donner du silicate de calcium. Cette réaction peut se poursuivre tant qu'il existe de la chaux éteinte et de la silice des minéraux argileux.

Diamond *et al.* [48] ont suggéré que les molécules de la chaux sont adsorbées par les surfaces des argiles et réagissent avec d'autres surfaces argileuses pour faire précipiter les produits de la réaction. De ce fait, les minéraux argileux aux grandes surfaces spécifiques comme les smectites sont très réactives vis à vis de la chaux.

Selon Stocker [49], la chaux réagit directement avec les minéraux argileux par l'attaque des feuillets sur leurs bords qui sont en contact avec l'eau pour donner du matériau type ciment. Des recherches menées concernant l'adsorption de la chaux par la kaolinite et la montmorillonite [50], ainsi que des études optiques des systèmes argile- chaux- eau [51, 52] indiquent que les réactions chimiques en surface sont bien possibles et les nouvelles phases peuvent se former directement sur les surfaces des particules argileuses.

Les principales réactions chimiques peuvent être schématisées comme suit :



Une large variété d'hydrates peut être obtenue en fonction des conditions des réactions chimiques. Ces conditions sont principalement : la quantité et le type de chaux, les caractéristiques du sol, le temps de cure et la température. Les réactions typiques entre le sol et la chaux sont les suivantes :

- Kaolinite+ chaux  $\rightarrow$  CSH (C/S=0,2-1) + CAH + CASH [53],
- Kaolinite+ chaux  $\rightarrow$  CASH (prehnite) [54],
- Montmorillonite + chaux  $\rightarrow$  CSH (gel)  $\rightarrow$  CSH (II) [55],
- Montmorillonite + chaux  $\rightarrow$  CSH (gel)+ C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub> (hydrogarnet ) [56],
- Argile + chaux  $\rightarrow$  CSH (gel) et/ou CSH (I) + C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub> + C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> [50],  
où C= CaO, S=SiO<sub>2</sub>, A= Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et H= H<sub>2</sub>O.

Pour CSH (I) et CSH (II), les ratios C/S sont respectivement inférieur et supérieur à 1,5 [57].

Les propriétés et caractéristiques du sol qui influencent les réactions pouzzolaniques sont : le pH, le taux de matière organique, le drainage naturel, la présence d'une quantité excessive de sodium échangeable, la minéralogie de l'argile, le degré d'altération, la présence des sulfates et carbonates, le fer extractible, le rapport silice/ sesquioxydes et le rapport silice/alumine [41].

### **1.2.3. Réactions physico-chimiques du ciment**

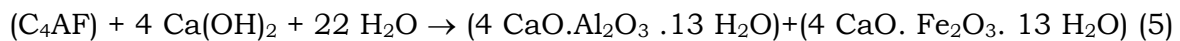
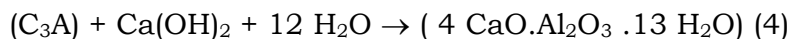
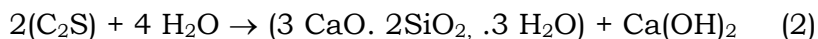
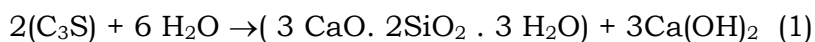
Le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire un matériau qui, finement moulu et gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réaction et

de processus d'hydratation et qui après durcissement conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le ciment Portland est une des nombreuses variétés de ciment. La composition typique de son clinker est : 67% de CaO, 22% de SiO<sub>2</sub>, 5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et 3% d'autres composés et il contient 4 phases majoritaires qui sont l'alite (3CaO.SiO<sub>2</sub> ou C<sub>3</sub>S), la bélite (2CaO.SiO<sub>2</sub> ou C<sub>2</sub>S), la célite qui est le mélange de l'aluminate de calcium (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou C<sub>3</sub>A) et du ferroaluminate de calcium (4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou C<sub>4</sub>AF) [58]. Plusieurs autres phases, comme les sulfates d'alcalins ou l'oxyde de calcium s'y retrouvent en très faibles quantités.

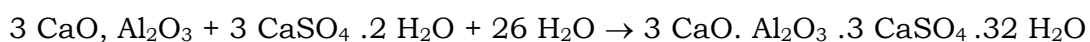
### **I.2.3.1. Réactions chimiques**

Le ciment en présence d'eau se solidifie. Les principales réactions chimiques responsables de ce phénomène sont les suivantes :



La réaction (1) est rapide ; elle est à l'origine de l'augmentation des résistances mécaniques à court terme. Le produit (3 CaO . 2SiO<sub>2</sub> . 3 H<sub>2</sub>O) est un silicate de calcium hydraté : c'est une tobermorite. La réaction (2), quant à elle est lente et est responsable de l'amélioration des propriétés mécaniques à long terme.

L'aluminate tricalcique s'hydrate très vite et nécessite l'addition d'un régulateur de prise de masse, le gypse (CaSO<sub>4</sub> . 2 H<sub>2</sub>O) qui permet la formation de fins cristaux d'ettringite (3 CaO . Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> . 3 CaSO<sub>4</sub> . 32 H<sub>2</sub>O) retardant la prise en masse du ciment. L'équation chimique de formation de l'ettringite est la suivante :



Lorsque l'on mélange une argile ou une latérite à du ciment en présence d'eau, on assiste aux mêmes réactions chimiques comme pour les mélanges argile-chaux. La portlandite produit lors de l'hydratation du ciment réagit avec le dioxyde de carbone

de l'air et les minéraux argileux pour donner respectivement de la calcite et du silicate de calcium ou aluminat de calcium hydratés. L'échange cationique et la floculation- agglomération s'observent aussi dans les mélanges argile -ciment. La réaction pouzzolanique impliquant les minéraux argileux n'est pas prépondérante compte tenu de la disponibilité de la portlandite.

#### **I.2.3.2. Réactions physiques**

Différentes réactions physiques se produisent pendant la prise du ciment. Il y a d'abord la formation d'une pâte de particules solides. A cet effet, les espaces interparticules sont interconnectés et remplis d'eau dite eau « capillaire ». Se développe ensuite à la surface des grains de ciment, un revêtement d'ettringite empêchant la prise éclair. La réaction d'hydratation du ciment continue et après deux heures, il y a formation des cristaux fibreux qui sont des silicates de calcium hydratés (CSH). Ces composés connus sous le label de tobermorite lient les composantes du mélange argile (ou latérite)-ciment. Ces cristaux se développent et contribuent de façon notable à l'amélioration des propriétés mécaniques de ces mélanges.

#### **I.2.4. Structure des silicates de calcium hydratés**

Les silicates de calcium hydratés (CSH) sont des composés issus de la réaction pouzzolanique entre les minéraux argileux et la chaux et aussi des produits majoritaires de la pâte du ciment. Ces composés sont en général sous forme de gel (forme amorphe) ou faiblement cristallisé. Cela rend leur identification difficile surtout par la diffraction des rayons X.

Les silicates de calcium hydratés peuvent présenter trois morphologies : la forme fibreuse aciculaire (type I), la forme réticulée ou en nid d'abeilles (type II) ou la forme presque sphérique et dense (type III) [59-62].

Les CSH sont des matériaux poreux qui peuvent contenir une quantité variable d'eau en équilibre chimique avec la solution aqueuse. Les CSH sont des minéraux synthétiques mais ils présentent certaines similitudes avec des minéraux naturels. Il existe dans la nature une famille de composés dont les caractéristiques

structurales sont très proches des CSH synthétiques. Ces composés naturels ont servi de modèles pour bâtir une représentation convenable de la structure des CSH : il s'agit des tobermorites [58].

Les tobermorites et les smectites ont beaucoup d'analogie structurale. Ces deux minéraux sont constitués de feuillets repartis en trois couches, deux couches tétraédriques de silicates renfermant un plan d'atomes en coordinence plus élevée. Les feuillets sont séparés par un espace interfoliaire dans lequel se logent des molécules d'eau ainsi que des ions [58].

Les tobermorites comprennent une double couche de Ca-O liée par des chaînes de silicates dans un arrangement parallèle à la direction de l'axe c [63].

Les tétraèdres dans les chaînes de silicates constituent un enchaînement à trois unités, un arrangement type « dreierketten », dans lequel deux des tétraèdres sont dirigés vers la couche polyédrique de CaO et l'autre (le tétraèdre de jonction) pointe sur la couche interfeuille. Ces couches de silicate de calcium ont une charge négative nette et sont liées par des cations de  $\text{Ca}^{+2}$  dans la région de couche interfeuille qui contient également des molécules de  $\text{H}_2\text{O}$  [57].

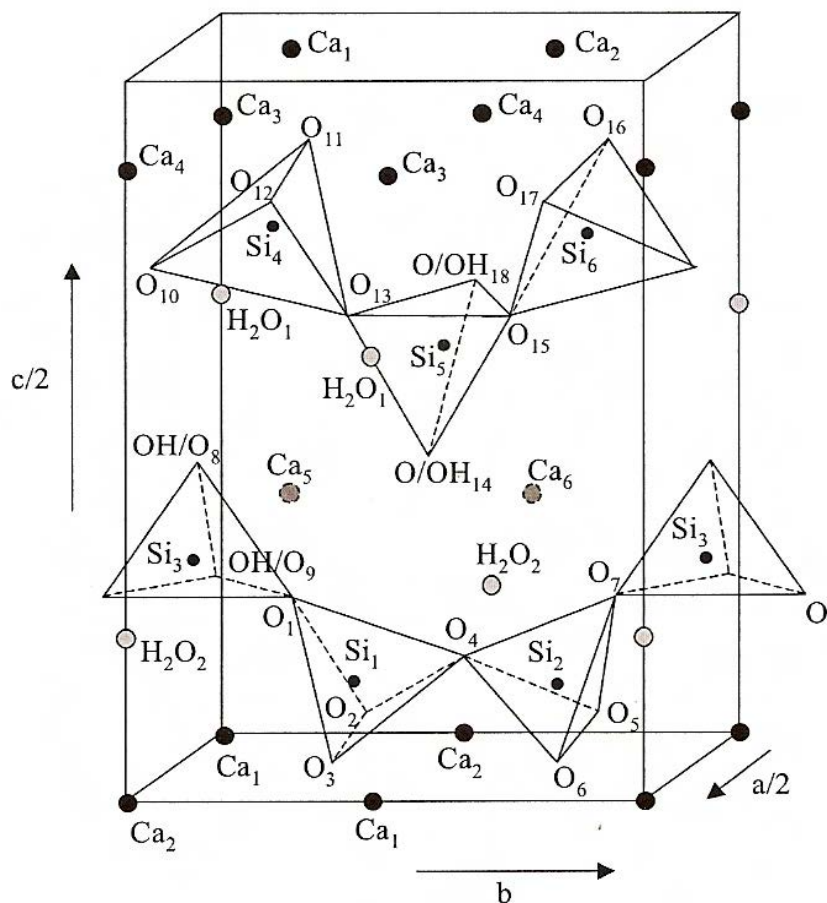
Il existe principalement trois polytypes de tobermorites caractérisés par leur degré d'hydratation et donc par la taille de leur empilement. Ces différents polytypes sont 1,4 ; 1,1 et 0,9 nm dont les noms dérivent de la distance interréticulaire (d) de la raie basale (002) selon la diffraction de Bragg [57, 63, 64]. Les tobermorites 1,26 et 1 nm ainsi que les clinotobermorites ont été aussi reportées dans la littérature [65]. La tobermorite (1,1nm) est le polytype le plus abondant dans la nature. La structure de cette tobermorite élucidée par Hamid [66], se compose de chaînes infinies de  $\text{Si}_3(\text{O}/\text{OH})_9$  disposées parallèlement à l'axe b, décalées d'une distance  $b/2$  et reliées entre elles par des atomes de calcium formant un plan (**figure I. 4**). Les atomes de calcium de ce plan, Ca(1), Ca(2), Ca(3) et Ca(4) sont coordonnés à sept atomes d'oxygène : quatre atomes d'oxygène coplanaires, deux oxygènes au dessus ou en dessous du plan, formant un dôme et le dernier oxygène au dessus ou en dessous du plan, formant une pyramide tétragonale. Dans l'interfeuille de la tobermorite peuvent être localisés d'autres atomes de calcium. La coordination octaédrique de Ca(5) et Ca(6) (lorsqu'ils sont présents) est similaire et très distordue. Chaque tétraèdre de silicium  $\text{SiO}_4^{4-}$  partage deux de ses oxygènes avec

les atomes de silicium voisins, formant ainsi une chaîne silicatée. Ils constituent un enchaînement à trois unités qualifié de « dreierketten » (**figure I. 5**).

La formule moyenne de la tobermorite naturelle est :  $\text{Ca}_{4,5}[\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_3]\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  avec  $\text{Ca}/\text{Si}=0,75$  [58].

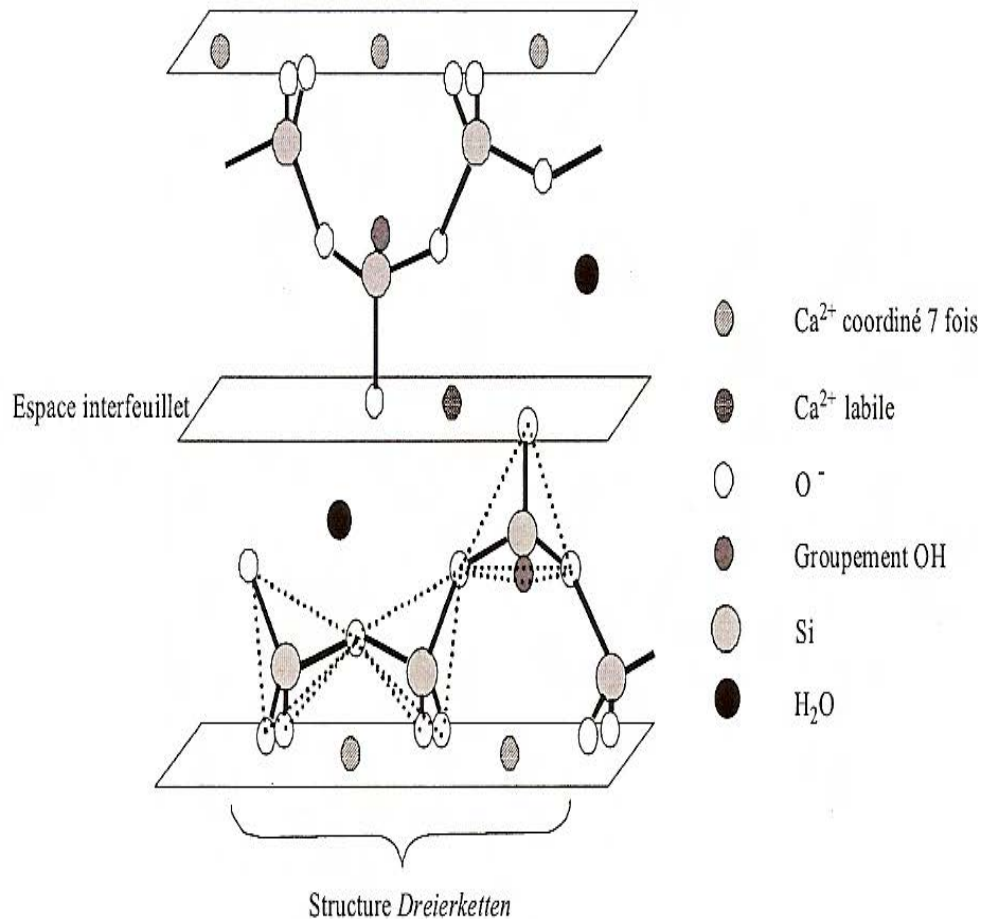
La tobermorite 1,4 nm est plus proche de la structure des CSH. Sa formule est  $\text{Ca}_5[\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2]\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ . L'interfeuillet contenant plus de molécules d'eau, le paramètre de maille  $c/2$  augmente de 1,1 à 1,4 nm.

En chauffant la tobermorite 1,4 nm à  $110^\circ\text{C}$ , il se forme la tobermorite 1,1 nm par perte des molécules d'eau excédentaires, ce processus étant réversible. Il est alors possible de définir deux sous-groupes : les tobermorites dites *normales* dont l'interfeuillet peut se rétracter encore jusqu'à 0,9 nm lorsqu'elles sont chauffées à  $300^\circ\text{C}$  (processus irréversible) et celle dites *anormales* qui ne subissent pas de rétraction au niveau de l'interfeuillet au cours du chauffage.



**Figure I. 4 : Vue tridimensionnelle de la structure de la tobermorite [66]**

Les paramètres de maille sont les suivants :  $a/2=0,558\text{nm}$ ,  $b=0,739\text{nm}$ ,  $c/2=1,1389\text{nm}$ . Les atomes de calcium grisés sont statistiquement distribués entre les mailles.



**Figure I. 5 : Représentation de la structure « dreierketten » des CSH**

### **I.2.5. Influences des liants hydrauliques (chaux et ciment) sur les propriétés géotechniques et mécaniques**

La chaux et le ciment étant tous deux des liants hydrauliques contribuent en général à l'amélioration des propriétés géotechniques et mécaniques des poudres minérales.

Pour la chaux, c'est l'hydroxyde de calcium, produit de l'hydratation de la chaux vive qui réagit avec les minéraux argileux et la silice fine ; ceci est responsable de la



modification des propriétés géotechniques et mécaniques des matériaux. Le ciment contribue à l'amélioration desdites propriétés par un mécanisme de jonction des particules du sol par les silicates de calcium hydratés produits au cours de l'hydratation du ciment d'une part, et d'autre part, par la réaction pouzzolanique entre l'hydroxyde de calcium produit et les particules argileuses du sol.

L'ampleur des effets des liants dépend surtout de la granulométrie et de la minéralogie de la matière première traitée.

### **I.2.5.1. Sur les propriétés géotechniques**

#### **I.2.5.1.1. La granulométrie**

L'ajout de la chaux ou du ciment à un sol argileux ou latéritique crée une agglomération de ses particules, contribuant à une augmentation de leurs tailles pour rejoindre celles des limons et du sable et par conséquent fait diminuer la fraction argileuse [40, 42, 67]. Ce phénomène est dû aux réactions d'échange cationique responsable de la floculation- agglomération des particules argileuses et aussi aux réactions pouzzolaniques impliquant les minéraux argileux. La diminution de la fraction argileuse pour une même quantité de chaux et de ciment est plus importante pour la chaux par rapport au ciment [42].

#### **I.2.5.1.2. La consistance du sol**

La consistance d'un sol est définie par les limites d'Atterberg et par la valeur au bleu de méthylène. La consistance d'un sol est immédiatement modifiée après l'ajout de la chaux ou du ciment. L'effet de la chaux sur les sols argileux ou latéritiques est plus ressenti sur les limites d'Atterberg que ne l'est celui du ciment [42]. Cette modification immédiate est due aux réactions d'échange cationique responsable de la floculation-agglomération des particules argileuses.

L'ajout de la chaux ou du ciment à un sol argileux s'accompagne d'une diminution de la limite de liquidité ( $w_L$ ), d'une augmentation de la limite de plasticité ( $w_p$ ) et par conséquent d'une diminution de l'indice de plasticité ( $I_p$ ) [3, 35, 36, 39, 40-42, 48, 68].

Par contre pour un sol limoneux, on observe les phénomènes contraires pour la limite de liquidité et celle de plasticité [68].

Il a été observé une augmentation des limites de liquidité et de plasticité dans le cas du traitement à la chaux des argiles saturées en calcium [69].

Ho et Handy [70] ont montré une augmentation de la limite de plasticité d'une montmorillonite avec la quantité de chaux jusqu'à une valeur optimale qu'ils qualifient de point de rétention. Pour des quantités de chaux plus élevées, ont observé une stabilisation de la limite de plasticité.

Les travaux de Default [71] concernant l'évolution des limites d'Atterberg et la valeur au bleu de méthylène avec dix jours de temps de cure sur une argile plastique du Sparnacien (IP = 54) ont montré une diminution de l'indice de plasticité jusqu'à 10 et une diminution de la limite de liquidité jusqu'à 7% de chaux. Entre 7 et 13%, ces valeurs évoluent très peu. Par contre la valeur au bleu de méthylène diminue avec l'augmentation de la quantité de chaux. Lopez *et al.* [72] aboutissent à la même conclusion en traitant une argile très plastique de Queretaro par la chaux.

Locat *et al.* [73], en traitant une argile de Louiseville par la chaux (dont le pourcentage varie de 0 à 10% en masse) pour des teneurs en eau comprises entre 122 et 650% après cent jours de cure, ont remarqué une variation des limites d'Atterberg et de la valeur au bleu de méthylène mais en sens opposé.

Les travaux de Sherwood [3] sur l'influence de la chaux sur les limites d'Atterberg dans le cas d'argile de Londres ont montré une augmentation de la limite de plasticité jusqu'à 4% de chaux. Au delà de ce taux, l'ajout de la chaux n'a aucune influence. Quant à la limite de liquidité, elle croît jusqu'à 2% de chaux et commence ensuite à décroître avec l'ajout de la chaux.

La limite de plasticité de la montmorillonite augmente avec l'ajout de la chaux jusqu'à 4% puis commence à décroître [36, 74]. Avec la kaolinite, l'indice de plasticité diminue à partir de 2% de chaux. La limite de liquidité augmente jusqu'à l'ajout de 2% de chaux pour la kaolinite. Cette dernière continue de croître jusqu'à l'ajout de 8% pour la montmorillonite.

Au regard de ces résultats de la littérature, on conclut que l'ajout de la chaux ou du ciment à un sol argileux ou latéritique fait augmenter la limite de plasticité et la valeur au bleu de méthylène. La chaux influence plus la consistance du sol que le ciment. La limite de liquidité croît ou décroît selon les cas de figure. Les variations

de la limite de plasticité sont beaucoup tributaires de la minéralogie de l'argile et du temps de cure [75].

### **I.2.5.1.3. La teneur en eau optimale et la densité sèche maximale**

L'ajout de la chaux ou du ciment à un sol argileux ou latéritique fait augmenter la teneur en eau optimale et par conséquent la densité sèche maximale diminue [3, 31, 35, 36, 39-42, 48]. L'augmentation de la teneur en eau optimale est due à la forte demande en eau après l'ajout de ces liants en vue de dissocier le  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pour produire des ions  $\text{Ca}^{2+}$  nécessaires pour les réactions d'échange cationique et pouzzolanique. La diminution de la densité sèche maximale d'un sol par l'ajout de la chaux s'explique de deux manières :

- (i) l'ajout de la chaux à un sol provoque l'agglomération des particules du sol qui occupent alors de grands volumes,
- (ii) La densité absolue de la chaux est généralement inférieure à celle des sols.

L'effet de la chaux sur ces paramètres est plus ressenti par rapport à celui du ciment [42].

### **I.2.5.2. Sur les propriétés mécaniques**

L'ajout de la chaux ou du ciment à un sol argileux ou latéritique améliore les performances mécaniques dont principalement la portance CBR, les résistances à la compression, à la flexion et à la traction par fendage (Essai Brésilien) de ce sol [3, 13, 20, 30, 35, 36, 39-42, 77-80]. L'amélioration de ces propriétés mécaniques est due aux réactions d'hydratation du ciment produisant des CSH qui lient les particules du sol entre elles d'une part, et, d'autre part, par les réactions pouzzolaniques entre les minéraux argileux et le  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Ces paramètres s'améliorent avec le temps compte tenu de la consolidation du CSH avec le temps. La portance CBR à trois jours de cure à l'air puis quatre jours d'immersion est en général supérieure à celle après quatre jours d'immersion directe [29, 31].

## Références bibliographiques

- [1] Caillère S, Henin S. Minéralogie des argiles. Edition Masson et Cie 1985 ; Chap. 1 :15-26.
- [2] Voinovitch IA, Debbras-Guenon J, Louvrier J. Analyse minéralogique des sols argileux. Edition Eyrolles 61, boulevard St Germain Paris VI 1971, 79p.
- [3] Khattab SAA. Etude multi – échelles d’un sol argileux plastique traité à la chaux. Thèse de Doctorat de l’Université d’Orléans (France), 2002, 250p.
- [4] Bailey SW. Structures of layer silicates. In: Brindley G.W. et Brown G (eds.): Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Mineral soc. London 1980; 5: 1-123.
- [5] Brindley GW, Brown G. Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Mineralogical society, 41 Queen’s Gate, London SAW 75 HR 1980.
- [6] Moore DM, Reynold RC. X-ray Diffraction and the identification and Analysis of Clay Minerals. Univ. Press, Oxford 1989 ; 322p.
- [7] Caillère S, Henri S, Rautureau M. Minéralogie des argiles Tome 2 : classification et nomenclature 1982, 189p.
- [8] Lanson B, Bouchet A. Identification des minéraux argileux par diffraction des rayons X : apport du traitement numérique. Bull. Centres Rech. Explor. Prod. Elf aquitaine 1995 ; Vol N°1, pp 91-118.
- [9] Holtzapffel T. Les minéraux argileux. Préparation, Analyse diffractométrique et détermination 1985, 136p.
- [10] Alipandi G. Matériaux réfractaires et céramiques techniques. Tome 1. Eléments de céramurgie et de technologie. Editions Septina 1996.
- [11] Evan MM. Some note on the recording and interpretation of X-ray diagrams of soils clays. Journ Soil Science 1949: 90-103.
- [12] Traoré K. Frittage à basse température d’une argile kaolinitique du Burkina Faso. Transformations thermiques et réorganisation structurale, Thèse de doctorat de l’Université de Limoges, 2003, 190p.
- [13] Moore RK. Lime stabilization: reactions, properties, design and construction. State of the Art Report. N°5. Transportation Research Board National Research Council, Washington, DC. 1987, 58p.
- [14] Thompson M R. Lime reactivity of Illinois soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division (ASCE) 1966; vol.92 (No SM5): 67-92.
- [15] NF 01. Association française de normalisation. Ed Blocs de terre comprimée pour murs et cloison, NF XP P 13-901. Paris AFNOR. 2001.
- [16] NF P94-051. Détermination des limites d’Atterberg. AFNOR, Mars 1993, 15p.

- [17] Konta J. Clay and man: Clay raw materials in the service of man. *Appl Clay Sci* 1995; 10: 275-335.
- [18] Velde B. Origin and mineralogy of clays. *Clays and the environment*. Springer 1995.
- [19] Morel R. *Les sols cultivés*. Lavoisier, Paris 1996.
- [20] Autret P. Latérites et graveleux latéritiques. *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* 1983, 38p.
- [21] Tardy Y. *Pétrologie des latérites et sols tropicaux*. Masson 1992, 459p.
- [22] Dibara M. Synthèse bibliographique sur les phénomènes latéritiques. Rapport de D.E.A., option géochimie appliquée, Université d'Orléans 1978, 56p.
- [23] Lyon Associates. *Laterite and lateritic soils, an engineering study for A.I.D., Inc. BRRI Ghana*, 1971.
- [24] Lacroix A. *Les latérites de Guinée française et les produits d'altération qui leur sont associés*, *Nouvelles archives du Museum d'Histoire Naturelle*, 1913.
- [25] Martin JF, Dyne J C. *Laterite and lateritic soils in Sierra Leone*. *Journal of agricultural science* 1927.
- [26] Harrassowitz H. *Laterite*. *Forsch Geol Paleont*, 1926.
- [27] Dreyfus. *Les latérites, généralités, leur utilisation en technique routière*. RGRA 1952 ; n° 245.
- [28] Fall M. *Identification et caractérisation mécanique de graveleux latéritiques du Sénégal : Application au domaine routier*. Thèse de l'I.N.P.L. 1993 , 179p.
- [29] Bagarre E. *Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière*. *ISTED* 1990, 143p.
- [30] *Guide pratique du dimensionnement des routes pour les pays tropicaux*. CEBTP, 1984, 157p.
- [31] Messou M. *Comportement mécanique d'une couche de base en graveleux latéritiques améliorés au ciment : cas des routes en Côte d'Ivoire*. Thèse de Doct-Ing en Génie Civil à l' Ecole Nationale des Ponts et Chaussées Paris 1980 ; 197p.
- [32] Tockol I, Massiera M, Chiasson P A, Maiga M. S. *Les graveleux latéritiques dans les pays du Sahel: Cas des routes non revêtues*. 7<sup>ème</sup> Congrès International de AIGI, 1994 ; 3423-3431.
- [33] Mahalingar-Iyer U, Williams DJ. *Properties and performance of lateritic soil in road pavements*. *Eng Geol* 1997; 46: 71-80.
- [34] Lompo P. *Les matériaux utilisés en construction routière en Haute Volta. Un matériau non traditionnel « Le lithostab »* IV<sup>ème</sup> Conférence routière africaine, 20-25- Janvier 1980- Nairobi, Kenya, 42p.

- [35] Akoto BKA, Singh G. Some geotechnical properties of a lime-stabilized laterite containing a high proportion of aluminium oxide. *Eng Geol* 1981; 34: 185-199.
- [36] Bell FG. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Eng Geol* 1996; 42: 223-237.
- [37] P'Kla A. Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (BTC) : application aux maçonneries : BTC- mortier de terre, Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (France), 2002, 229p.
- [38] Walker PJ. Strength, Durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks. *Cem Concr Comp* 1995; 17: 301-310.
- [39] Attoh-Okine B. Stabilization effect of locally produced lime on selected lateritic soils. *Construc Build Mater* 1990; 4(2): 86-91.
- [40] Osula DOA. Lime modification of problem laterite. *Eng Geol* 1991; .30: 141-154.
- [41] Attoh-Okine.NO. Lime treatment of laterite soils and gravels- revisited. *Construc Build Mater* 1995; Vol.9(n°5): 283-287.
- [42] Osula DOA. A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite. *Eng Geol* 1996; 42: 71-81.
- [43] Grim RE. *Clay mineralogy*. McGraw-Hill, New York, N.Y 1953.
- [44] Raymond K, Moore G, Brown C. Development of soil stabilization guidelines for Alabama soils. Report HPR N°84, Project N°930-077, 1977.
- [45] Ronald L, Epps JA, Barenberg EJ, Mitchell JK, Thompson MR. *Soil stabilization in pavement structures- a user's manual*. Fedral Highway Administration, Det. Of Transportation, USA, DOT-FH-11-9406, 1979.
- [46] Paige-Green P. A laboratory investigation in the influence of carbonation on strength of lime-stabilized materials. *Proc. Of the 8<sup>th</sup> Regional Conf. for Africa on Soil Mech and Found Enging*. Harare, 1984.
- [47] Eades JL. Reactions of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  with clay minerals in soil stabilization. Ph. D Thesis, Geology Department, University of Illilois, Urbana, 1962.
- [48] Diamond S, White JL, Dolch WL. Transformation of clay minerals by calcium hydroxide attack. *Proc 12<sup>th</sup> National Conference on clay and clay minerals*. Pergamon Press, New York, N.Y, 1964, p. 359-379.
- [49] Stocker PT. Diffusion and diffuse cementation in lime and cement stabilized clayey soils. Special Report 8. Australian Road Research Board, Victoria, Australia, 1972.
- [50] Diamond S, Kinter EB. Absorption of calcium hydroxide by montorillonite and kaolinite. *Journal of Colloid and interface Science* 1966; Vol. 22 (N° 3): 240-249.

- [51] Ormsby WC, Bolz LH. Microtexture and composition of reaction products in the system kaolin-lime-water. *J Am Ceram Soc* 1966; Vol. 49(N°7): 364-366.
- [52] Ford CM, Moore RK, Hajek BF. Reactions products of lime-treated South eastern soils. "In transportation Research Record 839. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1982, p. 38-40.
- [53] Moh ZC. Reactions of soil minerals with cement and chemicals. In Highway Research Record 86, HRB, National Research Council, Washington, D.C., 1965, p.39-61.
- [54] Sloane RL. Early reaction determination in two hydroxide-kaolinite system by electron microscopy and diffraction. In *Clays and Clay Minerals, Proceedings of the 13<sup>th</sup> Conference*, Pergamon Press, New York, N.Y., 1965, p.331-339.
- [55] Ruff CG, Ho C. Time-temperature-strength-reaction product relationships in lime-bentonite-water mixtures. In Highway Research Record 139, HRB, National Research Council, Washington, DC 1966, p 42-60.
- [56] Wang WH, Handy RL. Role of MgO in soil-lime stabilization. In special Report 90 : Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete, HRB, National Research Council, Washington, DC, 1966.
- [57] Yu P, Kirkpatrick RJ, Poe B, McMillan PF, Cong X. Structure of calcium silicate hydrate (C-S-H): near-, mid-, and far-infrared spectroscopy. *J Am Ceram Soc* 1999; 82(3): 742-748.
- [58] Vialisse-Terrisse H. Interaction des Silicates de Calcium Hydratés, principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins. Analogie avec les argiles. Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, UFR des Sciences et Techniques, France, 2000, 256p.
- [59] Diamond S. The microstructures of cement paste in concrete. In: *Proceedings of the VIII Congress on cement chemistry*, Rio de Janeiro, Brazil, 1986, p.122-47.
- [60] Taylor HFW. *Cement chemistry*. 2<sup>nd</sup> Ed. London: Academic Press, 1992.
- [61] Malhotra VM, Mehta PK. In : *Pozzolanic and cimentitious materials. Advances in concrete technology*, Vol.1. Ottawa, Canada : Overseas Publishers Association, 1996.
- [62] Gleize PJP, Müller A, Roman HR. Microstructural investigation of a silica fume-cement-lime mortar. *Cem Concr Comp* 2003; 25: 171-175.
- [63] Coleman NJ. Synthesis, structure and ion exchange properties of 11Å tobermorites from newsprint recycling residue. *Mater Research Bull* 2005 ; 40 : 2000-2013.

- [64] Viehland D, Yuan L J, Xu Z. Structural Studies of Jennite and 1.4 nm Tobermorite : Disordered Layering along the [100] of Jennite. *J Am Ceram Soc* 1997; 80 [18]: 3021-28.
- [65] Merlino S, Bonaccorsi E, Armbruster T. Tobermorites: Their real structure and order-disorder (OD) character. *Am Mineralogist* 1999; Vol84: 1613-1621.
- [66] Hamid S. The Crystal Structure of the 11Å Natural Tobermorite  $\text{Ca}_{2.25}[\text{Si}_3(\text{OH})_{1.5}] \cdot \text{H}_2\text{O}$ . *Z Kristallogr* 1981; 154: 189-98.
- [67] Narasimha Rao S, Rajasekaran G. Reaction products formed in lime-stabilized marine clays. *J Geotech Eng May* 1996: 329-336.
- [68] Brandle H. Alteration of soil parameters by stabilization with lime. *Comptes rendus du X<sup>ème</sup> congrès international de mécanique des sols et des travaux de foundations*. Vol.3, Stockholm, 15-19 juin 1981.
- [69] Diamond S, Kinter E B. Mechanism of soil-lime stabilization. *Highway Research Record*, N°92, 1965.
- [70] Ho C, Handy RL. Characteristics of lime retention by montmorillonitic clays, *Highway Research Record* N° 29, 55-69, 1963.
- [71] Delfaut A. Traitement à la chaux vive et au ciment des argiles plastiques du Sparnacienne de la région parisienne. Etude de laboratoire, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* -169, Sept-Oct 1990.
- [72] Lopez-Lara T, Zepeda-Carrido J A, Castario V M. A comparative study of the effectiveness of different additives on the expansion behavior of clay. *Electronic J. Geotech. Eng* 1999; Vol. 4.
- [73] Locat J, Tremblay H, Leroueil S. Mechanical and hydraulic behavior of a soft inorganic clay treated with lime. *Can Geotech J* 1996; 33: 654-669.
- [74] Bell FG. An assessment of cement PFA and lime PFA used to stabilized clay-size materials. *Bulletin of the Association of Engineering Geology* 1994; N° 49: 25-32.
- [75] San L H. Stabilization of Macau clay with lime, M.Sc. these, Faculty of Science and Technology, University of Macau, Macau, 2000.
- [76] Arabi M , Wild S. Microstructural development in cured soil-lime composites. *J Mater Sci* 1986; 21: 497-503.
- [77] Wild S, Arabi M, Leng Ward G. Soil-lime reaction and microstructural development at elevated temperatures. *Clay Miner* 1986; 21: 279-292.
- [78] Bahar R, Benazzoug M, Kenai S. Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cem Concr Compos* 2004; 26: 811-820.



[79] Kolas S, Kasselouri-Rigopoulou V, Karahalios A. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. *Cem Concr Compos* 2005; 27: 301-313.

[80] Basha EA, Hashim R, Mahmud HB, Muntohar AS. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construc Build Mater* 2005; 19: 448-453.

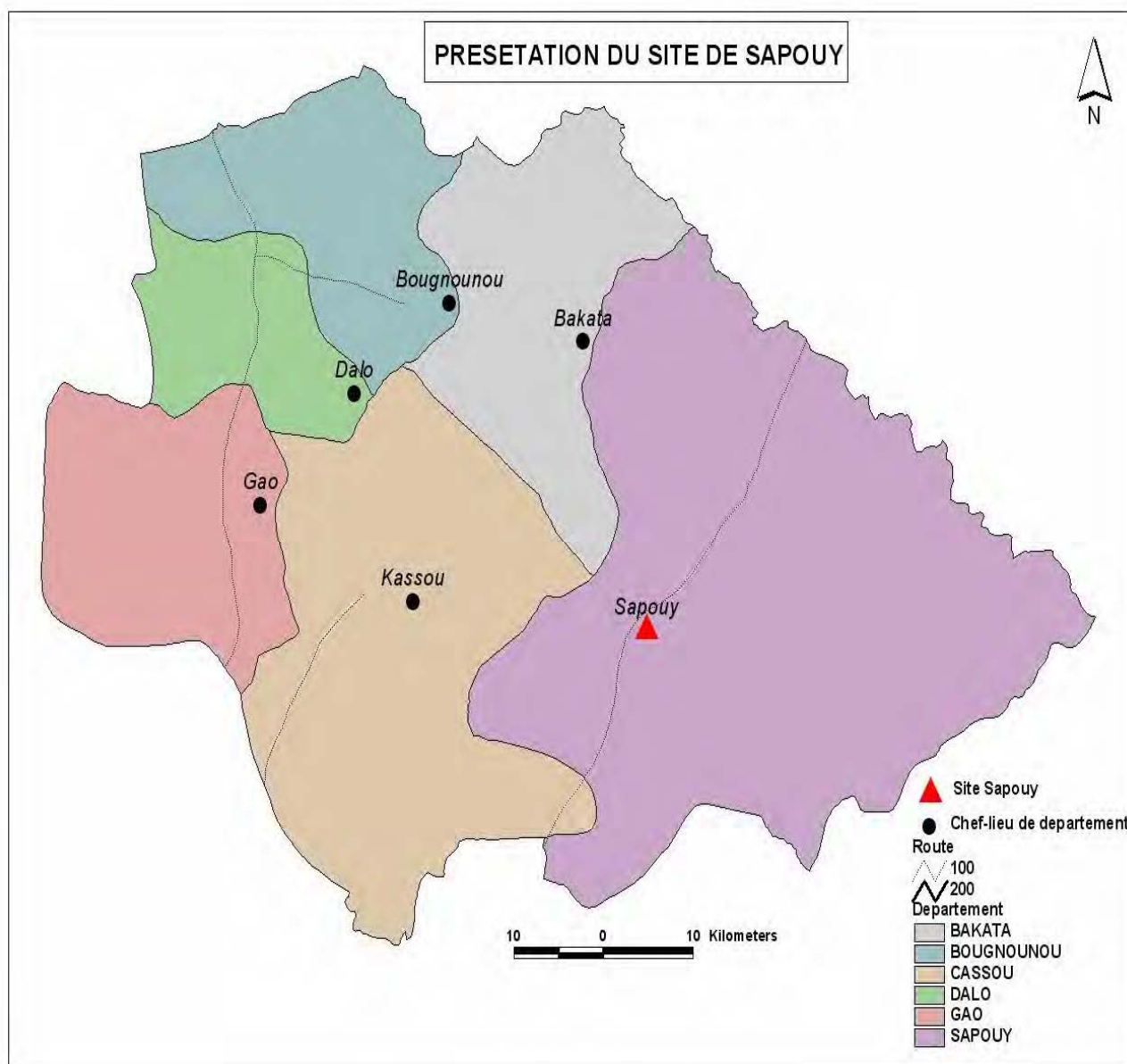
## **Chapitre II**

# **Matières premières, techniques et procédures expérimentales**

## **II.1. Matières premières**

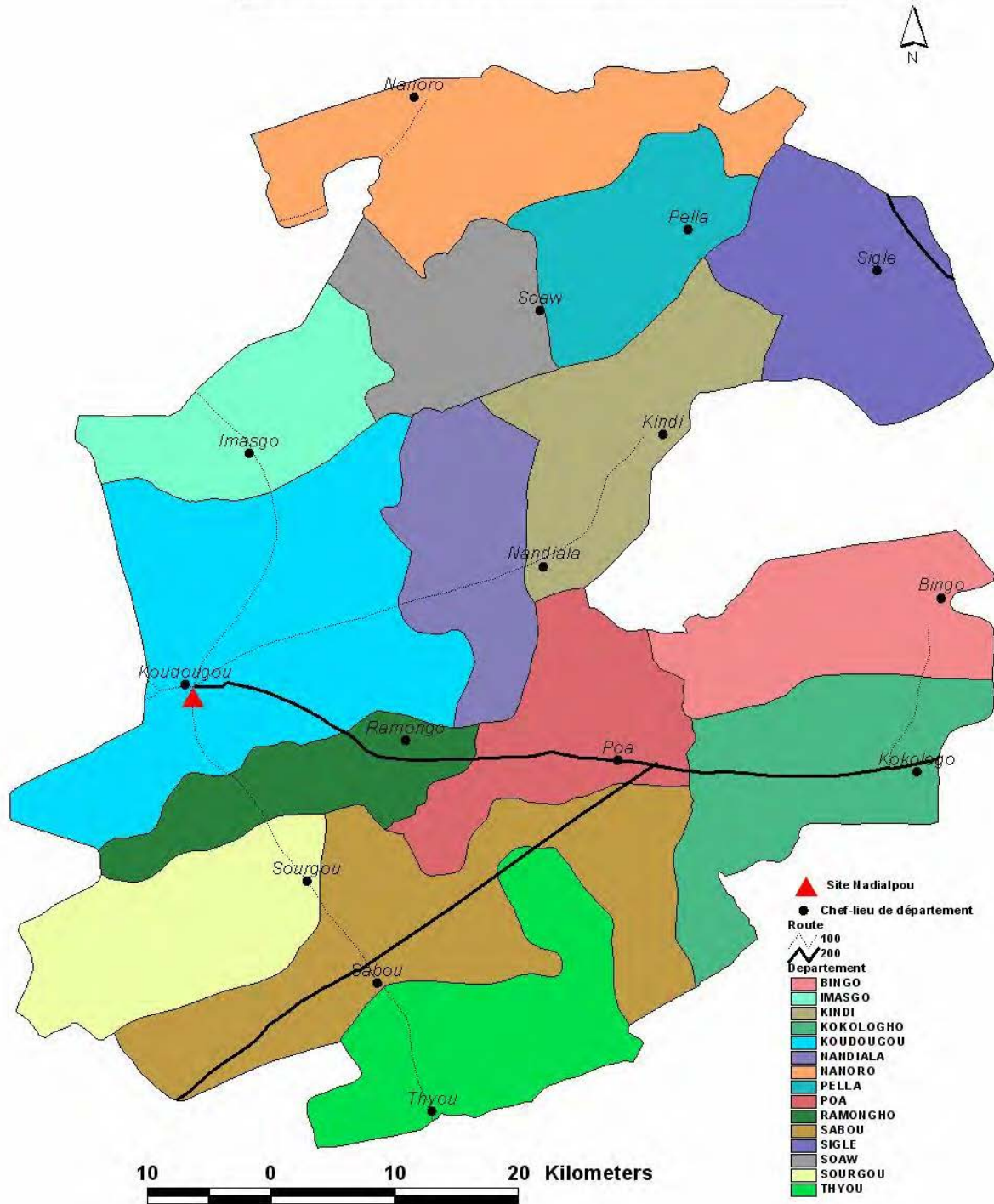
### **II.1.1. Descriptions, origines et échantillonnages.**

Deux matières premières font l'objet de cette étude. L'une est un graveleux latéritique prélevé à Sapouy (localité située au Sud du Burkina Faso) aux coordonnées géographiques 2° 12 ' 00 " ouest et 11° 31 ' 05 " Nord. L'autre est une terre argileuse prélevée à Nadialpou, un petit village situé au Centre- Ouest du Burkina Faso et plus précisément à l'ouest de Koudougou aux coordonnées géographiques 2° 22' Ouest et 12° 15' Nord. Les **figures II.1 (a, b)** montrent les emplacements de ces sites de prélèvement. L'échantillon de Sapouy de couleur brune (Code Munshell 7,5YR5/3) provient d'un emprunt destiné à la couche de base dans le bitumage de l'axe routier Sapouy -Léo- Frontière du Ghana. L'échantillon de Nadialpou de couleur brun clair (Code Munshell 7,5YR6/3) est prélevé dans une ancienne carrière utilisée par les populations locales pour la confection de briques crues et par une unité semi-industrielle pour la production de briques cuites.



**Figure II.1a : Site de Sapouy**

# PRESENTATION DU SITE DE NADIALPOU



**Figure II. 1b : Site de Nadialpou**

## II.1.2. Géologie des sites de prélèvement

Le site de Sapouy se trouvant dans le degré carré de Pô, comporte essentiellement des terrains paléoprotérozoïques appartenant au socle birimien [1].

Le paléoprotérozoïque comporte des ceintures volcano-sédimentaires et plutoniques métamorphisées à l'Eburnéen et des formations plutoniques (tonalites et granites) intrusives dans les ceintures.

Les terrains volcano-sédimentaires et plutoniques forment des zones allongées intercalées avec les granitoïdes. Ils comportent des corps volcaniques, volcano-sédimentaires et plutoniques : métavolcanites et schistes basiques, schistes et quartzites, ainsi que des corps gabbroïques et dioritiques. Des leptynites et granodiorites ainsi que des amphibolites affleurent aussi formant également des bandes allongées.

Les formations plutoniques sont surtout représentées par des granodiorites, tonalites et diorites quartzifères. Ces formations sont recoupées par des massifs plutoniques plus circonscrits tels que des granites hétérogènes, des granites fins à tendance porphyroïde datés à  $2136 \pm 9$  millions d'années, des granites porphyroïdes et des granites à amphibole et biotite datés à  $2110 \pm 8$  millions d'années, des granites et granodiorites datés à  $2100 \pm 8$  millions d'années, des granites à amphibole et biotite et des granites de grain fin. Viennent ensuite des granites leucocrates à biotite et parfois à grenat et des filons de pegmatite et de quartz.

Les phénomènes magmatiques tardifs sont marqués par la mise en place de dykes de dolérite.

Une latérisation poussée affecte l'ensemble des terrains magmatiques et sédimentaires.

Le site de Nadialpou est dans le degré carré de Koudougou. Il comporte les formations géologiques suivantes :

(a) Les métras sédiments, le méta volcanites, les ultrabasites et les formations plutoniques basiques comme le gabbro. Ces formations représentent environ 30% de la superficie du degré carré de Koudougou. Ce sont des formations précoces d'environ 2 milliards 200 millions d'années.

(b) Les formations plutoniques acides qui comprennent :

-les granodiorites, les tonalites (diorites quartzites) qui occupent 5% de la superficie du degré carré. Leur âge est d'environ 2 milliards 100 millions d'années.

- les granites qui représentent environ 65% de la superficie du degré carré. Leur âge est d'environ 2 milliards d'années. Les granites de dernière génération se rencontrent à 20 km au sud de Koudougou [2].

## **II.2. Techniques et procédures expérimentales**

### **II.2.1. Caractéristiques physiques et physico-chimiques**

#### **II.2.1.1. La perte au feu**

Une matière première dépourvue d'humidité ayant subi une cuisson à 1000°C accuse une perte de masse. La perte au feu s'explique essentiellement par :

- la déshydratation et/ou la déshydroxylation des hydroxydes, oxyhydroxydes de fer et d'aluminium, des minéraux argileux avec perte d'eau d'hydratation et/ou de constitution ;
- la décomposition des carbonates et des matières organiques.

La perte au feu (PF) a été évaluée par la relation :

$$PF = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \text{ où :}$$

$m_1$  : masse de la matière première étuvée à 105°C

$m_2$  : masse de la matière première portée à 1000°C dans un four après étuvage à 105°C.

#### **II.2.1.2. La densité**

La densité est un paramètre physique qui permet d'apprécier la composition minéralogique d'une matière première à partir des densités données dans la littérature pour des minéraux. Elle donne une indication sur l'espèce minérale prédominante dans une matière première. Elle est le rapport entre la masse de l'échantillon sur la masse du même volume de solvant utilisé. La densité a été évaluée à l'aide d'un pycnomètre borosilicaté en utilisant la relation :

$$d = \frac{m_3 - m_1}{m_2 + m_3 - (m_1 + m_4)} \text{ où :}$$

- $m_1$  : masse du pycnomètre vide,
- $m_2$  : masse du pycnomètre rempli d'eau distillée jusqu'au trait de jauge,
- $m_3$  : masse du pycnomètre et d'une quantité de matière première,
- $m_4$  : masse du pycnomètre avec la même quantité de matière première et rempli avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.

### II.2.1.3. L'absorption d'eau (C)

Lorsqu'on immerge une éprouvette de brique dans de l'eau, sa masse augmente.

On dit que l'éprouvette a absorbé de l'eau. Cette augmentation de masse est due à la pénétration de l'eau dans l'éprouvette à travers les pores. L'absorption d'eau représentée par le coefficient C caractérise la porosité ouverte d'un matériau.

Il existe deux types de porosités :

- la porosité fermée dans le cas où les pores ne communiquent pas avec l'extérieur,
- la porosité ouverte dans le cas où les pores communiquent avec l'extérieur.

Pour des éprouvettes de briques, la porosité ouverte est la plus préoccupante car elle est à l'origine de nombreux inconvénients dont principalement la perméabilité et les baisses des résistances mécaniques des briques.

La somme des deux porosités constitue la porosité totale [3].

L'essai pour la détermination du coefficient C d'absorption d'eau a été réalisé sur des éprouvettes prismatiques (4 cm x 4 cm x 16 cm) à une température de 20°C. Les masses des éprouvettes ont été déterminées après leur séchage dans une étuve réglée à 110°C jusqu'à masse constante. Les éprouvettes ont été immergées suivant leur plus grande face à enduire de sorte que celle-ci soit 5 mm au-dessous du niveau de l'eau. L'immersion a été réalisée en posant les éprouvettes sur des cales installées dans le fond d'un bac. Elles ont été retirées de l'eau au bout de 10 mn, essuyées avec un linge humide. Elles ont ensuite été pesées afin de déterminer la masse d'eau absorbée.



Le coefficient C d'absorption d'eau de chaque éprouvette est conventionnellement exprimé par la formule conventionnelle :

$$C = \frac{100M}{s\sqrt{t}}$$

dans laquelle :

m = masse d'eau en grammes, absorbée par l'éprouvette depuis le début de l'immersion,

s = produit de la longueur par la largeur de la face immergée, exprimé en centimètres carrés,

t = temps, en minutes, écoulé depuis le début de l'immersion [4].

Dans les conditions de l'essai (t=10 mn), le coefficient d'absorption d'eau est donné

par la formule :  $C = 31,6 \frac{M}{S}$

## **II.2.2. Caractéristiques géotechniques**

### **II.2.2.1. Analyse granulométrique**

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions de grains de différentes tailles d'un matériau. Elle s'effectue :

- par tamisage (tamis à maille carrée) pour des grains de diamètre supérieur à 80  $\mu\text{m}$ ,
- par sédimentométrie pour les grains les plus fins. Elle consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau. Plus les grains sont fins, plus la vitesse de décantation est lente. (loi de Stokes). La mesure de la densité de la suspension à des intervalles de temps variables permet de calculer la proportion de grains de chaque diamètre.

Les analyses granulométriques par tamisage et par sédimentométrie ont été réalisées selon respectivement les normes NF P18-560 [5] et NF P94-057 [6].

### **II.2.2.2. Les limites d'Atterberg**

Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui marquent les seuils entre :

- le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique : limite de liquidité ( $W_l$ ),
- le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide : limite de plasticité ( $W_p$ ).

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considérée, exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute. La différence  $I_p = W_l - W_p$  qui définit l'étendue du domaine plastique, est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité [7]. L'indice de plasticité permet d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon.

La détermination des limites d'Atterberg a été réalisée selon la norme NF P 94-051 [8].

### **II.2.2.3. L'essai au bleu de méthylène**

Il permet de mesurer la capacité d'adsorption ionique des sols et granulats à l'aide du bleu de méthylène. Il a pour but de déterminer la quantité et l'activité de la fraction argileuse d'un sol d'une façon globale. Le résultat de l'essai dépend directement à la fois de la quantité et de la nature minéralogique de cette fraction [9]. Le principe de l'essai consiste à introduire des quantités croissantes de bleu de méthylène jusqu'à ce que les particules argileuses en soient saturées. Il apparaît alors un début d'excès qui marque la fin de l'essai et que l'on détecte par le test dit à la tâche. Ce test consiste à former avec une goutte de la suspension déposée sur du papier filtre normalisé, une tâche qui est un dépôt de sol coloré en bleu soutenu, entourée d'une zone humide incolore. L'excès de bleu se traduit par l'apparition dans cette dernière zone d'une auréole bleu clair. On dira alors que le test est positif [10]. L'essai a été réalisé selon la norme NF P 94-068 [11].

#### **II.2.2.4. L'essai Proctor**

L'essai Proctor a pour objectif la détermination de la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale pour un compactage normalisé d'intensité donnée. Il consiste à compacter de façon identique des échantillons d'un même sol avec des teneurs en eau différentes. On constate que la densité sèche  $\gamma_d$  varie et passe par un maximum pour une teneur en eau déterminée dite optimale ( $W_{OP}$ ) [12].

Il existe deux types d'essais Proctor. Selon l'intensité de compactage utilisé, l'essai sera appelé essai Proctor normal ou essai Proctor modifié.

L'essai choisi pour notre étude est l'essai Proctor modifié car il est recommandé pour la construction routière. L'essai a été réalisé selon la norme NF P 94-093 [13].

#### **II.2.2.5. L'essai de portance California Bearing Ratio (CBR)**

Pour les différents éléments du corps d'une chaussée, on exige des performances qui sont fonction d'un essai type normalisé, l'essai CBR. Cet essai est un paramètre incontournable pour le dimensionnement mécanique des chaussées.

L'indice CBR est une grandeur utilisée pour caractériser un sol, en tant que support ou constituant d'une structure de chaussée.

Le principe général de l'essai servant à déterminer l'indice de portance CBR, consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique de 19,35 cm<sup>2</sup> de section pour le faire pénétrer à la vitesse de 1,27 mm/mn dans une éprouvette de sol. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué les enfoncements de 2,5 et 5 mm sont alors rapportées, aux valeurs de 13,35 et 20 kN, qui sont respectivement les forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements.

$$CBR_1 = \frac{F_1}{13,35} \times 100 \quad \text{et} \quad CBR_2 = \frac{F_2}{20} \times 100 \quad \text{où :}$$

$F_1$  et  $F_2$  correspondent aux forces mesurées pendant l'essai, elles sont exprimées en kN.

L'indice portant CBR est alors défini conventionnellement par la plus grande valeur, des rapports ainsi calculés. L'essai a été réalisé selon la norme NF P 94-093 [14].

## II.2.3. Caractéristiques mécaniques

### II.2.3.1. La résistance à la compression simple

L'éprouvette est soumise à une charge monotonement croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette :

$$R_c = \frac{10F}{S} \quad \text{où :}$$

$R_c$  : résistance à la compression de l'éprouvette en MPa.

$F$  : charge maximale supportée par l'éprouvette en kN.

$S$  : valeur moyenne de la section en  $\text{cm}^2$

L'essai a été réalisé suivant la norme NF P18-406 [15].

### II.2.3.2. Résistance à la flexion « 3 points »

L'éprouvette utilisée dans l'essai de flexion est une éprouvette prismatique 4 cm x 4 cm x 16 cm. La rupture est effectuée sous charge concentrée à l'aide d'une machine munie d'un dispositif à trois rouleaux.

Le dispositif de flexion comporte deux appuis à rouleau de 10 mm de diamètre, distants de 106,7mm, sur lesquels repose l'éprouvette prismatique suivant une face latérale de moulage, et un troisième rouleau de même diamètre, équidistant des premiers, et transmettant la charge  $F$ .

Le dispositif à rouleaux est utilisé sur une machine d'essai permettant d'exercer et de mesurer de faibles charges (<1000 daN) avec une précision de 1% dans les 4 / 5 supérieurs de l'échelle de mesure. La charge  $F$  doit croître progressivement de 5 daN /s  $\pm$  1daN/s.

La contrainte de rupture par flexion est donnée par la relation :  $R = \frac{6M}{b^3}$  dans

laquelle  $M$  est le moment de flexion,  $b$  l'arête de la section carrée du prisme. Dans le test de flexion 3 points,  $M$  vaut  $\frac{FL}{4}$  avec  $F$  la charge de rupture et  $L$  la distance

entre les appuis. En remplaçant M par son expression alors  $R = \frac{3 FL}{2 b^3}$ . Pour notre cas d'étude où L=10,67cm et b=4cm, R=0,250F.

La contrainte R est exprimée en bars si F est exprimée en daN [16].

### **II.2.3.3. La résistance à la traction par fendage (Essai Brésilien)**

Cette résistance est évaluée généralement sur les éprouvettes cylindriques.

Dans cet essai, on applique à l'éprouvette un effort de compression le long de deux génératrices opposées. Cet effort de compression induit des contraintes de traction dans le plan passant par ces deux génératrices. La rupture, due à ces contraintes de traction, se produit dans ce plan. L'éprouvette est placée entre les deux plateaux de la presse, le contact entre les plateaux et l'éprouvette se faisant par l'intermédiaire des deux bandes de contre plaqué. L'essai a été réalisé selon la norme NF P 18-408 [17]. La vitesse de chargement a été de 0,05 MPa/seconde. La

contrainte à la rupture est donnée par la relation :  $f_t = \frac{20F}{\pi ah} = 6,37 \frac{F}{ah}$  avec :

- $f_t$  : contrainte à la rupture en (MPa)
- F : charge appliquée en (kN)
- a : diamètre de l'éprouvette en (cm)
- h : hauteur de l'éprouvette en (cm).

### **II.2.4. La composition minéralogique**

#### **II.2.4.1. La diffraction des rayons X (D.R.X.)**

La diffraction des rayons X est l'une des techniques couramment utilisées pour l'identification des espèces minérales cristallisées d'une matière première.

Tout corps cristallisé peut être analysé par diffraction des rayons X car ses atomes sont arrangés selon des plans cristallins spécifiques.

Un faisceau de rayons X est diffracté sur un réseau de plans cristallins selon la loi de Bragg :

$2d \sin\theta = n\lambda$  où :

- n : l'ordre de la diffraction,

- $\lambda$  : longueur d'onde de la source émettrice,
- $d$  : espacement entre deux plans parallèles successifs du réseau cristallin [18].

Pour une source émettrice de Rayons X donnée ( $\lambda$ ), le balayage selon un angle d'incidence  $\theta$  d'une préparation représentative d'un échantillon, permet d'accéder à la connaissance de tous les espacements réticulaires ( $d$ ) de cet échantillon [19]. Pour l'analyse diffractométrique aux rayons X, des échantillons ont été broyés dans un mortier en agate jusqu'à une granulométrie  $< 80 \mu\text{m}$  puis séchés à l'air pendant une semaine. Les dépouillements des diffractogrammes ont été réalisés à l'aide des fiches A.S.T.M.

#### **II.2.4.2. L'analyse thermique différentielle (A.T.D.)**

L'analyse thermique différentielle permet de mettre en évidence la quantité de chaleur dégagée (réactions exothermiques) ou absorbée (réactions endothermiques) lors des différentes transformations chimiques et minéralogiques pouvant se produire au cours de la cuisson (frittage) d'un échantillon.

En A.T.D, on enregistre la différence de température ( $DT$ ) entre l'échantillon étudié et une substance (référence : alumine calcinée) qui ne manifeste aucun accident thermique dans la zone de température explorée. Tout comme la D.R.X., l'A.T.D. constitue aussi un moyen privilégié d'identification qualitative des constituants d'un échantillon.

D'une manière générale, aux réactions endothermiques ( $DT < 0$ ) correspondent successivement le départ de l'eau absorbée, de l'eau interfoliaire et de l'eau de cristallisation [19].

Aux réactions exothermiques ( $DT > 0$ ) correspond la formation de nouveaux minéraux (néocristallisation) comme par exemple celle de la phase spinelle à partir du métakaolin à  $980^\circ\text{C}$  [19]. Pour l'analyse des échantillons, ceux-ci ont été ramenés par broyage dans un mortier en agate à une granulométrie  $< 80 \mu\text{m}$ .

#### **II.2.4.3. L'analyse thermogravimétrique**

L'analyse thermogravimétrique détermine les pertes de masse que subit un échantillon au cours du chauffage. Ces pertes de masse sont mesurées en fonction

d'une élévation graduelle de la température de chauffe à l'aide d'une thermobalance. Les pertes de masse sont consécutives au départ d'eau zéolitique, à la décomposition des carbonates et hydrates et aux changements d'état des minéraux [20].

Les pertes en masse en fonction de la température permettent d'obtenir la courbe d'analyse thermogravimétrique primitive pour mieux apprécier les températures de début et de fin de perte de masse. Cette courbe permet aussi de mieux différencier les pertes de masse consécutives à des phénomènes qui se produisent à des températures bien déterminées et pour pouvoir comparer les thermogrammes obtenus à ceux de l'analyse thermique différentielle.

#### **II.2.4.4. La spectroscopie infrarouge**

La spectroscopie infrarouge est une méthode d'identification des espèces minérales d'un échantillon à partir des fréquences de vibration des principales liaisons de ces espèces minérales.

Les liaisons formées à partir d'atomes ou de groupements d'atomes ont des fréquences de vibration qui leur sont propres. Quand elles sont éclairées par des rayonnements électromagnétiques dont la fréquence est voisine de celle de leurs vibrations, elles entrent en résonance et puisent de l'énergie dans le faisceau. C'est cette perte d'énergie que l'on mesure.

Le fondement de la spectroscopie d'absorption est basé sur la loi Beer-Lambert.

$$I = I_0 e^{-\alpha p l}$$

I est l'intensité de la lumière transmise par une cellule de longueur l contenant un gaz sous pression p, I<sub>0</sub> correspond à l'intensité de la lumière incidente, α représente le coefficient d'absorption par unité de pression. Les échantillons analysés ont subi un pastillage dans une matrice du sel KBr.

#### **II.2.4.5. La microscopie électronique à balayage**

La microscopie électronique est un moyen de produire une image avec n'importe quel signal détectable résultant de l'interaction entre un faisceau d'électrons et un échantillon cible.

Le principe du balayage consiste à explorer la surface de l'échantillon par lignes successives et à transmettre le signal du détecteur à un écran cathodique dont le balayage est exactement synchronisé avec celui du faisceau incident.

Les microscopes à balayage utilisent un faisceau très fin qui balaie point par point la surface de l'échantillon.

La microscopie électronique à balayage donne des informations sur les caractéristiques microstructurales d'un matériau. Elle permet ainsi de visualiser les minéraux à des grossissements variables. Les caractéristiques microstructurales permettent de prédire le comportement mécanique du matériau.

## **II.2.5. La composition chimique**

### **II.2.5.1. Mise en solution des échantillons**

La détermination de la composition chimique d'un échantillon est précédée d'une mise en solution adéquate. La mise en solution choisie est celle d'une attaque tri-acide (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – HNO<sub>3</sub>) proposée par Njopwouo et Orléac en 1979 [21].

### **II.2.5.2. Dosage des éléments chimiques de la solution**

#### **II.2.5.2.1. Dosage des éléments chimiques par la spectrométrie d'absorption atomique**

La spectrométrie d'absorption atomique (ASS) dont le principe a été proposé par Walsh en 1955 est l'une des méthodes les plus courantes pour l'analyse chimique élémentaire. C'est une méthode d'analyse consistant à mesurer l'intensité de la lumière absorbée par un atome à l'état fondamental. La technique est basée sur le fait que tout atome peut absorber la radiation qu'il émet. L'intensité de la lumière absorbée est liée à la concentration de l'atome absorbant par la loi de Beer Lambert :

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon lc \text{ avec :}$$

A : l'absorbance

I<sub>0</sub> : l'intensité du faisceau incident



$I$  : l'intensité du faisceau transmis

$\epsilon$  : le coefficient d'extinction molaire

$l$  : l'épaisseur en cm de la vapeur atomique traversée par le faisceau

$c$  : la concentration de l'élément dosé.

Pour le dosage d'un élément chimique, la solution a été pulvérisée dans une flamme air-acétylène provoquant la dissociation et le retour à l'état fondamental des atomes. L'anticathode correspondant à l'élément dosé a été placée et un choix judicieux de la fente et de l'énergie a été fait.

Pour des solutions concentrées, des dilutions ont été faites. Pour le dosage de Mn, Ca et Mg, les solutions ont été diluées avec une solution de nitrate de lanthane de concentration  $6,23 \text{ gl}^{-1}$  pour éliminer des interférences chimiques.

#### **II.2.5.2.2. Dosage du titane par la spectrométrie d'absorption moléculaire ou colorimétrie**

Dans cette technique d'analyse appelée colorimétrie, un faisceau lumineux de longueur d'onde  $\lambda$  et d'intensité  $I_0$  traversant un milieu homogène d'épaisseur  $l$ , subit une absorption proportionnelle à la concentration  $C$  de la substance absorbante dissoute. Elle repose sur la loi de Beer- Lambert.

Pour une longueur d'onde incidente  $\lambda$ , on détermine l'absorbance  $A$  de la substance dissoute et à l'aide d'une courbe d'étalonnage, on détermine la concentration  $C$  de la substance.

L'eau oxygénée donne avec Ti (IV) en milieu acide un complexe orangé dont le spectre d'absorption présente un maximum aux environs de 410 nm. En mesurant à cette longueur d'onde, l'absorbance de la solution à doser dans laquelle, on a formé le complexe coloré, il est possible de calculer la teneur en  $\text{TiO}_2$

Pour le dosage du Ti, on a prélevé 25 ml de filtrat (I) que l'on a évaporé à sec. Le précipité obtenu a été repris par  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (5 %) afin d'avoir une concentration acide.

Après la reprise et la mise en fiole de 100 ml, pour développer la coloration du complexe, on a ajouté dans d'ordre 6 ml de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  concentré pour complexer le fer, 6 ml de  $\text{H}_2\text{O}_2$  (20 volumes). On a ensuite complété à 100 ml avec  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (5 %).

La teneur en  $\text{TiO}_2$  est obtenue en utilisant une courbe d'étalonnage [22].

### **II.2.5.2.3. Dosage de l'aluminium par complexométrie**

La complexométrie est l'ensemble des méthodes de dosage qui reposent sur l'emploi des complexants. Le dosage des ions  $Al^{3+}$  par cette méthode est basé sur la réaction de complexation de ces derniers avec la solution du sel dissodique de l'acide éthylène diamine tétra acétique ( $Na_2H_2Y \cdot 2H_2O$ ) en milieu acide.

Pour le dosage de l'aluminium, on a prélevé 50 ml de filtrat auquel 25 ml d'E.D.T.A de concentration 0,05 M ont été ajoutés. En présence de deux gouttes de rouge de méthyle à 0,02 %, le pH de la solution a été ramené à 5 par ajout d'un excès de 20 ml de solution tampon pH (5, 6). La solution obtenue a été portée à l'ébullition pendant quelques minutes pour former les complexes d'aluminium, de fer et de titane avec l'E.D.T.A. Dix (10) ml de la solution tartrique à 2 % et 5 ml de la solution de phosphate d'ammonium à 10 % acidifié à l'acide chlorhydrique ont été ajoutés à la solution précédente.

La nouvelle solution est portée à l'ébullition pendant 3 minutes pour libérer le titane du complexe. Après un refroidissement accéléré, on a ajouté autant d'alcool éthylique qu'il y a de liquide dans le récipient de dosage. L'alcool permet d'éviter la précipitation de la dithizone insoluble dans l'eau. 5 ml de solution de dithizone à 0,25 % dans l'alcool ont été ajoutés. Le complexon en excès a été titré par une solution de chlorure de zinc 0,05 M jusqu'au virage au rouge franc, 30 ml de solution Na F à 4 % ont été ajoutés à la solution précédente et l'ensemble a été porté à l'ébullition pendant 3 minutes en vue de libérer l'aluminium du complexe. La solution a été refroidie rapidement. Le complexon libéré a été dosé par une solution de zinc en présence d'un peu d'alcool et de 5 ml de dithizone. Lorsque la solution a viré au rouge franc, une goutte de chlorure de zinc a été ajoutée jusqu'à la stabilisation de la couleur rouge.

Un (1) ml de solution titrée de chlorure de zinc 0,05 M consommé au dernier dosage correspond à 2,54 mg de  $Al_2O_3$  [22].

### **II.2.5.2.4. Dosage de la matière organique**

Le dosage de la matière organique a été réalisé sur l'échantillon total broyé jusqu'à une granulométrie  $< 80 \mu m$ .

Le papier filtre plissé et 100 g d'échantillon pour l'essai ont été placés dans une étuve (60°C) pendant 4 heures avant le dosage.

Une prise d'essai de l'échantillon de masse  $M_o = 80\text{g}$  a été introduite dans un bêcher de 200 ml avec 100 ml d'eau oxygénée à 6 % (20 volumes). Le mélange a été chauffé doucement jusqu'à 60°C. On a agité avec une baguette en verre le mélange obtenu jusqu'à ce que le dégagement gazeux se soit arrêté. Le mélange a été ensuite porté à l'ébullition pendant 15 minutes. Le mélange a été ensuite filtré en lavant le résidu et le filtre à l'eau. L'ensemble papier filtre et son contenu a été introduit dans un bêcher de 100 ml de masse  $M_2$ . Le tout a été mis dans une étuve réglée à 60°C pendant 12 heures. Après le refroidissement dans un dessiccateur au gel de silice, on a pesé le tout soit  $M_3$  cette masse. Le taux de matière organique a été évalué par la relation :

$$MO(\%) = 1 - \frac{M_3 - (M_2 + M_1)}{M_o} \quad [23] \text{ avec :}$$

- $M_o$  : masse de prise d'essai,
- $M_1$  : masse du filtre plissé,
- $M_2$  : masse du bêcher,
- $M_3$  : masse de l'échantillon sans matières organiques + bêcher + papier filtre plissé.

#### **II.2.5.2.5. Les bases échangeables et la capacité d'échange cationique**

La capacité d'échange cationique est une caractéristique très importante pour un sol. Elle est très importante dans les réactions argile-chaux et argile-ciment. Le mécanisme repose sur les propriétés de la phase solide de pouvoir retenir des ions par la partie colloïdale constituée majoritairement d'humus et d'argile.

La méthode expérimentale d'évaluation de la capacité d'échange cationique a été celle à l'argent thiouré  $\text{Ag} [\text{SC} (\text{NH}_2)_2]^+$  [24, 25].

Le principe consiste à extraire des sols des cations pour une solution d'argent thiouré ( $\text{Ag Tu}$ ). Les concentrations des cations  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Na}^+$  extraits exprimées en méq/100g de terre définissent les bases échangeables tandis que la quantité totale des cations extraits en méq/100g de terre correspond à la capacité d'échange de cations (CEC).

Pour déterminer ces caractéristiques, on a dissout 3,38 g de nitrate d'argent

Ag( NO<sub>3</sub>) dans une fiole de 1 litre. Trente (30) g de (Ag Tu) ont été dissous dans 500 ml d'eau distillée dans une fiole de 2 l. A la solution obtenue, on a ajouté une solution de Ag (NO<sub>3</sub>) (0,02 M). Le mélange a été complété avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. La solution ainsi obtenue est la solution d'extraction. 30 ml de solution d'extraction ont été versés sur 1 g d'échantillon (0,25 nm) dans un tube centrifugeuse. L'ensemble a été agité pendant deux heures (temps suffisant pour l'extraction de tous les cations fixés dans le sol).

Le mélange obtenu a été filtré à l'aide d'un papier filtre et le filtrat a été recueilli dans une fiole de 10 ml. La solution a été complétée avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.

Les concentrations de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> et Na<sup>+</sup> en méq/100 g d'échantillon ont été déterminées par spectrométrie d'absorption atomique. On a enfin déterminé la capacité d'échange cationique par la relation :  $CEC = [Ag]_b - [Ag]_s$  où  $[Ag]_s$  est la concentration de l'argent dans la solution et  $[Ag]_b$  celle de l'argent dans le blanc.

#### **II.2.5.2.6. La mesure du pH**

La mesure du pH de l'échantillon a nécessité une certaine préparation. Pour cela 1 g d'échantillon a été dissout dans 4 ml d'eau distillée. Le mélange obtenu a été agité pendant 2 heures afin d'avoir une solution homogène. Les pH ont été mesurés sur ces différentes solutions.

## Références bibliographiques

- [1] Kagambéga N, Castain C. Notice explicative de la Carte géologique du Burkina Faso à 1/200000 ; Feuille Pô, 2003.
- [2] Carte géologique et Minière du Burkina Faso à 1 /1000000, 3<sup>ème</sup> édition, 2003.
- [3] Gorisse F. Essais et contrôle des bétons. Editions Eyrolles, 1978, 200p.
- [4] NF P13-305. Briques pleines ou perforées et blocs perforés en terre cuite à enduire., AFNOR., Octobre 1983, 19p.
- [5] NF P18-560. Analyse granulométrique par tamisage. AFNOR., Octobre 1978, 5p.
- [6] NF P94-057. Analyse granulométrique des sols, Méthode par sédimentation. AFNOR., Mai 1992, 17p.
- [7] L.C.P.C. Limites d'Atterberg. Méthode d'essai. N°19, 1987, 26p.
- [8] NF P94-051. Détermination des limites d'Atterberg., AFNOR., Mars 1993, 15p.
- [9] Tran NL. L'essai au bleu de méthylène. Avant- Projet de Mode opératoire, 1979, 15p.
- [10] Tourenq C, Tran NL. Mise en évidence des argiles par l'essai au bleu de méthylène. Application aux sols, roches et granulats. Bull Liaison Labo P et Ch, 1989, 80p.
- [11] NF P94-068. Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tache. , AFNOR., Novembre 1993, 8p.
- [12] L.C.P.C. Mode opératoire, Essai Proctor, Dunod, 1970, 35p.
- [13] NF P94-093. Détermination des références de compactage d'un matériau, AFNOR., Octobre 1999, 17p.
- [14] NF P94-078. Indice CBR après immersion- Indice CBR immédiat- Indice Portant Immédiat., AFNOR., Décembre 1992, 14p.
- [15] NF P 18-406. Bétons – Essai de compression., AFNOR., Décembre 1981, 3p.
- [16] NF P15-451. Essais mécaniques. Flexion et compression., AFNOR. , Juillet 1963, 2p.
- [17] NF P 18-408. Bétons – Essai de fendage., AFNOR., Décembre 1981, 3p.
- [18] Holtzapffel T. Les minéraux argileux. Préparation, analyse diffractométrique et détermination, 1985, 136p.
- [19] Sigg J. Les produits de la terre cuite, Editions Septima, Paris, 1991, 494p.
- [20] Jouenne CA. Traité de céramique et matériaux minéraux, Editions Septima, Paris, 1980, 657p.

- [21] Njopwouo D, Orliac M. Note sur le comportement de certains minéraux à l'attaque tri-acide. Cah ORSTOM, Séri Pédol 1979 ; Vol XVII(n°4):329-337.
- [22] Voinovitch A, Debras-Guedon J, Louvier J. L'analyse des silicates, Herman Editeur, 1962.
- [23] Guenot J. Sols. Dosage en matières organiques. Méthode directe à l'eau oxygénée. CEBTP 1985 ; N°E-01/185, 2p.
- [24] Pleysier J, Cremers A. Adsorption of the silver-thiourea complex in montmorillonite. Nature Phys Sc 1973; 423: 86-87.
- [25] Pleysier J, Cremers A. Stability of silver-thiourea complexes in montmorillonite clay. J Chem Soc Faraday Trans J 1975; 71: 256-264.

## **Chapitre III**

# **Caractérisation géotechnique, mécanique, chimique et minéralogique des graveleux latéritiques de Sapouy**

### **III.1. Introduction**

Les graveleux latéritiques sont des sols meubles formés sous climat tropical et subtropical dont la fraction granulaire est constituée de pisolites ou de nodules ferrugineux incrustés dans une fine matrice limono- argileuse [1]. Ils sont utilisés comme matières premières de couches de fondation et/ou de base [2-8].

En Afrique de l'Ouest, quelques études ont été faites sur les propriétés géotechniques et mécaniques ainsi que sur la genèse des sols latéritiques par Gidigasou [2-4, 9, 10] principalement sur les latérites du Ghana.

Au Burkina Faso, les graveleux latéritiques sont utilisés dans les constructions de routes et d'habitats. Ils sont caractérisés par un faible gonflement sous atmosphère humide. Bien que largement utilisés en construction routière, très peu d'études scientifiques leur ont été consacrées [11]. Leur choix en construction routière a été essentiellement basé sur leurs propriétés géotechniques : l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg, la valeur au bleu de méthylène, les références du Proctor modifié et la portance CBR [1, 11]. Les compositions minéralogique et chimique ainsi que la microstructure n'ont été que rarement prises en compte.

Le réseau routier au Burkina Faso est sujet à des déformations considérables telles celles dénommées tôles ondulées, la perte des matériaux et la dépression des routes. Il a été constaté que des graveleux latéritiques choisis sur la base de leurs propriétés géotechniques se sont mal comportés sur les chaussées. Ceci serait dû à l'insuffisance des tests géotechniques pour le choix de ces matériaux destinés à la construction routière. En conséquence, quelques chercheurs ont suggéré d'associer les analyses chimique et minéralogique aux essais géotechniques classiques [6, 7].

L'objectif de ce travail est de faire une étude associant les propriétés géotechniques et mécaniques et les compositions minéralogique et chimique des graveleux latéritiques de Sapouy (Burkina Faso). Cela dans le but d'évaluer leur aptitude comme matière première de couche de base pour le tronçon de route reliant Sapouy au Ghana.



### III.2. Techniques et procédures expérimentales

Pour la réalisation des essais et analyses, 25 sondages ont été implantés sur le site de prélèvement. Le sol a été décapé avant le prélèvement dans ces différents sondages. La profondeur moyenne des couches exploitables était de 0,5 m. Quatre sacs de 100 kg ont été prélevés dans chaque sondage. Un mélange unique a été réalisé à partir des 100 sacs de matières premières afin de mener des essais et analyses.

Une quantité suffisante d'échantillon du mélange unique a été broyée dans un mortier en agate jusqu'à une granulométrie  $< 80 \mu\text{m}$ . La poudre obtenue a été utilisée pour la détermination de la perte au feu et de la densité absolue.

L'analyse granulométrique par tamisage à sec et par sédimentométrie a été réalisée respectivement selon les normes NF P18-560 [12] et NF P94-057 [13].

La limite de liquidité ( $w_L$ ) a été mesurée selon la méthode de disque de Casagrande tandis que la limite de plasticité ( $w_P$ ) a été déterminée par la méthode du rouleau. Toutes ces mesures ont été réalisées selon la norme NF P94-051 [14].

La valeur au bleu de méthylène caractérisant la teneur en argiles de l'échantillon, a été déterminée selon la norme NF P 94-068 [15].

La teneur en eau optimale ( $w_{OPM}$ ) et la densité sèche maximale ( $\delta_{OPM}$ ) ont été déterminées selon la norme NF P94-093 [16].

La portance CBR a été évaluée selon la norme NF P94-078 [17]. A ce propos, les éprouvettes ont été immergées pendant quatre jours avant leur poinçonnement sur une presse universelle Seditech couplée à un ordinateur pour l'acquisition des données.

Les résistances à la compression simple et à la traction par fendage (Essai Brésilien) ont été mesurées sur des éprouvettes cylindriques (diamètre=hauteur = 15,2 cm) moulées à l'optimum Proctor modifié et conservées à la température de la salle pendant 28 jours. Pour ces essais 4 éprouvettes ont été utilisées. Les essais de compression simple et de traction par fendage ont été réalisés respectivement selon

les normes NF P 18-406 [18] et NF P18-408 [19]. L'appareil utilisé pour ces essais est la presse universelle Seditech.

La composition chimique a été déterminée après une mise en solution de l'échantillon par une attaque tri-acide (mélange sulfo-nitrique et acide chlorhydrique selon le protocole décrit par Njopwouo *et al.* [20]. Les éléments chimiques ont été dosés par spectrométrie d'absorption atomique, colorimétrie, complexométrie et par gravimétrie. Le spectrophotomètre utilisé est un Perkin Elmer AAnalyst 100 tandis que le colorimètre utilisé est un spectrophotomètre Jenway 6300. La matière organique a été dosée par l'attaque directe de l'échantillon à l'eau oxygénée (20 volumes) [21].

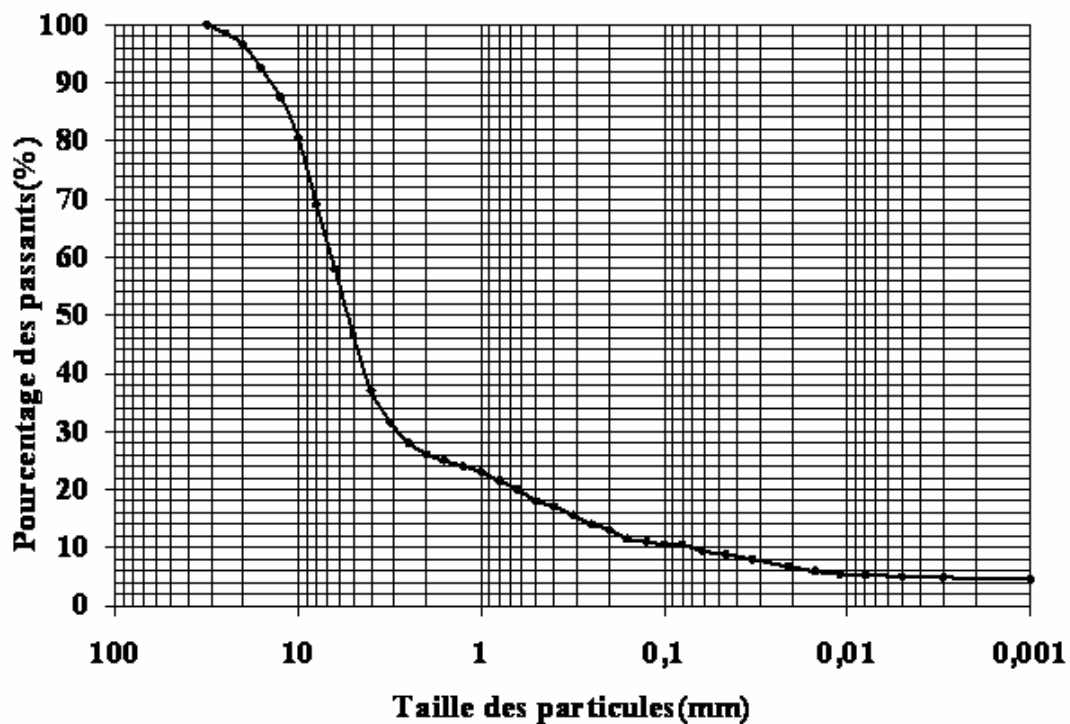
La poudre d'échantillon broyée jusqu'à une granulométrie  $<80\mu\text{m}$  a été utilisée pour les analyses par diffraction des rayons X et thermiques (ATD-ATG). La fraction fine ( $<2\ \mu\text{m}$ ) a été extraite par sédimentation selon la loi de Stokes [22] en vue de déterminer sa composition minéralogique par diffraction des rayons X. Le diffractomètre utilisé est un appareil de marque Bruker D 5000 avec un tube en arrière en graphite fonctionnant avec la radiation Cu K $\alpha$ . Les diffractogrammes ont été traités avec un logiciel Diffracplus D Quant. L'appareil utilisé pour les analyses thermiques est de type Labsys-Setaram. Les analyses ont été faites à la vitesse de chauffe de  $10^\circ\text{C}/\text{mn}$  sous atmosphère inerte d'azote.

La microstructure a été observée et analysée sur des échantillons compactés à l'optimum Proctor modifié à l'aide d'une caméra CCD avec une résolution de  $0,10280\ \mu\text{m}$ .

### III.3. Propriétés géotechniques et mécaniques

La perte au feu évaluée est de 8,14%. Cette valeur de perte au feu exprime une faible proportion des minéraux argileux de l'échantillon [23, 24]. La densité absolue est de 2,74. Cette valeur de la densité est proche de celle du quartz ; le quartz serait donc en forte teneur dans l'échantillon étudié.

La courbe d'analyse granulométrique de l'échantillon est représentée sur la **figure III. 1**. L'examen de cette courbe granulométrique montre que l'échantillon est constitué de 28% de squelette en masse, 18% de mortier en masse, 10,5% de particules fines en masse et 5% de fraction argileuse en masse.



**Figure III. 1 : Courbe d'analyse granulométrique de l'échantillon.**

Les propriétés géotechniques de l'échantillon sont reportées dans le **tableau III. 1**.

**Tableau III. 1 : Propriétés géotechniques de l'échantillon**

<b>Propriétés géotechniques</b>	<b>Résultats</b>
<b>Distribution de la taille des particules (%)</b>	
< 2 mm (squelette)	28,0
< 0,425 mm (mortier)	18,0
< 80 $\mu\text{m}$ (fines)	10,5
< 2 $\mu\text{m}$ (argiles)	5,0
<b>Limites d' Atterberg</b>	
Limite de liquidité, $w_L$ (%)	22,5
Limite de plasticité, $w_P$ (%)	12,0
Indice de plasticité, IP (%)	10,5
<b>Valeur au bleu de méthylène de l'échantillon total (g/100g)</b>	0,17
<b>Proctor modifié</b>	
Teneur en eau optimale (TEO), %	6,6
Densité sèche maximale (DSM),	2,17
<b>CBR à 95% de DSM, %</b>	43

Ces résultats permettent de déduire que l'échantillon est de classe A-2-6 selon US HRB.

L'indice de plasticité (10,5%), qui est inférieur à 12%, montre que l'échantillon est faiblement plastique [25]. Cette faible plasticité est liée à la faible teneur en argiles et à l'abondance du quartz.

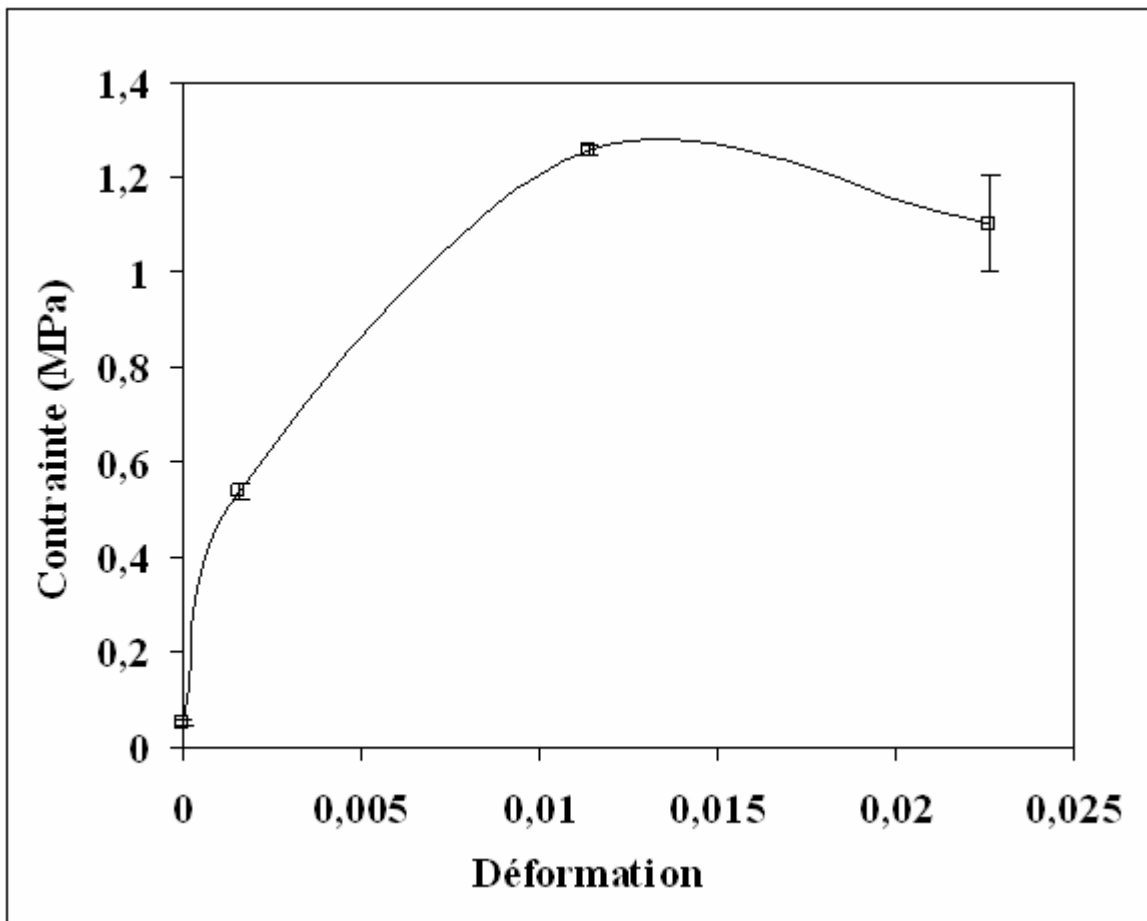
La faible valeur du bleu de méthylène (0,17g/100g) qui corrobore l'indice de plasticité et la perte au feu, suggère l'absence des argiles gonflantes dans l'échantillon.

La teneur en eau optimale (TEO), la densité sèche maximale (DSM) et la portance CBR à 95% de DSM qui sont respectivement de 6,6% ; 2,17 et 43% permettent de conclure que la matière première étudiée est convenable pour la couche de fondation en construction routière [26]. Son éventuelle utilisation comme matière première de couche de base nécessite une amélioration. Cette amélioration pourrait

être d'origine physique (utilisation des concassés durs) ou chimique (utilisation des liants hydrauliques : ciment, chaux, cendres volcaniques) [27-31].

La courbe contrainte- déformation de l'échantillon (**figure III. 2**) montre que ce dernier est ductile avec une phase plastique bien marquée ; il est donc bien indiqué comme échantillon de construction routière [27].

Les résistances à la compression simple et à la traction par fendage sont respectivement de 1,26 et 0,09 MPa. La résistance à la compression est dans l'ordre de grandeur de 0,5-1,5MPa. L'échantillon, selon les données de la littérature [27] est convenable pour une couche de fondation.



**Figure III. 2 : Courbe contrainte- déformation de l'échantillon après 28 jours de cure**

La résistance à la compression simple est supérieure à celles reportées pour des latérites de la Côte d'Ivoire [27], du Cameroun [1] et du Ghana [31]. Cela est dû au fait que ces latérites sont plus riches en minéraux argileux que les graveleux latéritiques de Sapouy. Les minéraux argileux contribuent à la baisse des propriétés mécaniques des matériaux. L'échantillon étudié présentant des propriétés mécaniques similaires à celles des échantillons qui se sont bien comportés comme couche de fondation sur les chaussées, est donc convenable pour cette couche.

Le module d'élasticité évalué à partir de la courbe contrainte- déformation est de 100 MPa. Cette valeur est dans l'ordre de grandeur des mesures reportées pour des graveleux latéritiques d'Afrique [1], généralement inférieures à 200 MPa.

### III.4. Composition chimique

La composition chimique de l'échantillon est donnée dans le tableau 2. L'échantillon contient une importante quantité de silice (56,19%), des quantités appréciables d'oxyde de fer (16,09%) et d'alumine (10,10%). L'oxyde de calcium est en faible teneur (3,24%). Ces résultats laissent penser que le quartz, les aluminosilicates et les minéraux de fer sont prédominants dans l'échantillon étudié. La faible teneur en oxyde de calcium montre que les composés riches en calcium sont en faible proportion.

**Tableau III. 2: Composition chimique de l'échantillon**

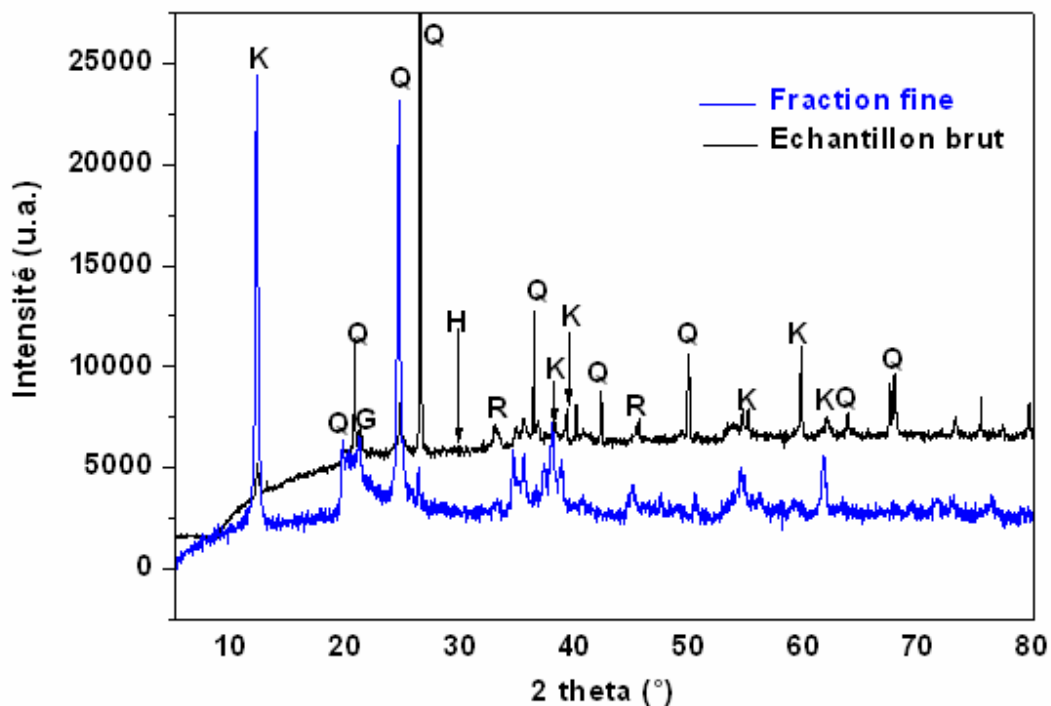
<b>Oxydes</b>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	CuO	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	PF (1000°C)	<b>Total</b>
%	56,19	10,10	16,09	0,05	3,24	0,11	1,68	2,01	0,07	1,39	8,14	99,07

### III.5. Composition minéralogique

#### III.5.1. Diffraction des rayons X

Les diffractogrammes de l'échantillon brut et de sa fraction fine sont représentés sur la **figure III. 3**.

Le diffractogramme de l'échantillon brut montre qu'il est essentiellement composé de quartz  $\alpha$ , kaolinite, goéthite, hématite et rankinite ( $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_3$ ). Ces phases minérales à l'exception de la rankinite sont celles couramment présentes dans les latérites [2, 24].



**Figure III. 3 : Diffractogrammes de l'échantillon brut et de sa fraction fine.**

K : Kaolinite, Q : Quartz, G : Goéthite , H : Hématite , R : Rankinite.

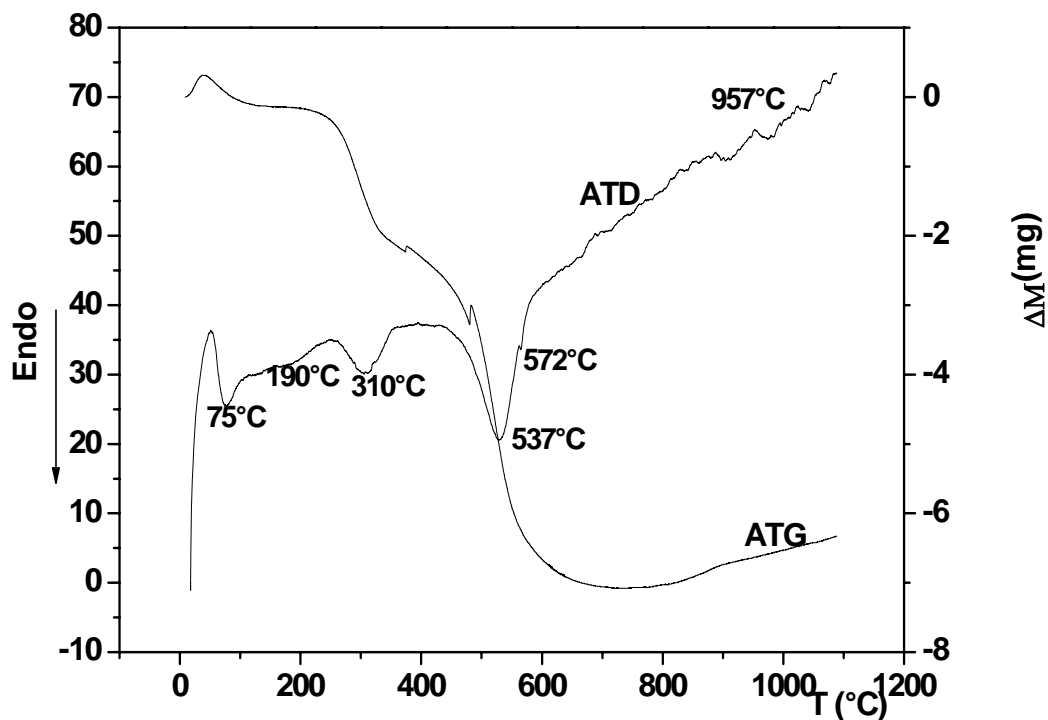
La présence de la rankinite pourrait s'expliquer par le fait que l'échantillon étudié provient des roches volcano-sédimentaires.

Le diffractogramme de la fraction fine ( $<2 \mu\text{m}$ ) indique la présence de la kaolinite, du quartz et de la rankinite. On peut remarquer donc qu'une partie du quartz et de la rankinite sont liées à la fraction argileuse riche en kaolinite.

Les espèces argileuses gonflantes telles les smectites sont absentes de l'échantillon. Ces minéraux accroissent la plasticité des matériaux et par conséquent ont des effets néfastes sur les propriétés mécaniques. Les raies diffuses associées à la kaolinite montrent sa pauvre cristallinité [32].

### III.5.2. Analyses thermique différentielle (ATD) et thermogravimétrie (ATG)

Les courbes ATD-TG de l'échantillon sont présentées sur la **figure III. 4**.



**Figure III. 4 : Courbes ATD-TG de l'échantillon**

L'examen des courbes ATD-TG montre un pic endothermique suivi d'une perte de masse autour de 75°C. Cet accident thermique est relatif à la perte d'eau hygroscopique ou d'hydratation de l'échantillon. Le large pic endothermique autour de 190°C suivi d'une perte de masse est lié à la fois à la perte d'eau de coordination et/ou zéolithique. L'absence de smectites et d'argiles fibreuses laisse penser que ce



phénomène peut être aussi attribué à la présence des composés organiques tels que les acides fulviques [33]. Les pics endothermiques autour de 310 et 537°C suivis de pertes de masse sont dus à la transformation de la goéthite en hématite et la déshydroxylation de la kaolinite et sa transformation en métakaolinite.

La déshydroxylation de la kaolinite et sa transformation en métakaolinite se traduit par l'équation suivante :  $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  (Kaolinite)  $\rightarrow$   $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_7$  (Métakaolinite) +  $\text{H}_2\text{O}$ .

Le mécanisme consisterait en un transfert de proton entre deux hydroxyles selon les équations suivantes :  $\text{OH}^- \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{O}^{2-}$  et  $\text{H}^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$  [34-36]. La température de déshydroxylation d'une kaolinite ordonnée est autour de 600°C tandis que celle d'une kaolinite désordonnée est plus faible [37, 38]. La température de déshydroxylation de la kaolinite de notre échantillon étant de 537°C, cette kaolinite serait désordonnée. Elle contiendrait des défauts d'empilement selon l'axe cristallographique c [38]. La structure désordonnée de la kaolinite pourrait se justifier par le remplacement de l'aluminium dans le feuillet octaédrique par le fer trivalent engendrant des lacunes dans sa structure.

Le pic endothermique autour de 572°C traduit la transformation du quartz  $\alpha$  en  $\beta$ .

Le phénomène exothermique autour de 957°C est relatif à la réorganisation structurale de la métakaolinite.

### III.5.3. Composition semi- quantitative des phases minérales cristallisées

A partir des résultats de l'analyse chimique et ceux de la diffraction des rayons- X, la composition semi- quantitative des phases minérales de l'échantillon a été évaluée en utilisant la relation de Yvon *et al.* [40]. Cette relation est la suivante :

$T(a) = \sum M_i P_i(a)$  dans laquelle :

- T (a)= teneur (oxyde %) en l'élément chimique « a » ;
- $M_i$ = teneur (%) en minéral « i » dans la matière étudiée et contenant l'élément « i » ;
- $P_i(a)$ = proportion de l'élément « a » dans le minéral « i ».

La méthode de calcul utilise les compositions idéales de la kaolinite, du quartz, de l'hématite, de la goéthite et de la rankinite.

Le **tableau III. 3** donne la composition semi- quantitative des phases minérales de l'échantillon étudié. Il est constitué d'une forte proportion de quartz (42%) qui est en liaison avec la valeur de la densité absolue qui est de 2,74. La quantité de la

kaolinite est appréciable (26%). Ceci est en accord avec la perte au feu (8,14%), l'indice de plasticité (10,5%) et la valeur au bleu de méthylène (0,17g/100g). Les proportions de la goéthite (composé de type ciment), de l'hématite et de la rankinite sont respectivement de 15, 3 et 6%.

**Table III. 3: Composition semi- quantitative des phases minérales**

<b>Phases cristallines</b>	Quartz	Kaolinite	Rankinite	Goéthite	Hématite	Balance
<b>Composition minéralogique (%)</b>	42	26	6	15	3	8

La balance est constituée majoritairement de la matière organique (4%) et des phases minérales amorphes.

### **III.6. Discussion**

Compte tenu des résultats géotechniques et en se basant sur les résultats concernant l'utilisation des sols tropicaux d'Afrique de l'Ouest en construction routière, l'échantillon étudié est convenable pour la confection d'une couche de fondation [41]. Ce résultat se justifie par la teneur en fines (10,5%) qui est inférieur à 30% et par le fait que le produit de l'indice de plasticité par le pourcentage de fines (f.Ip) qui est de 110 est supérieur à la valeur maximale (100) admise pour une matière première de couche de base [4].

Les normes géotechniques pour les matériaux de couches en technique routière tiennent compte de l'intensité du trafic et de l'épaisseur des couches. Sur le tronçon de route Sapouy-Ghana, le trafic est moyen avec environ 250 passages de véhicules par jour compte tenu de l'intensité des activités commerciales entre le Burkina Faso et le Ghana. Les valeurs minimales du CBR admises pour les matières premières de couche de fondation et de base pour un tel trafic sont respectivement de 30 et 80% [26]. Tenant compte de cela, l'échantillon étudié reste toujours convenable pour la confection d'une couche de fondation.

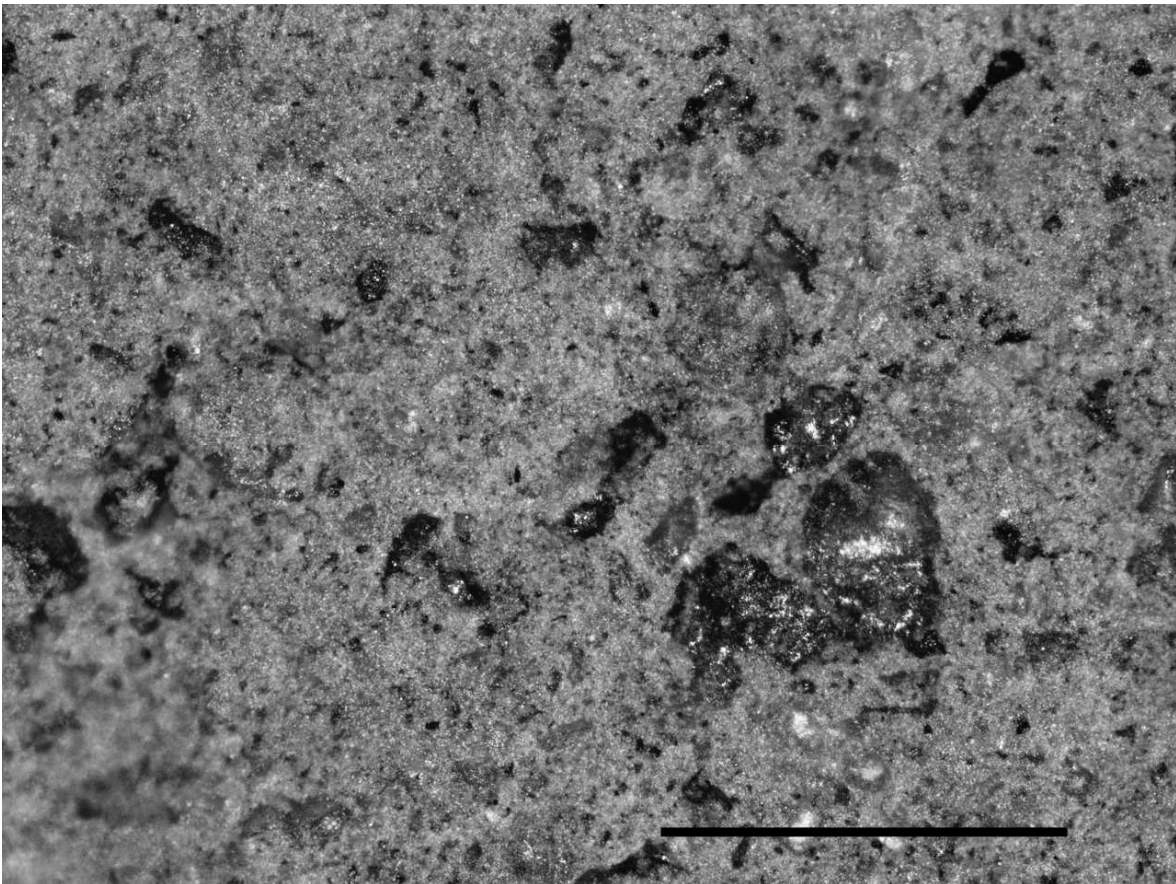
Les propriétés géotechniques de l'échantillon sont globalement meilleures que celles rapportées sur les sols latéritiques du Ghana et de la Côte d'Ivoire. Ces sols latéritiques contiennent une forte proportion en fraction fine constituée essentiellement de minéraux argileux comparativement à l'échantillon étudié [2,

27]. Il est bien connu qu'une forte proportion en argiles a un effet néfaste sur les propriétés géotechniques. Les différences observées seraient liées à la genèse des sols latéritiques et aussi au climat sous lequel ils ont été formés. En effet les latérites du Ghana et de la Côte d'Ivoire sont formées sous climat humide avec une pluviométrie annuelle appréciable tandis que celle du Burkina Faso est formée sous un climat sec avec une faible pluviométrie annuelle. Les latérites du Ghana et de la Côte d'Ivoire proviennent de l'altération du granite et des phyllithes [9] tandis que les graveleux latéritiques du Burkina Faso se sont développés par altération du grès et du granite [42]. Ces graveleux latéritiques sont riches en quartz. La forte teneur en quartz contribue à l'amélioration des propriétés géotechniques et mécaniques et à la stabilité des chaussées. Les latérites du Ghana et de la Côte d'Ivoire ont des propriétés géotechniques et mécaniques semblables car elles sont formées sous climat similaire ; elles sont toutes des latérites de forêt. Les graveleux latéritiques du Burkina Faso et du Sénégal sont des latérites de savane, ont des propriétés géotechniques et mécaniques similaires car ils sont formés sous condition climatique plus ou moins identique [5].

L'application des normes géotechniques et mécaniques pour l'identification et l'évaluation du potentiel d'utilisation en construction routière de certains sols latéritiques induit souvent en erreur compte tenu du caractère évolutif de ces matières premières avec le temps. Par exemple, certains sols latéritiques qui remplissaient tous les critères au moment de la construction de la chaussée se sont mal comportés sur la chaussée au cours du temps [2, 6]. Cela est lié à leurs compositions chimique et minéralogique. A ce propos, les analyses chimique et minéralogique doivent systématiquement compléter les essais géotechniques et mécaniques pour caractériser les matières premières utilisées en construction routière. En général l'un des critères les plus importants pour le choix d'une latérite dépend du ratio silice/sesquioxydes [5, 7]. La détermination de ce ratio qui est déduit de la composition chimique et/ ou minéralogique du matière première fait l'objet de discussions. Certains auteurs considèrent la silice totale pour son calcul tandis que d'autres recommandent de ne prendre en compte que de la silice provenant des aluminosilicates (les minéraux argileux) [5, 7]. Notre ratio qui a été évalué à partir de la silice totale est de 2,1. Selon les données de la littérature [6], l'échantillon pourrait être utilisé sur des chaussées sans dommage dans le futur. Cependant, du fait que le ratio est inférieur à 2,5, l'échantillon semble être inadéquat pour la confection d'une couche de base [7]. En effet la couche de base

exige l'utilisation de matières premières aux meilleures performances mécaniques dont le ratio est dans l'ordre de grandeur de 2,5-6.

Les caractéristiques géotechniques et mécaniques des graveleux latéritiques sont essentiellement tributaires de leurs compositions chimique et minéralogique ainsi que de la répartition des différents minéraux en présence [7, 43]. La microstructure du matériau compacté est présentée sur la **figure III. 5**.



**Figure III. 5 : Microstructure de l'échantillon compacté:** la barre sur l'image vaut 2mm.

On observe la présence des phases granulaires de taille importante, au sein du matériau de matrice. Les bonnes propriétés mécaniques de ce matériau compacté sont dues au pouvoir liant des phases composant ce matériau de matrice et notamment les minéraux argileux. Cette observation est en accord avec la

composition minéralogique qui a montré que la fraction granulométrique fine contient majoritairement de la kaolinite.

Dans cette étude, nous montrons que la composition minéralogique et les propriétés géotechniques d'une matière première de construction routière doivent être connues simultanément pour permettre un choix judicieux pour leur emploi. Le retrait volumique qui croît avec le taux d'argiles gonflantes telles les smectites, constitue l'un des paramètres les plus importants à prendre en compte lors de la mise en œuvre d'ouvrage de travaux publics [43]. Le caractère gonflant des matériaux dépend de la quantité et du type de minéraux argileux présents [7, 43, 44]. En particulier, la quantité de minéraux argileux et plus particulièrement les minéraux argileux de type smectite contribuent au retrait volumique et au phénomène de gonflement. Pour maîtriser ces phénomènes, les utilisateurs des matériaux préconisent la détermination du critère de gonflement et/ou le potentiel de retrait des sols latéritiques, évalué à partir des résultats des tests géotechniques et mécaniques [45]. Les principales caractéristiques utilisées pour évaluer cette mesure sont l'indice de plasticité, la teneur en minéraux argileux, la teneur en fraction fine, la valeur au bleu de méthylène et la limite de liquidité. Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature pour calculer ce paramètre de gonflement. Selon certains auteurs le potentiel de gonflement dépend essentiellement de l'indice de plasticité ( $I_p$ ), qui doit être inférieur à 18% pour un sol dont le potentiel de gonflement est faible. Pour un sol contenant de 8 à 65% de phase argileuse, la valeur du potentiel de gonflement ( $\varepsilon_s$ ) est donnée par l'expression :

$$\varepsilon_s = 1.10^{-5}I_p^{2,24}$$

Dans le cas de notre matériau, le potentiel de gonflement est inférieur à 0,1%. Il est donc classé parmi les sols peu gonflants, comme l'indique le **tableau III. 4**.

**Tableau III. 4 : Potentiel de gonflement des sols selon leur indice de plasticité.**

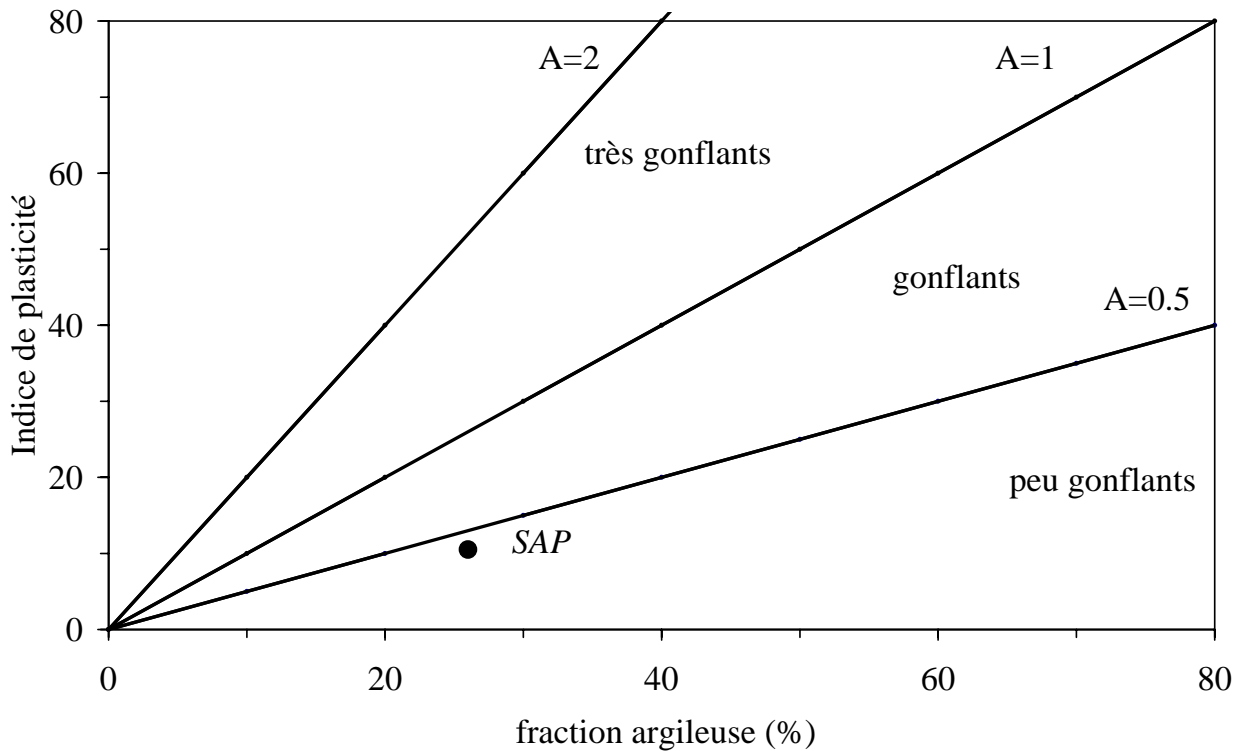
Potentiel de gonflement	$\varepsilon_s$	IP (%)
Faible	0-1,5	0-10
Modéré	1,5-5	10-20
Fort	5-25	20-35

Une deuxième catégorie d'auteurs relie le potentiel de gonflement et /ou de retrait à deux paramètres [45]. Un premier classement est basé sur l'indice de plasticité et le pourcentage de fraction argileuse fine (diamètre < 2 $\mu$ m). Une seconde méthode propose l'utilisation de la limite de liquidité et du pourcentage de particules fines de diamètre inférieur à 74  $\mu$ m. Dans ce cas, notre matériau qui a un indice de plasticité inférieur à 18% et 5% de fraction inférieure à 2  $\mu$ m, 10,5% de fraction fine et une limite de liquidité inférieure à 30%, est classé parmi les sols très peu gonflants, comme l'indique le **tableau III. 5**.

**Tableau III. 5 : Potentiel de gonflement des sols selon l'indice de plasticité, la limite de liquidité, et les fractions respectivement < 2  $\mu$ m et <74  $\mu$ m**

<b>I<sub>p</sub> (%)</b>	<b>% &lt; 2 <math>\mu</math>m</b>	<b>% &lt; 74 <math>\mu</math>m</b>	<b>w<sub>L</sub> (%)</b>	<b>Potentiel de gonflement</b>
> 35	> 95	> 95	>60	Très élevé
22-35	60-95	60-95	40-60	Elevé
18-22	30-60	30-60	30-40	Modéré
< 18	< 30	< 30	< 30	Faible

Une troisième catégorie d'auteurs [45] considère la relation entre l'indice de plasticité et le pourcentage de fraction argileuse globale, pour la détermination du potentiel gonflant des sols. Le report de ces données dans le graphique de la **figure III.6**, indique que notre échantillon est situé dans la zone relative aux matériaux peu gonflants.



**Figure III. 6: Domaines de classification des sols selon leur potentiel de gonflement:** A désigne la pente des droites limitrophes et le point SAP désigne la position de l'échantillon.

### III.7. Conclusions

Les résultats géotechniques et mécaniques obtenus ainsi que les données bibliographiques issues d'études sur des matières premières en Afrique de l'Ouest relatives à l'utilisation des graveleux latéritiques en construction routière indiquent que l'échantillon étudié est convenable pour la confection d'une couche de fondation. Cette aptitude est confortée par une microstructure homogène, un faible potentiel de gonflement du fait de l'absence d'argiles gonflantes telles les smectites, un ratio silice/sesquioxydes très favorable.

Par contre la matière première étudiée ne convient pas pour une couche de base pour cette section de route qui devra supporter un trafic de niveau moyen à cause de l'importance des activités commerciales entre le Burkina Faso et le Ghana.

## Références bibliographiques

- [1] Bagarre E. Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière. ISTED 1990, 143p.
- [2] Gidigasu M D. Degree of weathering in the identification of laterite materials for engineering purposes- A review. Eng Geol 1974 ; 8 : 213-266.
- [3] Gidigasu M.D. Geotechnical evaluation of residual gravels in pavement construction., Eng Geol 1980; 15: 1973-1984.
- [4] Gidigasu M.D. Development of acceptance specifications for tropical gravel paving materials., Eng Geol 1983 ; 19 : 213-240.
- [5] Fall M. Identification et caractérisation mécanique de graveleux latéritiques du Sénégal : Application au domaine routier. Thèse de l'I.N.P.L. 1993 ; 179p.
- [6] Tockol I, Massiera M, Chiasson P A, Maiga M. S. Les graveleux latéritiques dans les pays du Sahel : Cas des routes non revêtues. 7<sup>ème</sup> Congrès International de AIGI, 1994 ; 3423-3431.
- [7] Mahalinger-Iyer U, Williams DJ. Properties and performance of lateritic soil in road pavements. Eng Geol 1997; 46: 71-80.
- [8] Attoh-Okine NO. Application of genetic-based neural network to lateritic soil strength modeling. Construc Build Mater 2004; 18: 619-623.
- [9] Gidigasu M.D. The importance of soil genesis in the engineering classification of Ghana soils. Eng Geol 1971; 5: 117-161.
- [10] Gidigasu M.D. Mode of formation and geotechnical characteristics of laterite materials of Ghana in relation to soil forming factors. Eng Geol 1972; 6: 79-150
- [11] Lompo P. Les matériaux utilisés en construction routière en Haute Volta. Un matériau non traditionnel « Le lithostab » IV<sup>ème</sup> Conférence routière africaine, 20-25- Janvier 1980- Nairobi, Kenya, 42p.
- [12] NF P18-560. Analyse granulométrique par tamisage., AFNOR., Octobre 1978, 5p.
- [13] NF P94-057. Analyse granulométrique des sols. Méthode par sédimentation., AFNOR., Mai 1992, 17p.
- [14] NF P94-051. Détermination des limites d'Atterberg., AFNOR., Mars 1993, 15p.
- [15] NF P94-068. Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tache. , AFNOR., Novembre 1993, 8p.
- [16] NF P94-093. Détermination des références de compactage d'un matériau., AFNOR., Octobre 1999, 17p.



- [17] NF P94-078. Indice CBR après immersion- Indice CBR immédiat- Indice Portant Immédiat., AFNOR., Décembre 1992, 14p.
- [18] NF P 18-406. Bétons – Essai de compression., AFNOR., Décembre 1981, 3p.
- [19] NF P 18-408. Bétons – Essai de fendage., AFNOR., Décembre 1981, 3p.
- [20] Njopwouo D, Orliac M. Note sur le comportement de certains minéraux à l'attaque triacide. Cah O.R.S.T.O.M., Sér Pédol 1979; Vol XVII N°4 : 329-337.
- [21] Guenot J. Sols. Dosage en matières organiques. Méthode directe à l'eau oxygénée, CEBTP, N°E-01/185, 1984, 2p.
- [22] Holtzapffel T. Les minéraux argileux, préparation, analyse diffractométrique et détermination. Société Géologique du Nord. Ed., Villeneuve 1985. 136p.
- [23] Traoré K, Kabré TS, Blanchart P. Low temperature sintering of clay for pottery from Burkina Faso. Appl Clay Sci 2000; 17(5): 279-292.
- [24] Mbumbia L, Mertens de Wilmars A, Tirlocq J. Performance characteristics of lateritic soil bricks fired at low temperatures: a case study of Cameroon. Construc. Build Mater 2000; 14: 121-131.
- [25] Normalisation Française. Sols: reconnaissance et essais. Description- Identification- Dénomination des sols. XP P94-011. Août 1999, 22p.
- [26] CEBTP. Normes de Dimensionnement des routes dans les pays tropicaux 1972.
- [27] Messou M. Comportement mécanique d'une couche de base en graveleux latéritiques améliorés au ciment : cas des routes en Côte d'Ivoire. Thèse de Doct-Ing en Génie Civil à l' Ecole Nationale des Ponts et Chaussées Paris 1980 ; 197p.
- [28] Autret P. Latérites et graveleux latéritiques. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées 1983, 38p.
- [29] Moore RK. Lime stabilization: reactions, properties, design and construction. State of the Art Report. N°5. Transportation Research Board National Research Council, Washington, DC. 1987, 58p.
- [30] Attoh-Okine B. Stabilization effect of locally produced lime on selected lateritic soils. Construc Build Mater 1990; 4(2): 86-91.
- [31] Attoh-Okine. NO. Lime treatment of laterite soils and gravels- revisited. Construc Build Mater 1995; Vol.9 (n°5): 283-287.
- [32] Cases J M, Lietard O, Yvon J, Delon JF. Etude des propriétés cristalochimiques, morphologiques, superficielles de kaolinites désordonnées. Bull Minéra 1982; 105: 439-455.
- [33] Gieseking JE. Soil Component, Vol.1, organic components. Springer-Verlag New York, Heidelberg-Berlin, 1975.

- [34] Maiti GC, Freund F. Dehydration-related proton conductivity in kaolinite. *Clay Miner*1981; 16: 395-413.
- [35] Brindley GW. Role of crystal structure in the dehydration reactions of some layer-type minerals. *J Miner Soc Japon*1961 ; 5 : 217-237.
- [36] Frost R L, Vassallo A M. The déshydroxylation of the kaolinite clay minerals using infrared emission spectroscopy. *Clays Clay Miner* 1996; Vol. 44. N°5 : 635-651.
- [37] Grimshaw R W. Constitution of refractory clays II. *Trans Brit Ceram Soc*1945 ; 44 : 76-96.
- [38] Letellier MC. Récupération et dosage des phases argileuses d'un sable de gisement. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Univ Toulouse Sci Miner Crist, 1986, 175p.
- [39] Lietard O. Contribution à l'étude des propriétés physico-chimiques, cristallographiques et morphologiques des kaolins. Thèse Sci Phys, Nancy, 1977, 322p.
- [40] Yvon J, Garin P, Delon JF, Cases JM. Valorisation des argiles kaolinitiques des Charentes dans le caoutchouc naturel. *Bull Minéra*1982; 105: 431-437.
- [41] Guide pratique du dimensionnement des routes pour les pays tropicaux. CEBTP, 1984, 157p.
- [42] Kagambéga N, Castain C. Notice explicative de la Carte géologique du Burkina Faso à 1/200000 ; Feuille Pô, 2003.
- [43] Al-Rawas A. A., Qamarouddin M. Construction problems of engineering structures founded on expansive soils and rocks in Northern Oman. *Build Environ* 1998; vol 33 (2-3): 159-171.
- [44] Bell F. G. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Eng Geol*1996; 42: 223-237.
- [45] Djedid A. Bekkouche A. Aissa Mamoune A. M. Identification and prediction of the swelling behavior of some soils from the Tlemcen region of Algeria, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*. 2001; 233: 69-77.

## **Chapitre IV**

# **Influence du ciment sur la microstructure et les propriétés géotechniques et mécaniques des graveleux latéritiques**

#### **IV.1. Introduction**

Les tronçons de routes construites à partir des graveleux latéritiques naturels sont sujets à des détériorations [1-5]. Cela pourrait s'expliquer par :

- les limites objectives des propriétés géotechniques et mécaniques de ces matières premières naturelles,
- l'intensité du trafic routier.

La viabilité de ces routes construites dépend également des compositions chimique et minéralogique des sols latéritiques utilisés [4]. Ces propriétés géotechniques et mécaniques peuvent être améliorées par l'ajout de chaux, de ciment, de cendres volantes, de silice fine et de fibres végétales [2, 3, 5, 6-10]. Si les paramètres physiques des latérites argileuses ont été améliorés aux liants hydrauliques pour quelques pays ouest africains, à notre connaissance, peu d'attention a été accordé aux investigations microstructurales de ces matériaux composites [2,3, 5, 6, 9-11].

Notre étude porte sur la détermination des propriétés géotechniques et mécaniques des graveleux latéritiques de Sapouy améliorés au ciment en relation avec leur microstructure. D'après des études récentes [12], cet échantillon est une matière première de couche de fondation en construction routière. L'objectif de l'ajout du ciment est de pouvoir utiliser cet échantillon comme matière première de couche de base.

#### **IV.2. Caractéristiques physico-chimiques du ciment utilisé.**

Le ciment utilisé dans l'étude est du ciment Portland CPA 45 produit par la cimenterie « Diamond Cement » du Burkina Faso. Dans le **tableau IV.1** sont mentionnées ses compositions chimique et minéralogique fournies par le fabricant ainsi que quelques caractéristiques physico-chimiques (densités absolue et apparent, temps de début de prise) que nous avons déterminées.

**Tableau IV. 1: Compositions chimique et minéralogique et quelques propriétés physiques du ciment utilisé.**

<b>Composition Chimique</b>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	C.L.	R.I	P.F
	20,12	5,73	4,06	1,18	64,82	0,39	2,68	0,08	0,17	0,80	0,28	0,27
<b>Minéralogie</b>	<b>C<sub>3</sub>S<sup>a</sup></b>			<b>C<sub>2</sub>S<sup>b</sup></b>			<b>C<sub>3</sub>A<sup>c</sup></b>			<b>C<sub>4</sub>AF<sup>d</sup></b>		
	55,70			15,68			8,31			12,34		
<b>Propriétés physiques</b>	<b>Densité absolue</b>			<b>Densité apparente</b>			<b>Temps de début de prise (h)</b>					
	3,02			1,06			3					

C.L : Chaux libre; R.I : Résidus insolubles, P.F. : Perte au feu (1000°C) .

a: silicate tricalcite ou alite, b : silicate bicalcite ou belite, c : aluminat tricalcite, d : ferrite d'aluminat tetracalcite.

Le mélange (C<sub>3</sub>A +C<sub>4</sub>AF) est appelé célite.

### IV.3. Techniques et procédures expérimentales

Les mélanges graveleux latéritiques- ciment (pourcentage du ciment variant entre 2 et 8%) ont été étudiés. Le graveleux latéritique a été étuvé à 105°C pendant 24 heures puis mélangé manuellement (afin d'éviter une modification de la granulométrie) à la quantité appropriée de ciment. Les mélanges obtenus ont été conservés dans des sachets plastiques hermétiquement fermés afin d'éviter la contamination par l'humidité de l'air avant les analyses.

L'indice de plasticité (IP) et la valeur au bleu de méthylène des mélanges ont été déterminés selon respectivement les normes NF P94-051 [13] et NF P 94-068 [14]. Les références du Proctor modifié (la teneur en eau optimale (TEO) et la densité sèche maximale (DSM) et la portance CBR de ces mélanges ont été estimées respectivement selon les normes NF P94-093 [15] et NF P94-078 [16]. La portance CBR a été déterminée sur deux lots d'éprouvettes :

- un premier lot d'éprouvettes immédiatement immergées pendant 4 jours,
- un second lot d'éprouvettes ayant subi un temps de cure 3 jours à l'air puis immergées pendant 4 jours.

Le poinçonnement a été réalisé avec une presse universelle type SEDITECH.

Les essais mécaniques ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques issues des mélanges. Elles ont été moulées dans des moules CBR à l'optimum Proctor modifié

puis conservées à la température de la salle pendant 7, 14 et 28 jours. Les résistances à la compression simple et la traction par fendage (Essai brésilien) ont été réalisés selon respectivement les normes NF P 18-406 [17] et NF P18-408 [18]. L'appareil utilisé est une presse électromécanique universelle type SEDITECH.

La détermination de la composition minéralogique par diffraction des rayons- X a été faite sur des poudres issues du broyage des éprouvettes des essais mécaniques. Le diffractomètre X utilisé est de marque Philips X'Pert MPD équipé d'une anticathode de la raie K $\alpha$  du cuivre ( $\lambda=1,5418 \text{ \AA}$ ). Les analyses par infrarouge ont été faites sur des mélanges de 1mg d'échantillons graveleux latéritiques- ciment et 150mg de KBr. L'appareil utilisé est un spectrophotomètre de type Nicolet 510 FT. La zone de fréquence choisie a été de 400-400cm<sup>-1</sup>. Les changements thermiques de ces mélanges ont été mis en évidence par un appareil type Labsys-Setaram fonctionnant à la vitesse de chauffe de 10°C/mn et sous atmosphère inerte d'azote.

Les observations microscopiques ont été faites sur des pièces d'échantillons provenant des éprouvettes ayant subi les essais mécaniques après un dépôt de carbone sous vide. L'appareil utilisé est un microscope électronique à balayage type Jeol JSM 5500 équipé d'un analyseur Falcon EDAX. Les analyses chimiques élémentaires ont été réalisées sans standard (méthode ZAF). La résolution maximale tourne autour de 3,5 nm.

#### **IV.4. Caractérisations minéralogique et microstructurale**

##### **IV.4.1. Composition minéralogique**

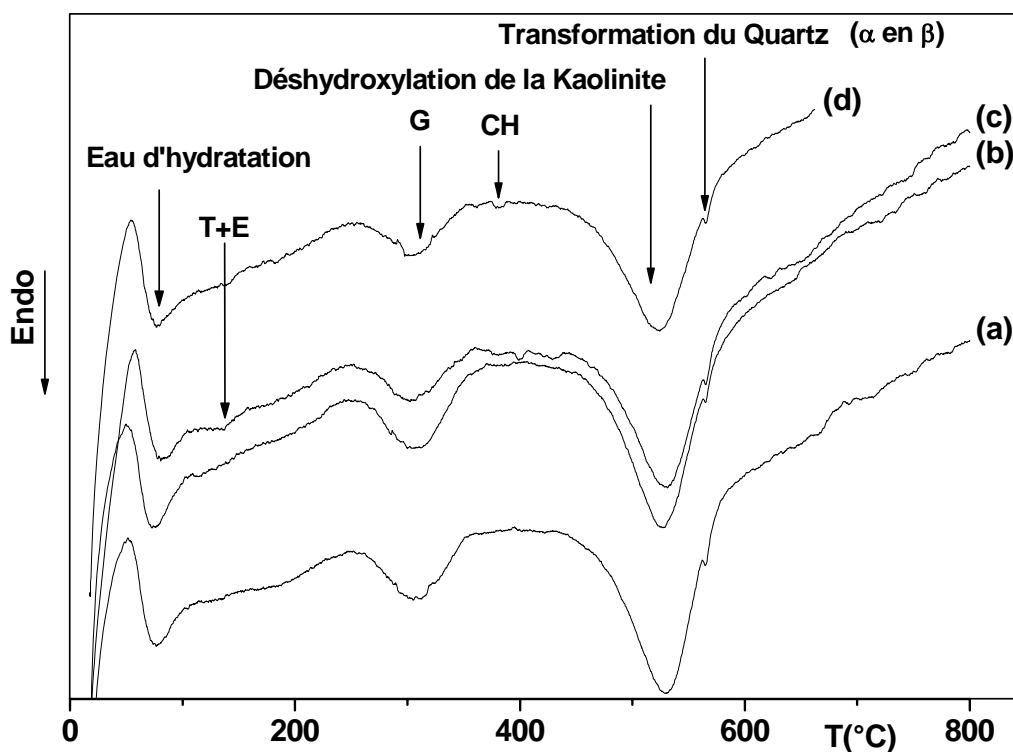
Les diffractogrammes de l'échantillon brut et de ses mélanges avec le ciment sont présentés à la **figure IV.1**.



Les diffractogrammes montrent que l'ajout du ciment aux graveleux latéritiques induit la formation de l'ettringite ( $\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ), de la calcite et de la portlandite (CH).

Comparativement à la portlandite, l'ettringite et la calcite apparaissent avec l'ajout d'une quantité de ciment. Des raies attribuables à la tobermorite 1,4 nm qui est un silicate de calcium hydraté (CSH) type I apparaissent. Cette espèce minérale est donc présente dans les mélanges graveleux latéritiques-ciment.

Les courbes d'analyse thermique différentielle sont représentées sur la **figure IV.2**.



**Figure IV. 2 : Thermogrammes de l'échantillon brut (a) et de ses mélanges avec le ciment (b : 2% ; c : 3% ; d : 8% de ciment).**

G : Goethite ; CH : Portlandite ; E : Ettringite ; T : Tobermorite.



Les thermogrammes présentent des accidents endothermiques autour de 80, 350, 530 et 567°C correspondant respectivement à la perte d'eau d'hydratation, à la perte d'eau de cristallisation de la goethite, à la déshydroxylation de la kaolinite et à la transformation du quartz  $\alpha$  à  $\beta$ .

L'accident thermique peu marqué autour de 150°C est attribuable à la déshydroxylation du silicate de calcium hydraté (CSH) type tobermorite et à l'ettringite [19-22] tandis que celui autour de 385°C est relatif à la déshydroxylation de la portlandite formé lors de l'hydratation du ciment.

La surface du pic de déshydroxylation de la kaolinite décroît avec l'ajout du ciment. Cela serait dû à l'implication de la kaolinite dans la réaction pouzzolanique [10].

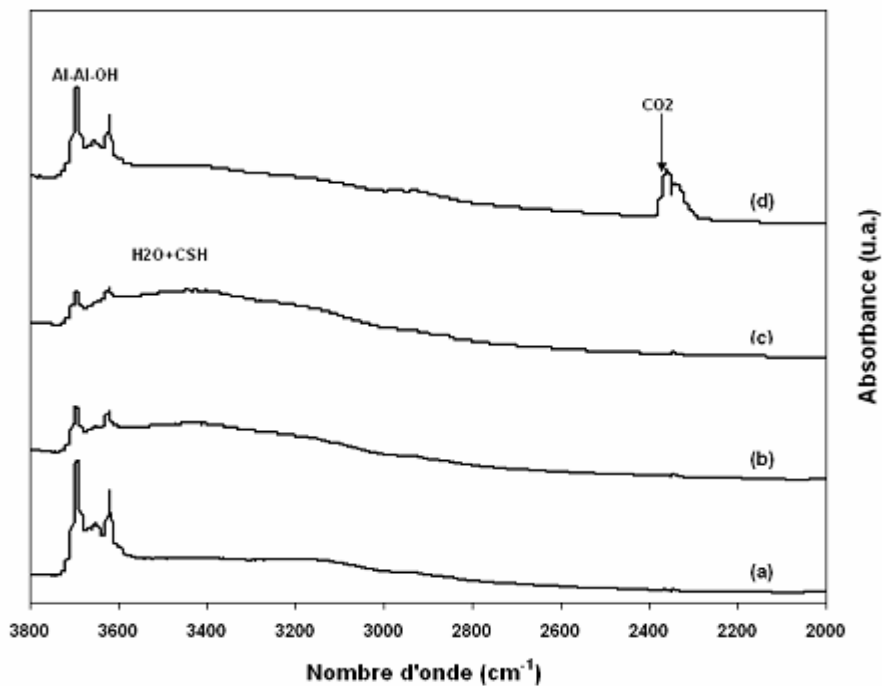
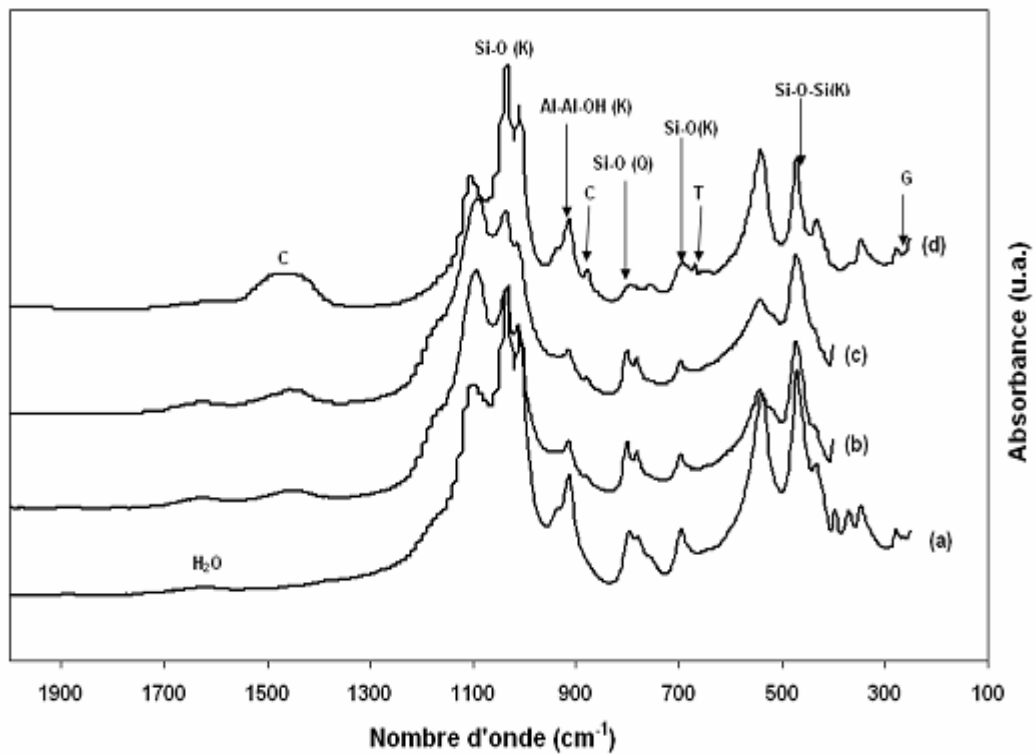
Les spectres I.R. de l'échantillon brut et de ses mélanges avec le ciment sont présentés sur la **figure IV. 3**.

Le spectre de l'échantillon brut (**figure IV. 3-a**) montre des bandes à 800 et 781 $\text{cm}^{-1}$  correspondant aux vibrations de Si-O du quartz. Il montre aussi la présence de la kaolinite caractérisée par les bandes suivantes :

- 3700, 3668 et 3620  $\text{cm}^{-1}$  : vibrations de valence de OH,
- 1100 et 1050  $\text{cm}^{-1}$  : vibrations de valence Si-O,
- 916 $\text{cm}^{-1}$  : vibration d'élongation OH,
- 696  $\text{cm}^{-1}$  : vibration Si-O perpendiculaire,
- 472 $\text{cm}^{-1}$  : vibration de déformation Si-O-Si,
- 520 $\text{cm}^{-1}$  : vibration de déformation de Al-O-Si [23-27].

La goethite et l'eau hygroscopique sont mises en évidence par l'existence des bandes respectives autour de 280 et 1650 $\text{cm}^{-1}$ .

Les principales bandes de la kaolinite de notre échantillon sont comparables à celles de **KGa2** (une kaolinite de faible cristallinité extraite dans l'Etat de Georgie aux USA). La kaolinite de l'échantillon et **KGa2** ont donc des cristallinités proches [26].



**Figure IV. 3 : Spectres infrarouge des graveleux latéritiques (a) et de ses mélanges contenant 2% (b), 3% (c) et 8% de ciment (d).**

K : Kaolinite, Q : Quartz, C : Calcite, T : Tobermorite, G : Goethite, CSH : Silicate de calcium hydraté.

Avec l'ajout du ciment **figure IV. 3 (b, c et d)**, de nouvelles bandes apparaissent. Les bandes autour de 1470 et 877 $\text{cm}^{-1}$  montrent la présence de la calcite [28] tandis que celle autour de 2360 $\text{cm}^{-1}$  prouve la présence du gaz carbonique dissous dans des échantillons riches en ciment (**figure IV. 3d**).

La large bande autour de 3400 $\text{cm}^{-1}$  est attribuée à la fois à l'eau d'hydratation et à la vibration de valence des hydroxyles du silicate de calcium hydraté (tobermorite) et la bande autour de 670 $\text{cm}^{-1}$  confirme la présence de la tobermorite [29, 30].

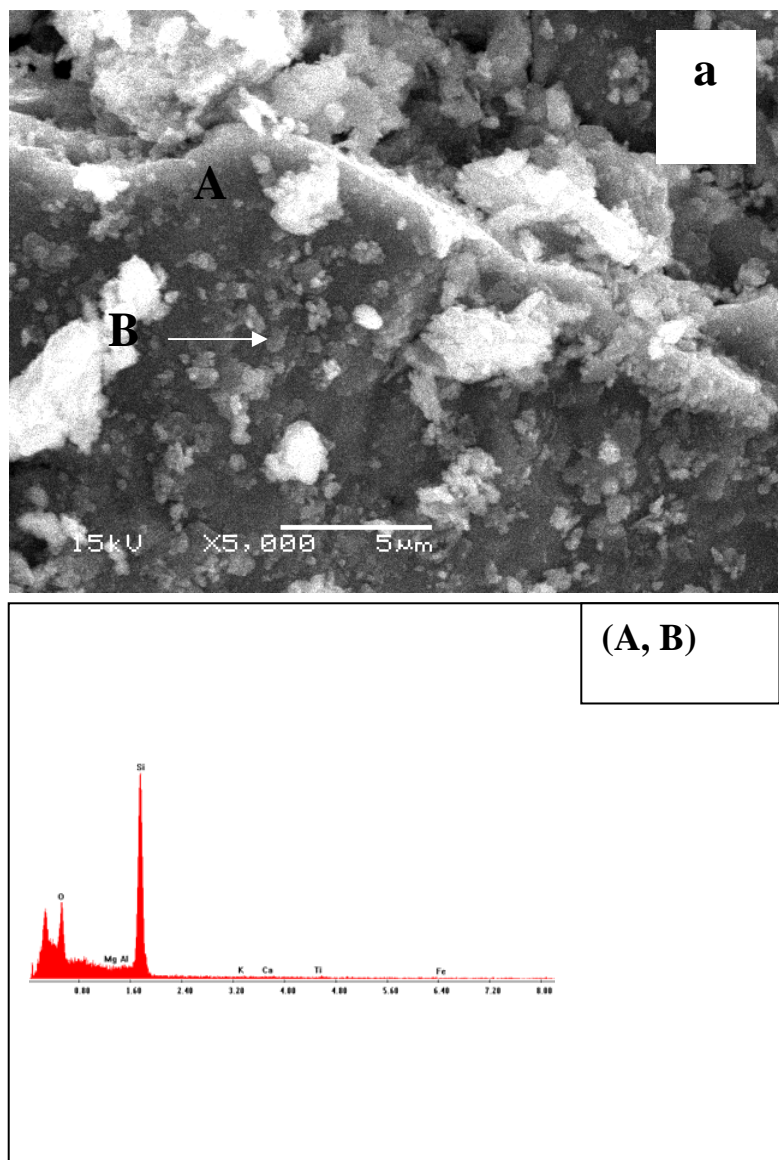
#### **IV.4.2. Investigation microstructurale**

Des particules isolées de quartz (**figure IV. 4a ; Zones A et B**) et de kaolinite (**figure IV. 4b ; Zone C**) ont été identifiées dans l'échantillon brut.

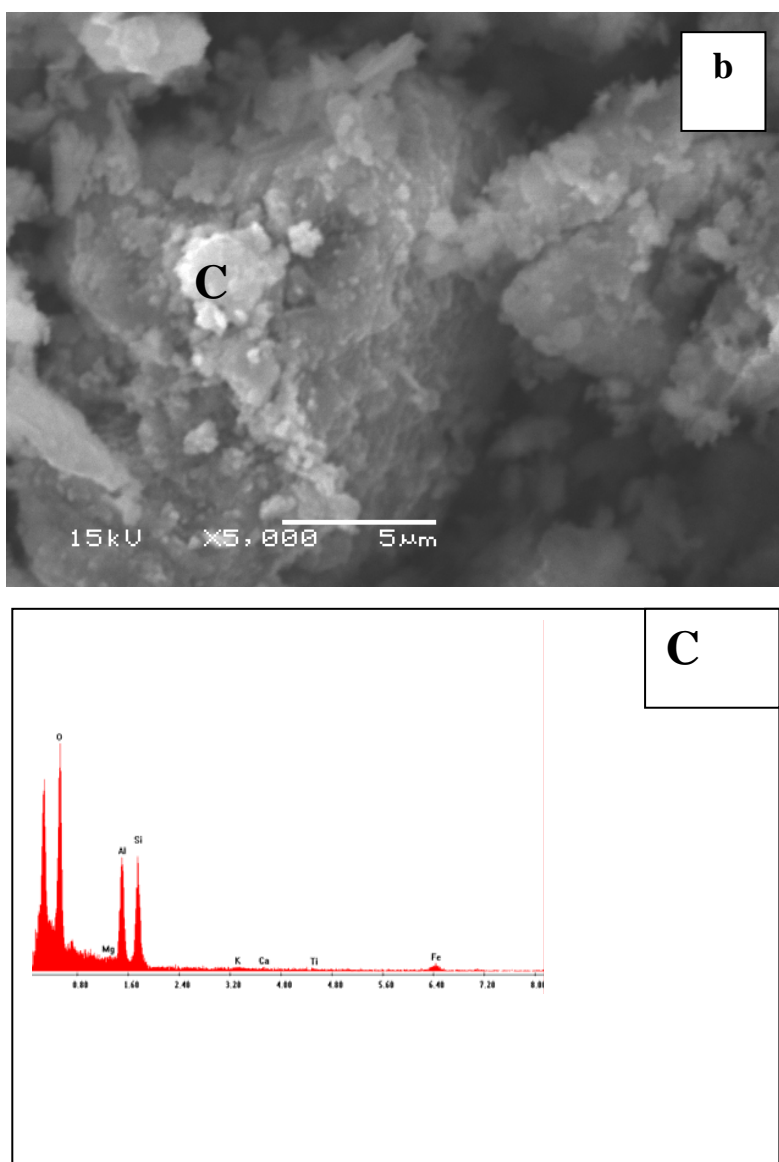
Cependant pour de faibles teneurs en ciment, des agglomérats de particules se sont développés (**figure IV. 4c**) et l'oxyhydroxyde de fer de formule  $\text{FH}_3$  ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) a été bien mis en évidence (**figure IV. 4c ; Zone D**) [31]. L'agglomération semble être la conséquence de la floculation, laquelle résulte de la réaction d'échange cationique entre les cations compensateurs des charges de l'échantillon et les cations  $\text{Ca}^{+2}$  qui dérivent de la dissociation de la portlandite en milieu aqueux ; un composé formé lors de l'hydratation du ciment [10]. Des particules constituées essentiellement de calcium et de soufre ont été observées (**figure IV. 4d ; Zone E**). Ces particules correspondent à l'ettringite ( $C/\bar{S} = 1,77$ ) qui provient de la réaction entre le gypse et l'aluminate tricalcite en milieu aqueux.

L'augmentation de la quantité du ciment a entraîné l'existence des zones riches en soufre et calcium constituées de portlandite et/ou de la calcite, l'ettringite et la tobermorite (**figure IV. 4d ; Zone F**) [32, 33]. En se référant à certains auteurs [30, 34, 35], la tobermorite qui est un silicate de calcium hydraté (CSH) est issue de la réaction d'hydratation du  $\text{C}_3\text{S}$  et  $\text{C}_2\text{S}$  qui sont des composantes du ciment mais sa partielle formation suivant la réaction pouzzolanique impliquant la kaolinite et la portlandite est aussi plausible.

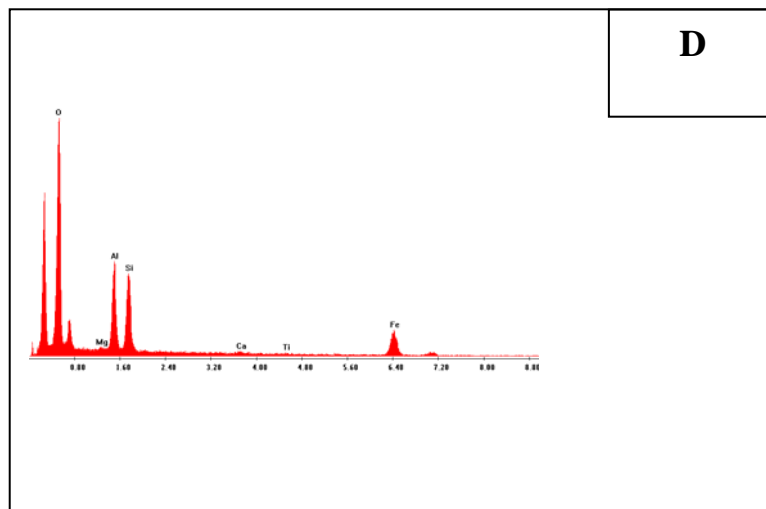
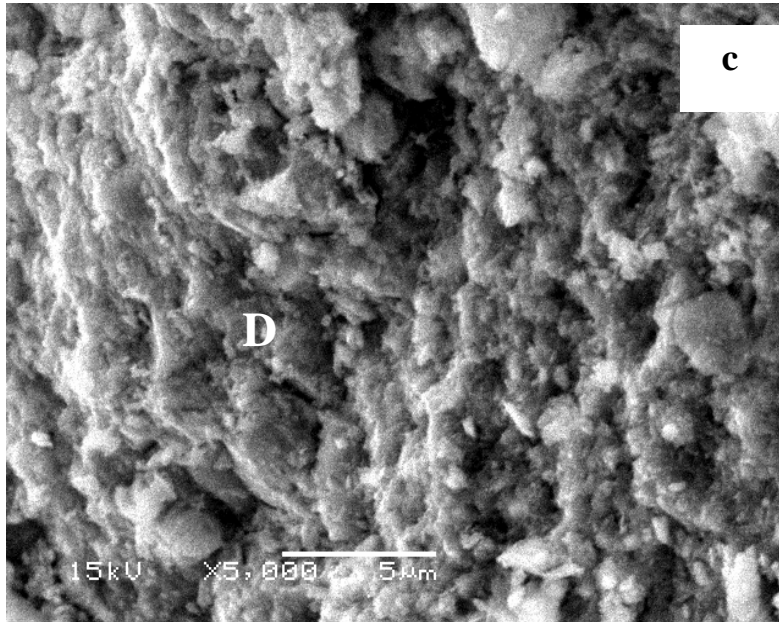
Pour de fortes teneurs en ciment (8% ciment) (**figure IV. 4 (e, f) ; Zones G et H**), l'ettringite est moins présente. En se basant sur les travaux antérieurs [36], il est apparu que la réaction entre les ions  $\text{SO}_4^{2-}$  provenant du gypse et  $\text{C}_3\text{A}$  pour former l'ettringite devient minoritaire comparativement à la fixation des ions  $\text{SO}_4^{2-}$  sur le CSH. La fixation de ces ions sulfates est favorisée par l'alcalinité du milieu ( $\text{pH}=11,41$ ). D'autre part pour de fortes teneurs en ciment, les précipités de tobermorite deviennent abondants (**figure IV. 4f ; Zone H**).



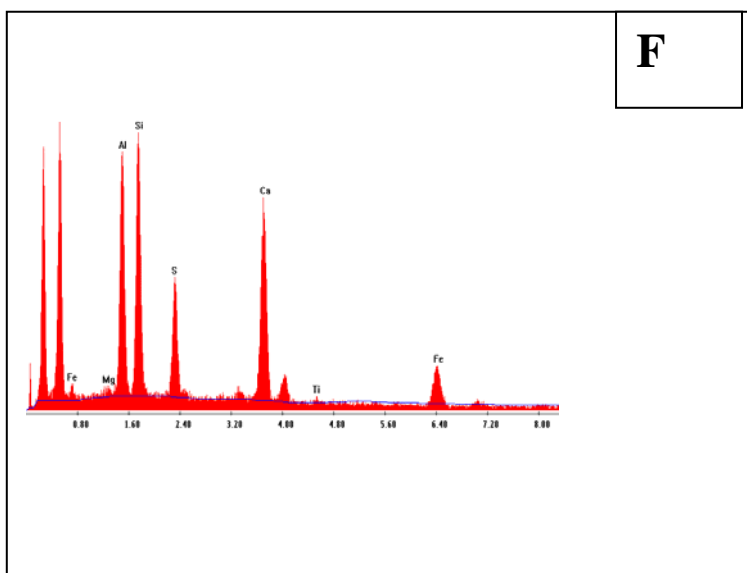
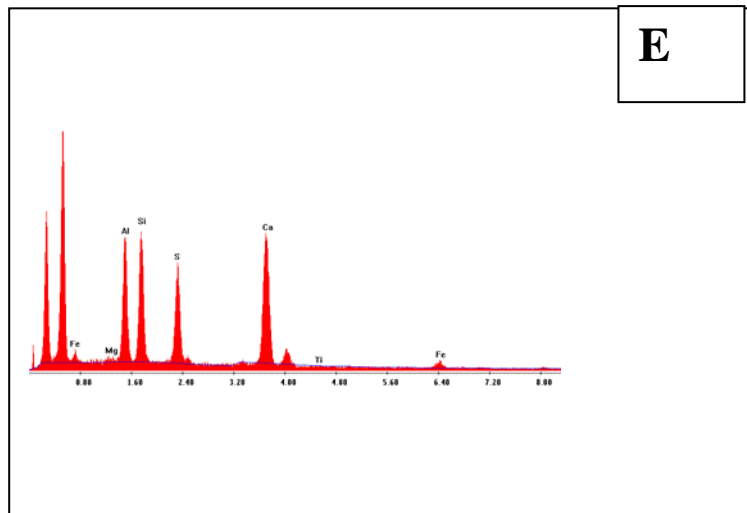
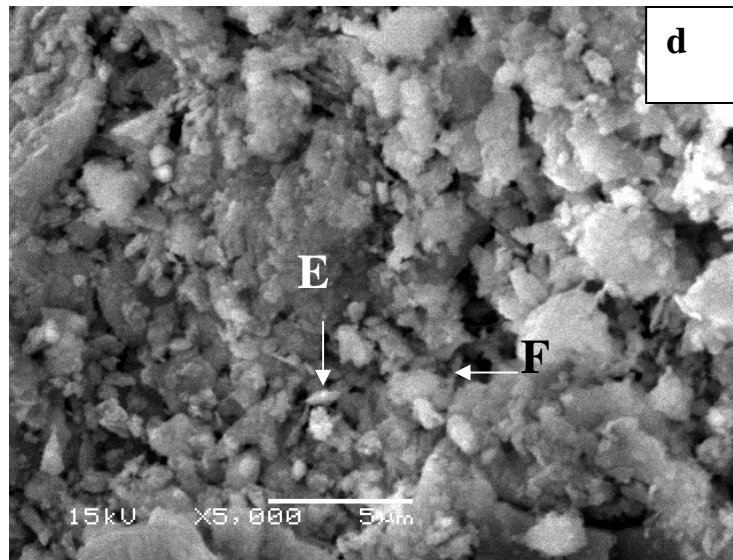
**Figure IV. 4 (a) : Micrographes par MEB et analyses EDAX des zones A et B du graveleux latéritique**



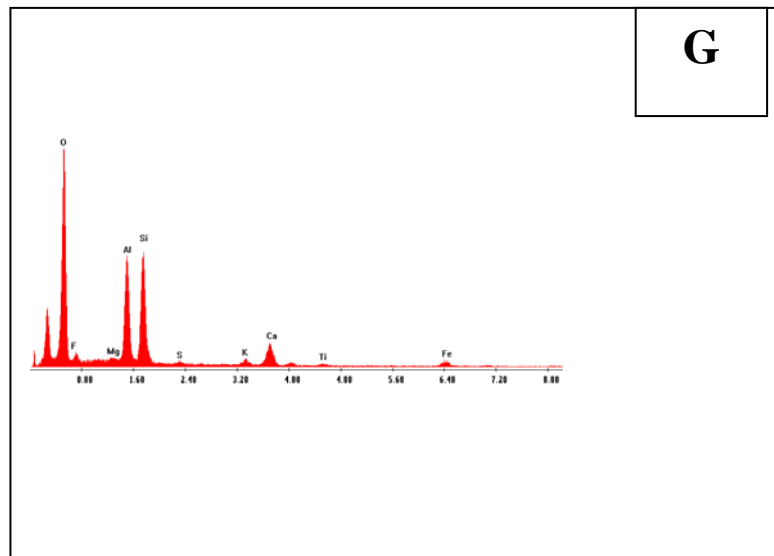
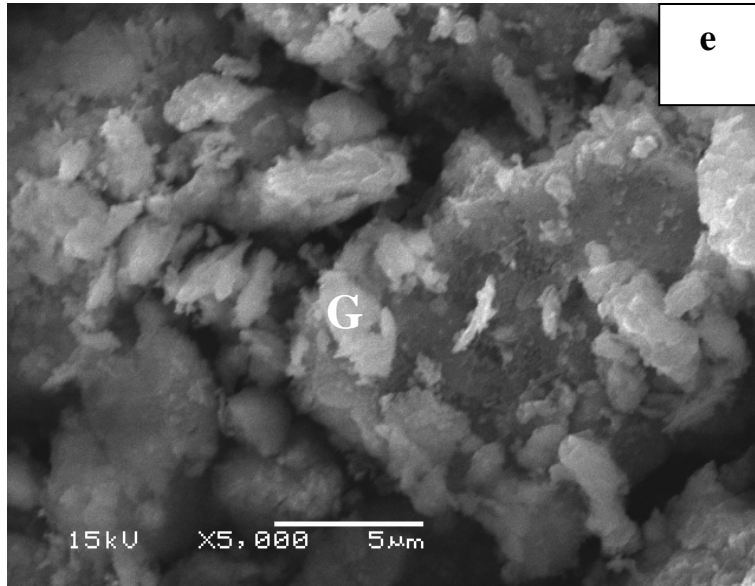
**Figure IV. 4 (b) : Micrographes par MEB et analyse EDAX de la zone C du graveleux latéritique**



**Figure IV. 4c : Micrographe par MEB et analyse EDAX de la zone D du graveleux latéritique+2% ciment**

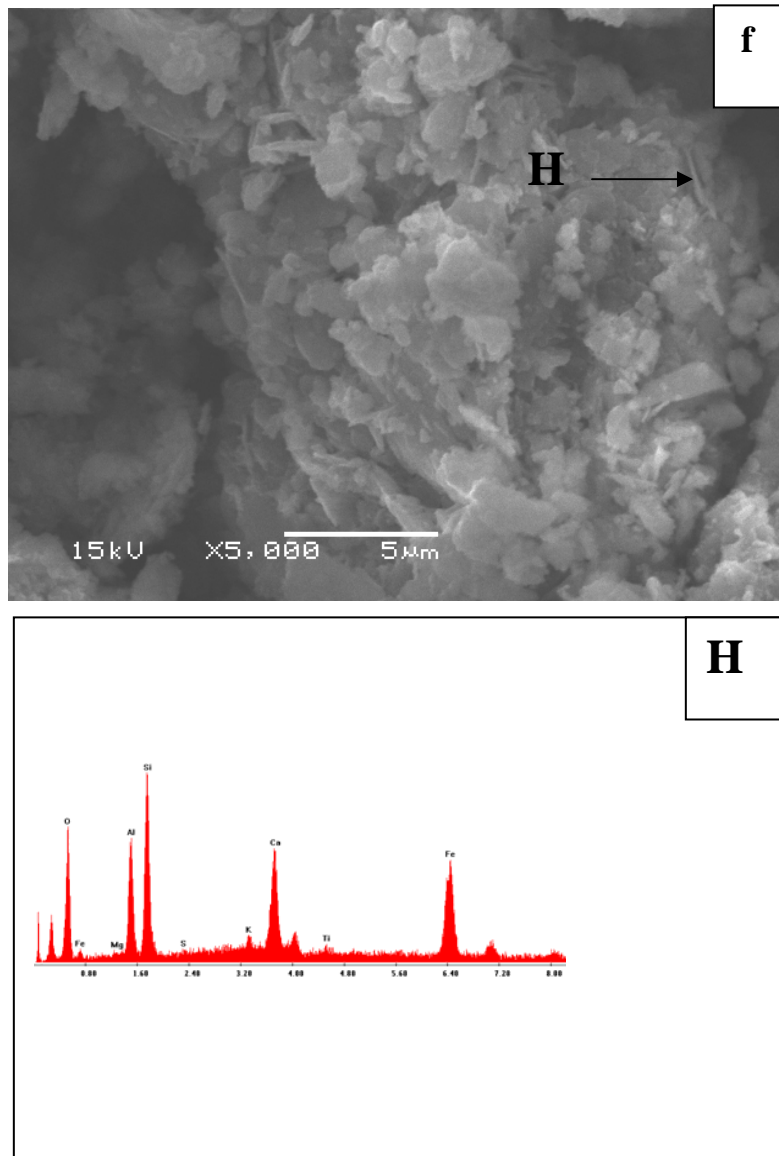


**Figure IV. 4d : Micrographie par MEB et analyses EDAX des zones E et F du graveleux latéritique+3% Ciment**



**Figure IV. 4e : Micrographe par MEB et analyse EDAX de la zone G du graveleux latéritique+8% Ciment**

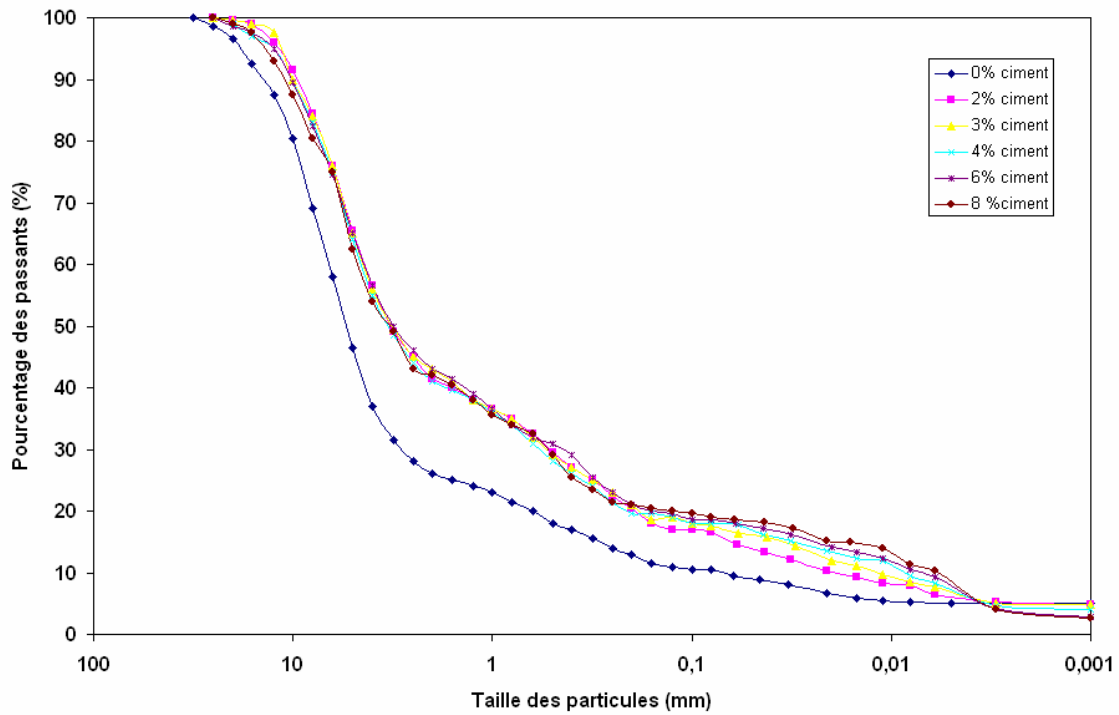




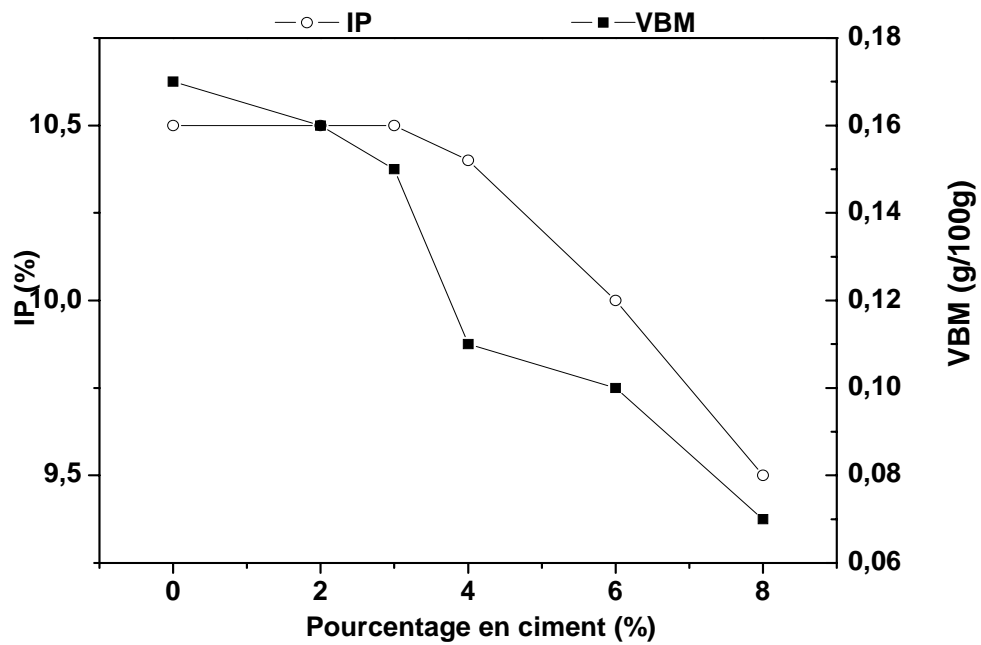
**Figure IV. 4f : Micrographe par MEB et analyse EDAX de la zone H du graveleux latéritique+8% Ciment**

#### **IV.5. Propriétés géotechniques et mécaniques**

La distribution des tailles des particules, l'indice de plasticité (IP) et la valeur au bleu de méthylène (VBM) de l'échantillon brut et des mélanges avec le ciment sont représentés sur les **figures IV. 5 et 6**.



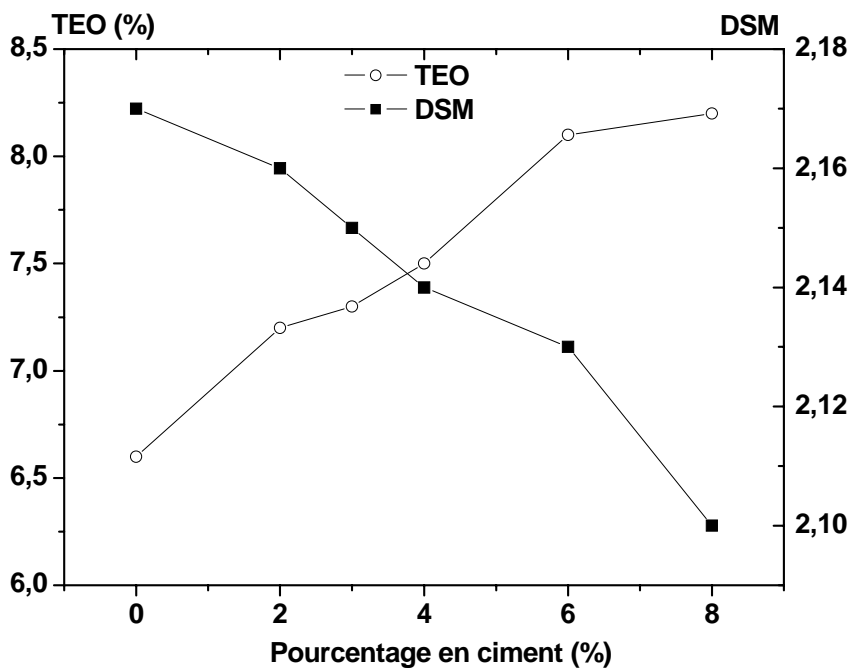
**Figure IV. 5 : Courbes d'analyse granulométrique complète de l'échantillon brut et des mélanges avec le ciment.**



**Figure IV. 6 : Variations de l'indice de plasticité (IP) et de la valeur au bleu de méthylène (VBM) avec le pourcentage de ciment.**

La **figure IV.5** montre globalement l'augmentation de la taille des particules de l'échantillon brut avec l'ajout du ciment. En effet les quantités de limons et de sable augmentent. Cependant la fraction argileuse diminue avec cet ajout. L'indice de plasticité et la valeur au bleu de méthylène diminuent avec l'ajout du ciment. L'ensemble de ces résultats s'explique en grande partie par la réaction d'échange cationique entre l'échantillon brut et les cations  $\text{Ca}^{+2}$  libérés durant l'hydratation du ciment. La réaction pouzzolanique impliquant la fraction argileuse est aussi responsable de la réduction de l'indice de plasticité et de la valeur au bleu de méthylène notamment pour des pourcentages de ciment  $\geq 6\%$ .

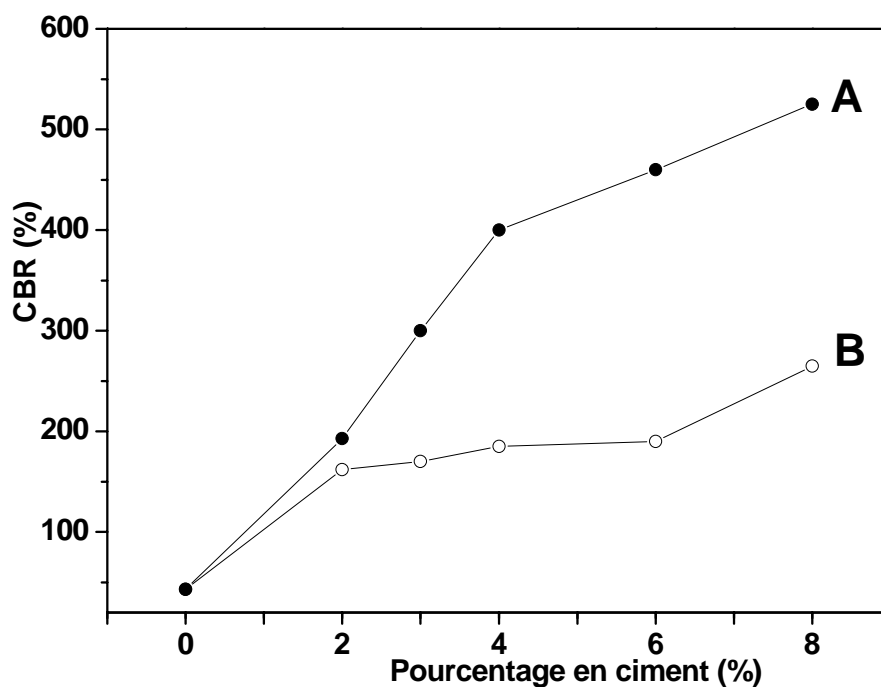
La teneur en eau optimale (TEO) et la densité sèche maximale (DSM) sont présentées sur la **figure IV. 7**.



**Figure IV. 7 : Variations de la TEO et de la DSM avec l'ajout du ciment.**

La teneur en eau optimale croît tandis que la densité sèche maximale décroît avec l'ajout du ciment. L'augmentation de la TEO est due à la forte affinité du ciment vis-à-vis de l'eau. L'augmentation de la quantité de ciment requiert plus d'eau pour dissocier la portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) et pour produire des cations  $\text{Ca}^{+2}$  nécessaires aux réactions d'échange cationique. La réduction de la DSM est due au fait que l'ajout du ciment crée l'agrégation des particules et de ce fait génère un plus grand volume. Cela entraîne une modification de la distribution de la taille des particules. Ce résultat est en accord avec celui rapporté par Osula en 1991 sur les latérites du Nigeria amendées par le ciment [10].

La variation du CBR avec la quantité du ciment est reportée sur la **figure IV. 8**.



**Figure IV. 8 : Variation du CBR avec l'ajout du ciment**

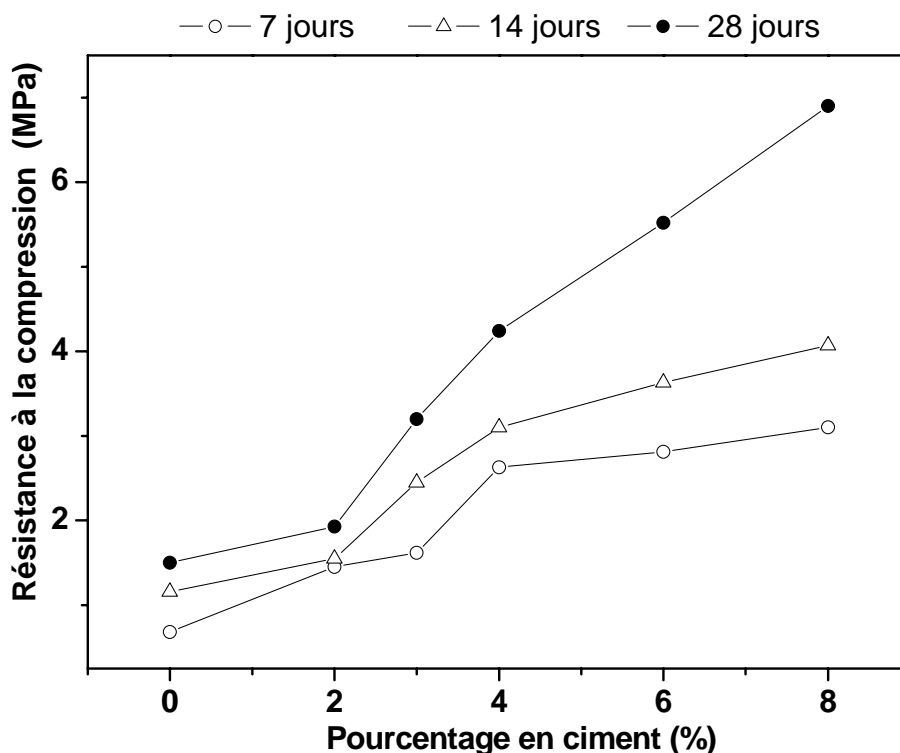
A : Eprouvettes immédiatement immergées pendant 4 jours

B : Eprouvettes ayant subi 3 jours de cure à l'air + 4 jours d'immersion

L'augmentation du CBR est due au développement continu de la tobermorite qui est bien connue comme un composé type « ciment ». Les valeurs élevées du CBR pour

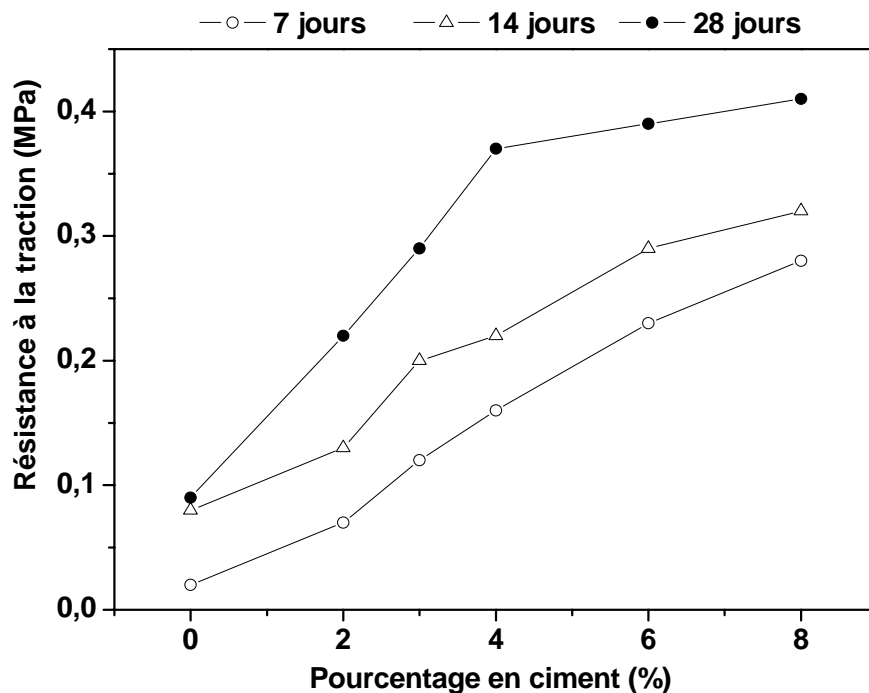
les éprouvettes immédiatement immergées résultent du processus ininterrompu de l'hydratation du ciment. Pour des éprouvettes ayant subi une cure de 3 jours à l'air avant d'être immergées, un tel processus ne pourrait avoir lieu, compte tenu du fait que le temps de prise du ciment est de 3 heures. Les évolutions observées pour le CBR sont en désaccord avec les résultats rapportés par Messou [2]. Cette discordance serait liée à la différence au niveau de la quantité des minéraux argileux : à cause de leur teneur, les réactions pouzzolaniques impliquant les minéraux argileux pour le graveleux latéritique étudié sont moins significatives comparativement à celles qui interviennent dans les latérites riches en argiles étudiées par Messou [2]. Les éprouvettes élaborées dans notre étude se comportent comme un béton maigre à cause des fortes teneurs en gravier fin et en sable. Il est bien admis que l'eau est très importante pour la consolidation du béton au jeune âge.

Les variations des résistances à la compression et à la traction par fendage sont présentées sur les **figures IV. 9 et 10**.



**Figure IV. 9 : Variation de la résistance à la compression simple avec la quantité de ciment et le temps de cure**

L'augmentation observée pour ces résistances est principalement attribuée à la formation de la tobermorite dont la cristallisation ultérieure dépend du temps de cure. Elle est en outre due à la formation de faibles quantités de calcite et de la portlandite qui ont un effet néfaste sur les propriétés mécaniques.



**Figure IV.10 : Variation de la résistance à la traction par fendage avec la quantité de ciment et le temps de cure**

Au terme des études sur l'amélioration des graveleux latéritiques au ciment, nous constatons que :

- IP varie entre 9,5 - 10,5%,
- la TEO et la DSM varient entre 7,2-8,2% et 2,1-2,16 respectivement,
- les valeurs du CBR sont supérieures à 160%,
- la résistance à la compression simple varie entre 1,45-3,1MPa.

Les graveleux latéritiques amendés au ciment conviennent donc pour la confection d'une couche de base en construction routière [3].

Les résistances à la compression simple pour notre échantillon amendé au ciment sont supérieures à celles rapportées par Messou [2], Bahar *et al.* [37], Basha *et al.*

[38] et Koliass et *al.* [21] sur les sols latéritiques améliorés au ciment. Cela est dû au fait que les sols étudiés par ces auteurs sont plus riches en minéraux argileux que l'échantillon étudié dans ce mémoire.

#### **IV.6. Conclusions**

L'ajout du ciment aux graveleux latéritiques induit la formation de la tobermorite (silicate de calcium hydraté : CSH) 1,4 nm, de l'ettringite, de la portlandite, de la calcite et d'un oxyhydroxide de fer. Ces nouvelles phases minérales formées sont responsables de l'homogénéité de la microstructure et de l'amélioration des propriétés géotechniques et mécaniques. Ces impacts positifs sont essentiellement dus au développement de cette tobermorite qui dérive essentiellement de la réaction d'hydratation du ciment. La formation de ce silicate de calcium hydraté par suite de la réaction pouzzolanique impliquant les minéraux argileux semble être insignifiante.

Les composites obtenus conviennent tous pour la confection d'une couche de base en construction routière quel que soit l'intensité du trafic. Pour des raisons économiques, une petite quantité de ciment telle que 2% est suffisante pour obtenir un bon matériau de couche de base en construction routière.

## Références bibliographiques

- [1] Gidigasu M D. Lateritic Soil Engineering, Elsevier Science Amsterdam, The Netherlands, 1976.
- [2] Messou M. Comportement mécanique d'une couche de base en graveleux latéritiques améliorés au ciment : cas des routes en Côte d'Ivoire. Thèse de Doct-Ing en Génie Civil à l' Ecole Nationale des Ponts et Chaussées Paris, 1980, 197p.
- [3] Bagarre E. Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière. ISTED 1990, 143p.
- [4] Tockol I, Massiera M, Chiasson P A, Maiga M. S. Les graveleux latéritiques dans les pays du Sahel: Cas des routes non revêtues. 7<sup>ème</sup> Congrès International de AIGI, Rotterdam (Holland) 1994, 3423-3431.
- [5] Attoh-Okine.NO. Lime treatment of laterite soils and gravels- revisited. Construc Build Mater1995; 9(5): 283-287.
- [6] Autret P. Latérites et graveleux latéritiques. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France, 1983, 38p.
- [7] Akoto B K A. The effect of repeated loading on the ultimate unconfined compressive strength of a lime stabilized laterite. Eng Geol 1986; 23: 125-135.
- [8] Attoh-Okine B. Stabilization effect of locally produced lime on selected lateritic soils. Construc Build Mater. 1990; 4(2): 86-91.
- [9] Osula D O A. Lime modification of problem laterite. Eng Geol. 1991; 30:141-154.
- [10] Osula D O A. A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite. Eng Geol. 1996; 42:71-81.
- [11] Simon A B, Giesecke J, Bidlo G. Use of lateritic soils for road construction in north Dahomey. Eng Geol. 1973; 7:197-218.
- [12] Millogo Y, Traoré K, Ouedraogo R, Kaboré K, Blanchart P, Thomassin JH. Geotechnical, mechanical, chemical and mineralogical characterization of lateritic gravels of Sapouy (Burkina Faso) used in road construction. Construc Build Mater. (in press).
- [13] NF P94-051, Détermination des limites d'Atterberg, Mars 1993, 15p.
- [14] NF P94-068. Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tache. , AFNOR., Novembre 1993, 8p.
- [15] NF P94-093, Détermination des références de compactage d'un matériau, Octobre 1999, 17p.



- [16] NF P94-078, Indice CBR après immersion- Indice CBR immédiat- Indice Portant Immédiat, Décembre 1992, 14p.
- [17] NF P 18-406, Bétons – Essai de compression, Décembre 1981, 3p.
- [18] NF P 18-408, Bétons – Essai de fendage, Décembre 1981, 3p.
- [19] Rojas MF, Sanchez de Rojas MI. The effect of high curing temperature on the kinetics in MK/lime and MK-bended cement matrices at 60°C. *Cem Concr Res.* 2003; 33: 643-649.
- [20] Assal H H. Influence of silica fume on the properties of fired then water cured lime-rich clay bricks. *Sil Ind.* 2003; 68 (5-6): 55-60.
- [21] Kolias S, Kasselouri-Rigopoulou V, Karahalios A. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly as hand cement. *Cem Concr Compos.* 2005; 27: 301-313.
- [22] Lanás J, Sirera R, Alvarez J I. Compositional changes in lime-based mortars exposed to different environments. *Thermochim Acta.* 2005; 429:219-226.
- [23] Farmer VC. The infrared spectra of minerals. Chapter 15: The layer silicates. Mineralogical Society, London, 1974, 331-363.
- [24] Cases JM, Lietard O, Yvon J, Delon JF. Etude des propriétés cristalochimiques, morphologiques, superficielles de kaolinites désordonnées. *Bull Minéra.* 1982; 105: 439-455.
- [25] Frost RL, Vassallo AM. The dehydroxylation of the kaolinite clay minerals using infrared emission spectroscopy. *Clays and Clay Miner.* 1996; 44 (5): 635-651.
- [26] Madejova J, Komadel P. Baseline studies of the clay minerals society source clays: infrared methods. *Clays and Clay Miner.* 2001; 49 (5) : 410-432.
- [27] Manju CS, Narayanan Nair V, Lalithambika M. Mineralogy, geochemistry and utilization study of the Madayi kaolin deposit, North Kerala, India. *Clays and Clay Miner.* 2001; 49 (4):355-369.
- [28] Guerrero A, Goni S. Microstructure and mechanical performance of Belite Cements from high calcium coal fly ash. *J Am Ceram Soc.* 2005; 88(7): 1845-1853.
- [29] Dutta DK, Bordoloi D, Prakash C. Hydratation of portland cement clinker in the presence of carbonaceous material. *Cem Concr Res.* 1995; 25: 1095 –1102.
- [30] Yu P, Kirkpatrick RJ, Poe B, McMillan PF, Cong X. Structure of calcium silicate hydrate (C-S-H): near-, mid-, and far-infrared spectroscopy. *J Am Ceram Soc.* 1999; 82(3): 742-748.
- [31] Journées ouvrages d'Art du Réseau des L.P.C., Lyon, 13 Avril 2005.
- [32] Klimesch DS, Ray A. Hydrogarnet formation during autoclaving at 180°C in unstirred metakaolin-lime-quartz slurries. *Cem Concr Res.* 1998; 28(8):1109-1119.

- [33] Gleize PJP, Muller A, Roman HR. Microstructural investigation of a silica fume-cement-lime mortar. *Cem Concr Compos.* 2003; 25: 171-175.
- [34] Mitchell DRG, Hinczak I, Day R A. Interaction of silica fume with calcium hydroxide solutions and hydrated cement pastes. *Cem Concr Res.* 1998; 28(11): 1571-1584.
- [35] Viallis-Terrisse H. Interaction des silicates de calcium hydratés, principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins. Analogie avec les argiles. Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne (France), UF des Sciences et Techniques, 2000, 256p.
- [36] Divet L, Randriambololona R. Delayed ettringite formation: the effect of temperature and basicity on the interaction of sulphate and C-S-H phase. *Cem Concr Res.* 1998; 28 (3): 357-363.
- [37] Bahar R, Benazzoug M, Kenai S. Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cem and Concr Compos.* 2004; 26: 811-820.
- [38] Basha EA, Hashim R, Mahmud HB, Muntohar AS. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construc Build Mater.* 2005; 19:448-453.

## **Chapitre V**

# **Microstructure et propriétés physiques des briques crues élaborées à partir d'une matière première argileuse améliorée à la chaux**

## **V.1. Introduction**

La terre crue est beaucoup utilisée dans les habitats traditionnels. Parmi ces multiples utilisations, on peut citer son emploi pour la confection des briques crues. L'utilisation de la terre crue en vue de produire ces briques crues pour la construction d'habitats dans les pays en voie de développement a quelques inconvénients liés essentiellement aux médiocres propriétés mécaniques de la terre crue.

Pour améliorer les propriétés physiques de cette terre crue, des débris végétaux, de la cendre volante et de faibles quantités de ciment ou de chaux y sont couramment introduites [1-9].

Si les processus chimiques et les propriétés géotechniques des terres amendées à la chaux ont été étudiés [1-8], les effets des ajouts de la chaux sur la microstructure et les propriétés physiques des briques crues à base d'argiles ont fait l'objet de peu de travaux scientifiques à notre connaissance.

L'objectif de ce travail est d'étudier les effets des ajouts de chaux sur les transformations microstructurales et les propriétés physiques : résistances à la compression et à la flexion trois points des briques crues élaborées à partir d'une matière première argileuse de Nadiapou (Burkina Faso).

## **V.2. Techniques et Procédures Expérimentales**

Pour l'élaboration des éprouvettes de briques, la matière première et la chaux vive ont été broyées jusqu'à une granulométrie  $<0,315\text{mm}$ . La poudre de matière première obtenue a été étuvée à  $105^{\circ}\text{C}$  pendant 24 h puis mélangée à différentes quantités (4-12%) de poudre de chaux vive. Une quantité optimale d'eau (30%) a été ajoutée au mélange obtenu. Les pâtes obtenues ont été homogénéisées dans un malaxeur à mâchoires pendant 15 mn puis pressées manuellement dans des moules parallélépipédiques (4cmx4cmx16cm) et gardées pendant 24 h avant démoulage. Les briques alors démoulées ont été gardées à la température de la salle pendant 7, 14, 21 et 90 jours afin de suivre l'évolution des propriétés physiques avec le temps de cure.

Les changements microstructuraux des briques crues ont été examinés par la diffraction des rayons X (DRX), spectroscopie infrarouge, analyse thermique différentielle (ATD), microscopie électronique à balayage (MEB) et spectrométrie à dispersion d'énergie (SDE). Les analyses par DRX ont été réalisées à l'aide d'un diffractomètre de marque Philips Xpert Pro MPD équipé avec la radiation K $\alpha$  du cuivre. Les spectres IR ont été enregistrés à l'aide d'un spectromètre de marque Nicolet 510 à transformée de Fourier. La zone balayée va de 4000 à 400cm<sup>-1</sup>. Les thermogrammes ont été enregistrés avec un appareil Labsys-Setaram opérant à la vitesse de chauffe de 10°C/mn sous atmosphère d'azote.

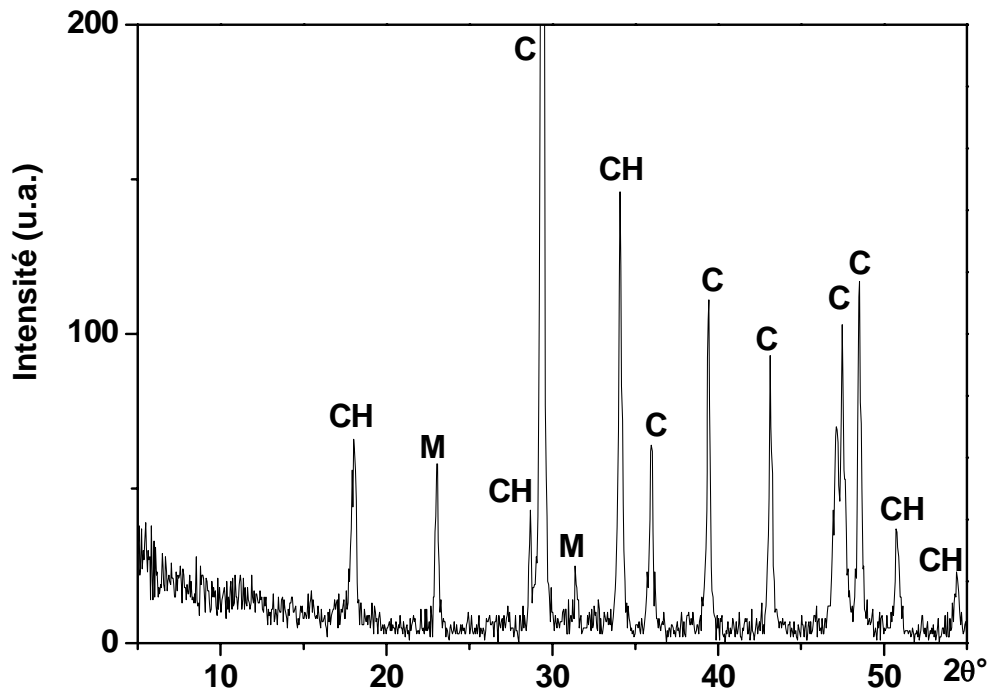
Pour l'examen au microscope électronique à balayage (MEB), des dépôts de carbone sous vide ont été faits sur des morceaux d'éprouvettes de briques. Le MEB utilisé est de marque Jeol JSM 5500 équipé d'un système Falcon EDAX. Les analyses chimiques élémentaires par la technique EDAX ont été faites sans standard (méthode ZAF). La résolution maximale tournait autour de 3,5 nm.

La résistance à la flexion 3 points des briques crues a été déterminée grâce à un appareil de marque R.M.U- Testing Bergamo, avec une vitesse d'application de la de 50N/s. La résistance à la compression simple a été déterminée à l'aide d'une presse hydraulique multitesteur type Seidner D 7940 Riedlingen. Toutes ces mesures ont été réalisées selon la norme NF P14-306 [10]. L'absorption d'eau des briques crues a été évaluée selon la norme NF P13-305 [11].

### **V.3. Caractérisation des matières premières**

#### **V.3.1. La chaux vive**

La chaux vive commerciale d'Espagne a été utilisée pour l'étude. Le diffractogramme de cette chaux vive (**figure V. 1**) montre qu'elle est constituée majoritairement de CaO et de Ca(OH)<sub>2</sub> ou portlandite et d'une espèce minérale de faible teneur qui est le carbonate de magnésium hydraté. Son analyse chimique montre qu'elle est constituée de 62,24% de CaO et de 36,75% de résidus insolubles formés essentiellement de quartz.



**Figure V.1 : Diffractogramme de la chaux vive utilisée**

CH:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , C :  $\text{CaO}$  ; M : Carbonate de magnésium hydraté

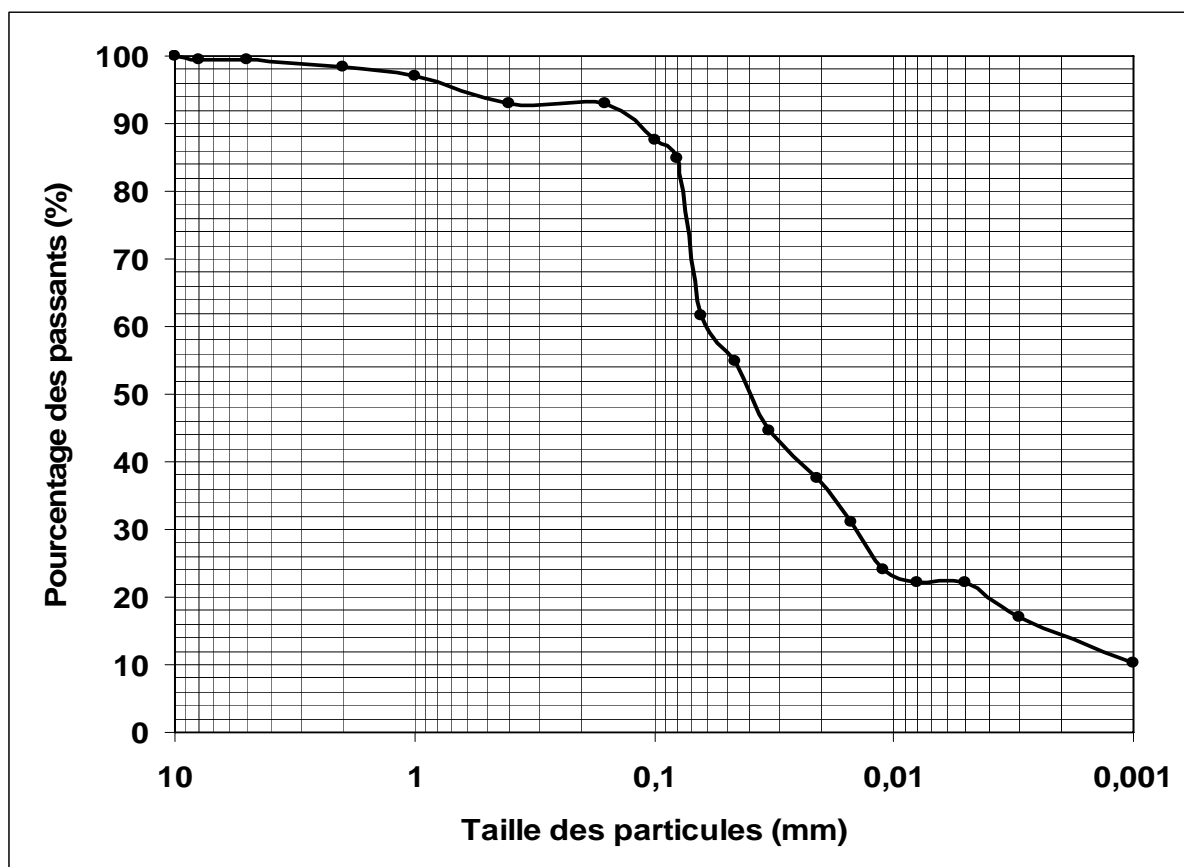
### V.3.2. La matière première argileuse

#### V.3.2.1. Caractéristiques physico-chimiques

La densité mesurée de 2,67, est proche de celle du quartz. L'échantillon est donc riche en quartz. La faible valeur de la perte au feu (6,27%) prédit que les minéraux argileux ne sont pas abondants et par conséquent le quartz semble être l'espèce minérale prédominante dans l'échantillon.

La valeur au bleu de méthylène évaluée à 0,74g/100g rapprochée aux données de la littérature [12], indique que la kaolinite est l'espèce argileuse dominante dans l'échantillon.

La courbe d'analyse granulométrique complète de l'échantillon est représentée sur la **figure V. 2**. L'examen de cette courbe montre que l'échantillon contient 12% d'argiles et 99,5% des particules passent au tamis de maille 5 mm. La limite de liquidité et l'indice de plasticité sont de 33,5 et 19 % respectivement. Au regard de ces résultats de granulométrie et de limites d' Atterberg, la matière première étudiée est utilisable pour la fabrication des briques crues qui pourraient être stabilisées aux liants hydrauliques : chaux et ciment, par exemple [13].



**Figure V. 2 : Courbe d'analyse granulométrique complète de l'échantillon**

### **V.3.2.2. Composition chimique et minéralogique**

#### **V.3.2.2.1. Composition chimique**

La composition chimique de l'échantillon est présentée dans le **tableau V.1**. L'échantillon est composé majoritairement de silice (79,36%). Cela laisse prévoir

que le quartz et les minéraux argileux y sont prédominants. L'alumine est en proportion acceptable (11,85%). Compte tenu de l'indice de plasticité (IP=19%), de la perte au feu (6,27%) et du taux d'alumine, le quartz est bien le minéral majoritaire dans l'échantillon. Le taux d'oxyde de fer (1,81%) bien que faible, laisse penser que l'échantillon contient des composés ferrifères.

**Tableau V. 1 : Composition chimique de l'échantillon**

<b>Oxydes</b>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	CuO	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	PF
%	79,36	11,85	1,81	tr	0,03	tr	tr	tr	0,33	1,27	6,27

tr : trace ; PF : perte au feu

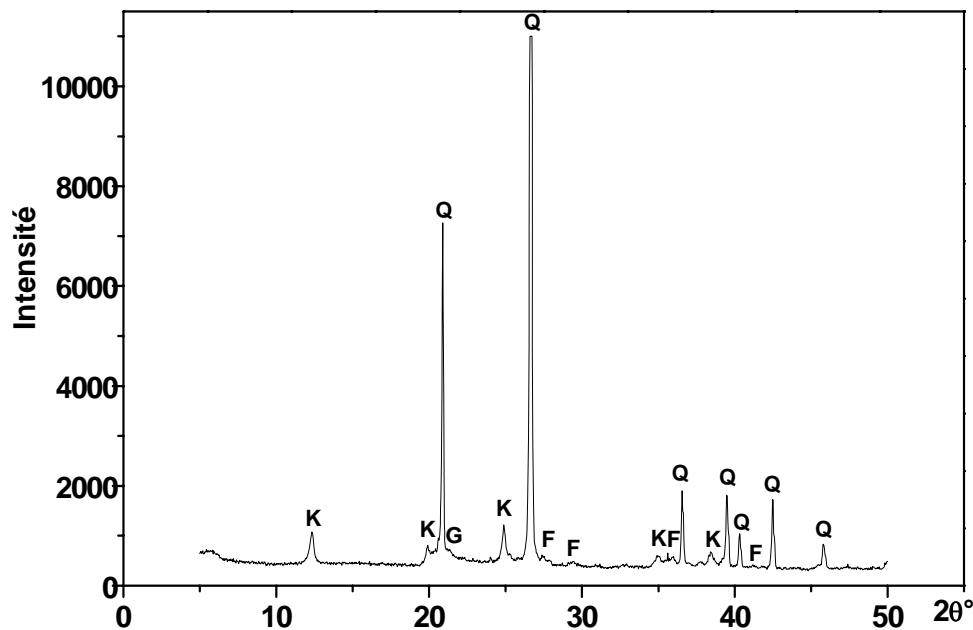
Les autres constituants sont en faible proportion ou à l'état de traces.

### **V.3.2.2.2. Composition minéralogique**

#### **V.3.2.2.2.1. Diffraction des rayons- X**

Le diffractogramme de la matière première est présenté sur la **figure V.3**. Le diffractogramme montre que celle-ci est essentiellement constituée de quartz, de kaolinite, de goethite et du feldspath potassique. Au regard des intensités des raies, le quartz est l'espèce minérale majoritaire comme le prévoyaient les résultats physico-chimiques et l'analyse chimique. La kaolinite est en proportion acceptable. Quant à la goethite et au feldspath potassique, ils se retrouvent en très faibles teneurs.



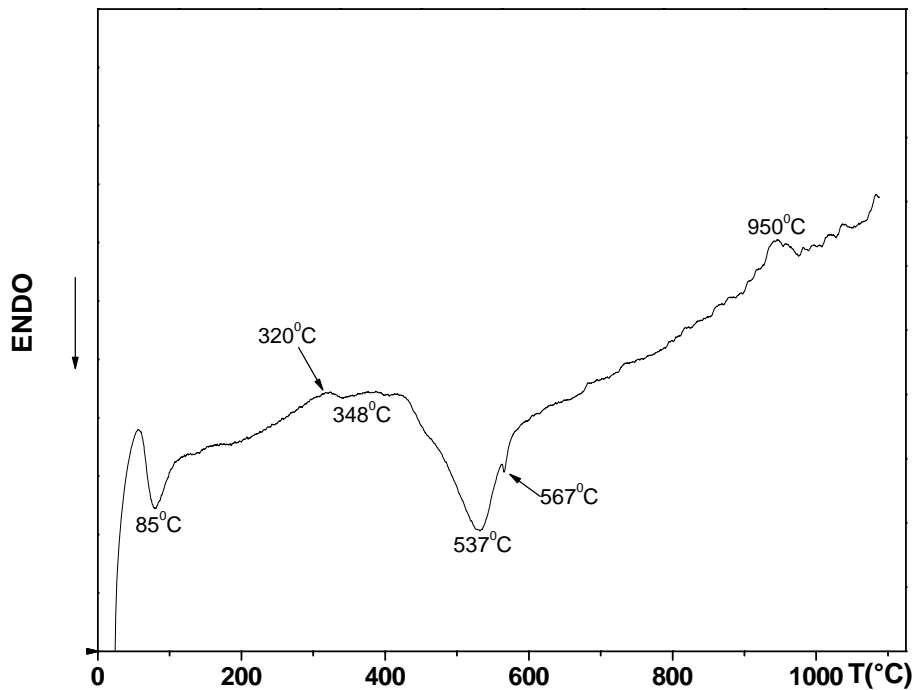


**Figure V. 3 : Diffractogramme de la matière première**

K : Kaolinite ; Q : Quartz ; G : Goethite ; F : Feldspath potassique

#### **V.3.2.2.2. Analyse thermique différentielle (A.T.D.)**

La courbe ATD de l'échantillon (**figure V. 4**) montre des accidents endothermiques autour de 85, 537, 567°C correspondant respectivement au départ d'eau hygroscopique, à la déhydroxylation de la kaolinite et sa transformation en métakaolinite et à la transformation du quartz  $\alpha$  en  $\beta$ . La présence de la goethite est prouvée par le faible accident thermique autour de 348°C. A cette température, la goethite est transformée en hématite. Les pics exothermiques autour de 320 et 955°C traduisent respectivement la présence de la matière organique et la réorganisation structurale de la métakaolinite [14].



**Figure V. 4 : Courbe ATD de l'échantillon étudié**

#### **V.3.2.2.2.3. Composition semi- quantitative de la matière première**

La composition semi- quantitative est présentée dans le **tableau V. 2**. Ce tableau rapporte que l'échantillon est composé majoritairement de quartz (65%), d'une quantité acceptable de kaolinite (30%) et de faibles teneurs de goethite (2%) et feldspath potassique (2%). La balance qui est de 1% est constituée de minéraux amorphes et surtout de la matière organique ou probablement des carbonates. Au vu de ces résultats, l'échantillon est utilisable pour la fabrication des briques car elle contient une proportion acceptable de kaolinite qui servira de liant des particules isolées.

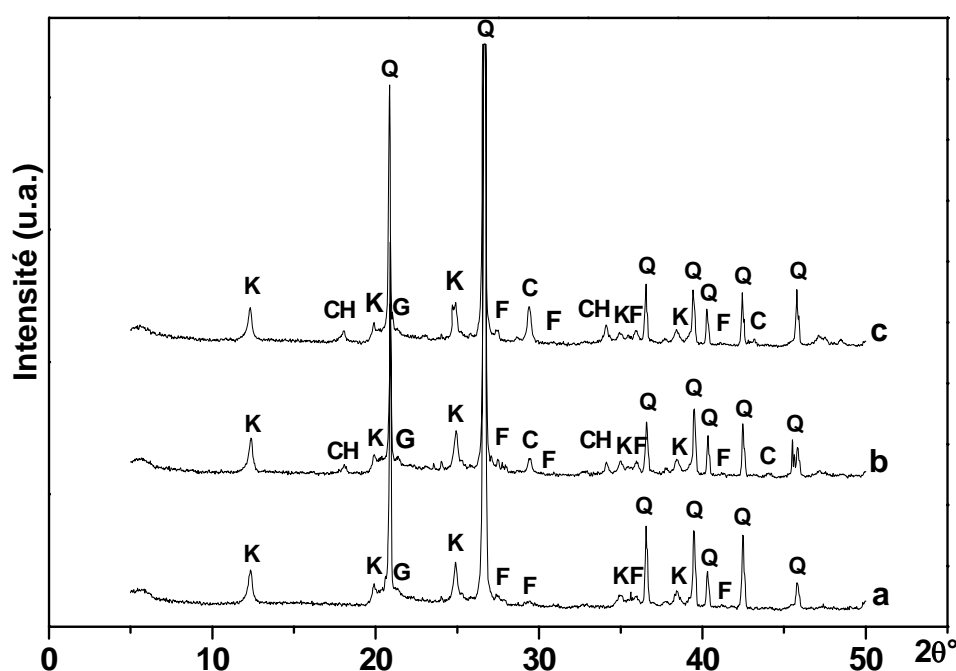
**Table V. 2: Composition semi- quantitative des phases minérales**

Phases cristallines	Quartz	Kaolinite	K-feldspath	Goéthite	Balance
Composition minéralogique (%)	65	30	2	2	1

#### V.4. Influence de la chaux sur la microstructure et les propriétés physiques des briques crues

##### V.4.1. Investigation microstructurale

Une analyse globale des diffractogrammes des poudres d'échantillons de briques crues amendées à la chaux (**figure V.5**) montre la présence de la kaolinite, du quartz, de la goéthite et du feldspath potassique ainsi que de la calcite et de la portlandite (CH). L'intensité des principales raies des deux derniers composés croît avec l'ajout de la chaux tandis que celle du quartz décroît légèrement.



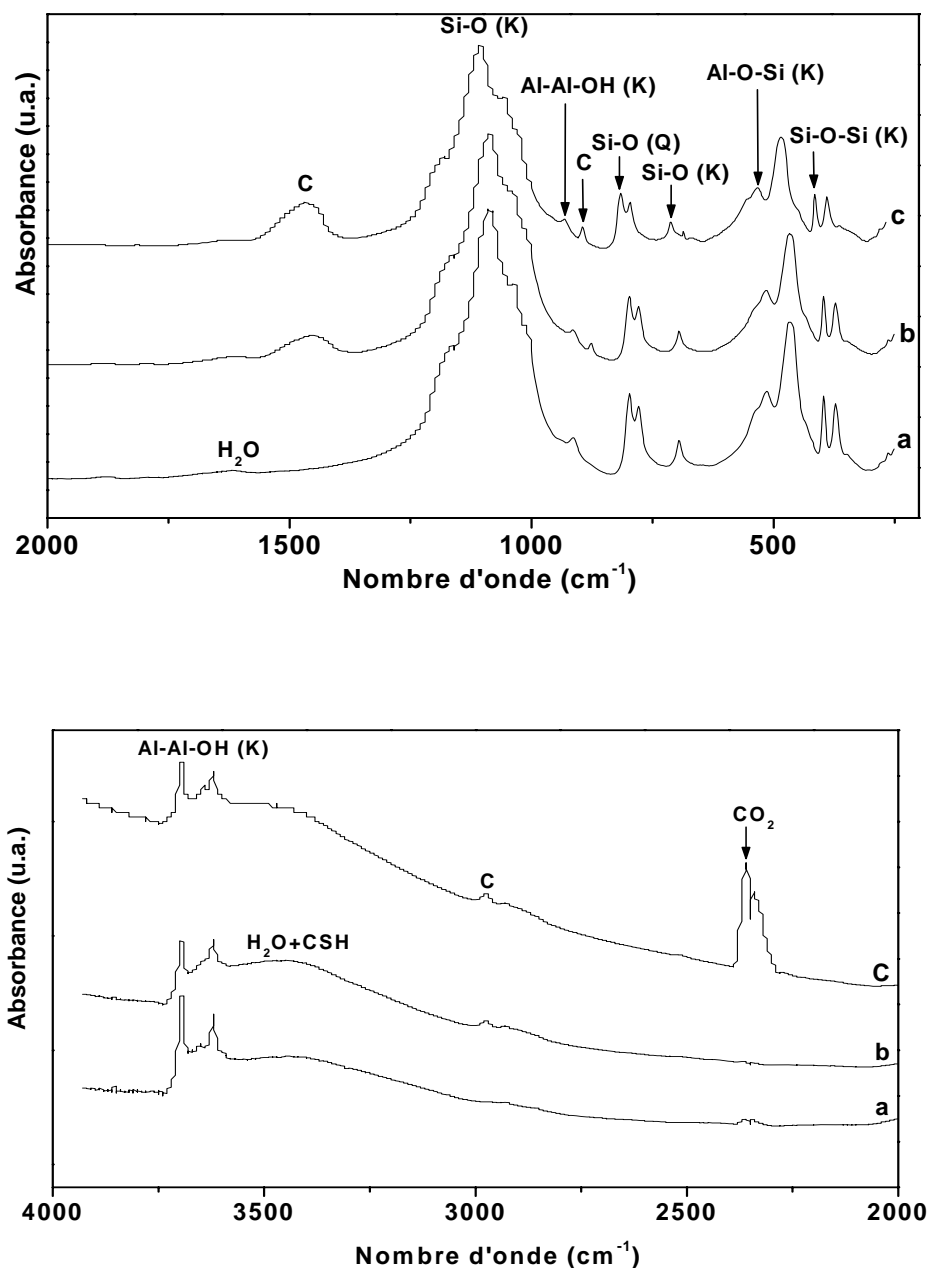
**Figure V. 5 : Diffractogrammes des échantillons de briques crues.**

a- Matière première ; b-6% chaux ; c-10% chaux.

K : Kaolinite ; Q : Quartz ; G : Goéthite ; F : Feldspath potassique ; CH :  $\text{Ca(OH)}_2$  ; C : Calcite.

Un examen minutieux du diffractogramme de l'échantillon contenant 6% de chaux montre la présence des raies diffuses et de faibles intensités pour  $48^\circ < 2\theta < 50^\circ$ . Ces raies seraient attribuables au silicate de calcium hydraté (CSH) faiblement cristallisé [15].

Pour mettre en évidence les phases non cristallisées, des échantillons broyés de briques ont été analysés par spectrométrie infrarouge (**figure V. 6**).

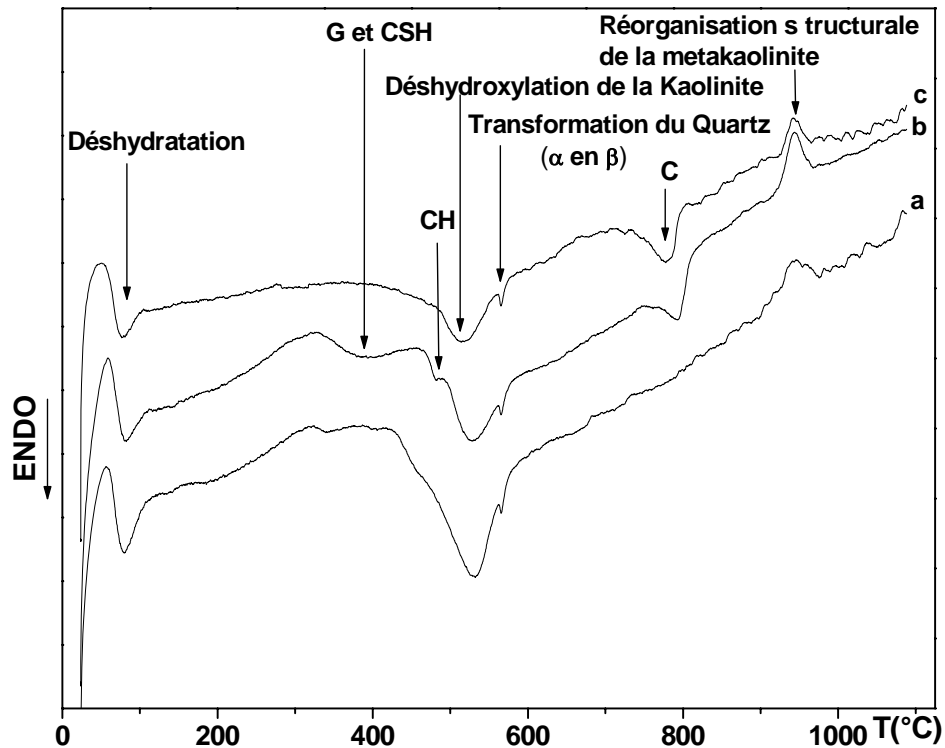


**Figure V. 6 : Spectres infrarouge des échantillons de briques crues.**

a- Matière première ; b-6%chaux ; c-10% chaux  
K : Kaolinite ; Q : Quartz ; C : Calcite ; CSH : Silicate de calcium hydraté.

Les spectres obtenus montrent les principales bandes du quartz (798, 781 et 397 $\text{cm}^{-1}$ ) [16], de l'eau hygroscopique (1640  $\text{cm}^{-1}$ ) [16] et de la kaolinite (3700, 3668, 3620, 1090, 1050, 920, 696, 520, 470  $\text{cm}^{-1}$ ) [16-19]. Cette kaolinite a une structure désordonnée à cause de l'absence de sa bande caractéristique de 3650  $\text{cm}^{-1}$  [16, 19]. La présence de la portlandite (CH) et de la calcite est révélée par l'intensification de la bande de 3650  $\text{cm}^{-1}$  et la présence des bandes de 879, 1470, 2980  $\text{cm}^{-1}$  [20] respectivement. Il est à noter que l'intensité de la bande large de vibration d'élongation autour de 3400  $\text{cm}^{-1}$  (**figure V. 6b**) qui est couramment attribuée à l'eau d'hydratation, croît tandis que celle à 1650  $\text{cm}^{-1}$  décroît. Ce résultat laisse penser que la première bande est attribuable au CSH [20] et à l'eau fortement absorbée. La bande IR à 2350  $\text{cm}^{-1}$  (**figure V. 6c**) est due à la présence du dioxyde de carbone fortement dissout dans les échantillons riches en chaux.

Les analyses thermiques différentielles réalisées sur les mélanges matière première -chaux (**figure V. 7**) montre la présence des effets endothermiques autour de 85, 480, 537 et 567°C correspondant respectivement à la perte d'eau hygroscopique, à la déshydroxylation de la portlandite (CH) et de la kaolinite et à la transformation du quartz  $\alpha$  en  $\beta$ . La présence de la goethite se caractérise par un pic endothermique autour de 348°C. Le large accident endothermique situé entre 335 et 340°C (**figure V.7b**) est attribué à la fois aux pertes d'eau structurale de CSH et de la goethite [21, 22] tandis que le phénomène endothermique autour de 797°C est lié à la décomposition de la calcite pour donner la chaux et produire un dégagement du dioxyde de carbone.



**Figure V. 7 : Courbes d'analyse thermique différentielle des échantillons de briques crues.**

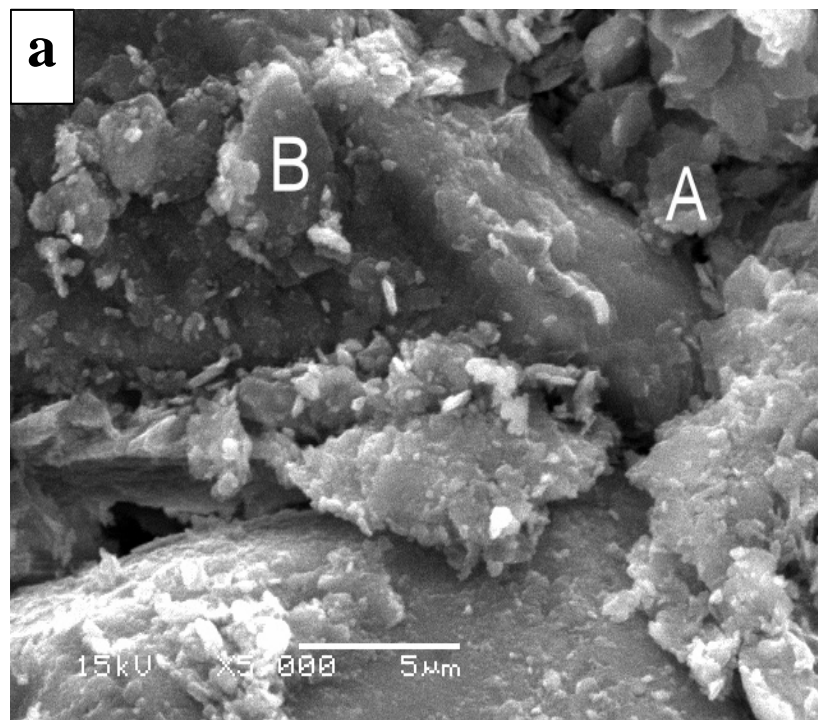
a- Matière première ; b-6% chaux ; c-10% chaux.

G : Goethite ; C : Calcite ; CH :  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ; CSH: Silicate de calcium hydrate.

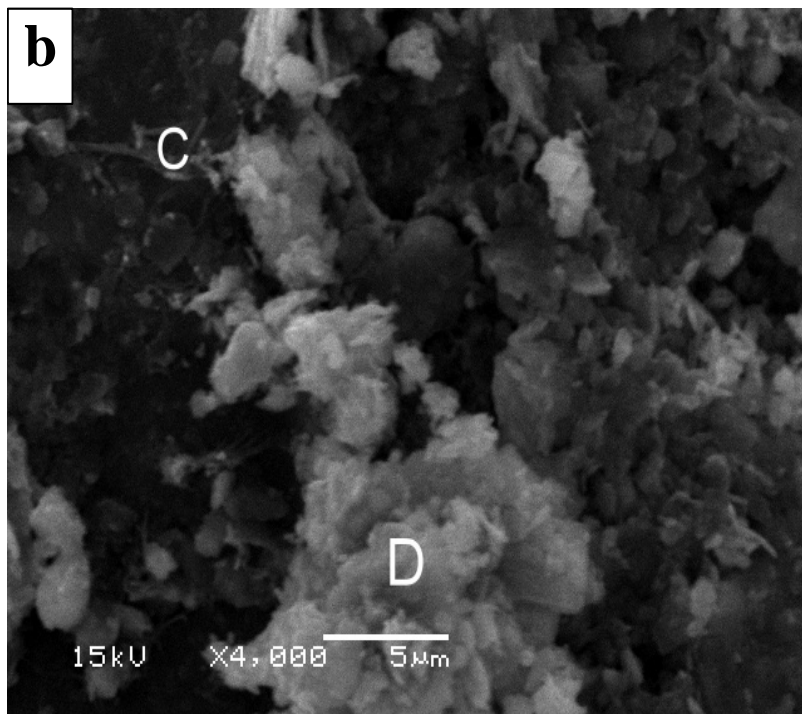
Les observations par microscopie électronique à balayage (MEB) de l'échantillon brut et du mélange avec 4% de chaux (**figure V. 8(a, b)**) montrent une structure hétérogène constituée de particules isolées de kaolinite (**figure V. 9A**), de gros grains de quartz (**figure V. 9B**) et des particules de quartz fin filiforme (**figure V. 9C**). La formule structurale de la kaolinite déduite de son analyse par EDAX (**figure V. 9A**) est  $\text{Na}_{0,02}(\text{Si}_{1,98}\text{Al}_{0,02})(\text{Al}_{1,69}\text{Fe}_{0,18}\text{Ti}_{0,03}\text{Mg}_{0,1})\text{O}_5(\text{F},\text{OH})_4$ . Des zones riches en calcium, se manifestant par des aspects brillants (**figure V. 8a-Zone D**) se développent pour l'échantillon contenant 4% de chaux. D'après le spectre EDAX D de la **figure V. 9**, ces zones sont constituées d'un mélange de kaolinite, de quartz fin et de composés calciques (calcite et/ou CSH).

Quand la quantité de chaux atteint 6%, le quartz fin filiforme disparaît et la liaison des particules se développe entraînant donc une microstructure homogène (**figure V. 8c**). Dans ce cas, des particules isolées sous forme de nid d'abeilles (**figure V.8e-Zone E**) identifiées comme étant du CSH (**figure V. 9E**) se développent. En outre, il est à noter que les gros grains de quartz présentent sur leur surface des « points de piqûres » (**figure V. 8d-ZoneF ; figure V. 9F**) qui apparemment constituent des sites préférentiels de nucléation du CSH et/ou de la calcite. Cependant il apparaît que les grains du feldspath potassique (**figure V. 8e-Zone G ; figure V. 9G**) restent inaltérés lors de l'addition de la chaux.

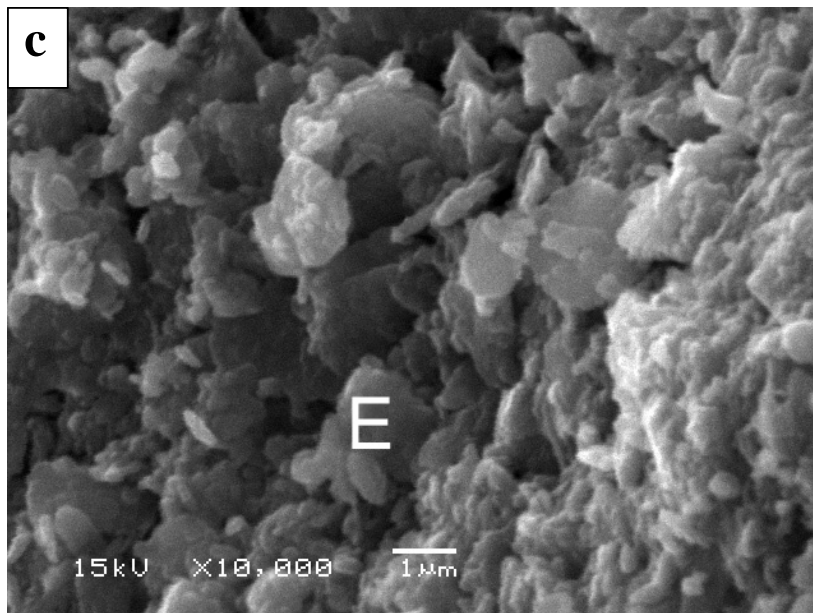
Pour 12% de chaux, la portlandite et la calcite qui se manifestent par des zones brillantes (**figure V. 8f-Zone H ; figure V. 9H**) se forment majoritairement. Cette carbonatation excessive est à l'origine de la présence d'une microstructure hétérogène.



**Figure V. 8a : Micrographe MEB d'un échantillon de brique crue naturelle.**

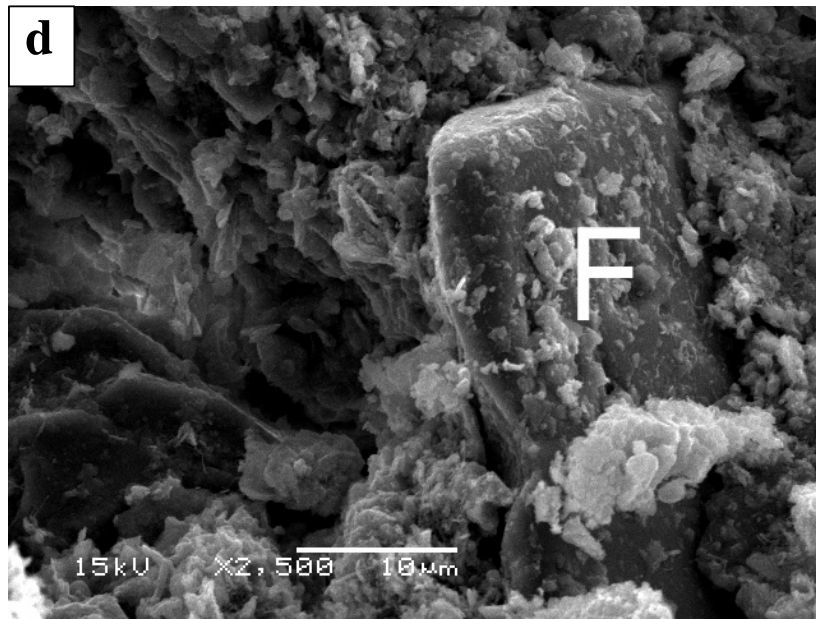


**Figure V. 8b : Micrographe MEB d'un échantillon de brique crue amendée à 4% de chaux**

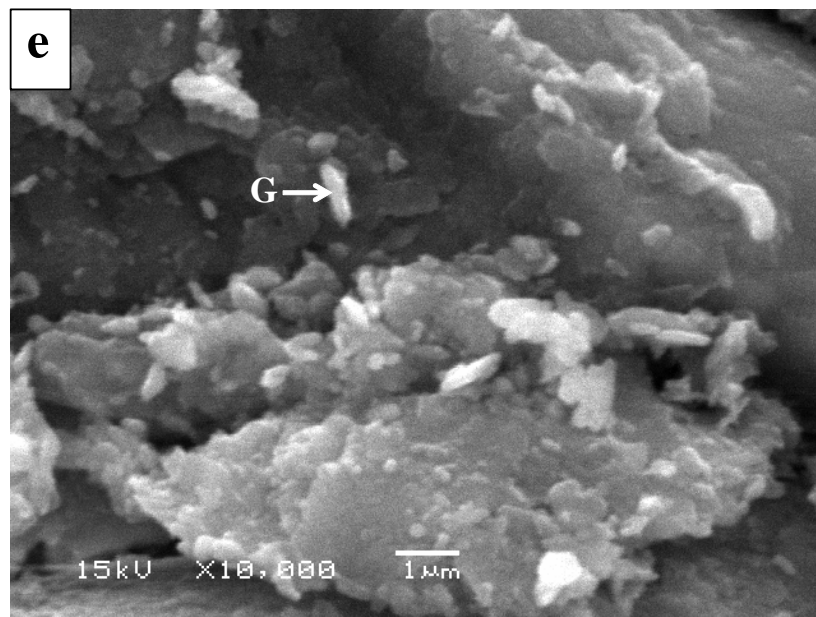


**Figure V. 8c : Micrographe MEB d'un échantillon de brique crue amendée à 6% de chaux**

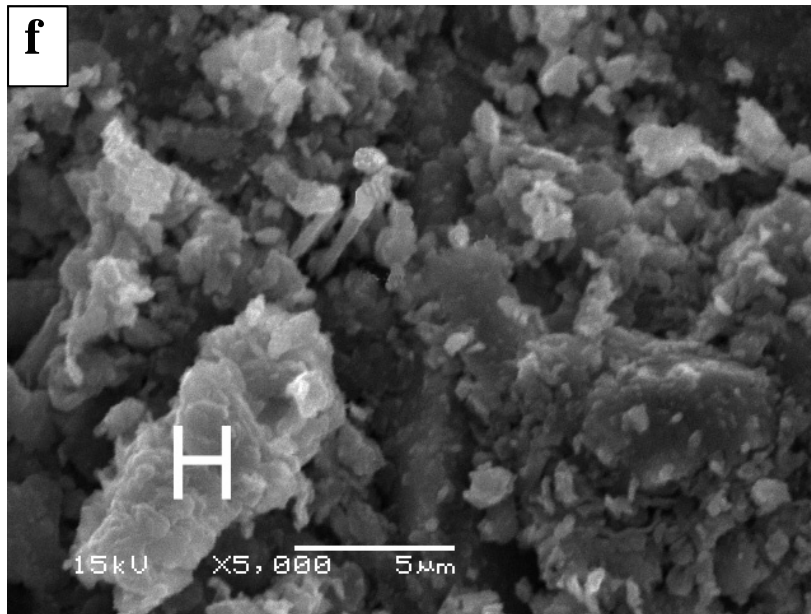




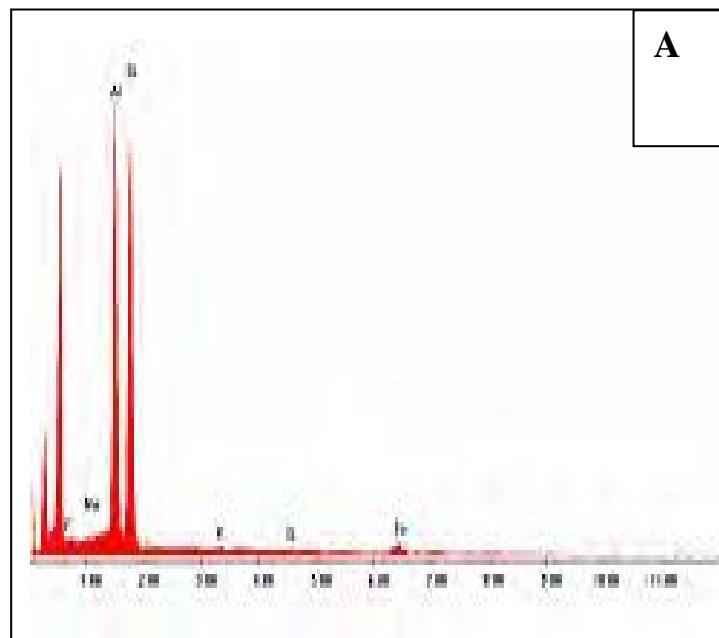
**Figure V. 8d : Micrographe MEB d'un échantillon de brique crue amendée à 10% de chaux**



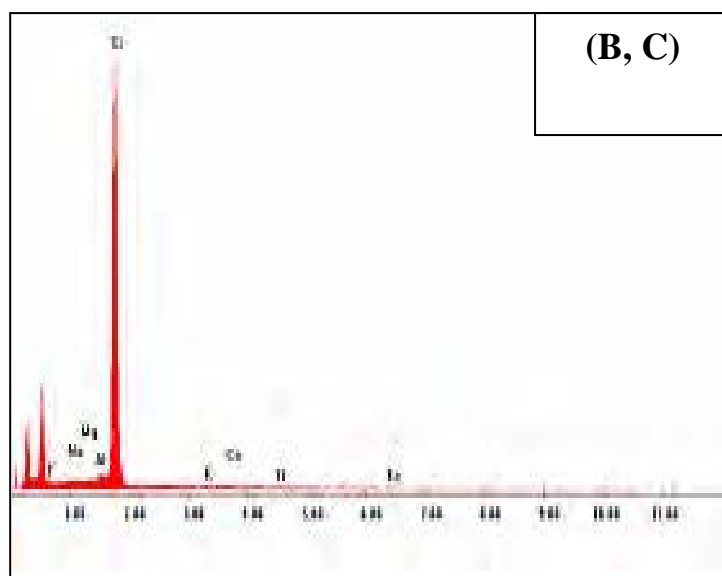
**Figure V. 8e : Micrographe MEB d'un échantillon de brique crue amendée à 10% de chaux**



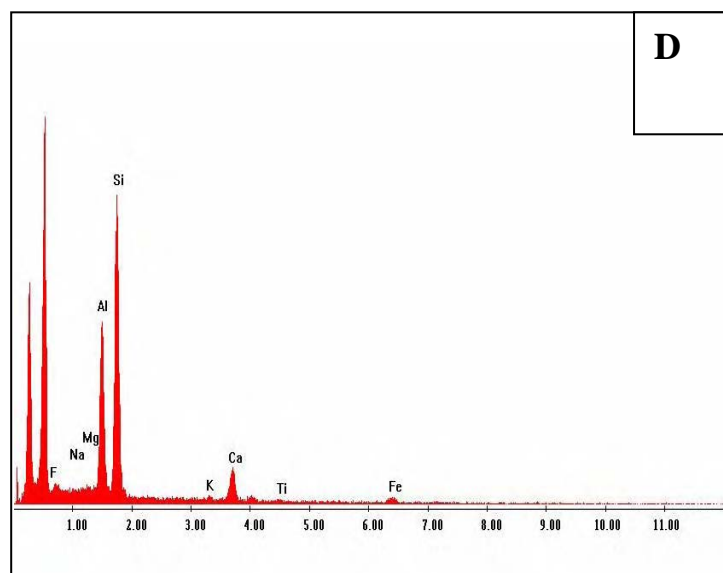
**Figure V. 8f : Micrographe MEB d'un échantillon de brique crue amendée à 12% de chaux**



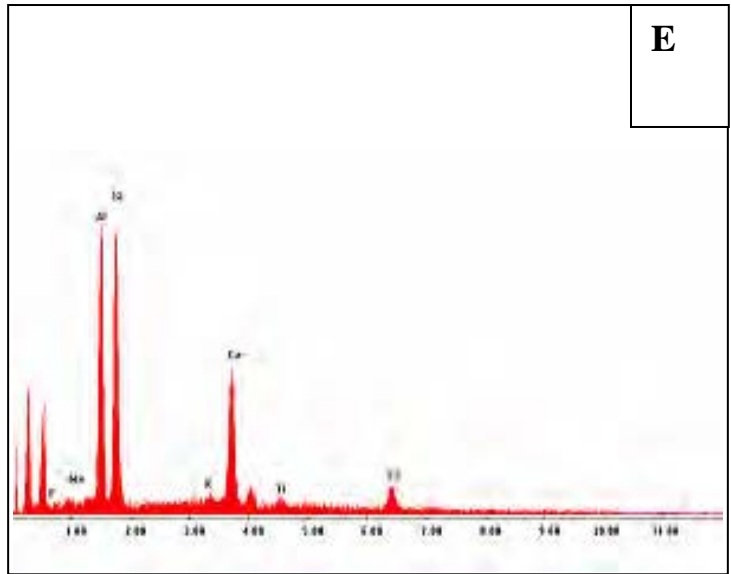
**Figure V. 9A : Analyse par EDAX de la zone A**



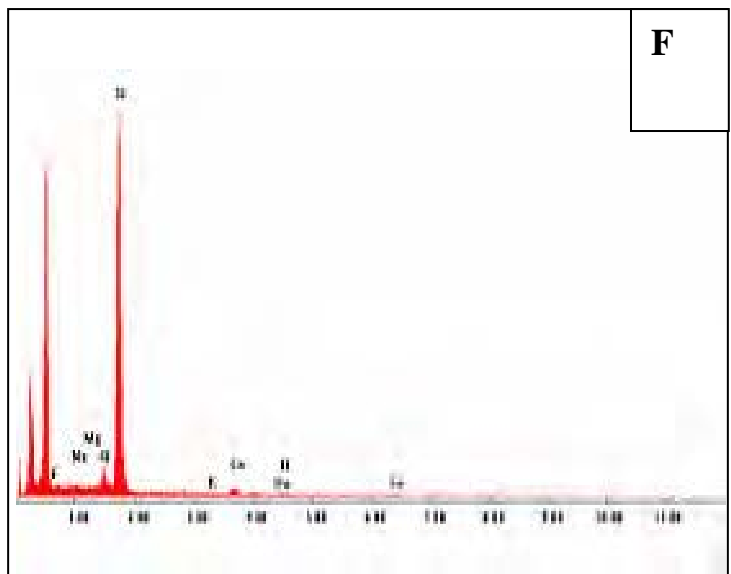
**Figure V. 9 (B, C) : Analyses par EDAX des zones B et C**



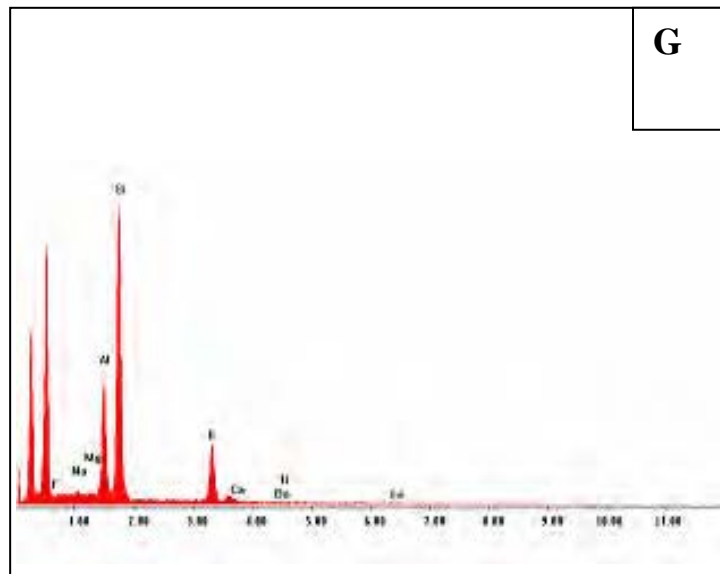
**Figure V. 9D : Analyse par EDAX de la zone D**



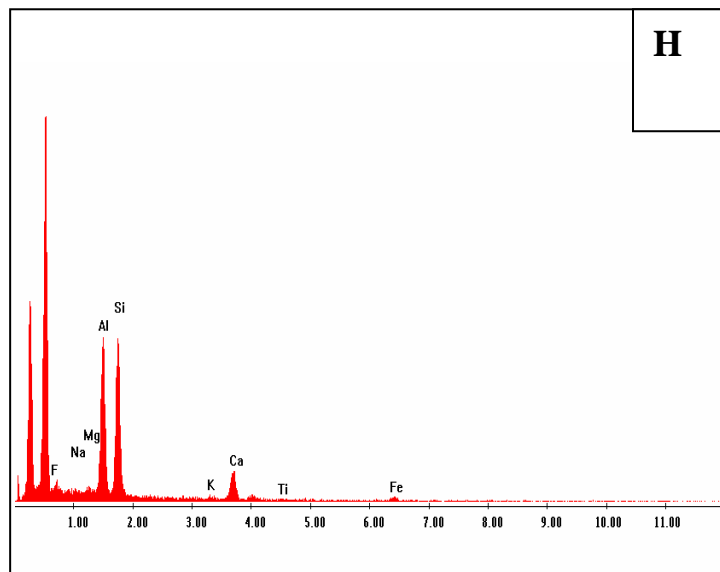
**Figure V. 9E : Analyse par EDAX de la zone E**



**Figure V. 9F : Analyse par EDAX de la zone F**

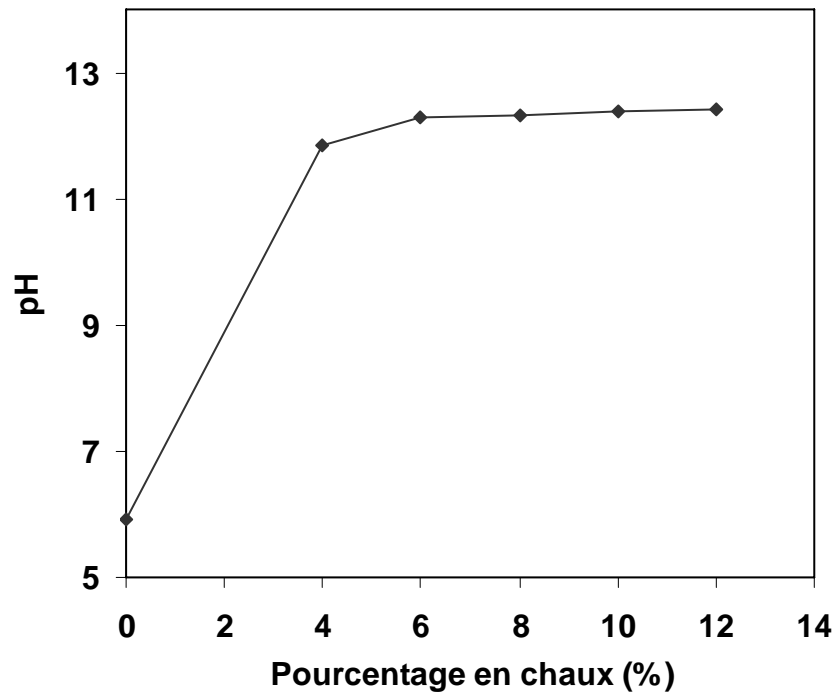


**Figure V. 9G : Analyse par EDAX de la zone G**



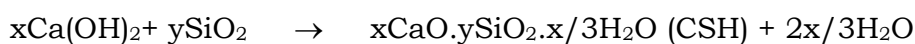
**Figure V. 9H : Analyse par EDAX de la zone H**

A la lumière des résultats de microstructure, le CSH proviendrait de la réaction entre la chaux et les fins grains de quartz. La solubilité de ce quartz fin dans le milieu est liée à l'augmentation du pH dû à l'ajout de la chaux (**figure V. 10**).

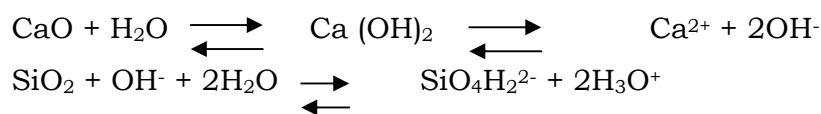


**Figure V. 10 : Variation du pH avec l'ajout de chaux.**

Dans ces conditions, le silicate de calcium hydraté se forme selon la réaction :



qui est la combinaison des équations chimiques suivantes :



En se basant sur les analyses EDAX (**figure V. 9E**), le ratio  $x/y=C/S$  est de 0,6. Ce ratio est proche des valeurs rapportées pour CSH [2].

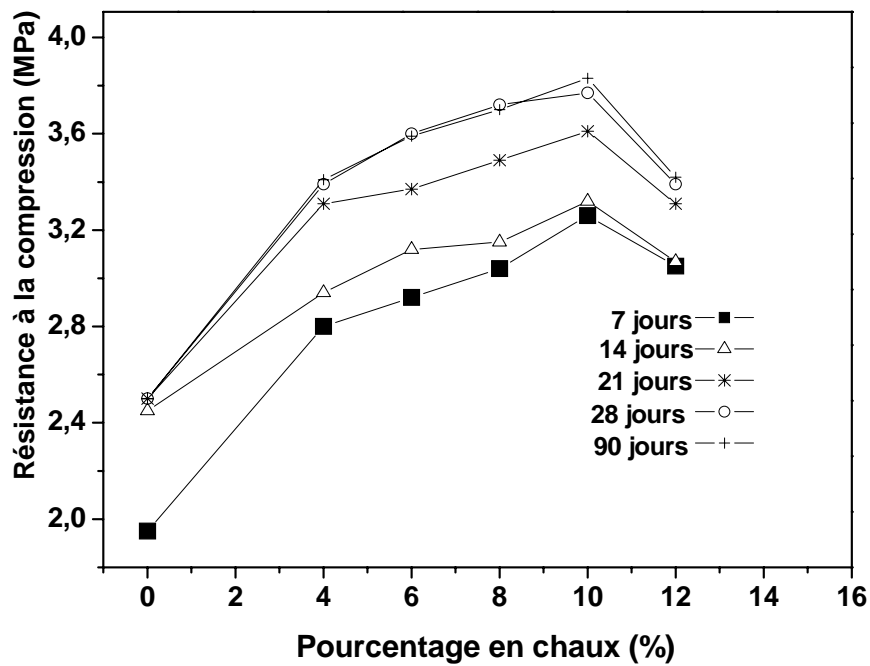
Il faut noter que la floculation- agglomération des particules qui s'observe généralement pour des mélanges sol- chaux ne se manifeste pas pour cette étude à cause de la faible capacité d'échange cationique (4,6 meq/100g) pour le matériau concerné. En outre la réaction pouzzolanique impliquant la kaolinite semble être insignifiante.

La formation excessive de la calcite dans des échantillons riches en chaux est la manifestation de la réaction de la chaux éteinte avec le dioxyde de carbone de l'atmosphère. La dissolution du CO<sub>2</sub> dans les pâtes s'accroît avec l'affinité du calcium et par conséquent, la réaction de carbonatation devient prédominante. Apparemment, la carbonatation excessive des échantillons limite la formation des composés « type ciment » hydratés.

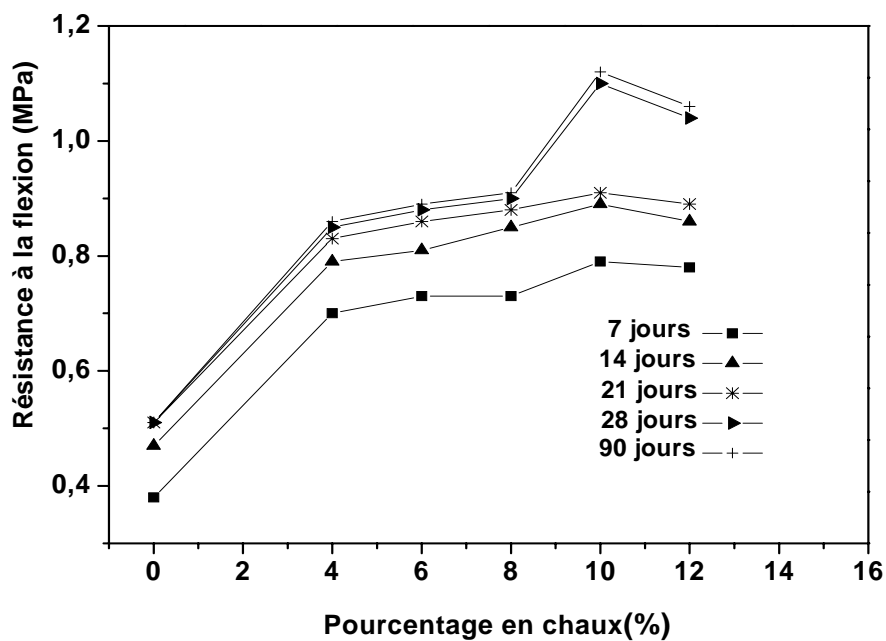
#### **V.4.2. Propriétés physiques**

L'évolution des résistances à la compression et à la flexion et l'absorption d'eau avec l'ajout de chaux sont présentées sur les **figures V. 11, 12 et 13**. On constate en général que les résistances à la compression et à la flexion augmentent avec l'ajout de chaux tandis que l'absorption d'eau diminue. Par ailleurs, ces propriétés s'améliorent aussi avec le temps de cure. Cependant, des quantités de chaux supérieures à 10% ont des effets un peu néfastes sur ces propriétés. Dans tous les cas, les valeurs des résistances mécaniques sont dans l'ordre de grandeur des valeurs exigées pour les briques crues [23-25]. L'amélioration des propriétés physiques est liée au caractère « ciment » du CSH et à la formation d'une faible quantité de calcite et de la portlandite. La formation excessive de ces composés réduit la résistance mécanique et accroît la porosité caractérisée par une augmentation de l'absorption d'eau.

L'amélioration des propriétés physiques avec le temps est essentiellement due au fait que la réaction pouzzolanique se poursuit avec le temps ; il s'agit d'une réaction dont la cinétique est lente. Quand le temps de cure atteint 28 jours, il n'y a pas de différence significative quant à l'évolution des propriétés physiques. Apparemment 28 jours est un temps suffisant pour achever la réaction pouzzolanique.

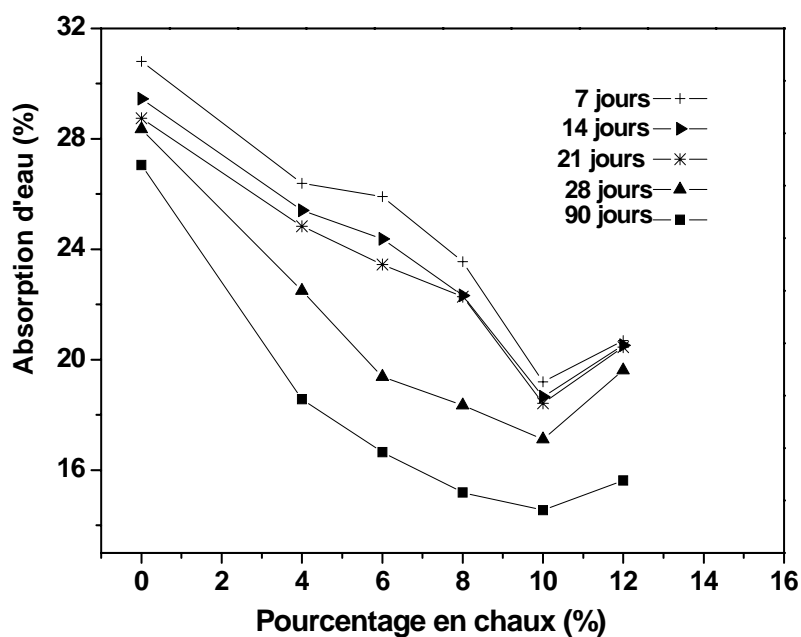


**Figure V. 11 : Evolution de la résistance à la compression simple avec l'ajout de chaux et le temps de cure.**



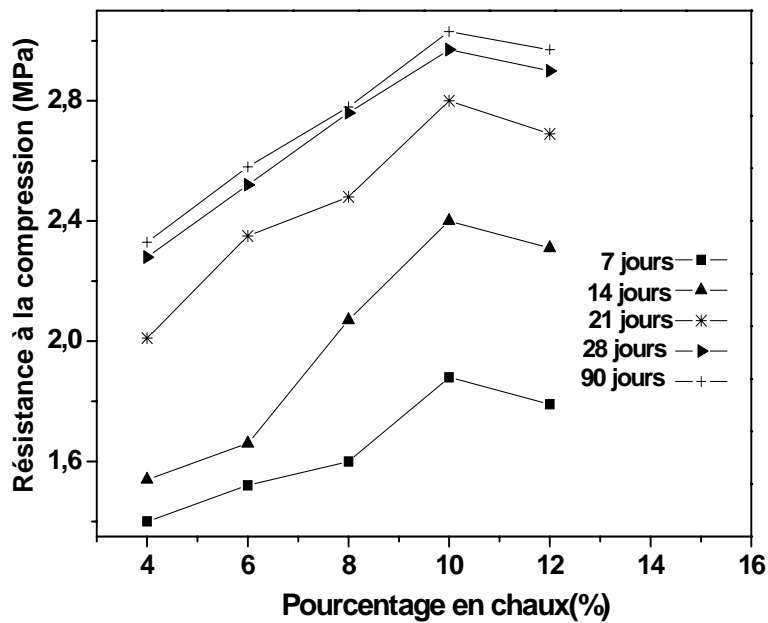
**Figure V. 12 : Evolution de la résistance à la flexion avec l'ajout de chaux et le temps de cure.**



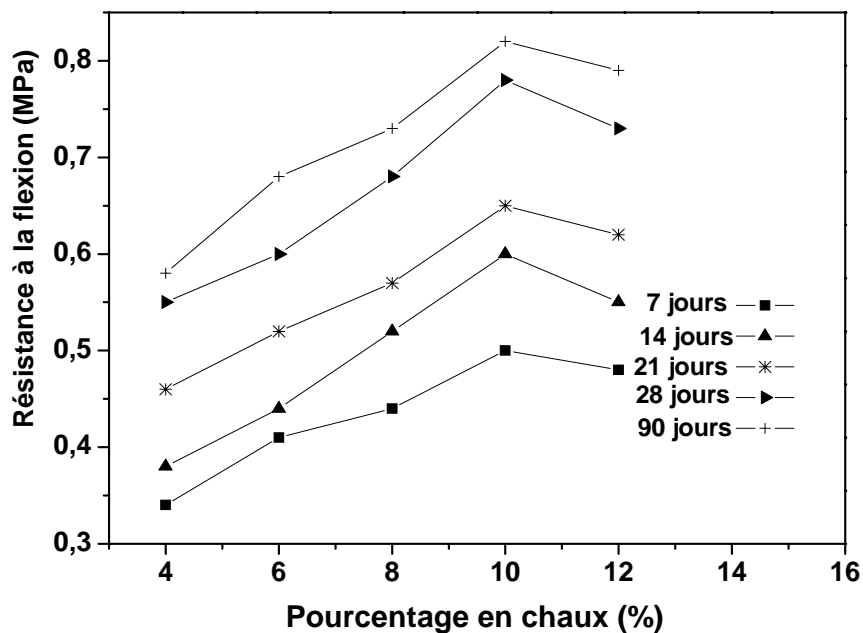


**Figure V. 13 : Evolution de l'absorption d'eau avec l'ajout de chaux et le temps de cure.**

Pour tester l'impact de la pluie (le principal facteur d'érosion en climat tropical) sur les briques crues, celles-ci ont été totalement immergées pendant 4 jours et ont subi les essais à la compression simple et à la flexion 3 points (**figure V. 14 et 15**). Les résultats ont montré que les briques crues se détériorent tandis que les résistances des briques amendées à la chaux pour un temps de cure  $\geq 21$  jours sont toujours de l'ordre de grandeur des valeurs exigées par les normes.



**Figure V. 14 : Evolution de la résistance à la compression simple des briques crues immergées pendant 4 jours avec l'ajout de chaux et le temps de cure.**



**Figure V. 15 : Evolution de la résistance à la flexion des briques crues immergées pendant 4 jours avec l'ajout de chaux et le temps de cure.**

## **V.5. Conclusion**

L'ajout de chaux à une matière première argileuse riche en quartz pour l'élaboration des briques crues induit la formation de calcite et de silicate de calcium hydraté. Ce dernier composé est essentiellement formé par la réaction entre la chaux et le quartz fin. Sa présence contribue au renforcement dans le temps des briques crues. Cependant, la formation de la portlandite, de la calcite et d'une faible quantité de CSH affectent négativement la résistance mécanique des briques crues. Finalement pour l'élaboration des briques aux propriétés optimales à base de mélange argile - chaux, il est recommandé de réduire la taille des grains du quartz, d'accroître la durée d'hydratation et d'éviter le contact entre la pâte et l'air.

## Références bibliographiques

- [1] Arabi M, Wild S. Microstructural development in cured soil-lime composites. *J Mater Sci* 1986; 21: 497-503.
- [2] Wild S, Arabi M, Leng Ward G. Soil-lime reaction and microstructural development at elevated temperatures. *Clay Miner* 1986; 21:279-292.
- [3] Moore RK. Lime stabilization: reactions, properties, design and construction. State of the Art Report. N°5, Transportation Research Board National Research Council, Washington, DC, 1987, 58p.
- [4] Attoh-Okine B. Stabilising effect of locally produced lime on selected lateritic soils. *Construc Build Mater* 1990; 4(2):86-91.
- [5] Attoh-Okine NO. Lime treatment of laterite soils and gravels-revisited. *Construc Build Mater* 1995; 9(5): 283-287.
- [6] Bell FG. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Eng Geol* 1996; 42 :223 – 237.
- [7] Khattab SAA. Etude multi – échelles d'un sol argileux plastique traité à la chaux. Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans (France), 2002, 250p.
- [8] Lopez-Lara T, Zaragoza JB, Lopez C. Mineralogical characterization of stabilized soils. *EJGE* 2004; 9 (F).
- [9] Millogo Y, Hajjaji M, Ouedraogo R, Gomina M. Cement-lateritic gravels mixtures: microstructure and strength characteristics. *Construc Build Mater* (In press).
- [10] NF P 14-306. Blocs en béton cellulaire autoclave pour murs et cloisons. AFNOR., 1986, 16p.
- [11] NF P 13-305. Briques pleines ou perforées et blocs perforés en terre cuite à enduire., AFNOR., 1983, 19p.
- [12] Tourenq C, Tran NL. Mise en évidence des argiles par l'essai au bleu de méthylène. Application aux sols, roches et granulats. *Bull liaison Labo P et Ch* 1989 ; 159-jan-févr. Réf-3376.
- [13] Nor 01. Association française de normalisation, Ed., Blocs de terre comprimée pour murs et cloison, NF XP P 13-901. Paris : AFNOR., 2001.
- [14] Rollet AP, Bouaziz R. L'analyse thermique. Tome 2, Gauthier- Villars Editeur, Paris, 1972, 587p.
- [15] Narasimha Rao S, Rajasekaran G. Reaction products formed in lime-stabilized marine clays. *J Geotech Eng* 1996; May: 329-336.
- [16] Farmer VC. The infrared spectra of minerals. Chapter 15: The layer silicates. Mineralogical Society, London, 1974, 331-363.

- [17] Cases JM, Lietard O, Yvon J, Delon JF. Etude des propriétés cristallographiques, morphologiques, superficielles de kaolinites désordonnées. Bull Minéra 1982;105: 439-455.
- [18] Frost RL, Vassallo AM. The dehydroxylation of the kaolinite clay minerals using infrared emission spectroscopy. Clays and Clay Miner 1996; 44 (5):635-651.
- [19] Madejova J, Komadel P. Baseline studies of the clay minerals society source clays: infrared methods. Clays and Clay Miner 2001; 49 (5): 410-432.
- [20] Dutta DK, Bordoloi D, Prakash C. Hydratation of portland cement clinker in the presence of carbonaceous material. Cement and Concrete Res 1995; 25 (5): 1095 – 1102.
- [21] Assal HH. Influence of silica fume on the properties of fired then water cured lime-rich clay bricks. Sil Ind 2003; 68 (5-6): 55-60.
- [22] Rojas MF, Cabrera J. The effect of temperature on the hydration rate and stability of hydration phases of metakaolin-lime-water systems. Cement Concrete Res 2002; 32: 133-138.
- [23] Mbumbia L, Mertens de Wilmars A, Tirlocq J. Performance characteristics of lateritic soil bricks fired at low temperatures: a case study of Cameroon. Construc Build Mater 2000 ; 14 :121-131.
- [24] Mbumbia L, Mertens de Wilmars A, Tirlocq J, Vandeneede V. Influence du processus de fabrication sur les propriétés des briques à base de latérite. Sil Ind 2000; 65 (9-10) :101-109.
- [25] P'Kla A. Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (BTC) : application aux maçonneries : BTC- mortier de terre. Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (France), 2002, 229p.

## **Conclusion générale et perspectives**

Les graveleux latéritiques de Sapouy (Burkina Faso) sont constitués de quartz, de kaolinite, de goethite, de rankinite, et d'hématite. Les teneurs de ces constituants sont respectivement égales à 42, 26, 15, 6 et 3 % en masse. L'addition de ciment ( $\leq 8$  % en masse) et d'eau à cette matière première s'accompagne de la formation de calcite, de portlandite, d'ettringite et de tobermorite-1,4 nm, qui est un silicate de calcium hydraté (CSH). Apparemment, la tobermorite provient essentiellement de l'hydratation de  $C_2S$  et  $C_3S$ , constituants du ciment. Le développement de CSH à partir de la réaction pouzzolanique impliquant les minéraux argileux semble être insignifiant. La présence de la tobermorite améliore les propriétés géotechniques et mécaniques des mélanges graveleux latéritiques - ciment. Ces mélanges, même à faible teneur en ciment (par exemple 2 % en masse) conviennent pour la confection de couche de base en construction routière.

Par ailleurs, les études minéralogique et géotechnique effectuées sur la matière première argileuse de Nadialpou (Burkina Faso), montrent que celle-ci, qui est constituée de quartz (65 % en masse), de kaolinite (30 % en masse) et de faibles quantités (environ 2 % en masse) de goethite et de feldspath potassique, convient pour l'élaboration des briques crues pour les habitats économiques. Toutefois, ces briques se détériorent après quelques heures d'immersion dans l'eau. En vue d'améliorer les propriétés physiques de ces briques, des amendements à la chaux broyée sont effectués. Il peut être conclu que l'ajout de la chaux à cette matière première argileuse conduit à la formation de la calcite et du silicate de calcium hydraté (CSH) faiblement cristallisé. Ce dernier semble provenir de la réaction entre la chaux et le quartz fin filliforme, et sa présence contribue à l'amélioration des propriétés mécaniques des briques. Cependant, au-delà de 10% d'ajout de chaux, la présence excessive de la portlandite et de la calcite et la faible formation de CSH, ont des effets néfastes vis-à-vis de la résistance mécanique des briques.

Les briques crues élaborées à partir des mélanges argile-chaux se caractérisent par des valeurs de résistance mécanique comparables à celles communément admises. En outre, leur résistance mécanique demeure acceptable après immersion dans l'eau pendant une durée de 4 jours. A ce propos, il peut être déduit que la réduction de la taille des grains de quartz, l'augmentation du temps d'hydratation et la préservation des pâtes de l'air contribuent à l'amélioration de la qualité des briques formulées à partir des mélanges argiles-chaux.

Comme perspectives, et concernant le volet appliqué, il paraît pertinent de construire des routes pilotes avec des graveleux latéritiques du Burkina Faso amendés au ciment et suivre l'évolution de leurs caractéristiques physiques en fonction du temps. Ceci permettra, entre autres, de proposer de bonnes formulations. Concernant les mélanges à base des matières premières argileuses et chaux, il serait intéressant de tester les briques de ces mélanges dans le domaine de la construction et plus particulièrement d'évaluer les effets de paramètres autres que l'érosion des briques par la pluie.

A propos de l'aspect fondamental, et compte tenu du fait que les teneurs en CSH sont très faibles et que sa présence constitue toujours un débat pour des chercheurs, particulièrement quand il s'agit de sa formation par la réaction pouzzolanique de minéraux argileux avec la chaux ou le ciment, il serait important d'effectuer des investigations sur ce composé, qui d'ailleurs joue un rôle crucial au niveau de la consolidation des matériaux. Il s'avère donc important d'effectuer des études de synthèse de CSH en utilisant des constituants de base à compositions bien définies, et de procéder à sa caractérisation par les techniques sensibles à la présence de matériaux amorphes.



## **Annexes**

# Geotechnical, mechanical, chemical and mineralogical characterization of a lateritic gravels of Sapouy (Burkina Faso) used in road construction

Millogo Younoussa <sup>a,\*</sup>, Traoré Karfa <sup>a</sup>, Ouedraogo Raguilnaba <sup>a</sup>, Kaboré Kalsibiri <sup>b</sup>,  
Blanchart Philippe <sup>c</sup>, Thomassin Jean Hugues <sup>d</sup>

<sup>a</sup> *Laboratoire de Physico-Chimie et de Technologie des Matériaux (LPCTM), UFR/Sciences Exactes et Appliquées, Université de Ouagadougou, 03 B.P. 7021, Ouagadougou 03, Burkina Faso*

<sup>b</sup> *Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP), Ouagadougou, 01 B.P. 133 Ouagadougou 01, Burkina Faso*

<sup>c</sup> *Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogènes (GEMH), Ecole Nationale Supérieure de Céramique Industrielle (ENSCI), 47–73, Avenue Albert Thomas, 87065 Limoges, France*

<sup>d</sup> *Laboratoire Matériaux et Géologie Environnementale, Université de Poitiers, UMR CNRS 6532, Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, 40, Avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers Cedex, France*

Received 12 May 2005; received in revised form 1 June 2006; accepted 3 July 2006

Available online 4 October 2006

## Abstract

Geotechnical and mechanical tests conducted on lateritic gravels of Burkina Faso showed that this material presents: fines (10.5 wt.%), plasticity index (10.5%), Californian Bearing Ratio (43%), compressive strength (1.26 MPa) and tensile strength (Brazilian test) of 0.09 MPa. The X-ray diffraction (XRD) and the chemical analysis revealed a quartz amount of 42 wt.%, 26 wt.% of kaolinite, 15 wt.% of goethite, 6 wt.% of rankinite and 3 wt.% of hematite. The results of geotechnical and mechanical tests combined to those of the XRD and the chemical analysis particularly the silica/sesquioxides ratio showed that the lateritic gravels is suitable for the sub-base course in road construction.

© 2006 Elsevier Ltd. All rights reserved.

**Keywords:** Lateritic gravels; Geotechnical and mechanical tests; Mineralogical and chemical analyses; Road construction; Burkina Faso

## 1. Introduction

The lateritic gravels are movable ground formed in tropical environment, composed of granular fraction constituted of pisolites or ferruginous nodules encrusted in a limono-clayey fine matrix [1]. Because of their abundance in countries of the intertropical zone, they are used in road construction as material of sub-base or base [2–8].

In West Africa, some studies are done concerning the geotechnical and mechanical characteristics and the genesis on the lateritic soils by Gidigasu [9,10,2–4] on the lateritic soils and mainly on those of Ghana.

The roads permitting the commercial exchanges between countries and on other hand the connection between productive agricultural areas with towns, play a vital social and economic role in the developing countries.

In Burkina Faso, the lateritic gravels are considered to be good materials for the road construction and the habitat. They are characterized by low swelling under humid atmosphere. Although they are widely used, very few scientific works have been dedicated to them [11]. Their choice in road engineering is essentially based on their geotechnical properties which are determined by known tests: the particle size distribution, the Atterberg limits, the methylene blue value, the references of the Proctor modified and the Californian Bearing Ratio (CBR) [1,11]. Nevertheless, it is observed that the mineralogical and chemical

\* Corresponding author. Tel.: +226 70 26 33 83; fax: +226 50 34 31 87.  
E-mail address: [y.millogo@univ-ouaga.bf](mailto:y.millogo@univ-ouaga.bf) (Y. Millogo).



## Cement-lateritic gravels mixtures: Microstructure and strength characteristics

Younoussa Millogo <sup>a</sup>, Mohamed Hajjaji <sup>b,\*</sup>, Raguilnaba Ouedraogo <sup>a</sup>, Moussa Gomina <sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Laboratoire de Physico-Chimie et de Technologie des Matériaux (LPCTM), UFR/Sciences Exactes et Appliquées, Université de Ouagadougou, 03 B.P. 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso*

<sup>b</sup> *Equipe de Physico-Chimie de Matériaux Naturels et Phénomènes d'Interfaces, Département de Chimie, Faculté de Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, Boulevard Prince My Abdellah, B.P. 2390, Marrakech, Morocco*

<sup>c</sup> *Laboratoire CRISMAT UMR 6508 CNRS/ENSICAEN, 6 Bd Maréchal Juin, 14050 Caen Cedex 4, France*

Received 15 December 2006; received in revised form 11 July 2007; accepted 23 July 2007

### Abstract

Microstructure of cement-lateritic gravels mixes, containing up to 8 wt% cement, was investigated by means of X-ray diffraction, infrared spectrometry, differential thermal analysis, scanning electron microscopy and energy dispersive spectrometry. Also, strength characteristics of the mixtures were measured. The results show that cement admixtures resulted in the formation of 1.4 nm-tobermorite, ettringite, iron oxyhydroxide, portlandite and calcite. The increasing amount of tobermorite, due to the increase of the cement content, was attended with a noticeable reduction of particles segregation. In addition, its marked crystallization, observed for the high curing time (28 days), contributed to the improvement of the mechanical strength. As regards the application aspect, the results show that cement amended lateritic gravels are convenient for base course construction.

© 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved.

**Keywords:** Lateritic gravels; Cement mixes; Microstructure; Mechanical strength; Base course

### 1. Introduction

Lateritic soils are widespread materials in tropical and subtropical African countries. They are required for road construction. However, the road sections built with raw lateritic soils are the subject of deterioration because of rain erosion and traffic intensification [1–5].

The viability of roads consisting of lateritic soils is proven to be dependent on the chemical and mineralogical compositions as well as the mechanical characteristics of these raw materials [4]. To improve the latter properties, additions of lime, cement, ash fly, silica fume and vegetable fibres were tested [2,3,5–10]. If the physical parameters of amended argillaceous lateritic soils from some West African countries have been evaluated, a little attention is paid

to the investigation of their microstructure as well as to the study of the lateritic gravels of Burkina Faso, which are lean clay materials [2,3,5,6,9–11].

This work is devoted to the study of the microstructure and the determination of strength characteristics of cement modified lateritic gravels from Burkina Faso. The potential use of these amended materials for road construction is discussed.

### 2. Materials and experimental procedures

#### 2.1. Materials

The mineralogical and chemical compositions of the concerned lateritic gravels, taken from Sapouy (Burkina Faso), are given in Table 1. The values of some physical properties of these materials are gathered in Table 2. Comments on these characteristics are reported elsewhere [12].

\* Corresponding author. Tel.: +212 24 43 46 49; fax: +212 24 43 74 08.  
E-mail address: [Hajjaji@ucam.ac.ma](mailto:Hajjaji@ucam.ac.ma) (M. Hajjaji).



# Microstructure and physical properties of lime-clayey adobe bricks

Younoussa Millogo <sup>a,b,c,\*</sup>, Mohamed Hajjaji <sup>c</sup>, Raguilnaba Ouedraogo <sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Institut des Sciences de la Nature et de la Vie (ISNV), Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, 01 BP 1091 Bobo 01, Burkina Faso*

<sup>b</sup> *Laboratoire de Physico-Chimie et de Technologie des Matériaux (LPCTM), UFR/Sciences Exactes et Appliquées, Université de Ouagadougou, 03 B.P. 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso*

<sup>c</sup> *Equipe de Physico-Chimie de Matériaux Naturels et Phénomènes d'Interfaces, Département de Chimie, Faculté de Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, Boulevard Prince My Abdellah, B.P. 2390, Marrakech, Morocco*

Received 14 March 2007; received in revised form 3 September 2007; accepted 17 September 2007

## Abstract

Microstructural changes of adobe bricks made of lime-clayey raw material mixes were investigated by X-ray diffraction, infrared spectrometry, differential thermal analyses, scanning electron microscopy and energy dispersive spectrometry. The impact of these changes on the mechanical resistance and water absorption of adobe bricks was evaluated. It is found that lime additions resulted in the development of calcite and poorly crystallized calcium silicate hydrate (CSH). The latter compound is mainly originated from the reaction between fine filiform quartz and lime. The contribution of the pozzolanic reaction, involving kaolinite (the unique clayey constituent of the raw material), to CSH formation seems to be insignificant. The development of CSH together with the formation of minor amounts of calcite, in <10 wt.% lime samples, improved the mechanical strength and the compactness of adobe bricks. However, the quasi-absence of CSH and the excessive contents of portlandite (Ca(OH)<sub>2</sub>) and calcite, observed for >10 wt.% lime, had a slight detrimental effect on the measured physical properties. In all cases, lime amended adobe bricks are suitable for rural building construction in tropical countries.  
© 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved.

**Keywords:** Adobe bricks; Lime additions; Microstructure; Physical properties

## 1. Introduction

The use of adobe bricks in the construction of shelters in developing countries is mainly dependent on their mechanical resistance, water absorption and chemical behaviours. To improve the physical properties of these building materials, straw debris, fly ash and small amounts of cement or lime are commonly introduced. In spite of the positive impacts of these amendments on the quality of adobe bricks, a little attention has paid to their effects on the microstructure of the traditional building materials.

If the chemical processes and the geotechnical properties of lime-stabilized soils have been investigated [1–8], a little study has been devoted to the assessment of the effects of lime additions on the microstructure and the physical properties of adobe clayey bricks.

The aim of this work is to study the effects of lime additions on the microstructure transformations and the physical properties (bending and compressive strengths, water absorption) of adobe bricks made of a raw clay material from Burkina Faso.

## 2. Materials

The basic raw material is from Nadialpou (Burkina Faso). Its mineralogical and chemical compositions are given in [Table 1](#).

The chosen lime is a Spanish commercial product, commonly used in the country. As can be derived from [Fig. 1](#), it

\* Corresponding author. Address: Institut des Sciences de la Nature et de la Vie (ISNV), Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, 01 BP 1091 Bobo 01, Burkina Faso. Tel.: +226 70 26 33 83; fax: + 226 20 98 25 77.

E-mail address: [y.millogo@univ-ouaga.bf](mailto:y.millogo@univ-ouaga.bf) (Y. Millogo).

Mr Y. Millogo  
Institut des Sciences de la Nature et de la Vie ( ISNV)  
Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso  
01 BP 1091 Bobo 01  
Burkina Faso

Your Ref : e.mail 02/06/2007

Our Ref : JT/ D-116

Date: 17-09-2007

Chers auteurs,

Concerne votre article " Microstructure, Geotechnical and Mechanical Properties of Lateritic Gravels from Burkina Faso" ( ref D-116 )

Après examen par un référé, comme aucune remarque importante n'est apparue, votre article est accepté dans son état actuel ; il est transféré vers l'imprimeur en vue de confectionner la première épreuve .

Meilleures salutations,

Dr J. Tirlocq – associate editor