HAL
open science

Caractérisation et valorisation des matérieux latéritiques utilisés en construction routière au Niger

Mahamadou Souley Issiakou

To cite this version:

Mahamadou Souley Issiakou. Caractérisation et valorisation des matérieux latéritiques utilisés en construction routière au Niger. Autre. Université de Bordeaux, 2016. Français. NNT : 2016BORD0340 . tel-01511599

HAL Id: tel-01511599

https://theses.hal.science/tel-01511599

Submitted on 21 Apr 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

PRÉSENTÉE POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE

L'UNIVERSITE DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR

SPÉCIALITÉ : Mécanique

Par Mahamadou SOULEY ISSIAKOU

CARACTERISATION ET VALORISATION DES MATERIAUX LATERITIQUES UTILISÉS EN CONSTRUCTION ROUTIERE AU NIGER

Soutenue le 08 décembre 2016 devant la commission d'examen :

M. Richard FABRE :	Professeur à l'université de Bordeaux	Directeur de Thèse
Mme Nadia SAIYOURI :	Professeur à l'université de Bordeaux	Co-directrice de thèse
Mme Anne PANTET :	Professeur à l'université du Havre	Rapporteur
M. Christophe LANOS :	Professeur à l'université de Rennes	Rapporteur
M. Tikou BELEM :	Professeur à l'université de Québec	Examinateur
M. Yannick ANGUY :	Docteur, CNRS	Invité

Remerciements

Un travail scientifique et plus particulièrement une thèse de doctorat constitue un véritable « édifice cristallin » mis en œuvre par son auteur mais dont l'apport externe est toujours nécessaire pour sa bonne réussite. Ce travail n'aurait pas été possible sans la contribution des uns et des autres.
Je remercie mon directeur de thèse M. Richard FABRE d'avoir accepté d'encadrer mes travaux de thèse. Je me rappelle il y a 3 ans après l'obtention de mon Master, je me suis rendu à son bureau alors que je portais un projet de thèse. Ensemble nous nous sommes occupés des formalités jusqu'au financement de la thèse, le thème de recherche retenu étant l'étude des matériaux latéritiques du Niger. Sans son soutien et sa disponibilité, les résultats de ce travail n'auraient pas vu le jour.

J'adresse toute ma reconnaissance à Mme Nadia SAIYOURI, qui a accepté de codiriger mes travaux. Grâce à son soutien, nous avons pu affiner nos recherches par des investigations chimiques et minéralogiques.

Merci à Yannick ANGUY et Cécile GABORIEAU, leur explication et nos séances de manipulation au MEB, au microscope optique et au Raman m'ont été d'une grande utilité et m'ont permis d'assimiler beaucoup de connaissances sur la chimie et la minéralogie des sols.

J'exprime mes sincères remerciements à Mme Odile BABOT de m'avoir aidé à interpréter et exploiter les analyses ATD/ATG, ses explications sur la spectrométrie de masse ont été fort utiles pour l'interprétation des résultats.

Je souhaite remercier M. Adrien LECLECH du BRGM pour les analyses DRX ainsi que l'explication et l'interprétation des résultats DRX à partir des données de I'ICDD et son explication sur le principe de quantification des diffractogrammes.

Je remercie M. Christophe LANOS et Mme Anne PANTET d'avoir accepté d'être les rapporteurs de mon travail de thèse ainsi que M. Tikou BELEM pour son intérêt porté à cette étude.

Merci à tout le personnel de l'ambassade de France, plus particulièrement Mme Gwenola MALAM ISSA et Mme Christiane GUIDI-MOREL pour leur soutien et l'organisation de mes déplacements entre la France et le Niger.

Je remercie tous les collègues de thèse et de travail, qui ont su me réconforter, grâce à leur soutien cette thèse s'est déroulée dans de parfaites conditions.

Merci au directeur du laboratoire I2M, M. Denys BREYSSE de m'avoir accueilli dans son labo.

Je remercie infiniment mes parents, ma mère, mon père, mes frères et sœurs. Merci pour leur soutien qui a été pour moi une source de courage et de motivation. Qu'ils trouvent en ce travail toute ma gratitude.

Je ne finirai pas ces remerciements sans penser à mon ami Joanihas RAKOTOARISON BOIREAU pour son soutien, j'ose espérer que ce travail te prouvera à quel point ton soutien m'a été utile.

Enfin je remercie tous le corps professoral de l'université de Bordeaux et le personnel du laboratoire I2M pour tout le savoir qu'ils m'ont donné.

Résumé

Les latérites sont les sols les plus utilisés dans les travaux de génie civil, plus particulièrement en construction routière dans la plupart des pays de la zone intertropicale. Ce sont des sols résiduels ou détritiques provenant de l'altération des roches préexistantes. Ces sols contiennent en quantité appréciable des oxydes de fer et d'aluminium, de la kaolinite et de la silice, mais de faibles quantités d'oxydes de titane, de manganèse, de magnésium, …, etc. La grande diversité des composés chimiques des latérites rend leur caractérisation malaisée. En outre, les documents normatifs et les guides techniques utilisés pour le dimensionnement des chaussées en Afrique subsaharienne pour la plupart inadaptés, ne prennent pas en compte la spécificité des conditions climatiques et environnementales des formations latéritiques dans les projets routiers. Une caractérisation interdisciplinaire de ces sols avec la prise en compte des facteurs intervenant dans le processus de latéritisation permettrait de déterminer des propriétés plus précises, plus pertinentes et beaucoup plus représentatives. Ce travail a pour vocation la caractérisation et la détermination de l'aptitude des sols latéritiques du sud-ouest du Niger. La zone concernée par l'étude comporte sept gisements latéritiques aux contextes géologiques forts différents les uns des autres. Notre étude, basée sur diverses approches a permis de déterminer les propriétés géotechniques et mécaniques des sols d'une part et les propriétés chimiques et minéralogiques d'autre part. À l'issue de l'étude, deux catégories de sols sont à distinguer : [1] *les sols de bonne portance :* d'indice CBR de l'ordre de 100 contiennent en moyenne une teneur en fines n'excédant pas 12% et un indice de plasticité inférieur à 15. Pour ces sols, la portance dépend beaucoup de la taille des particules. Ces derniers ont une résistance élevée au cisaillement et un angle de frottement interne effectif φ' de l'ordre de 40° ainsi qu'une cohésion effective c' supérieure à 10 kPa. Leur comportement est dilatant au cours du cisaillement. Ils présentent de faibles valeurs en indice de vide et en perméabilité. De même, leur amplitude de tassement est faible. La bonne portance de ces sols se justifie principalement par leur teneur appréciable en oxydes de fer. L'attaque de la matrice fine par ces derniers se fait de manière diffuse ou par concrétionnement sous forme de cercles d'oolithes et de pisolithes ovoïdes tangents. [2] *les sols de faible portance :* la fraction fine et l'indice de plasticité sont élevés, respectivement de l'ordre de 25 et 30. La portance est de l'ordre de 30, l'angle de frottement interne inférieur à 30° et la cohésion inférieure à 5 kPa. Ces sols résistent faiblement au cisaillement et leur comportement est contractant, c'est-à-dire celui d'un sable lâche. Ils sont plus compressibles, encore moins perméables avec un coefficient de gonflement élevé. La faible portance de ces sols est imputable à leur faible teneur en oxydes de fer, ainsi que le mode d'attaque qui se fait de manière isolée.

L'amélioration des sols présentant une faible portance a été expérimentée en y rajoutant séparément une certaine teneur en liant hydraulique (ciment), en chaux (CaO) et en nodules latéritiques. Les analyses minéralogiques et chimiques ont montré que l'ajout des produits a conduit à une modification texturale et a favorisé la mise en place de composés chimiques néo-synthétisés ayant pour rôle principal de renforcer les liaisons entre les éléments minéraux contenus dans les échantillons de sol latéritique. Dans la plupart des cas, les échantillons améliorés ont présenté une bonne portance validant ainsi leur aptitude en construction routière.

Mots clés : *latérites, construction routière, minéralogie, oxydes de fer, amélioration, microanalyse X, portance, propriétés mécaniques et géotechniques, Niger.*

Abstract

Laterites are the most commonly used soils in civil engineering works, particularly in road construction in most countries of intertropical region. These are residual or detrital soils resulting from the alteration of pre-existing rocks. These soils contain a considerable quantity of iron and aluminum oxides, kaolinite and silica, but small quantities of titanium oxides, manganese, magnesium, etc. The large diversity of the chemical compounds of laterites makes their characterization difficult. Moreover, specification documents and technical guides used for road design in sub-saharan Africa, most of them unsuitable, do not take into account the specificity of climatic and environmental conditions of laterite formations in road projects. An interdisciplinary characterization of these soils, taking into account the factors involved in the lateritization process, should make it possible to be determined more precisely. It's also the best way to get more relevant and much more representative properties. The aim of this work is to characterize and determine the lateritic soils suitability of southwestern Niger in road construction. The area covered by the study consists of seven lateritic deposits with strong geological different contexts from one to another. Our study, based on various approaches, made it possible to determine the geotechnical and mechanical properties of the soils on the one hand and the chemical and mineralogical properties on the other hand. At the end of the study, two categories of soils are to be distinguished: [1] *soils with good bearing capacity* : CBR of around 100 contain average fines content not exceeding 12% and a plasticity index less than 15. For these soils, the bearing capcity depends very much on the size of the particles. They have a high shear strength, an effective internal friction angle φ' of the order of 40° and an effective cohesion c' greater than 10 kPa. Their behavior is dilatant during shear. They have low values in void ratio and in index permeability. Similarly, their amplitude of settlement is low. The good bearing capacity of these soils is mainly justified by their appreciable iron oxides content. The attack of the microstructure by the latter is done in diffuse way or by concretionary circles of oolites. [2] *the soils of low bearing capacity :* the fine fraction and the plasticity index are high respectively of the order of 25 and 30. The bearing capacity is around 30, the internal friction angle is less than 30° and the cohesion less than 5 kPa. These soils are weak to the shear and their behavior is contracting (loose sand behavior). They are more compressible and less permeable with a high swelling coefficient. The low bearing capacity of these soils is attributable to their low iron oxide content and to the mode of attack which is carried out in isolated way.

The improvement of soils with low bearing capacity has been tested separately by adding a certain amount of hydraulic binder (cement), lime (CaO) and lateritic nodules. Mineralogical and chemical analyzes showed that the addition of the products led to a textural modification and favored the production of neo-synthesized chemical compounds whose main role was to strengthen the links between the mineral elements contained in the lateritic samples. In most cases, the improved samples showed good bearing capacity and validated their road pavement suitability.

Key words: *laterite, road construction, mineralogy, iron oxides, improvement, microanalysis X, bearing capacity, mechanical and geotechnical properties, Niger.*

Table des matières

Remerciements ..... **iii**

Résumé ..... **v**

Abstract ..... **vi**

Liste des figures ..... **xii**

Liste des Tableaux ..... **xx**

Liste des notations, sigles et acronymes ..... **xxii**

0 CHAPITRE 0 : INTRODUCTION GENERALE **1**

0.1 Introduction 1

0.2 Généralités sur les latérites 3

0.3 Phénoménologie des terrassements routiers avec les sols latéritiques 3

0.4 Problématique liée à la dégradation des chaussées latéritiques et besoins en recherche 5

0.4.1 Principales causes de dégradation des chaussées 5

0.4.2 Les types de dégradation 7

0.5 Cadre de l'étude : objectifs et hypothèses 9

0.6 Structure de la thèse 10

0.7 Avancements et limites de l'étude 12

0.7.1 Contexte scientifique 12

0.7.2 Démarches utilisées et difficultés rencontrées 12

1 CHAPITRE I : REVUE DE LITTÉRATURE **19**

1.1 Définition des latérites 19

1.2 Distribution géographique des formations latéritiques 19

1.2.1 Dans le monde 19

1.2.2 En Afrique 20

1.3 Caractères généraux des profils latéritiques et facteurs de mise en place 21

1.3.1 Conditions de formation des sols latéritiques 22

1.3.2 Genèse des formations latéritiques 23

1.3.3 Définition d'un profil latéritique type 23

1.4 Facteurs de formation des latérites 25

1.4.1 Le climat (pluviométrie, température, bilan hydrique) 25

1.4.2 La topographie 26

1.4.3 Végétation et faune 27

1.4.4 La roche mère 27

1.4.5 Le temps 27

1.4.6 Synthèse sur la genèse des sols latéritiques 28
1.5 Caractéristiques morphologiques et physiques des latérites 32
1.5.1 Induration 32
1.5.2 Couleur 32
1.5.3 Densité 32
1.5.4 Structure 33
1.6 Processus de cuirassement des massifs latéritiques et types de structure mis en place 33
1.6.1 Cimentation 34
1.6.2 Imprégnation 34
1.6.3 Concrétionnement 35
1.6.4 Le recouvrement 36
1.6.5 La métasomatose 37
1.7 Caractéristiques chimiques et minéralogiques 37
1.7.1 Caractéristiques chimiques 37
1.7.2 Caractéristiques minéralogiques 39
1.7.3 Caractéristiques analytiques 40
1.8 Caractérisation à partir du processus pédogénétique 40
1.8.1 Les sols ferrugineux 40
1.8.2 Les sols ferralitiques 41
1.8.3 Les sols fersialitiques 42
1.8.4 Les ferrisols 43
1.9 Propriétés géotechniques et mécaniques des graveleux latéritiques 43
1.9.1 Identification et caractérisation des sols latéritiques 43
1.9.2 Caractéristiques principales des latérites 45
1.9.3 Classification des sols latéritiques 53
1.10 Processus de dégradation des routes latéritiques 58
1.11 Amélioration des propriétés des latérites par l'ajout d'un produit industriel ou naturel 59
1.11.1 Amélioration à la chaux 59
1.11.2 Amélioration au ciment 59
1.11.3 Amélioration aux nodules latéritiques (litho-stabilisation) 59
1.11.4 Comportement mécanique des assises traitées au liant hydraulique ou à la chaux 60
1.11.5 Effets de l'amélioration des performances de sols latéritiques sur les couches de chaussées 61
1.12 Conclusion 64

2 CHAPITRE II : METHODOLOGIE GENERALE D'ETUDE 69
2.1 Introduction 69
2.2 Données générales des sols latéritiques de la zone d'étude et facteurs de mise en place 70
2.2.1 Présentation de la zone d'étude 70
2.2.2 Zonage climatique et pédologique du Niger 71
2.3 Contexte géologique 72
2.3.1 Structure générale 72
2.3.2 Cadre géologique de la zone d'étude 73
2.3.3 Description des séquences pédologiques retrouvées au droit des gisements étudiés 80
2.4 Déterminisme des sols par les roches 85
2.5 Le modelé caractéristique des gisements de la zone d'étude 86
2.6 Facteurs environnementaux des sites latéritiques de la zone d'étude 87
2.6.1 La végétation 87
2.6.2 Le climat 88
2.6.3 Les températures 89
2.6.4 Les précipitations 89
2.7 Facteurs texturaux, morphologiques et physiques des latérites de la zone d'étude 90
2.7.1 Densité 90
2.7.2 Couleur 91
2.7.3 Structure 92
2.8 Matériel et méthodes 94
2.8.1 Essais géotechniques et mécaniques: méthodologie d'échantillonnage et de caractérisation 94
2.8.2 Analyses minéralogiques et chimiques 100
2.9 Synthèse sur la caractérisation mécanique et minéralogique 112
2.10 Conclusion 114
3 CHAPITRE III : PROPRIETES GEOTECHNIQUES ET MECANIQUES 119
3.1 Introduction 119
3.2 Procédures de caractérisation géotechnique 120
3.3 Propriétés géotechniques 121
3.3.1 Granulométrie 121
3.3.2 Limites d'Atterberg 127
3.3.3 Classification GTR et HRB des sols 129
3.3.4 Caractéristiques de compactage et de portance 131
3.3.5 Synthèse et discussion des résultats géotechniques 134

3.4 Propriétés mécaniques 136
3.4.1 Méthodologie générale 136
3.4.2 Caractéristiques de compressibilité 137
3.4.3 Caractéristiques de cisaillement 145
3.4.4 Recherche de corrélation entre les propriétés mécaniques (c', ϕ') et la portance (I_{CBR}) 154
3.4.5 Synthèse et discussion des résultats mécaniques 155
3.5 Analyse statistique des données 156
3.5.1 Recherche de corrélations simples entre les propriétés géotechniques 156
3.5.2 Analyses en Composantes Principales (ACP) : Interconnexions multiples 158
3.6 Conclusion 167
4 CHAPITRE IV : CARACTERISATION MINERALOGIQUE 173
4.1 INTRODUCTION 173
4.2 Étude pétrographique des échantillons 174
4.2.1 Texture à attaques ferrugineuses isolées 174
4.2.2 Texture à attaques ferrugineuses diffuses 176
4.2.3 Texture à oolithes 178
4.2.4 Synthèse de l'étude pétrographique 179
4.3 Composition minéralogique 179
4.3.1 Analyse à la diffraction des rayons X (DRX) 179
4.3.2 Diffractogrammes des échantillons latéritiques 180
4.3.3 Interprétation des résultats de DRX 188
4.3.4 Synthèse des analyses DRX 189
4.4 Analyses ATD / ATG couplées à la spectrométrie de masse 192
4.5 Microscopie électronique à Balayage et analyse à la sonde EDS des échantillons latéritiques 197
4.5.1 Analyse spectrale à l'EDS 197
4.5.2 Microanalyse à la sonde EDS par cartographie X-2D des échantillons des sites de Torodi et de Tillabéry 204
4.6 Analyses chimiques 218
4.7 Conclusion 221
5 CHAPITRE V : AMELIORATION DES PROPRIETES DES LATERITES 225
5.1 Introduction 225
5.2 Généralités sur l'amélioration et la stabilisation des matériaux latéritiques naturels 226
5.3 Procédures expérimentales 227
5.3.1 Technique de traitement aux nodules latéritiques 230

5.3.2 Amélioration à la chaux 233
5.3.3 Amélioration au ciment 233
5.3.4 Méthodologie expérimentale de caractérisation 234
5.4 Résultats des techniques d'amélioration des graveleux latéritiques 234
5.4.1 Technique d'amélioration par ajout de nodules latéritiques 234
5.4.2 Composition chimique et minéralogique des nodules latéritiques et de l'échantillon S3 avant et après ajout de nodules 241
5.5 Techniques d'amélioration à la chaux et au liant hydraulique 245
5.5.1 Résultats des essais géotechniques 245
5.5.2 Analyse minéralogique et chimique des échantillons avant et après ajout du produit de traitement 248
5.6 Conclusion 256
6 CHAPITRE VI : SYNTHÈSE GÉNÉRALE 261
6.1 Introduction 261
6.2 Classes de portance en fonction des données minéralogiques 261
6.3 Classes de portance en fonction des facteurs environnementaux 262
6.4 Classe de portance en fonction des propriétés géotechniques 262
6.5 Classes de portance en fonction des propriétés mécaniques 263
6.6 Autres facteurs influençant les performances des sols latéritiques 264
6.7 Synthèse des résultats d'amélioration des sols latéritiques à la chaux et au ciment 266
6.8 Conclusion 268
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES 273
Annexes 285
Références 309

Liste des figures

Chapitre 0

Figure 0-1: Fuseau granulométrique type pour un sol latéritique utilisable en couche de base (CEBTP, 1984). 5
Figure 0-2: Exemples de dégradations précoces de chaussées en latérite. A) Nids de poule générés par une ségrégation granulométrique (route Torodi). B) Nids de poule dus à un défaut de portance (Route Tahoua-Arlit). C) Tôle ondulée (route rurale en latérite dans la zone de Say). D) Défaut de portance causé par un problème d'assainissement (Zone de Fillingué). 8

Chapitre I

Figure 1-1: Distribution des formations latéritiques sur la surface du globe (Lyon Associates, 1971). 19
Figure 1-2: Les différentes formations latéritiques en Afrique. Relation entre le type de pédogenèse et le climat (Lyon Associates, 1971). 20
Figure 1-3: Exemple de profil latéritique type (Alexandre, 2002). 22
Figure 1-4: Définition morphologique du degré d'altération des roches (Little, 1969). 24
Figure 1-5: Profil type des sols ferrugineux, dit profil de Walther (1915). 25
Figure 1-6: Pédogenèse et évolution du phénomène de latéritisation (Maignien, 1966). 29
Figure 1-7: Classification des ions par Godschimdt (1937). 31
Figure 1-8: Faciès conglomératique. 34
Figure 1-9: Faciès lamellaire. 35
Figure 1-10: Faciès oolithique ou concrétionnaire. 36
Figure 1-11: Faciès vermiforme. 36
Figure 1-12: Faciès massif. 37
Figure 1-13: Processus de mise place des sols ferrugineux en savane (Lyon Associates, 1971). 41
Figure 1-14: Processus de mise en place des sols ferralitiques en forêt (Lyon Associates, 1971). 42
Figure 1-15 : Mise en évidence du comportement d'effondrement (Malomo, 1983). 50
Figure 1-16: Relation entre ICBR 95%OPM et valeur de bleu sur matériau total (Congo RDC). 56
Figure 1-17: Diagramme d'identification géotechnique des graveleux latéritiques proposé par les études du RDC. 57
Figure 1-18: Courbes granulométriques des sols du Nigéria en fonction de la roche mère. .. 58

Chapitre II

Figure 2-1 : Localisation de la zone d'étude A) Région de Tillabéry ; B) Région de Dosso. 70
Figure 2-2: Localisation des deux principaux bassins versants du Niger. A) Bassin des Iullemmeden. B) Bassin du Tchad. 72
Figure 2-3: Localisation du bassin paléozoïque à phanérozoïque des Iullemmeden (en grisé), avec les principaux linéaments et fossés mésozoïques de l'Afrique de l'Ouest (Bellion et al., 1989). 1 : Socle précambrien métamorphique ; 2 : chevauchement panafricain ou paléozoïque ; 3 : Linéament ou faille majeure ayant joué ou rejoué au Mésozoïque ; 4 : Dolérites liasiques ; 5 : Fossé jurassique de Nara ; 6 : Fossé crétacé. Le rectangle rouge est la zone d'étude. 74
Figure 2-4: Carte géologique de la bordure Sud-ouest du bassin des Iullemmeden et la position des différents sites de la zone d'étude. 76
Figure 2-5: Coupe géologique synthétique I de la bordure sud-ouest du bassin des Iullemmeden montrant qu'à l'ouest de la coupe le site de Guéchémé se situe sur des sables oolithiques CT3. 76
Figure 2-6*:* Coupe géologique synthétique II de la bordure sud-ouest du bassin des Iullemmeden montrant qu'à l'ouest de la coupe le site de Dosso se situe sur des sables et silts du CT3. 77
Figure 2-7 *:* Coupe géologique synthétique III de la bordure sud-ouest du bassin des Iullemmeden montrant qu'au Nord le site de Fillingué se situe sur les argiles ligneuses et sables fins moyens du CT2. 77
Figure 2-8 *:* Coupe géologique synthétique IV de la bordure sud-ouest du bassin des Iullemmeden montrant qu'au Sud-ouest de la coupe le site de Guéchémé se situe sur des sables et argiles du CT3. 78
Figure 2-9 *:* Profils latéritiques des sites situés sur le socle du Liptako (Torodi et Tillabéry). 81
Figure 2-10 *:* Profils latéritiques des sites du Continental Terminal 3 (Ouallam, Dosso et Guéchémé). 82
Figure 2-11 *:* Profil latéritique du site de Say (CT1). 84
Figure 2-12 *:* Profil latéritique du site de Fillingué (CT1). 85
Figure 2-13 *:* Photographies caractéristiques de profils latéritiques entablés dans la zone d'étude. A) Profil latéritique de Torodi (Birimien) (à entablement ferrugineux). B) Profil latéritique de Ouallam. (CT3) C) Profil latéritique de Say (CT1). D) Profil latéritique de Fillingué (sous de buttes-témoins) (CT2). 87
Figure 2-14 *:* Données pluviométriques des sites (Source : station de mesure de l'aéroport de Niamey [1985 – 2008]). 90
Figure 2-15 *:* Photographies caractéristiques des teintes des formations latéritiques de la zone d'étude. 91
Figure 2-16 *:* Photographies caractéristiques des faciès latéritiques rencontrés dans la zone d'étude. 92
Figure 2-17 : Dispositif permettant de réaliser l'essai œdométrique et éprouvette de sol après test de compressibilité. 98
Figure 2-18: Boite de cisaillement et éprouvette de sol après cisaillement. 99

Figure 2-19: Observation en lumière naturelle polarisée (LNP ; grossissement x40) d'une lame mince de latérite. La résine amorphe apparaît en gris-beige. Les différents minéraux apparaissent en teintes ocre et blanche. 102
Figure 2-20: Photographie d'un Microscope Électronique à Balayage (MEB). 103
Figure 2-21: Photographie d'un spectromètre de diffusion Raman. 104
Figure 2-22: Exemple de spectre recueilli à l'EDS faisant apparaître les atomes contenus dans l'échantillon analysé. 105
Figure 2-23: Vue à x 900 en BSE (électrons rétrodiffusés) au GAD (contraste de topographie et de numéro atomique Z). Taille de l'image : 366 x 286 µm. Cliché recueilli sur un échantillon latéritique de Tillabéry. 106
Figure 2-24: Spectre EDS moyen enregistré sur la surface entière du cliché de la Figure 2-23. 106
Figure 2-25: Cartographies élémentaires des différents éléments chimiques identifiés sur le spectre EDS moyen (Figure 2-24) mesuré sur la Figure 2-23 (site de Tillabéry). 108
Figure 2-26: Reconstitution statistique de phases tirée de l'analyse à l'EDS en mode cartographie de la Figure 2-23 (site de Tillabéry). La phase jaune qui couvre 61.5% de la surface est dominée par la kaolinite. La phase rouge (11% de la surface) est la plus riche en oxydes de Fe et Al (goethite et gibbsite). La phase bleue (28% de la surface est intermédiaire). 109
Figure 2-27: Interprétation minéralogique d'un spectre EDS relatif au site de Torodi quantifié (At %) par la méthode ZAF. 110
Figure 2-28: Exemple de spectres ATD-ATG du site d'étude de Torodi. 111

Chapitre III

Figure 3-1: Enveloppes des sols relativement bien inscrits dans le fuseau type recommandé par le CEBTP (1984) en couche de base. 124
Figure 3-2 : Enveloppes des sols mal inscrites dans le fuseau type recommandé par le CEBTP (1984) pour l'utilisation des graveleux latéritiques en couche de base. 125
Figure 3-3 : Classes de fréquence des paramètres $C_{80\mu m}$, D_{max}, C_u et C_c. 126
Figure 3-4 : Valeurs moyennes des propriétés de plasticité (WL, WP, IP et IC). 128
Figure 3-5 : Classes de fréquence des paramètres IP et WL. 129
Figure 3-6 : Classes de fréquence des paramètres γ_{dopm}, W_{opm}, I_{CBR95} et I_{CBR98}. 133
Figure 3-7 : Méthode de détermination graphique de la contrainte de pré-consolidation σ'_p par Casagrande. 138
Figure 3-8 : Méthode de détermination graphique du coefficient de consolidation Cv. 139
Figure 3-9 : Courbes de compressibilité des sols de faible amplitude de tassement. 142
Figure 3-10 : Courbes de compressibilité des sols de plus fortes amplitudes de tassement. 144
Figure 3-11 : Courbes de résistance au cisaillement ; A : Torodi ; B : Tillabéry ; C : Say ; D : Guéchémé. 146
Figure 3-12 : Courbes de déformation volumique en fonction du déplacement tangentiel ; A : Torodi ; B : Tillabéry ; C : Say ; D : Guéchémé. 147
Figure 3-13 : Courbes intrinsèques déduites des essais de cisaillement $\tau = f(\sigma)$, pour les sites de ; A : Torodi ; B : Tillabéry ; C : Say ; D : Guéchémé. 149
Figure 3-14 : Courbes de résistance au cisaillement ; A : Ouallam ; B : Fillingué. 150

Figure 3-15 : Courbes de déformation volumique en fonction du déplacement tangentiel ; A : Ouallam ; B : Fillingué. 151
Figure 3-16 : Courbes intrinsèques $\tau = f(\sigma)$ pour les sites de ; A : Ouallam ; B : Fillingué. 151
Figure 3-17 : Caractéristiques de cisaillement des échantillons de Dosso. 153
Figure 3-18 : Corrélations entre les propriétés mécaniques (c' et φ') et l'indice portant I_{CBR}. **A)** ICBR *vs.* φ' ; **B)** ICBR *vs.* c'. 154
Figure 3-19 : Corrélations simples retrouvées entre les propriétés géotechniques. 157
Figure 3-20 : Représentation des variables dans les plans factoriels. 159
Figure 3-21 : Représentation des individus dans les plans factoriels. 163

Chapitre IV

Figure 4-1 : Observation en lumière naturelle polarisée analysée (LNPA ; grossissement x4) des lames minces des échantillons prélevés sur les sites de Torodi, Ouallam, Fillingué et Dosso. La résine amorphe apparaît en gris-beige. Les différents minéraux apparaissent en teintes ocre, blanche, orange et jaune-orangée. 175
Figure 4-2 : Schéma de la texture à attaques ferrugineuses isolées des échantillons des sites de Torodi, Ouallam, Fillingué et Dosso. 176
Figure 4-3 : Observation en lumière naturelle polarisée analysée (LNPA ; grossissement x4) d'une lame mince sur l'échantillon de Tillabéry. La résine amorphe apparaît en gris-beige. Les différents minéraux apparaissent en teintes ocre et blanche, orange et jaune-orangée. 177
Figure 4-4 : Schéma de la texture à attaques ferrugineuses diffuses de l'échantillon de Tillabéry. 177
Figure 4-5 : Texture oolithique observée en lumière naturelle polarisée analysée (LNPA ; grossissement x4) de lames minces des échantillons de Say et Guéchémé. 178
Figure 4-6 : Schéma de la texture oolithique des échantillons de Say et Guéchémé. 178
Figure 4-7 : Diffractogramme et quantification Riedvelt de l'échantillon latéritique de Torodi. 181
Figure 4-8 : Diffractogramme et quantification Riedvelt de l'échantillon latéritique de Tillabéry. 182
Figure 4-9 : Diffractogramme et quantification Riedvelt de l'échantillon latéritique de Ouallam. 183
Figure 4-10 : Diffractogramme et quantification Riedvelt de l'échantillon latéritique de Say. 184
Figure 4-11 : Diffractogramme et quantification Riedvelt de l'échantillon latéritique de Fillingué. 185
Figure 4-12 : Diffractogramme et quantification Riedvelt de l'échantillon latéritique de Dosso. 186
Figure 4-13 : Diffractogramme et quantification Riedvelt de l'échantillon latéritique de Guéchémé. 187
Figure 4-14 : Corrélations entre les minéraux et la portance CBR. 190
Figure 4-15 : Courbes ATD et ATG des échantillons latéritiques des sites de Torodi, Tillabéry, Ouallam et Say. 193

Figure 4-16 : Courbes ATD et ATG des échantillons latéritiques des sites de Fillingué, Dosso et Guéchémé. 194
Figure 4-17 : Spectres de masse des hydroxyles (OH) contenus dans les échantillons. 196
Figure 4-18 : Spectres de masse de l'éau (H_2O) contenue dans les échantillons. 196
Figure 4-19 : Cliché en électrons rétrodiffusés : échantillon de Ouallam. **A)** Spectre de la zone A: silice dominante, **B)** Spectre de la zone B: oxydes de fer dominants, **C)** Spectre de la zone C: kaolinite dominante, **D)** Spectre de la zone D: oxydes de fer dominant. 198
Figure 4-20 : Cliché en électrons rétrodiffusés : échantillon de Say. **A)** Spectre de la zone A: silice dominante, **B)** Spectre de la zone B: kaolinite dominante, **C)** Spectre de la zone C: kaolinite dominante, **D)** Spectre de la zone D: kaolinite dominante / oxydes de fer. 199
Figure 4-21 : Cliché en électrons rétrodiffusés recueilli : échantillon de Fillingué. **A)** Spectre de la zone A: silice dominante, **B)** Spectre de la zone B: kaolinite dominante, **C)** Spectre de la zone C: Gibbsite dominante, **D)** Spectre de la zone D: Kaolinite / oxydes de fer. 201
Figure 4-22 : Cliché en électrons rétrodiffusés recueilli : échantillon de Dosso. **A)** Spectre de la zone A: oxydes de fer dominant, **B)** Spectre de la zone B: Illite/kaolinite, **C)** Spectre de la zone C: kaolinite dominante, **D)** Spectre de la zone D: Anatase / kaolinite. 202
Figure 4-23 : Clichés en électrons rétrodiffusés recueilli : échantillon de Guéchémé. **A)** Spectre de la zone A: silice dominante, **B)** Spectre de la zone B: oxydes de fer dominants / Kaolinite, **C)** Spectre de la zone C: kaolinite / oxydes de fer. 204
Figure 4-24 : Échantillon provenant du site latéritique de Torodi : A] Cliché formé en mode BSE (électrons rétrodiffusés) dans les conditions de faible pression (50 Pa). En mode BSE, les zones vives expriment les atomes lourds (numéro atomique Z d'éléments atomiques lourds) à cause du relief de la surface irrégulière de cet échantillon, le contraste topographique et par numéro atomique Z sont inclus dans cette image. **B]** Cartographie issue de l'analyse statistique des données spectrales. Les petits spots jaunes sont les zones de scotch carbone utilisé pour fixer l'échantillon, et ne sont donc pas couverts par celui-ci. Surfaces occupées par les phases : 18% pour la phase rouge, 64% pour la phase bleue et 17,5% pour les vides intergranulaires (en vert Figure 4-24-B) **C]** Superposition des cartographies élémentaires, Si en cyan, Fe en violet et Ti en jaune. Les zones en noir ne sont pas détectées par l'EDS (porosité inter-granulaire, pentes ou reliefs non orientés vers le détecteur EDS et/ou constituent des zones inaccessibles au faisceau incident d'électrons (cf. aux zones en vert sur la Figure 4-24-B). 206
Figure 4-25 : Analyse statistique de la cartographie 2D acquise à partir de la reconstitution de phases sur toute la surface du cliché de la Figure 4-24-A. **A]** Spectre caractérisant les zones en rouge sur la Figure 4-24-B. La quantification en pourcentage atomique (At %) a été obtenue grâce à la matrice de correction ZAF. Cette quantification fait ressortir une combinaison de phases (en % de surface) de 60% de silice (80% mol), 33% de kaolinite (10,1% mol) et 7% de goethite (9,4% mol). **B]** Spectre décrivant les zones bleues sur la Figure 4-24-B. La quantification en pourcentage atomique met également en evidence une combinaison de phases minérales (en % de surface) dominée par la kaolinite (80%), goethite (12%), silice (3,7%) et oxydes de titane (1,5%). 207
Figure 4-26 : Spectre mesuré sur la zone délimitée par la petite fenêtre blanche sur les Figure 4-24-B et C, riche en Titane apparaissant sous forme de petits points jaunes sur la Figure 4-24-C. La quantification en % atomique traduit une combinaison de phases minérales

(en % de surface) composées d'anatase (16%), de kaolinite (67,5%), de goethite (13%) et une faible quantité de silice (2,5%). 207
Figure 4-27 : Échantillon provenant du site latéritique de Tillabéry D] Cliché formé en mode BSE (électrons rétrodiffusés) dans les conditions de faible pression. **E]** Cartographie issue de l'analyse statistique des données spectrales. Les spectres EDS caractérisant en moyenne les trois phases sont fournis sur les Figure 4-28 et Figure 4-29 ainsi que leurs quantifications en % atomique et leur interprétation minéralogique. Les zones en jaune couvrent 61 % de la surface et sont dominées par la kaolinite. Les zones en rouge (11% de la surface) sont les plus riches en oxydes de fer et d'aluminium (goethite et gibbsite) et les zones en bleu (28% de la surface) sont des mélanges intermédiaires entre les deux phases précédentes. **F]** La superposition des cartographies élémentaires, Si en cyan, Fe en violet et Ti en jaune permettent de visualiser précisément les zones dominées par chaque élément atomique. Les zones en noir correspondent à celles qui n'ont pas été détectées par l'EDS. 208
Figure 4-28 : Analyse statistique de la cartographie 2D acquise à partir de la reconstitution de phases sur toute la surface du cliché de la Figure 4-27-D. **A)** Spectre (statistiquement identifié) caractérisant les zones en rouge sur la Figure 4-27-E. La quantification en pourcentage atomique (At %) traduit une combinaison de phases minérales (% de surface occupée par la phase en rouge) de 47,8% de goethite, 27,7% de kaolinite, 10,9% de gibbsite et des traces d'anatase. **B)** Spectre décrivant les zones bleues sur la Figure 4-27-E. La quantification en pourcentage atomique correspondante fait ressortir un mélange de kaolinite (47%), goethite (28%), gibbsite (6,7%) et de l'anatase en traces. 209
Figure 4-29 : Analyse statistique de la cartographie 2D acquise à partir de la reconstitution de phases sur toute la surface du cliché de la Figure 4-27-D. Spectre (statistiquement identifié) caractérisant les zones en jaune sur la Figure 4-27-E. La quantification en pourcentage atomique (At %) a été interprétée comme une combinaison de phases minérales (% de surface occupée par la phase en jaune sur la Figure 4-27-E de 65,2% de kaolinite, 13% de goethite et des traces de gibbsite et d'anatase. 210
Figure 4-30 : Spectre mesuré sur la zone délimitée par la petite fenêtre blanche sur la Figure 4-27-F, plus riche en titane apparaissant sous forme de petits points jaunes. La quantification en % atomique traduit une combinaison de phases minérales (en % de surface) composée de 29,7% d'anatase, 27,4% de goethite, 32,8% de kaolinite et 3,5% de gibbsite. 210
Figure 4-31 : Clichés d'échantillons provenant du site latéritique de Tillabéry. **A)** Cliché formé en mode BSE (électrons rétrodiffusés) dans les conditions de faible pression (50 Pa) sur la zone indiquée par la petite flèche blanche sur les Figure 4-27-E et F. **B)** Zoom sur les feuillets de kaolinite dans la partie supérieure de la Figure 4-31-A. **C)** Zoom sur les petites « boulettes » d'oxydes de fer dans la partie inférieure de la Figure 4-31-A. **D)** Spectre moyen mesuré sur la Figure 4-31-C. La quantification en % atomique typifie essentiellement une combinaison de phases minérales (% d'occupation) dominée par la goethite (57,8%) et de la kaolinite (37,3%). 211
Figure 4-32 : Échantillon prélevé sur le site de Torodi. **K)** Image de lame mince photographiée au microscope optique. **L)** Image de lame mince identifiée au MEB. **M)** Zoom sur la zone C de l'image L. 213

Figure 4-33 : Échantillon de Torodi. **A)** Spectre de la zone A dominée par la silice **B)** Spectre de la zone B dominée par la kaolinite. **C) et D)** Spectres des zones C et D dominées par un mélange hématite / kaolinite / silice. 214
Figure 4-34 : Spectres Raman du quartz et de l'hématite de l'échantillon de Torodi (Figure 4-32-L – Zones A, C et D). 214
Figure 4-35 : Échantillon de Tillabéry. **K)** Image de lame mince photographiée au microscope optique. **L)** Image de lame mince identifiée au MEB. 215
Figure 4-36 : Échantillon provenant du site latéritique de Tillabéry. **A)** Spectre de la zone A contenant majoritairement de la kaolinite. **B)** Spectre de la zone B caractérisée par un mélange d'oxydes de fer dominants et de kaolinite. 216
Figure 4-37 : Spectres Raman de l'hématite de l'échantillon prélevé sur le site de Tillabéry (Figure 4-35-L – Zone A et B). 216
Figure 4-38 : Échantillon de Say. **K)** Image de lame mince photographiée au microscope optique. **L)** Image de lame mince identifiée au MEB. 217
Figure 4-39 : Échantillon de Say. **A)** Spectre de la zone A caractérisé par un mélange goethite dominante / kaolinite. **B)** Spectre de la zone B comportant un mélange goethite / kaolinite dominante. 217
Figure 4-40 : Spectres Raman de la goethite de l'échantillon de Say dans les zones A et B de la Figure 4-38-L. 218
Figure 4-41 : Teneurs de silice et de sesquioxydes des échantillons de Tillabéry et Guéchémé. 219
Figure 4-42 : Teneurs de silice et de sesquioxydes de l'échantillon de Say. 219
Figure 4-43 : Teneurs de silice et de sesquioxydes des échantillons de Ouallam, Torodi, Fillingué et Dosso. 220
Figure 4-44 : Rapports S/R des échantillons de sols latéritiques. 220

Chapitre V

Figure 5-1: Résultats des propriétés géotechniques avant et après ajout de 10 et 15% de nodules aux échantillons latéritiques de Dosso. 228
Figure 5-2: Résultats des propriétés géotechniques avant et après ajout de 2, 4 et 6% de chaux aux échantillons latéritiques de Fillingué. 228
Figure 5-3: Résultats des propriétés géotechniques avant et après ajout de 3, 5 et 7% de ciment aux échantillons latéritiques de Ouallam. 229
Figure 5-4: A) Nodules latéritiques de la region de Ouallam; **B)** Nodules latéritiques en zone de pente (region de Say); **C)** Nodules latéritiques en *stone-line* au sein d'un profil latéritique (Fillingué) **D)** Nodules latéritiques au sommet d'un plateau latéritique (Région de Tillabéry). 230
Figure 5-5: Dalle gréseuse partiellement démantelée (region de Ouallam). 231
Figure 5-6: Cliché MEB d'une fracture fraîche d'un grain de nodule. 231
Figure 5-7: Spectres EDS recueillis sur les zones A, B, C et D (sur le cliché de la Figure 5-6). 232

Figure 5-8: Courbes granulométriques des 5 échantillons latéritiques non traités de la région de Dosso. 235
Figure 5-9: Courbes granulométriques des échantillons latéritiques de la région de Dosso avant et après traitement : comparaison de fuseaux granulométriques. 237
Figure 5-10: Droites intrinsèques de l'échantillon S3 avant et après ajout de nodules. 239
Figure 5-11: Courbes de déformation volumique de l'échantillon S3 avant et après traitement aux nodules. 240
Figure 5-12: Teneurs des éléments chimiques majeurs : silices et sesquioxydes permettant d'évaluer le ratio S/R. 241
Figure 5-13: Résultats du ratio S/R des latérites non traitées, traitées et des nodules latéritiques. 242
Figure 5-14: A gauche la vue au MEB de l'échantillon S3 avant traitement. À droite le spectre EDS mesuré sur le grain identifié par la lettre A sur l'image. 242
Figure 5-15: A gauche vue au MEB de l'échantillon S3 après traitement aux nodules. À droite le spectre EDS mesuré localement sur la zone identifiée par la flèche jaune. 243
Figure 5-16: Zoom de la zone riche en fer indiquée par la flèche jaune (structure filamentaire) ennoyée dans une matrice d'argile (kaolinite) et de silice, identifiée par la lettre A sur l'image de la Figure 5-15. 244
Figure 5-17: Zoom sur des zones riches en fer après mélange de l'échantillon S3 aux nodules latéritiques. **A)** Oxydes de fer en « grains de riz » ; **B)** Oxydes de fer en « boulettes». 244
Figure 5-18: Courbes granulométriques des échantillons latéritiques **A)** Fillingué avant et après amélioration à 4% de chaux et **B)** Ouallam avant et après stabilisation à 7% de ciment. 245
Figure 5-19: Diffractogramme et quantification Riedvelt de l'échantillon latéritique de Fillingué avant et après ajout de 4% de chaux. 249
Figure 5-20: Diffractogramme et quantification Riedvelt de l'échantillon latéritique de Ouallam avant et après ajout de 7% de ciment. 250
Figure 5-21: Image MEB recueillie sur une zone de l'échantillon latéritique de Fillingué amélioré par l'ajout de 4% de chaux. 251
Figure 5-22: Spectres EDS + quantification ZAF des zones A, B et C indiquées sur le cliché MEB de la Figure 5-21. 252
Figure 5-23: Cliché MEB correspondant au grossissement de la zone A sur le cliché de la Figure 5-21. Grains de quartz recouvert d'une fine pellicule composée de calcite, CSH, CAH, Ettringite… 253
Figure 5-24: Image MEB recueillie sur une zone de l'échantillon latéritique de Ouallam amélioré à 7% de ciment. 254
Figure 5-25: Spectres EDS + quantification ZAF des zones A, B, C, D et E indiquées sur le cliché MEB de la Figure 5-24. 255

Liste des Tableaux

Chapitre I

Tableau 1-1: Degré de latéritisation des gisements latéritiques en fonction du rapport S/R. . 38
Tableau 1-2: Rapport S/R selon la fraction granulométrique (Autret, 1980). 38
Tableau 1-3: Densité Relative (γ_s/γ_w) de quelques latérites (Gidigasu, 1976)..... 45
Tableau 1-4: Classification géotechnique de sols latéritiques de Hong Kong provenant de roches mères diverses (Lumb, 1962)..... 48
Tableau 1-5: Paramètres de résistance au cisaillement de quelques latérites de Hong Kong (Lumb, 1962)..... 48
Tableau 1-6: Perméabilité de quelques sols résiduels tropicaux (Gidigasu, 1976). 53
Tableau 1-7: Classification des graveleux latéritiques naturels de Côte d'Ivoire. 55
Tableau 1-8: Définition des classes de graveleux latéritiques du RDC. 57
Tableau 1-9: Caractéristiques géotechniques des sols de Nigéria en fonction de la roche mère. 58

Chapitre II

Tableau 2-1: Coordonnées GPS et altitudes moyennes des sites de la zone d'étude. 71
Tableau 2-2: Méthodologie générale de caractérisation. 112

Chapitre III

Tableau 3-1: Valeurs moyennes des caractéristiques granulométriques. 122
Tableau 3-2: Nombre d'échantillons prélevés par site. 123
Tableau 3-3: Caractéristiques moyennes déterminées à partir des limites d'Atterberg..... 127
Tableau 3-4: Résultats des classifications GTR et HRB. 129
Tableau 3-5: Caractéristiques de compactage et indices de portance. 132
Tableau 3-6: Résultats des essais œdométriques réalisés sur les éprouvettes des sols latéritiques peu compressibles; sites de Guéchémé, Tillabéry et Say. 141
Tableau 3-7: Résultats des essais œdométriques réalisés sur les éprouvettes des sols latéritiques compressibles ; sites de Torodi, Ouallam, Fillingué et Dosso. 143
Tableau 3-8: Valeurs moyennes de teneurs en eau et de poids volumiques humides ayant servi au reconditionnement des échantillons de sol dans la boîte de cisaillement..... 145
Tableau 3-9: Valeurs des contraintes de cisaillement (τ) et de déplacement maximum (hf) pour les 4 sites (Figure 3-11). 146
Tableau 3-10: Valeurs des paramètres mécaniques effectifs, (c' et φ') déduites des courbes intrinsèques (Figure 3-13) pour les 4 sols latéritiques au comportement dilatant..... 149
Tableau 3-11: Valeurs des contraintes de cisaillement et des déplacements des échantillons de Ouallam et Fillingué. 150
Tableau 3-12: Résultats des essais de cisaillement des sites de Ouallam et de Fillingué..... 152
Tableau 3-13: Résultats des essais de cisaillement des échantillons de Dosso. 152
Tableau 3-14: Matrice des corrélations issue de l'analyse ACP..... 160

Chapitre IV

Tableau 4-1: Teneur des espèces minérales retrouvées et quantifiées à la DRX..... 189
Tableau 4-2: Températures correspondant aux départs et gains de masse. 194
Tableau 4-3: Pertes de masse liées aux transformations chimiques lors de la cuisson..... 195
Tableau 4-4: Pics Raman de référence de quelques minéraux couramment retrouvés dans les sols latéritiques. 215
Tableau 4-5: Composition chimique: éléments majeurs et mineurs des sols latéritiques..... 218

Chapitre V

Tableau 5-1: Quantités des phases minérales retrouvées au sein du nodule latéritique. 232
Tableau 5-2: Résultats des essais géotechniques des sols latéritiques naturels de Dosso. ... 235
Tableau 5-3: Comparaison entre les critères standards du CEBTP (couche de base et couche de fondation) et les valeurs mesurées sur l'échantillon S3 non traité (colonne « S3 non traité ») et traité à 15% de nodules (colonne « S3 traité »). 238
Tableau 5-4: Résultats des essais à la boîte de cisaillement. 239
Tableau 5-5: Résultats des essais de compressibilité à l'œdomètre..... 241
Tableau 5-6: Résultats des limites d'Atterberg des échantillons de Fillingué avant et après ajout de 4% de chaux. 246
Tableau 5-7: Résultats des limites d'Atterberg des échantillons de Ouallam avant et après ajout de 7% de ciment. 246
Tableau 5-8: Résultats des essais Proctor et CBR des échantillons de Fillingué avant et après ajout de 4% de chaux. 247
Tableau 5-9: Résultats des essais Proctor et CBR des échantillons de Ouallam avant et après ajout de 7% de ciment. 247

Chapitre VI

Tableau 6-1: Caractéristiques minéralogiques en fonction des classes de portance..... 261
Tableau 6-2: Facteurs environnementaux et génétiques en fonction des classes de portance. 262
Tableau 6-3: Propriétés géotechniques en fonction des classes de portance. 263
Tableau 6-4: Propriétés mécaniques en fonction des classes de portance. 264

Liste des notations, sigles et acronymes

A	Anatase
AASHTO	American Association of State Highway Transportation
ACP	Analyse en Composantes Principales
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATD	Analyse Thermique Différentielle
ATG	Analyse Thermique gravimétrique
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BS	British Standards
BSE	Back Scattered electroncs
c’	Cohésion effective
$C_{0,5mm}$	Pourcentage de passants au tamis de 0,5 mm (mortier)
C_{2mm}	Fraction sableuse (passants au tamis de 2 mm)
$C_{2\mu m}$	Pourcentage de passe à 2 µm (fraction argileuse)
C_{5mm}	Pourcentage de passant au tamis de 5 mm
$C_{80\mu m}$	Pourcentage de fines (passants au tamis de 80 µm)
CAH	Aluminate de calcium hydraté
CASH	Alumino-silicate de calcium hydraté
CBR	Californian Bearing Ratio
C_c	Coefficient de courbure
Cc	Coefficient de compressibilité
Cg	Coefficient de gonflement
CEBTP	Centre d’Expertise du Bâtiment et des Travaux Publics
CH	Continental Hamadien
CI	Continental Intercalaire
CSH	Silicate de calcium hydraté
CT	Continental Terminal
CTGA	Comité Transnational des Géotechniciens d’Afrique
C_u	Coefficient d’uniformité ou coefficient de Hazen
C_{vmoy}	Coefficient de consolidation moyen

D_{max}	Diamètre maximal des plus gros grains
DRX	Diffraction des Rayons X
e_0	Indice des vides initial
EDAX	Energy Dispersive Analysis of X-rays
EDS	Energy Dispersive Spectrometer
E'_{oed}	Module œdométrique effectif
φ'	Angle de frottement interne effectif
γ_d	Poids volumique sec
γ_h	Poids volumique humide
γ_{opm}	Poids volumique à l'Optimum Proctor Modifié
γ_s	Poids volumique des particules solides
γ_w	Poids volumique de l'eau
G	Goethite
Gi	Gibbsite
GAD	Gaseous Analytical Detector
GTR	Guide Technique de réalisation des Remblais et des couches de forme
H	Hématite
HRB	High Research Board
I2M	Institut d'Ingénierie et de Mécanique
I_c	Indice de consistance
ICDD	International Center of Diffraction Data
I_P	Indice de Plasticité
IRD	Institut de Recherche et de Développement
K	Coefficient de perméabilité
K	Kaolinite
Ki	Ratio Silice/oxydes d'aluminium
LBTP	Laboratoire du Bâtiment et des Tavaux Publics
LNPA	Lumière Naturelle Polarisée Analysée
LNTP/B	Laboratoire National des Travaux Publics et de Bâtiments
LPA	Lumière Polarisée Analysée

M	Microcline
MEB	Microscope Électronique à Balayage
MO	Matière organique
OPM	Optimum Proctor Modifié
ORSTOM	Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
P2RT	Projet de Révision des Règles Techniques
pH	Potentiel Hydrogène
PST	Partie Supérieure des Terrassements
Q	Quartz
R_{2mm}	Refus au tamis de 2 mm
Rc	Résistance à la compression
RDC	République Démocratique du Congo
Rt	Résistance à la traction
RTR	Recommandations pour les Terrassements Routiers
RX	Rayon X
σ'_p	Contrainte de pré-consolidation effective
Sm	Spectrométrie de masse
S/R	Ratio Silice/Sesquioxydes
τ'	Contrainte tangentielle ou de cisaillement effective
USCS	Unified Soil Classfication System
UU	Unconsolidated Undrained (Non consolidé non drainé)
WDS	Wavelengh Dispersive Spectrometer
W_L/L_L	Limite de Liquidité
W_{nat}	Teneur en eau naturelle
W_P/L_P	Limite de Plasticité
W_{opm}	Teneur en eau à l'Optimum Proctor Modifié
ZAF	Numéro atomique Z, Absorption A, Fluorescence F

CHAPITRE 0

INTRODUCTION GENERALE

0 CHAPITRE 0 : INTRODUCTION GENERALE

0.1 Introduction

Depuis des décennies, l'étude des sols latéritiques connaît un regain d'intérêt, avec l'aménagement des infrastructures routières, concomitant au développement économique des pays de l'Afrique subsaharienne. Ce travail de thèse a comme principal objectif l'apport de nouvelles connaissances scientifiques et techniques, sur les sols tropicaux et leur valorisation pour la construction routière.

Depuis quelques années, la meilleure efficacité des équipements pour la réalisation d'analyses minéralogiques et chimiques permet de déterminer qualitativement et quantitativement les principaux minéraux que contiennent ces sols. Ainsi, le couplage des essais géotechniques, macroscopiques avec ces analyses microscopiques devient effectif, sous réserve de mettre en place des procédures convenables. De nombreux travaux effectués par les géologues et pédologues montrent la litho-dépendance des latérites avec la roche mère en Afrique de l'Ouest. Ces affirmations parfois controversées restent cependant trop générales et donc sans un véritable intérêt pour les ingénieurs en construction routière. De même, les ingénieurs œuvrant dans ce domaine négligent parfois l'apport des analyses fines. Ainsi, une meilleure compréhension interdisciplinaire constitue certainement de nos jours, une réelle avancée. Ce travail s'inscrit dans cette logique. L'utilisation des matériaux locaux pour la réalisation des routes est une démarche logique qui peut s'avérer difficile à mettre en œuvre en présence de sols complexes tels que les latérites. Pour cela, il est proposé dans un premier temps l'évaluation de leurs propriétés géotechniques et mécaniques et dans un deuxième temps la détermination de leurs compositions chimiques et minéralogiques. Le but final du travail étant bien évidemment la formalisation de la variabilité des propriétés géotechniques des sols latéritiques en fonction des caractéristiques microstructurales et environnementales.

En effet, les graveleux latéritiques constituent une ressource très prisée dans l'industrie de la construction au Niger, plus particulièrement en construction de routes revêtues et non revêtues. Une étude plus appropriée pour déterminer leurs caractéristiques mécaniques et géotechniques ne saurait se faire sans une analyse poussée. Comme l'ont montré de nombreuses études, une caractérisation efficiente et réaliste de ces matériaux passe par une étude pluridisciplinaire adoptée pour nos travaux de recherche.

Il est reconnu que les constituants minéralogiques et la microstructure conditionnent et influencent les propriétés géotechniques des sols latéritiques (Ogusanwo 1988 ; Ibrahima, 2007). De même, Adebisi (2013) a démontré que le mode de formation et la composition minéralogique de la roche mère conditionnent la cohésion et les caractéristiques de compressibilité de ces sols. Leur caractérisation en vue d'une utilisation en construction routière doit par conséquent se faire en prenant en compte d'une part la microstructure et la composition minéralogique et d'autre part, les facteurs environnementaux et pédogénétiques ayant favorisé leur mise en place.

Nos travaux de recherche concernent les formations latéritiques situées aux alentours de Niamey (capitale du Niger). Lors des travaux de terrain nous avons tout d'abord étudié les facteurs géologiques et les caractéristiques environnementales des gisements latéritiques retenus pour l'étude. Des échantillons de sol y ont été ensuite prélevés suivant un maillage défini dans chaque zone d'étude dans le but de les identifier, de les classer et de vérifier leur aptitude en construction routière.

Par ailleurs, l'étude des propriétés des graveleux latéritiques supposerait que l'on ait une idée de l'effet des propriétés sur les remblais et couches de fondation et de base latéritiques sur le comportement mécanique des chaussées sous circulation. Cela nous renvoie aux constatations de détérioration précoce des routes construites avec ces matériaux. Dans la plupart des cas, des désordres apparaissent bien avant le délai pour lequel elles ont été conçues.

La question est de savoir si ces matériaux sont-ils partiellement étudiés en application routière, les aspects génétiques et géologiques étant le plus souvent ignorés ? Une autre question que l'on pourrait se poser est aussi la conformité des documents normatifs (généralement étrangers) auxquels se réfèrent les concepteurs utilisant les graveleux latéritiques comme matériaux de construction. Sont-ils adaptés à ces sols qui constituent des matériaux très évolués et évolutifs ? Quels pourraient être les formalismes à mettre en place à titre complémentaire grâce à l'apport des analyses chimiques et minéralogiques dans la détermination des propriétés physiques et mécaniques des sols latéritiques ? Les techniques actuelles de caractérisation et de mise en œuvre sont-elles conforment aux matériaux latéritiques ? Voilà substantiellement les questions sur la base desquelles sont formulées nos hypothèses de recherche.

La compréhension du processus de formation des gisements latéritiques ainsi que leurs caractéristiques physiques et mécaniques permet de fournir des idées sur l'efficacité des techniques de construction actuellement en vigueur. L'étude des sols latéritiques en construction et en entretien des routes nous permettra de dégager et de formaliser les méthodologies conformes.

Dans ce travail, des techniques d'amélioration et de stabilisation des graveleux latéritiques ne répondant pas aux critères d'utilisation en routier ont également été expérimentées. Les expériences menées concernent l'amélioration des graveleux latéritiques par l'ajout de matériaux stabilisant tels que la chaux et le ciment ainsi que la litho-stabilisation par l'ajout de nodules latéritiques concassés constituant des blocs de pierre largement disponibles sur la plupart des gîtes latéritiques du Niger.

Une compréhension améliorée des relations entre les sols latéritiques dans leur milieu naturel et leur comportement une fois compactés dans un remblai ou une couche de chaussée aiderait certainement à rattacher leurs propriétés au comportement des routes.

0.2 Généralités sur les latérites

Le mot « latérite » a été pour la première fois suggéré par Buchanan (1807) pour désigner un matériau servant à la construction et exploité dans les régions montagneuses de Malabar (Inde). Buchanan le décrit comme suit : ce matériau présente l'aspect d'un dépôt ferruginisé, à morphologie vésiculaire. Il est apparemment non stratifié, et se situe en faible profondeur dans les sols. Lorsqu'il est frais il peut être découpé en blocs réguliers à l'aide d'un instrument tranchant. Exposé à l'air, il durcit rapidement et résiste remarquablement aux agents météorologiques. Dans les dialectes locaux ces formations sont dénommées « terre à briques ». Le nom « latérite » n'est donc que la traduction latine d'une terminologie vernaculaire. Latérite a pour racine « later » qui signifie brique en latin, ceci uniquement par référence à l'utilisation de ces blocs (Maignien, 1966 ; Autret 1983 ; Bourgeon & Gunnell, 2005). Les théories traitant de l'origine et de la formation des latérites sont variées (Alexandre, 2002 ; Adewuyi & Okosun, 2013). Sur un plan historique il faut distinguer trois périodes.

- Les premières hypothèses, déjà anciennes (moitié 19ème siècle), se rattachent aux études effectuées en Inde. Elles s'appuient sur la description des matériaux et leur mode de gisement. Cependant, le mot « Latérite » peut comporter plusieurs définitions et quoi qu'il en soit, la définition donnée par Buchanan n'a plus qu'une valeur historique (Bourgeon & Gunnell, 2005).
- La seconde période concerne le développement des analyses chimiques et partiellement minéralogiques. Elle contribue à l'élargissement de la définition du terme latérite. Elle prend naissance à la fin du 19ème siècle jusqu'à une époque récente.
- Enfin, actuellement, l'introduction des méthodes de pédologie expérimentale permet d'aborder le problème dans son aspect dynamique et génétique.

Certains auteurs affirment que :

- la latérite est un produit détritique et sédimentaire,
- la latérite est un produit résiduel d'altération des roches,
- et enfin, la latérite est d'origine volcanique.

Chaque hypothèse se justifie en partie d'après la morphologie et le gisement des latérites. L'origine volcanique s'appuie sur l'aspect scoriacé et le développement en bancs horizontaux sur les coulées basaltiques du Deccan en Inde. (Maignien, 1966).

0.3 Phénoménologie des terrassements routiers avec les sols latéritiques

Lorsque les sols latéritiques sont abondants, ils sont mis en remblai. Ils sont réservés pour la partie supérieure des terrassements (PST), pour la couche de forme. Les sols latéritiques aux meilleures qualités portantes sont utilisés pour la réalisation des assises de chaussée (couche de fondation et couche de base). On a tendance à admettre que les déformations par tassement des remblais de hauteur moyenne (de l'ordre de 10 m) sont admissibles.

Cependant, un problème important est celui de l'érosion des talus en sols latéritiques peu cohésifs ; il faut alors raidir les pentes au maximum, y favoriser le développement de la végétation et prévoir des fossés de crête et des descentes d'eau étanches. Selon Bagarre (1990), les pentes les plus usuelles des talus de remblai latéritique sont de 3/2 pour les hauteurs moyennes (de l'ordre de 10 m) et de 1/1 pour les hauteurs plus importantes (c'est-à-dire supérieures à 10 m). En déblais, les terrains latéritiques ont le plus souvent une tenue satisfaisante, pour peu qu'on adopte les pentes convenables en fonction de la hauteur. Le compactage des matériaux dont la fraction fine est souvent importante est contrôlé par la teneur en eau mais à condition que le degré de saturation des sols n'excède pas 90 à 95%. Aussi, la prise en compte de l'indice de consistance permet de définir dans la plupart des cas les conditions de compactage des terrains. Il faut préciser que les valeurs d'indice de consistance ne doivent pas dépasser 1,6 car au-delà de cette valeur le sol devient sec et donc difficilement compactable.

Les graveleux latéritiques satisfont généralement les critères d'aptitude en couches de forme. Il est demandé le plus souvent un degré de compactage d'au moins 95% de l'OPM et une portance minimale (CBR à 4 jours d'imbibition à 95% de l'OPM) dépendant des ressources locales en matériaux et des pratiques usuelles. En tout état de cause, le Guide du CEBTP (1984) recommande d'éliminer en tête de plateforme les sols ayant, selon les conditions climatiques, un pourcentage de fines supérieur à 35% et un IP supérieur à 30 et le gonflement linéaire dans le moule CBR devra rester inférieur à 2%.

La couche de fondation des chaussées est le domaine d'utilisation privilégié des graveleux latéritiques naturels. L'épaisseur de couche de fondation en graveleux latéritiques après compactage varie de 15 à 50 cm selon la nature des sols de plateforme et de l'importance du trafic. Un CBR minimum de 30 pour la couche de fondation (25 est toléré pour un trafic t < 300 véhicules/jour). Les valeurs de l'IP et de teneur en fines étant respectivement plafonnées à 25 et 35%. Aussi, des recommandations d'homogénéisation des matériaux d'un gisement devront être suivies pour ne pas craindre des zones de sous-dimensionnement. Le graveleux latéritique s'adapte plus ou moins aux contraintes qu'il subit. Il n'en demeure pas moins qu'il reste sensible à la fatigue et à la densification. Selon Bagarre (1990), des essais de plaque répétés ont montré que les déformations permanentes importantes sont obtenues. C'est ainsi que 1000 cycles de chargement à la contrainte de 2 bars effectivement développée sur une couche de fondation entraînent une déformation permanente de 80/100 à 100/100 mm. Il s'ensuit que des matériaux de qualité suffisante (CBR = 30) doivent être utilisés en couche de fondation et qu'il pourra être nécessaire de les améliorer.

Le critère fondamental de convenance d'un matériau pour la couche de base est le CBR qui doit être au minimum de 80 pour une compacité de 95% à l'OPM ; cette portance est rarement atteinte quand les matériaux subissent une imbibition de 4 jours comme c'est le cas dans les pays à forte pluviométrie. En zone sèche, de type sahélien comme le Niger, le CBR obtenu après le poinçonnement immédiat des échantillons est parfois, sinon souvent satisfaisant. Cependant, aucun pays de la zone sahélienne ne dispose d'un guide ou un document de spécifications permettant le zonage des localités où la valeur du CBR peut être prise en compte sans pour autant imbiber les éprouvettes de sol avant poinçonnement.

Les critères d'acceptabilité des graveleux latéritiques naturels en couche de base, compatibles avec un CBR minimal de 80 (CBR de 60 admis pour les faibles trafics) sont entre autres : un IP inférieur à 15, une teneur en fines n'excédant pas 20 et la granulométrie doit parfaitement s'inscrire dans le fuseau type (Figure 0-1) recommandé par le CEBTP (1984) dans le Guide de dimensionnement des chaussées en Afrique tropicale.

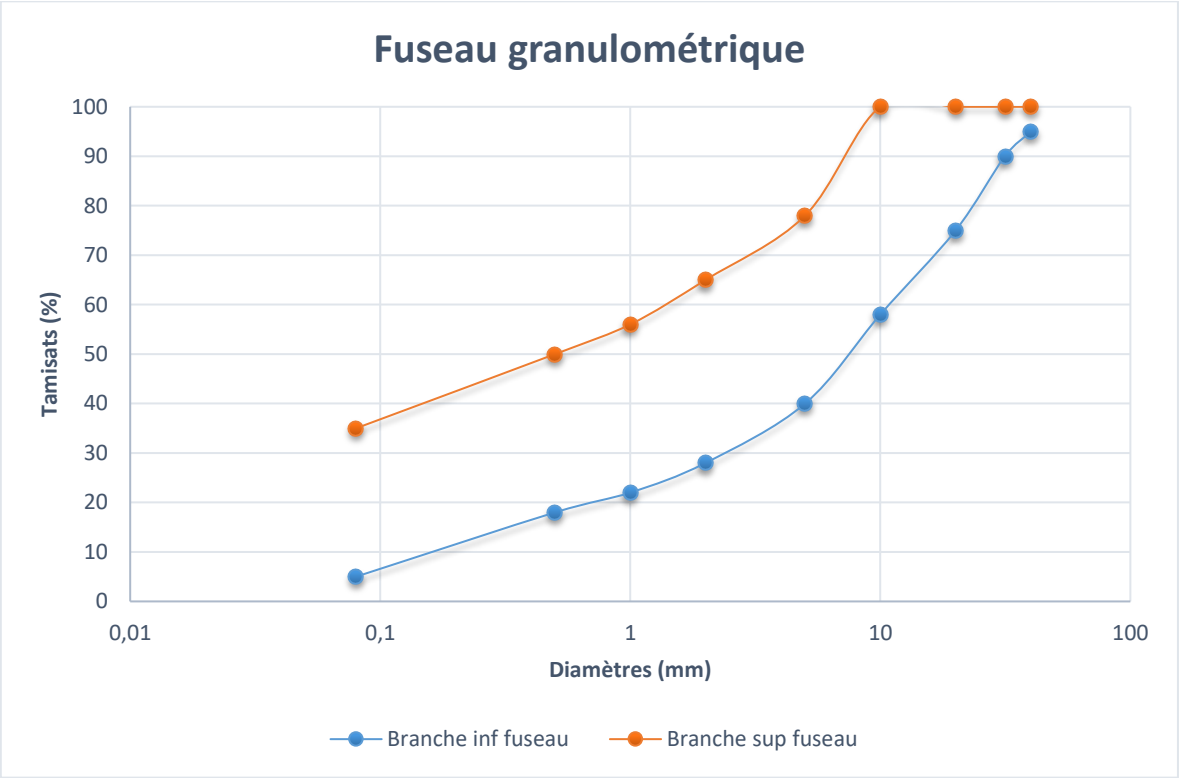


Figure 0-1: Fuseau granulométrique type pour un sol latéritique utilisable en couche de base (CEBTP, 1984).

L'augmentation du pourcentage de fines avant et après compactage Proctor, devra rester inférieure à 8%. Concernant le compactage in-situ, le rouleau à pneus est l'engin de compactage le mieux adapté aux graveleux latéritiques. Des études (Lyon Associates, 1971 ; Bagarre, 1990 ; Autret, 1980) ont montré qu'un surcroît de compactage n'est pas recommandé à cause de la fragilisation du matériau et la teneur en eau de compactage doit rester voisine de $W_{opm} \pm 1\%$.

0.4 Problématique liée à la dégradation des chaussées latéritiques et besoins en recherche

0.4.1 Principales causes de dégradation des chaussées

Les chaussées évoluent et se dégradent essentiellement sous l'effet du trafic lourd et des conditions climatiques. La rapidité de cette évolution et les désordres qui apparaissent sont également liés à la nature et à l'épaisseur des matériaux utilisés ainsi que leurs conditions de fabrication et de mise en œuvre. Certains désordres consécutifs à l'instabilité d'un support de chaussée (remblais ou terrain naturel) sont dans bien des cas indépendants du trafic et du climat.

0.4.1.1 Le trafic

L'usure de la couche de roulement est la conséquence directe des efforts de cisaillement qui se manifestent au contact des pneumatiques. Elle entraine essentiellement des pertes de matériaux, le polissage des granulats, la diminution de la rugosité. Elle dépend du trafic et est également fonction de la croissance des véhicules et se trouve surtout aggravée par le trafic des poids lourds. La fatigue des couches inférieures au contraire résulte des efforts verticaux de transmission des charges à la couche de fondation. La répétition des contacts inter-granulaires entraine des effets d'attrition, la production de fines et l'augmentation de la plasticité.

La couche de roulement devenant moins rigide, les déformations sous charges augmentent, deviennent irréversibles, et il en résulte sa destruction plus ou moins rapide. Ces phénomènes de fatigue sont fonction non seulement du cycle des charges mais aussi et surtout des charges sur essieux. Le respect de la limitation des charges à l'essieu revêt donc d'une importance capitale pour une bonne exploitation de la route en adéquation avec les hypothèses de dimensionnement. Aussi le respect de la charge à l’essieu permet d’établir un diagnostic assez réaliste lorsque les désordres ne sont pas occasionnés par le trafic.

0.4.1.2 Les conditions climatiques

Le paramètre le plus nuisible pour le corps de chaussée est la présence de l'eau. L'eau pénètre dans le corps de chaussée:

- ✓ par infiltration,
- ✓ par percolation,
- ✓ par remontées capillaires.

Nous savons que la teneur en eau d'un sol si elle est trop élevée peut provoquer des désordres importants en modifiant la portance ou en favorisant l'attrition de certains granulats comme les graveleux latéritiques.

0.4.1.3 La qualité des matériaux

Elle est d'une importance capitale car il est difficile de faire une route de bonne qualité en utilisant des matériaux aux caractéristiques mécaniques médiocres. Les dégradations liées à la mauvaise qualité des matériaux peuvent être causées par :

- ✓ une granulométrie incorrecte (ségrégation ou hétérogénéité granulométrique),
- ✓ un défaut de portance (ICBR faible),
- ✓ un pourcentage élevé de fines (tamisât à 80 µm),
- ✓ une dureté des granulats insuffisante,
- ✓ des granulats sales (matières végétales),
- ✓ un polissage rapide des granulats de fabrication défectueuse (spécialement pour les enrobés),
- ✓ un malaxage insuffisant.

0.4.1.4 La mise en œuvre

Même si la qualité du liant et des granulats est excellente, le dimensionnement bien fait, une mauvaise réalisation au cours de la mise en œuvre, de la manutention ou lors du compactage pourra se traduire par un ouvrage fini d'une qualité médiocre. Ainsi, divers défauts de mise en œuvre peuvent conduire à des dégradations aux conséquences variées:

- ✓ les défauts de compacité aux accotements : peuvent conduire à un affaissement sous la charge des poids lourds, ce phénomène résulte du fluage de la couche de base,
- ✓ les poches de points faibles en couche de base : favorisent l'apparition d'une cassure du revêtement plus rigide et une formation de nids de poule ou de flaches,
- ✓ le défaut de compacité sur l'assise et sur la plate-forme : la conséquence immédiate est l'existence de poches de points faibles conduisant à des orniérages ou pelades,
- ✓ un mauvais accrochage du revêtement sur la couche de base : peut donner lieu à un faïençage de la chaussée, à une pelade du revêtement,
- ✓ le compactage excessif des couches de chaussée: contribue souvent à la mise en place d'ornières,
- ✓ le défaut ou l'excès d'arrosage constitue un sérieux problème sur les chantiers routiers, l'utilisation d'une planche d'essai doit systématiquement se faire pour tout chantier routier afin d'estimer les bonnes quantités en fonction des conditions climatiques.

Les causes des dégradations au niveau des chaussées non revêtues sont similaires à celles des chaussées revêtues. On y retrouve essentiellement l'action du trafic, de l'eau et de la qualité des matériaux utilisés. Cependant, à cause du défaut de protection de leurs surfaces de roulement contre les agressions, les effets de ces sollicitations sont accentués. Sous l'effet de la circulation, l'usure générale de la couche de roulement est accélérée, la tôle ondulée et les nids de poule se développent et l'on note des déformations au niveau des points de virage.

De même sous l'action de l'eau, des ravines transversales et longitudinales se créent et les effets de l'eau peuvent même atteindre la plateforme rendant ainsi le passage des véhicules difficile, voire impossible.

0.4.2 Les types de dégradation

Les dégradations les plus couramment rencontrées se classent en deux grandes familles : les dégradations structurelles et les dégradations superficielles. Les premières apparaissent au sein de la structure de chaussée ou de son support et remettent en cause le patrimoine. Les secondes prennent naissance dans la couche de surface de la chaussée et affectent d'abord ses qualités superficielles avant d'évoluer en profondeur.

0.4.2.1 Les dégradations structurelles (Type A)

Elles caractérisent un état structurel de la chaussée, soit liées à l'ensemble des couches d'assise et du sol support, soit seulement liées à la couche de surface. Ce sont des dégradations issues d'une insuffisance de capacité structurelle de la chaussée. On y trouve essentiellement les déformations et les fissurations par fatigue (Figure 0-2).

0.4.2.2 Les dégradations non structurelles (Type B)

Encore appelées dégradations superficielles, elles engendrent des réparations qui généralement ne sont pas liées à l'aspect structurel de la chaussée. Leur origine est soit un défaut de mise en œuvre, soit un défaut de qualité d'un produit, soit une condition locale particulière que le trafic peut accentuer. Les formes de dégradation les plus courantes sont: les fissurations (hors fatigue), les arrachements et les mouvements de matériaux. Des exemples de dégradations de routes revêtues et non revêtues sont illustrés sur la planche de la Figure 0-2.

Figure 0-2: Exemples de dégradations précoces de chaussées en latérite. **A)** Nids de poule générés par une ségrégation granulométrique (route Torodi). **B)** Nids de poule dus à un défaut de portance (Route Tahoua-Arlit). **C)** Tôle ondulée (route rurale en latérite dans la zone de Say). **D)** Défaut de portance causé par un problème d'assainissement (Zone de Fillingué).

En somme, la plupart des désordres constatés sur les chaussées sont soit liés à une mauvaise caractérisation des graveleux latéritiques, un problème de mise en œuvre, un problème d'assainissement, ou un souci de contrôle et de réglementation de la charge à l'essieu. L'un dans l'autre, l'optimisation de la construction des routes latéritiques en Afrique tropicale doit être au cœur des projets pour garantir une retombée économique satisfaisante. Cependant, l'utilisation des normes actuelles n'étant pas en parfaite adéquation avec la caractérisation des sols latéritiques, une recherche sérieuse et rigoureuse s'impose. Une étude adaptée aux conditions locales des gisements latéritiques et une analyse de leur minéralogie permettraient sans doute de mettre en place les premières bases permettant d'accéder à l'élaboration de procédures expérimentales et de modes opératoires propres aux graveleux latéritiques. Une telle étude nécessiterait la contribution d'experts et chercheurs ayant des connaissances très spécialisées sur les sols en question.

0.5 Cadre de l'étude : objectifs et hypothèses

Les sols les plus utilisés en construction routière en Afrique, au sud du Sahara, sont les graveleux latéritiques. Ils ont été utilisés pour la construction des routes dans les programmes de développement des infrastructures des pays tropicaux. Les latérites ou sols latéritiques constituent une grande famille de sols qui se forment dans les régions tropicales humides et arides et qui résultent d'un processus particulier d'altération. Certaines classes de ces sols sont utilisées en corps de chaussées (couches de base et couches de fondation), en appliquant des règles souvent inadaptées, à partir de règles générales d'aptitude des sols au compactage. Les latérites sont plus ou moins abondantes selon les régions et leur utilisation systématique comme matériaux de construction nécessite la mise place de techniques appropriées pour leur caractérisation. Dans ce contexte, il devient nécessaire d'évaluer les ressources disponibles et d'étudier comment l'on pourrait étendre le domaine des propriétés acceptables pour ces sols ou utiliser des matériaux naturels de remplacement.

L'enjeu majeur de la recherche sera donc de concevoir une réponse aux besoins en sols latéritiques et le développement économique sans compromettre les atouts environnementaux du Niger. Plus précisément, dans quelle mesure l'utilisation de ces matériaux, maîtrisée par un outil d'intervention publique peut-elle contribuer à assurer un développement durable et une gestion intégrée.

Au Niger, les graveleux latéritiques sont couramment utilisés pour la construction des routes, remblais, digues, pistes rurales, ouvrage d'accès…etc. La plupart des études portées sur ces sols montrent la carence de leur évaluation vis-à-vis des conditions climatiques locales et les facteurs géologiques et génétiques ayant favorisé leur mise en place. Il faut rappeler que dans la plupart des projets d'infrastructure où la ressource latéritique est concernée, les critères d'aptitude de ces matériaux pour leur utilisation sont régis par des documents normatifs ne cadrant pas souvent avec certaines nuances spatio-temporelles et climatiques des sols africains. Pour répondre à ces questions, nous avons adopté dans le cadre de notre travail une étude multi-conceptuelle et interdisciplinaire, en suivant la méthodologie suivante :

- ✓ comprendre d'abord les graveleux latéritiques dans leur environnement ainsi que l'appréciation des facteurs géologiques et génétiques majeurs ayant favorisé leur genèse ;
- ✓ échantillonnage et détermination des caractéristiques géotechniques et mécaniques suivant une implantation représentative des sondages dans chaque gisement étudié ;
- ✓ appréciation de la roche mère et des facteurs pédologiques, du modelé, de la végétation et la pluviométrie sur les formations latéritiques ;
- ✓ analyse statistique de la variabilité des propriétés géotechniques vis-à-vis de leur performance et recherche éventuelle de corrélations ;
- ✓ détermination de la composition chimique et minéralogique des graveleux latéritiques prélevés ;
- ✓ tentatives de mise en relation des propriétés physiques et mécaniques aux propriétés chimiques et microstructurales ;

- ✓ évaluation de l'influence de la microstructure des sols latéritiques sur la portance ;
- ✓ estimation de l'influence du mode de revêtement des oxydes de fer sur les propriétés mécaniques ;
- ✓ mise en lumière des limites des textes réglementaires actuellement utilisés pour l'évaluation des propriétés géotechniques des sols latéritiques ;
- ✓ expérimentation de la stabilisation et l'amélioration des graveleux latéritiques de faibles performances par ajout de produit industriel ou matériau naturel local ;
- ✓ analyse des échantillons améliorés et mise en lumière des facteurs ayant conféré la bonne portance aux sols après ajout du produit stabilisant.

Cela a permis de confronter plusieurs approches (macros et micros) pour la caractérisation des gisements latéritiques retenus pour l'étude et comprendre les phénomènes ayant aboutis à leur formation.

Par ailleurs, les résultats issus des essais mécaniques, physico-chimiques et minéralogiques ont permis de sanctionner les hypothèses émises lors de l'analyse des facteurs environnementaux, climatiques et géologiques.

Ainsi, les conclusions issues de l'analyse et l'interprétation des facteurs génétiques et géologiques seront confrontées à celles issues des différentes études techniques réalisées pour la caractérisation mécanique et minéralogique des sols. L'un des outils les plus efficaces pour étudier un vaste ensemble de données est la recherche d'interconnexions multiples entre celles-ci. L'étude de la variabilité de la portance des sols par la recherche d'interconnexions multiples a comme principal objectif la détermination de valeurs seuils pour lesquelles certaines propriétés géotechniques influencent sensiblement leur portance. Nous pourrons ensuite les relier si possible à leur localisation ou à des facteurs plus généraux tels que la composition minéralogique, le lieu et le mode de formation de chaque gisement.

En effet, l'objectif d'une étude plus large des sols latéritiques, à l'échelle d'un pays, le Niger, ou de plusieurs pays, comme la zone intertropicale du continent africain, consisterait à trouver des relations nouvelles entre les différentes propriétés des graveleux latéritiques, de définir les facteurs influençant leur comportement mécanique en remblai ou en couches de chaussée, pour établir ensuite des règles applicables à ces sols lors des études de projets ou plus généralement pour la définition d'une politique à l'échelle d'un pays. Cela pourrait se faire par une analyse statistique de vastes ensembles de données couvrant d'une part les sols d'origine variée et d'autre part les sols de paramètres variés. Cette étude permettrait de dégager une approche quantitative et qualitative des graveleux latéritiques vis-à-vis de leur aptitude en technique routière. Les propriétés ainsi mesurées, seront comparées aux spécifications en vigueur au Niger pour les travaux d'aménagement routier.

0.6 Structure de la thèse

Pour parvenir aux résultats recherchés, nous avons adopté une démarche chronologique dont les différentes parties sont rapportées dans six chapitres successifs et complémentaires.

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique sur l'état actuel des connaissances internationales des matériaux latéritiques. Ce chapitre fournit des éléments sur la genèse des sols latéritiques, le milieu environnemental et géologique. Nous y présenterons également les détails du phénomène de latéritisation ainsi qu'une synthèse des caractères généraux des sols latéritiques et les facteurs intervenant dans leur mise en place ainsi que leurs caractéristiques morphologiques et physiques. Nous passerons également en revue les facteurs chimiques, minéralogiques, physiques, géotechniques et mécaniques jouant un rôle notable sur le comportement de ces sols ainsi que l'influence des modes d'essai et de prétraitement.

Dans le deuxième chapitre, seront présentés le contexte géologique et environnemental des gisements latéritiques de la zone d'étude et la méthodologie générale de caractérisation. Les différents aspects développés dans cette partie concernent la géologie des gisements latéritiques, les facteurs environnementaux influençant leurs propriétés tels que la végétation, le climat, la température et les précipitations. Nous présenterons également les facteurs texturaux, morphologiques et physiques tels que la densité, la couleur et les différentes structures retrouvées. Les matériels ayant permis l'évaluation des caractéristiques globales des échantillons latéritiques de la zone d'étude y sont également présentés.

Le troisième chapitre est consacré à la détermination des propriétés géotechniques et mécaniques des graveleux latéritiques. En effet, les résultats obtenus suite aux essais de caractérisation ont présenté une forte dispersion. Une étude par les méthodes statistiques a donc été adoptée pour la détermination des tendances sur la variabilité des propriétés étudiées afin de déterminer des corrélations et interconnexions multiples entre celles-ci. L'étude statistique utilisée est l'analyse en composantes principales (ACP) à travers la mise en relation de l'indice portant CBR des sols et les autres propriétés géotechniques telles que la plasticité, la granulométrie, les références de compactage, … etc.

Le quatrième chapitre présente les résultats de la caractérisation minéralogique et chimique des sols provenant de l'ensemble de la zone d'étude. Dans cette partie les différentes approches minéralogiques et chimiques ont permis d'apprécier la composition chimique et minéralogique de ces sols et la description de leur microstructure, les familles de pores ainsi que l'organisation et la combinaison des différentes phases minérales.

Dans le cinquième chapitre de notre travail, nous détaillerons les techniques d'amélioration et de stabilisation des graveleux latéritiques. Ces techniques ont pour vocation principale d'améliorer la portance des sols présentant des performances mécaniques naturellement faibles.

Le sixième chapitre est dédié à une analyse synthétique des seuils de variabilité de la portance des sols vis-à-vis des propriétés mécaniques, géotechniques, environnementales et microstructurales sous forme de tableaux synthétiques de données. Il inclut également la discussion des résultats des techniques d'amélioration des sols.

Le travail s'achève enfin sur une conclusion générale abordant les résultats majeurs auxquels nous sommes parvenus et des perspectives.

0.7 Avancements et limites de l'étude

0.7.1 Contexte scientifique

Le projet de thèse porte sur les matériaux latéritiques du Niger, utilisés en construction routière. La grande diversité des minéraux se trouvant au sein des sols latéritiques rend leur comportement souvent imprévisible en application routière. Les matériaux latéritiques ont la propriété de s'indurer seulement après humidification et dessèchement successifs. La latérite, du fait de sa pédogenèse, sa constitution minéralogique et son caractère de matériau résiduel évolutif possède un comportement instable lorsqu'elle est compactée en couches de chaussée. Ces sols, pourtant très utilisés en aménagement routier au Niger ne conviennent tous pas en couches de chaussée. Certains emprunts latéritiques sont de *facto* abandonnés lorsque les propriétés géotechniques sont en deçà des valeurs requises pour une utilisation en routier.

Notre travail consiste dans un premier temps à rechercher et à identifier des gisements latéritiques dans une zone choisie (Niamey[1] et périphéries et la Région de Dosso). Les critères de choix des sites sont principalement basés sur les hypothèses que nous nous sommes assignées au début de l'étude. En d'autres termes, ces critères sont principalement les dissemblances notoires relatives aux éléments tels que la typologie des sols, la géologie (type de roche mère), les facteurs climatiques (pluviométrie, température, mode de drainage, type de modelé…), la couleur, la morphologie, la végétation et les données pédologiques (position des horizons différentiés, nature détritique ou résiduelle des formations étudiées).

L'étude et l'analyse des données physiques et minéralogiques permettront de distinguer les sols par classes de portance en fixant des seuils pour chaque paramètre considéré. De cette façon, les sols de faible portance pourraient être facilement identifiés. La suite de notre étude consistera à étudier l'aptitude des sols de faible portance améliorés par ajout de liant hydraulique (ciment), de la chaux et des matériaux naturels largement disponibles sur les emprunts latéritiques appelés *nodules latéritiques.* Il s'agit de la recherche d'une technique de revalorisation ou d'amélioration des matériaux latéritiques de faibles caractéristiques géotechniques les rendant inadmissibles en couches d'assise. Des essais mécaniques et géotechniques seront réalisés sur les mélanges obtenus pour déterminer les différentes propriétés avant et après l'amélioration. Les analyses fines qui seront réalisées avant et après les mélanges permettront de mettre en lumière les composés ayant permis l'amélioration de la portance et le mécanisme par lequel se sont opérées les modifications apportées par l'ajout du produit stabilisant.

0.7.2 Démarches utilisées et difficultés rencontrées

Comme tout travail de recherche, une étude bibliographique a été au préalable entreprise de manière générale sur les latérites. Celle-ci a permis d'appréhender tout d'abord les facteurs (nature de la roche mère, climat, pluviométrie, température,…etc.) nécessaires à la formation des sols latéritiques.

[1] Capitale du Niger

Nous nous sommes ensuite intéressés aux facteurs pédogénétiques de ces sols notamment en Afrique intertropicale en prenant en compte les facteurs principaux tels que la pluviométrie et le mode de lessivage. Cela a permis de catégoriser les différentes unités pédogénétiques des sols latéritiques à travers le monde et celles qu'on rencontre au Niger. Le mot « latérite », qui est un vocable générique a ainsi été réparti en plusieurs sous-catégories à savoir les sols ferrugineux, ferralitiques, fersialitiques, ferrisols, lathosols…etc., chaque sous-catégorie ayant des propriétés plus ou moins spécifiques. L'accent a ensuite été mis sur les différentes classifications existantes sur ces sols dans plusieurs pays et les classifications universelles appliquées à tous les sols latéritiques à travers le monde afin de préciser en fonction de tous ces paramètres la catégorie dans laquelle l'on peut ranger les sols du Niger. L'avantage d'une telle démarche permet d'établir une première approche prédictive du comportement mécanique des latérites à partir des caractéristiques géotechniques élémentaires et sur leur mode de formation.

Le sud-ouest du Niger, où les latérites sont abondantes avec des propriétés géotechniques relativement contrastées a été retenu comme zone d'étude. Les paramètres géotechniques, mécaniques, chimiques et minéralogiques de 7 zones du secteur d'étude ont été évalués. Cette étude permet de dégager les principales caractéristiques des latérites du Niger ainsi que leur composition minéralogique. La démarche consisterai donc à évaluer l'impact des éléments minéraux sur les principaux paramètres considérés dans un projet de construction routière principalement le rôle des oxydes de fer et leur mode de revêtement de la matrice. Grâce à cette méthodologie nous avons pu écarter les techniques déjà en vigueur dans le pays et qui s'avèrent coûteuses et inadaptées à l'utilisation de ces sols en aménagement routier.

0.7.2.1 Démarches utilisées et résultats obtenus

Il faut rappeler que certaines propriétés géotechniques influent souvent les unes sur les autres (par exemple la quantité de fines et l'indice de plasticité). L'analyse en composantes principales (ACP) a permis la détermination des frontières d'influence entre celles-ci. Quelques corrélations ont été retrouvées entre les paramètres géotechniques et ces résultats sont pour la plupart corroborés par les analyses chimiques et minéralogiques.

Des résultats de microanalyse x et l'analyse des éléments majeurs, nous avons obtenu les spectres des différents faciès rencontrés au sein des matrices des échantillons analysés. Les principaux faciès retrouvés sont les phases à dominance ferrugineuse, les phases transitionnelles fer-argile et les phases argileuses (principalement la kaolinite, l'illite et la smectite en traces). Quelques phases éparses de silice, soufre, phosphore, titane, vanadium…etc. y ont été également retrouvées, mais en faibles teneurs.

Pour établir la liaison et la disposition des faciès au sein de la matrice, nous avons établi une cartographie des éléments minéraux à travers une approche statistique des principaux spectres retrouvés majoritairement dans la matrice. Connaissant d'une part les signatures spectrales des minéraux retrouvés dans les échantillons naturels et des échantillons traités (stabilisés ou améliorés) ainsi que leur disposition au sein de la matrice, et d'autre part la composition minéralogique du matériau utilisé pour le traitement, nous avons pu estimer les liaisons chimiques qui se sont mises en place après le traitement.

Cela a permis de connaître les nouvelles liaisons chimiques qui confèrent la bonne performance aux matériaux latéritiques traités. Ces techniques seront par la suite perfectionnées après modélisation et réajustement des paramètres.

Le traitement expérimenté par l'ajout de nodules latéritiques (litho-stabilisation) s'est révélé prometteur car celui-ci a permis d'améliorer significativement la capacité portante des sols. Des essais géotechniques comparatifs ont été effectués sur les matériaux latéritiques avant et après traitement. *In fine*, il s'avère que les latérites naturelles de faibles propriétés géotechniques et de faible portance ont été significativement améliorées à partir d'un ajout de 15% de nodules latéritiques. Nous estimons qu'à l'issue de l'étude, la litho-stabilisation des sols latéritiques par les nodules latéritiques revêt un intérêt tout particulier. Ceci se justifie par la facilité d'accès à ces nodules et dont l'extraction et la production ne nécessiteraient pas la mise en place d'un positif industriel de grande envergure. Il est vrai que nos travaux expérimentaux permettent d'ouvrir des pistes pour une recherche plus poussée mais il n'en demeure pas moins que ces derniers restent limitatifs eu égard à la nature et à la variété de nodules que l'on peut retrouver sur les gisements latéritiques. Quoi qu'il en soit, nos travaux de recherche ont permis de parvenir à des résultats plausibles, validant par conséquent la dimension économique que pourrait engendrer le perfectionnement de l'amélioration des sols latéritiques par l'ajout de nodules.

Les essais géotechniques et mécaniques déjà effectués ont par ailleurs permis de lister les différentes classes retrouvées ainsi que le comportement mécanique des sols à travers les essais de cisaillement et essais œdométriques.

0.7.2.2 Difficultés et incertitudes liées aux méthodes de caractérisation choisies

Les travaux de recherche entrepris dans le but de la mise en place d'une démarche fiable et représentative de caractérisation des graveleux latéritiques du Niger requièrent l'utilisation de plusieurs techniques afin de disposer d'un vaste ensemble de données aussi bien physiques que minéralogiques.

Les méthodes physiques concernent la détermination des propriétés géotechniques à travers les essais usuels permettant de déterminer la distribution granulométrique et les critères de plasticité via l'évaluation expérimentale des limites d'Atterberg. Ces données sont également utiles pour la classification des sols échantillonnés. Les caractéristiques optimales de compactage et de portance sont déterminées grâce aux essais Proctor et de poinçonnement des éprouvettes de sol suivant les modes opératoires en vigueur. Les essais mécaniques ont permis de compléter les données géotechniques en permettant d'estimer le comportement des sols latéritiques face aux phénomènes de tassement et de cisaillement.

La nature graveleuse des latérites constitue un véritable obstacle dans le pilotage des essais géotechniques et principalement les essais mécaniques. Les essais de cisaillement et de compressibilité sont effectués sur la classe granulaire 0/5 mm des sols afin d'obtenir des données faiblement influencées par la nature graveleuse. Cela constitue une première limite dans la caractérisation mécanique des sols étudiés puisque ces essais ne sont pas effectués sur la totalité des classes granulaires.

En effet, les graveleux latéritiques contiennent des blocs de roche de diamètre dépassant parfois 100 mm. Or la boîte de cisaillement utilisée a pour dimensions 60x60 mm et la cellule œdométrique de diamètre 50 mm. La réalisation d'un essai de cisaillement sur un tel échantillon ne pourrait conduire qu'à des résultats très approximatifs puisque les éléments grossiers biaiseront à coup sûr les propriétés telles que l'angle de frottement interne, la cohésion, l'indice des vides, l'amplitude des tassements, …etc. Aussi la confection des éprouvettes de sol contenant des éléments grossiers ne peut en aucun cas permettre l'obtention d'une surface plane de cisaillement. Les blocs contenus dans les sols latéritiques sont dans la plupart des cas, des agrégats incluant à la fois des grains de quartz reliés à la kaolinite par les oxydes de fer. Aussi, les essais de cisaillement étant réalisés sur des échantillons totalement saturés en eau, l'application d'une charge, même de faible niveau provoquera la désagrégation des blocs et donc la surestimation des amplitudes de tassement. Les raisons qui nous ont poussés à effectuer les essais mécaniques sur la fraction 0/5 mm sont simplement dues au fait que les éléments grossiers, en deçà de 5 mm influencent peu les propriétés mécaniques. La surface de cisaillement est certes rugueuse malgré l'utilisation de cette classe granulaire mais pas assez pour influencer considérablement les propriétés mécaniques qui en sont déduites. L'expérience a également montré que ce sont les éléments fins qui jouent un rôle primordial dans le comportement mécanique des sols latéritiques.

Les analyses minéralogiques basées sur diverses approches ont permis l'accès à une compréhension généralement maîtrisée de la composition minéralogique des échantillons de sol et l'interconnexion entre les différentes phases minérales. Par exemple, les analyses DRX permettent dans un premier temps d'inventorier les différents éléments minéraux contenus dans les sols. Ces minéraux sont ensuite quantifiés à l'aide des pics de diffractogramme par une méthode appropriée. Les investigations à l'ATD/ATG se sont révélées fort utiles pour la confirmation de la présence des phases minérales majeures au sein des échantillons. Lorsque ces analyses sont couplées à la spectrométrie de masse, elles permettent de valider les principaux minéraux retrouvés à la DRX. Les analyses au MEB sont quant à elles réalisées pour décrire la microstructure et les familles de vides inter-granulaires. La microanalyse à la sonde EDS est ensuite réalisée sur une zone choisie pour étudier le mode de disposition et l'interconnexion des différentes phases minérales retrouvées dans les sols ainsi que leur quantification par la méthode ZAF.

Malgré la combinaison des analyses DRX, ATD/ATG/Sm et MEB nous n'avons pas pu mettre en évidence ou du moins à discriminer certaines phases minérales ou certains minéraux polymorphes. Cependant, les données de la littérature permettent dans la plupart des cas de valider les résultats qui paraissent très probables. En fin de compte nous arrivons à détecter les principales phases minérales, leur disposition au sein de la matrice et la teneur de chaque élément minéral. Néanmoins, celles-ci ne permettent pas de discriminer les oxydes de fer dont les plus courants sont la goethite et l'hématite de même que la gibbsite et la boehmite. Malgré la combinaison de ces diverses techniques d'analyse, les résultats auxquels nous sommes parvenus sont limités. Ces méthodes d'analyse sont effectuées à des échelles différentes.

En DRX les analyses se font sur des volumes de poudre latéritique et les analyses MEB constituent une microanalyse X de surface dont la qualité des résultats dépend beaucoup du relief de la zone choisie. En d'autres termes, lorsque la surface de l'échantillon présente des reliefs importants la qualité des résultats d'analyse est affectée. L'échantillon doit donc présenter une surface rigoureusement plane permettant une bonne détection par la sonde EDS des électrons rétrodiffusés. Les analyses à la DRX sont également limitées puisque qu'elles ne permettent de détecter que les composés bien cristallisés. Les minéraux amorphes et ceux présentant un défaut d'empilement dans leur réseau cristallin sont rarement détectés. Les diffractogrammes recueillis sur les échantillons sont interprétés à l'aide de la base de données de l'ICDD mais les modèles de diffractogramme qui y sont retrouvés sont parfois difficilement ajustables aux diffractogrammes expérimentaux des échantillons. La quantification des phases cristallisées à l'aide des pics du diffractogramme est approximative mais la méthode de Riedvelt utilisée permet l'obtention de valeurs plus pertinentes et réalistes. Les analyses ATD et ATG apportent peu d'informations sur les phases minérales détectées à la DRX. Il s'agit d'une méthode complémentaire permettant de valider de manière certaine la présence des principales phases minérales. En revanche, le couplage de ces analyses à la spectrométrie de masse a permis de mettre en évidence des phases minérales supplémentaires.

Toutes les méthodes précédemment citées n'ont pas permis de distinguer la nature des oxydes de fer c'est-à-dire leur forme hydratée (goethite) et la forme non hydratée (hématite). Cela a été possible grâce au couplage de la microscopie optique à la spectrométrie X au MEB et à la spectroscopie Raman. Cette dernière permet, grâce aux pics caractéristiques des minéraux de les identifier de manière très précise. Les zones riches en oxydes de fer présentant un intérêt particulier sont d'abord repérées sur les lames minces en microscopie optique. Ces zones sont ensuite identifiées au MEB et en spectroscopie Raman. Les spectres recueillis au Raman permettent de distinguer le type d'oxydes de fer (hématite ou goethite). Enfin, le type d'oxyde de fer retrouvé sur un spectre EDS est quantifié par la méthode ZAF au MEB. L'observation des lames au microscope optique a également permis d'apprécier les principaux minéraux et la nature de la texture ainsi que le mode d'attaque des oxydes de fer ; mais les phases mineures n'ont pas pu être identifiées.

CHAPITRE I

REVUE DE LITTERATURE

1 CHAPITRE I : REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Définition des latérites

Au sens général du terme, la latérite est un matériau fortement altéré, riche en oxydes secondaires de fer, d'alumine ou des deux. Elle est à peu près dépourvue de bases et de silicates primaires, mais peut contenir de grandes quantités de quartz et de kaolinite (Cole, 1836 ; Clark, 1938 ; Campbell, 1917 ; Gidigasu, 1976 ; Autret, 1980 ; Avwenagha, et al., 2014 ; Giorgis, et al., 2014). La latérite a la propriété de s'indurer seulement après humidification et dessèchement successifs (Alexander & Cady, 1962 ; Segalen, 1967 ; Gidigasu, 1976). Il faut noter que, le mot latérite comporte plusieurs sous-groupes de sols qui se différencient selon les caractéristiques pédogénétiques, les facteurs du milieu, et les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques. En résumé, Maignien (1958) précise que seule l'induration est une caractéristique spécifique de la latérite puisque les autres données peuvent être retrouvées dans d'autres types de sols ou matériaux argileux.

1.2 Distribution géographique des formations latéritiques

1.2.1 Dans le monde

Les latérites sont largement répandues à travers le monde, mais plus particulièrement en régions intertropicales d'Afrique, d'Australie, des Indes, du Sud-est Asiatique et de l'Amérique du Sud (Figure 1-1).

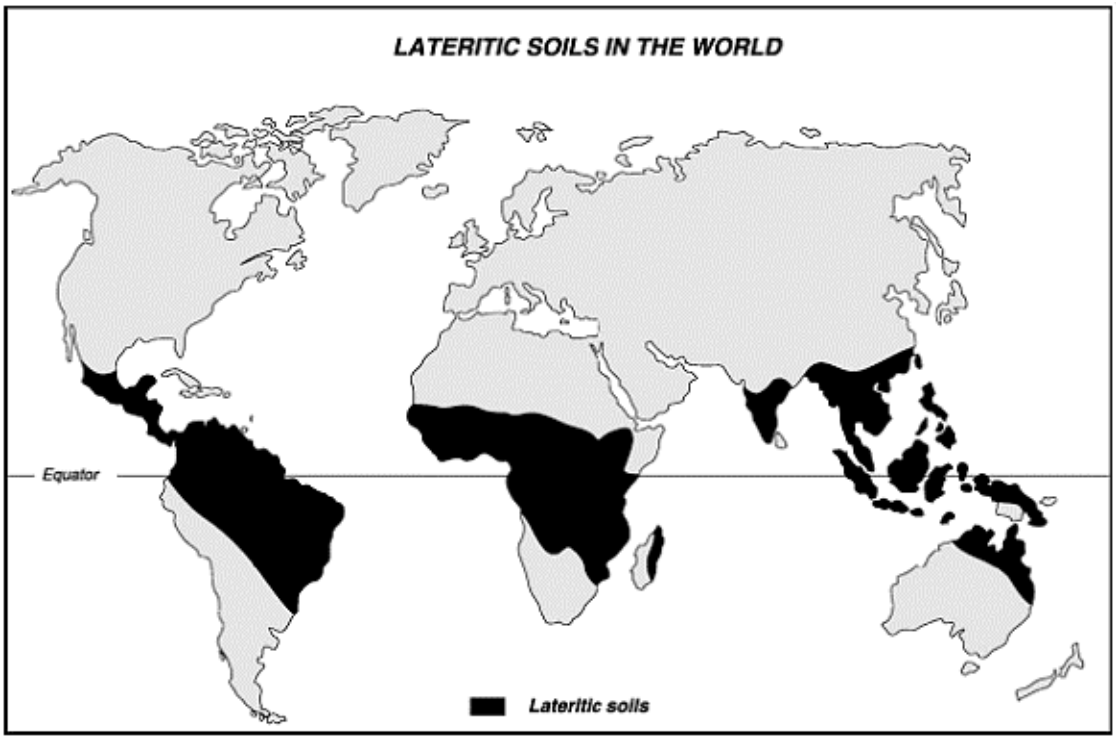


Figure 1-1: Distribution des formations latéritiques sur la surface du globe (Lyon Associates, 1971).

Toutefois, la répartition de ces sols ne correspond pas nécessairement aux conditions actuelles de genèse. Beaucoup de ces formations sont subactuelles ou fossiles, même en régions intertropicales. Leur extension montre qu'à un moment ou l'autre de l'histoire du globe, les conditions de formation ont pu se trouver réunies, conditions qui n'ont pas été nécessairement contemporaines en tous les points de la terre (Maignien, 1966 ; Fauck, 1972).

Les latérites et beaucoup d'autres sols des régions intertropicales sont situés dans des zones où il fait très chaud et où les pluies sont abondantes, soit toute l'année, soit au cours d'une saison humide (Legros, 2013).

1.2.2 En Afrique

La Figure 1-2 donne une idée générale de la répartition des différents types de sols latéritiques retrouvés en Afrique.

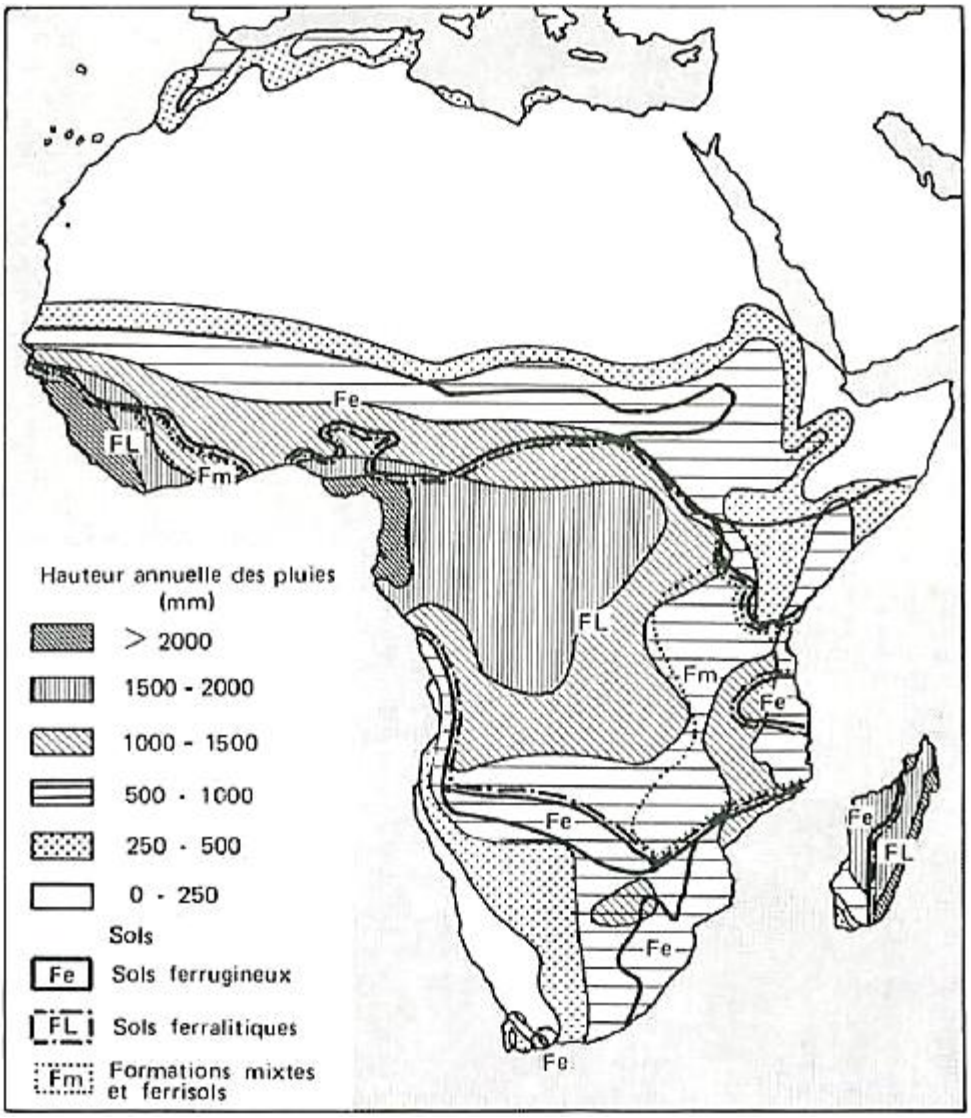


Figure 1-2: Les différentes formations latéritiques en Afrique. Relation entre le type de pédogenèse et le climat (Lyon Associates, 1971).

Cette carte illustre les différents types de latérite entre les tropiques en fonction du zonage pluviométrique. Nous avons entre autres les sols :

- ferrugineux (entre les isohyètes 250 et 500 mm),
- ferralitiques (entre les isohyètes 500 et 1000 mm),
- fersialitiques (entre les isohyètes 1500 et 2000 mm),
- formations mixtes et ferrisols (> 2000 mm)

Cette carte permet aussi de constater une absence totale de sols ferrugineux en zone tropicale humide et l'absence de sols ferralitiques en zone saharienne (Maignien, 1966 ; Lyon Associates, 1971).

1.3 Caractères généraux des profils latéritiques et facteurs de mise en place

Les sols latéritiques montrent les traits généraux communs suivants :

- ✓ ce sont des sols profonds ; certains atteignent 15 à 20 mètres d'épaisseur et même plus de 40 mètres comme cela a été rapporté par une étude sur les cuirasses latéritiques en Côte d'Ivoire (Cougny, 1988),
- ✓ les horizons sont habituellement peu différentiés, surtout s'il n'y a pas cuirassement ou concrétionnement,
- ✓ les transitions entre horizons sont progressives,
- ✓ l'horizon de surface est rarement tout à fait en place (érosion superficielle, glissement de terrain). Il est souvent graveleux ou caillouteux et les teneurs en argiles sont faibles,
- ✓ les horizons sous-jacents sont le siège de mouvements verticaux, latéraux ou obliques (tassements, apports d'éléments en solution ou en pseudo-solution venant des profils voisins ou entrainement de ces éléments vers d'autres profils),
- ✓ en profondeur les liaisons avec les horizons de surface paraissent souvent incertaines. Ce sont fréquemment de très vieux sols qui ont évolué à travers plusieurs cycles climatiques, des millénaires, voire du million d'années,
- ✓ ils sont très colorés (rouges ou jaunes) avec des valeurs pédologiques et des intensités dites « chroma » élevées. Les variations de couleur entre l'état sec et l'état humide sont faibles,
- ✓ ils sont généralement profondément et intensément altérés. Peu de minéraux, en dehors du quartz et de quelques débris de roches, échappent à l'altération. Les processus d'argilisation y sont intenses.

Selon Maignien (1966), à travers ces caractéristiques morphologiques générales certaines variations peuvent y apparaître en jouant sur quatre niveaux, à savoir : les horizons de surface, les horizons d'accumulation de sesquioxydes, les horizons argileux (le plus souvent la kaolinite), les horizons d'altération (exemple de profil latéritique en Figure 1-3).

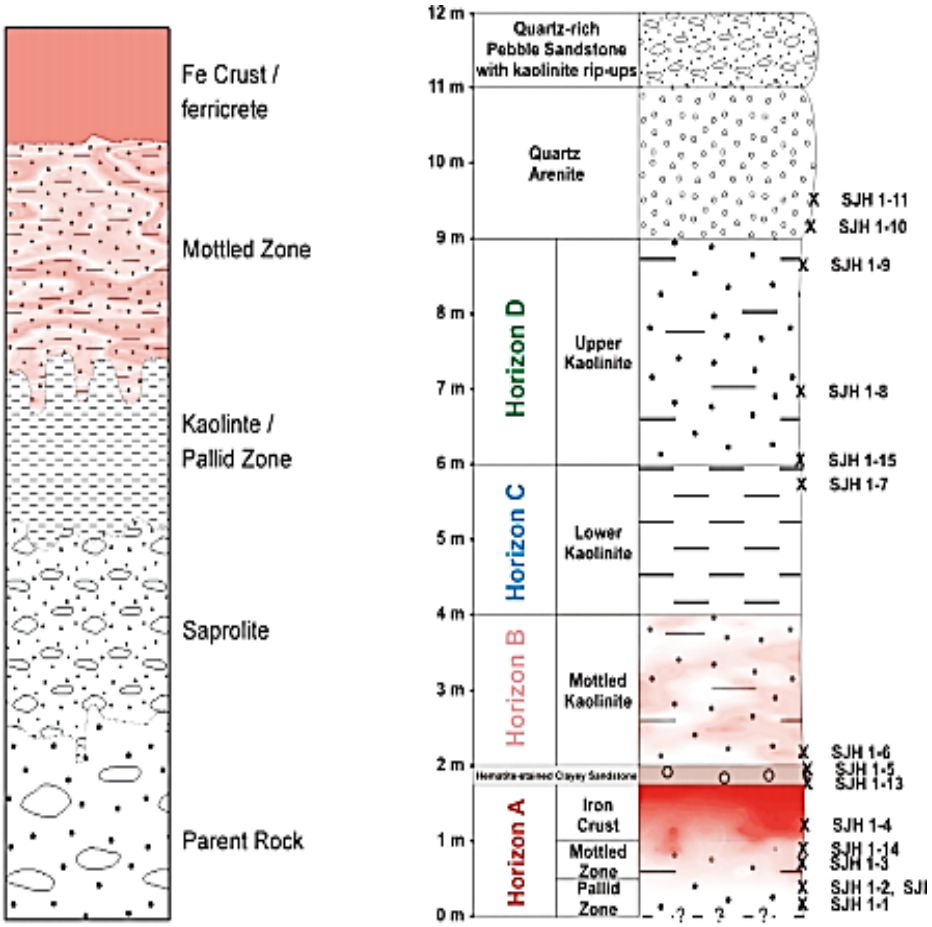


Figure 1-3: Exemple de profil latéritique type (Alexandre, 2002).

1.3.1 Conditions de formation des sols latéritiques

Selon (Newbold, 1844 ; Gidigasu, 1974, 1976 et 1983), les conditions nécessaires à la formation des latérites sont les suivantes :

- ✓ un climat tropical, sujet aux alternances de saisons sèches et humides ou de moussons,
- ✓ un plateau ou une superficie topographique doucement inclinée, non sujette à une érosion mécanique appréciable,
- ✓ la composition chimique et minéralogique de la roche du substratum contenant les constituants latéritiques (alumine et fer),
- ✓ une texture poreuse permettant l'infiltration des eaux de percolation,
- ✓ l'eau d'infiltration doit demeurer dans les interstices de la roche pendant une longue période réunissant ainsi les possibilités maximales d'érosion chimique,
- ✓ une eau d'infiltration devant contenir un composé acide ou alcalin susceptible de réagir avec les composés de la roche de manière à donner un électrolyte permettant aux phénomènes électrodynamiques d'opérer (latéritisation).

Ce processus annuel doit continuer au moins pendant une époque géologique, approximativement du million d'années (Autret, 1983).

1.3.2 Genèse des formations latéritiques

Dans la genèse des latérites, interviennent plusieurs facteurs conditionnant une évolution plus ou moins poussée de latéritisation. Ce sont les facteurs climatiques, la topographie, la végétation et la nature géologique de la roche altérée (Humbert, 1948 ; Alexander & Cady, 1962 ; Beauvais, 1989 ; Bagarre, 1990 ; Braun, et al., 2012). Le phénomène de latéritisation 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 (SiO_2), phénomène de lessivage, accompagné d'un enrichissement en fer et en alumine sous forme de sesquioxydes (Fe_2O_3 et Al_2O_3) (Autret, 1983 ; Tardy, 1993).

1.3.3 Définition d'un profil latéritique type

Little (1969) a proposé une classification générale des sols résiduels basée sur leur degré d'altération, le pourcentage de cimentation et les caractéristiques morphologiques générales des profils latéritiques (Figure 1-4). Des classifications similaires ont été proposées par Jones & Knill (1965). Cependant, sur la base des expériences de terrain, Duncan (1970) indique que de tels systèmes de classification qualitative sans quantification liée aux propriétés mécaniques conduisent généralement à des valeurs douteuses.

La classification de Little (1969), permet une description graduelle de l'érosion des roches mères jusqu'aux sols latéritiques. Les différentes étapes sont :

- ✓ **roche saine** : il s'agit de la roche fraiche non encore altérée mais pouvant contenir des joints tachetés en limonite juste en dessous de la roche légèrement altérée. La coloration indique des joints de percolation d'eau. Elle ne peut être disloquée que par dynamitage.
- ✓ **roche légèrement altérée** : cet horizon est caractérisé par une altération préférentielle des zones colorées par la limonite. Quelques débris de feldspaths provenant des roches granitiques peuvent y être retrouvés. Sa résistance avoisine celle de la roche saine. La dislocation de cet horizon requiert l'utilisation d'explosifs. Cet horizon est très perméable à cause de la présence des joints de limonite.
- ✓ **roche moyennement altérée** (50 à 90% érodée) : horizon considérablement altéré, il possède une certaine résistance due aux parties non encore altérées. Il contient de gros blocs de roche non pulvérisables à la main. On observe un réseau de joints à limonite important. La pulvérisation de cet horizon est difficile sans l'usage d'explosifs.
- ✓ **roche fortement altérée** : dans cet horizon, la roche est tellement fragilisée par l'érosion que les blocs retrouvés peuvent être cassés ou pulvérisés à la main. Horizon très tacheté à la limonite. Il contient moins de 50% des minéraux de la roche saine.
- ✓ **roche complètement altérée** : roche décomposée par l'érosion mais la texture de la roche mère est reconnaissable, surtout pour les sols d'origine granitique, le feldspath originel est complètement décomposé en minéraux argileux. Cet horizon peut être excavé à la main sans utilisation d'explosifs ou d'engins spéciaux.
- ✓ **sols latéritiques** : horizon ne permettant pas la reconnaissance de la texture de la roche mère à cause de la nature humifère de la couche de surface ou les racines de plantes.
- ✓ **et enfin l'horizon humifère + sols de couverture** : couches de surface (terre végétale).

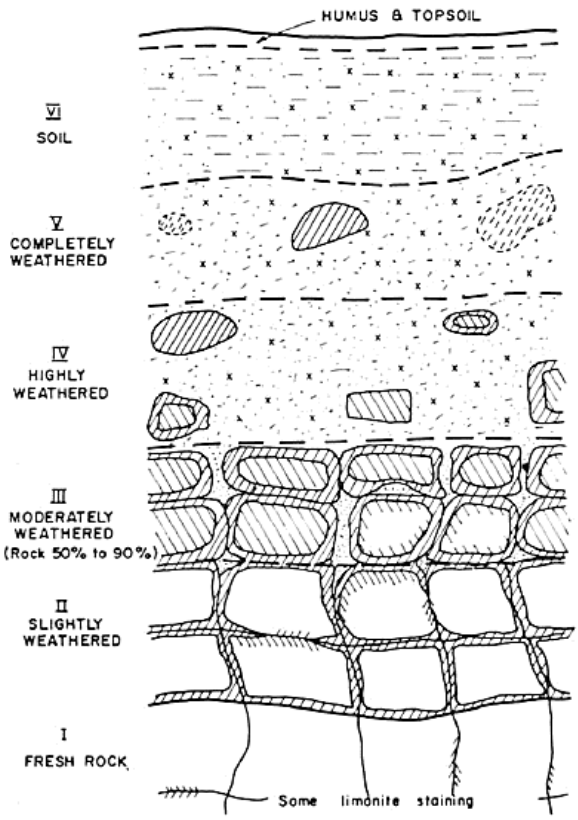


Figure 1-4: Définition morphologique du degré d'altération des roches (Little, 1969).

Pour examiner et comprendre les profils latéritiques types, nous devons nous intéresser à la dynamique des différents faciès au sein de ce profil, de l'altération de la roche mère à la formation de l'horizon latéritique. Il s'agit du profil de Walther (1915), du nom du premier descripteur, en Australie, en 1915. Ce sol représente environ 20 m d'épaisseur (Figure 1-5). À la base nous avons la *roche non altérée* avec une densité de l'ordre de 2,7 (granite et roches voisines). Au-dessus de cette roche saine, on observe une couche de plusieurs mètres dans laquelle les minéraux semblent intacts, lorsqu'on les observe de loin. En réalité ils sont profondément altérés et corrodés. Un couteau peut y pénétrer. La densité tombe à 1. Le matériau a donc déjà perdu par dissolution plus de la moitié de sa masse. C'est la roche profondément dégradée, la *saprolithe*. Plus haut dans le profil, l'évolution est telle que les minéraux de la roche ne sont plus clairement visibles sauf dans quelques poches. C'est la limite de la roche, la *lithomarge*. Son allure typique est bariolée. Encore plus haut dans le sol, les oxydes de fer dominent en trois couches successives. À la base, ils apparaissent en taches ; c'est la zone tachetée. Plus haut, le fer est suffisamment abondant pour lier entre eux les minéraux présents, les masquer par enrobage et former *in fine* une cuirasse résistante dont la densité dépasse 2. Mais elle contient encore au moins 25% de kaolinite (Beoglin, 1990). Encore plus haut, la cuirasse apparait en blocs séparés. C'est la zone de démantèlement. Tout en haut du profil de sol, on observe en général une couche d'argile de type kaolinite, riche en fer et donc de couleur rougeâtre. Lorsque cette couche meuble et rougeâtre est éliminée par érosion - ce qui est fréquent - la cuirasse sous-jacente est portée à l'affleurement. Elle sert alors d'armature au paysage, en zone tropicale sèche en particulier.

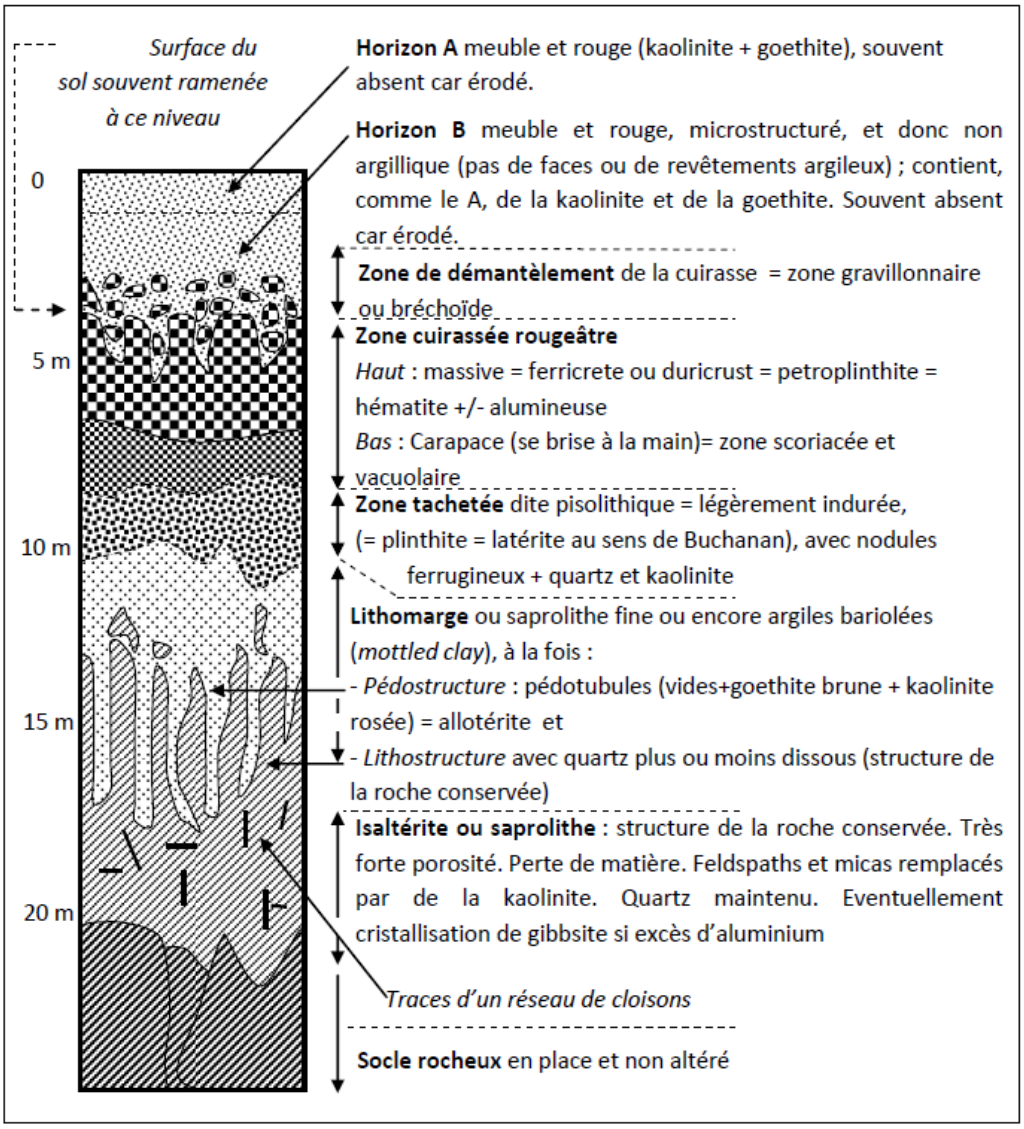


Figure 1-5: Profil type des sols ferrugineux, dit profil de Walther (1915).

1.4 Facteurs de formation des latérites

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

1.4.1 Le climat (pluviométrie, température, bilan hydrique)

Le climat a une action combinée avec la température et le bilan hydrique. Les climats tropicaux de par les températures moyennes sont favorables à une altération des roches de substratum et aboutir à la latéritisation. De nombreux spécialistes ont montré que sous une humidité constante, le rapport SiO_2/ (Fe_2O_3+Al_2O_3) (rapport silice libre et sesquioxydes) (Lyon Associates, 1971 ; Gidigasu, 1972 ; 1976 ; Schellmann, 1986 ; 2003 ; Bourman & Ollier, 2002 ; 2003) décroît avec la température qui agit comme un catalyseur des réactions chimiques. Au-dessus d'une température annuelle de 16°C, ce rapport est inférieur à 2.

D'après (Maignien, 1958, 1966), la majorité des sols latéritiques contemporains se développent sous des températures moyennes annuelles qui avoisinent 25°C.

Par ailleurs de grandes quantités d'eau sont nécessaires pour aboutir à une altération chimique (hydrolyse). Les régimes de précipitations engendrent des mouvements d'eau ascendants (saturation) et intermittents. Il s'agit donc d'une zone présentant de longues saisons sèches déficitaires en eau entrecoupées de brèves saisons des pluies (saturation du sol). Il y a donc une alternance de lessivage et d'accumulation de sesquioxydes (Grant, 1974 ; Autret, 1983).

Par ailleurs, quasiment tous les auteurs sont d'accord pour dire que les sols ferrugineux tropicaux prennent naissance dans une zone climatique correspondant à une pluviométrie de 300 à 1200 mm environ qui est la zone soudano-sahélienne correspondant à quatre mois humides et huit mois secs, (Segalen, 1967 ; Pias, 1970). Au Niger, la pluviométrie évolue en moyenne entre les isohyètes 150 et 800 mm.

1.4.2 La topographie

Le processus de latéritisation sous climat tropical est essentiellement basé sur un échange ionique en milieu aqueux, nécessitant donc de l'eau et du temps. La topographie influe sur ce processus dans la mesure où elle favorise ou défavorise l'accumulation d'eau (Maignien, 1966).

La plupart des sols latéritiques sont situés en zone plate permettant l'accumulation des eaux et évitant ainsi l'érosion mécanique (Autret, 1983).

Les analyses de Maignien (1958), Segalen (1967) et Fauck (1972), vont dans le même sens. Ils précisent que les formations latéritiques sont typiquement liées à une topographie subhorizontale avec des pentes toujours inférieures à 8 - 9%. On peut observer des cuirasses ferrugineuses sur toutes les formes du paysage dont la pente est inférieure aux valeurs précédentes. Il peut s'agir de plateaux, de plaines, de terrasses alluviales, de replats structuraux, peu importe leurs étendues du moment qu'il s'agit de très faibles pentes (Maignien, 1966).

Concernant les sols ferrugineux tropicaux, deux tendances se sont opposées, correspondant à des conceptions pédologiques fort éloignées l'une de l'autre :

- ✓ pour les uns (Segalen, 1967 ; Autret, 1983), c'est la topographie qui conditionne la pédogenèse de ces sols. Les conditions hydriques d'un milieu plat mal drainé sont les causes de l'individualisation des sols ferrugineux tropicaux qui ne sont que des sols hydromorphes ou, tout au moins, très proches de ceux-ci,

- ✓ pour les autres (Maignien, 1966 ; Gidigasu, 1972 ; Gavaud, 1977), ce sont les processus pédogénétiques qui en orientant la mise en place du modelé contribuent à l'individualisation de ces sols, les processus d'hydromorphie étant une conséquence du colmatage de l'horizon B illuvial formé par accumulation de matériaux fins apportés par lessivage oblique.

1.4.3 Végétation et faune

En zone de savane, on retrouve la latérite sous forme de carapace. En forêt c'est plutôt des graveleux latéritiques à pisolites (Autret, 1983). Segalen (1967), fait bien la part des choses sur les caractéristiques des sols ferrugineux et ferralitiques en relation avec la végétation. Il affirme qu'il semble y avoir une coïncidence entre d'une part la zone des forêts et les sols ferralitiques et d'autre part la savane et les sols ferrugineux. On peut donc penser que la matière organique de la savane joue un rôle non négligeable dans la migration d'éléments complexables comme le fer et l'argile. Maignien (1958, 1966), stipule que si l'on considère les formations indurées actuelles, il est certain que les cuirasses ferrugineuses sont beaucoup plus étendues sous savanes que sous forêts. Sous forêts on observe essentiellement des concrétions, parfois très abondantes même sous forêts ombrophiles. Il est aussi possible d'observer au milieu des massifs forestiers des clairières à sols cuirassés qui sont les traces des niveaux anciens.

1.4.4 La roche mère

La nature de la roche mère ne semble pas avoir d'incidence sur l'existence du phénomène de latéritisation puisque celui-ci se manifeste aussi bien sur des roches basiques ignées type basalte que sur des roches acides type granite, gneiss ou sur des roches sédimentaires type grès, schistes, calcaires (Stephens,1946 ; Alexander & Cady, 1962 ; Beauvais, 1989 ; Sandipan & Sanat, 2015). Par contre, elle joue un rôle sur le type de réaction et la nature du constituant argileux. Les roches cristallines basiques comme les basaltes sont plus pauvres en silice et composées pour partie d'olivine qui s'altère en montmorillonite ; les roches cristallines acides, tels que les granites et les gneiss, s'altèrent principalement en kaolinite ou halloysite ; les roches sédimentaires argileuses, tels que les schistes et les grès, en illite (Lyon Associates, 1971 ; Autret, 1983). Les latérites indurées et les sols latéritiques s'observent sur tous les types de roches sauf, peut-être, sur certains quartzites particulièrement pures. Pratiquement, le problème se résume à la litho-dépendance des graveleux latéritiques aux roches mères sous-jacentes. Fauck (1967) dans son analyse, indique que les sols ferrugineux tropicaux sont particulièrement bien développés sur des matériaux suffisamment riches en sables ; ou plutôt, riches en kaolinite, quartz et hydroxydes de fer, ou sur matériaux siliceux kaolinisés. Segalen (1967), dans son étude sur les sols tropicaux de Cameroun, a également précisé que les seules roches associées à des sols tropicaux sont celles susceptibles de fournir des matériaux sableux. Et ce sont le plus souvent des roches acides. Ailleurs, même les sols riches en sable ne portent pas de sols ferrugineux tropicaux. Maignien (1962), n'est pas en accord avec les assertions de Segalen (1967). Il avance que ce n'est pas uniquement la possibilité d'une roche à fournir du sable qui oriente la pédogenèse des sols ferrugineux tropicaux, mais beaucoup plus leur acidité ou, si l'on préfère, leur excès en silice.

1.4.5 Le temps

Il semble actuellement admis que le phénomène de latéritisation est lent et s'est poursuivi sur des périodes (époques géologiques) d'environ un million d'années (Alexander & Cady, 1962 ; Autret, 1983). L'étude de la position topographique des latérites dans un paysage montre que de nombreuses cuirasses sont anciennes (Beoglin, 1990 ; Alexandre, 2002).

Ceci est particulièrement net en régions arides, où les conditions actuelles de la pédogenèse ne permettent pas la mise en place de ces formations.

Le recoupement des travaux effectués en Afrique tend à montrer que la première grande période de latéritisation est Tertiaire (Maignien 1966, Gidigasu 1972 ; 1974). Elle se serait développée sur une surface d'aplanissement Crétacé. Cette période extrêmement longue aurait eu une aire d'extension géographique considérable, et il est fort possible qu'elle se soit étendue jusqu'en Europe. En Afrique, ils sont mieux conservés en régions subarides et subhumides, qu'en régions humides. Dans le domaine forestier on ne l'observe que sporadiquement. (Maignien, 1966).

Par analogie, selon Legros (2007), le temps nécessaire à la différenciation d'un sol tropical typique avec argiles bariolées et cuirasse sus-jacente (profil de Walther présenté au §1.3.3) représente plusieurs millions d'années, sans doute une dizaine. Il sous-tend que la vitesse de recul de la surface de la roche à la base des sols est de l'ordre de 10 à 20 m, voire 40 m par million d'années, soit donc quelques millimètres tous les cent ans.

Selon (Legros, 2007), ces chiffres appellent au moins deux observations :

- ✓ les durées sont telles qu'on ne peut plus considérer l'altération comme intervenue à climat constant. À l'échelle de temps considérée, même la tectonique des plaques doit être prise en compte. En faisant glisser l'Afrique et l'Amérique du Sud sous l'Équateur, elle a déplacé du même coup les régions arrosées et celles qui sont soumises à de grandes sécheresses. Peut-être donc qu'argiles bariolées d'une part et cuirasse ferrugineuse d'autre part, matérialisent, dans un seul profil, des changements climatiques. On voit donc la complexité des observations face à la durée des temps géologiques.
- ✓ lorsque les sols font en moyenne 2 m d'épaisseur, il faut moins de 2000 ans pour les raboter par érosion anthropique et plus de 100 000 ans pour avoir l'espoir de les voir renaître par altération des roches sous-jacentes. À l'échelle humaine les sols représentent un capital non renouvelable.

1.4.6 Synthèse sur la genèse des sols latéritiques

La destruction du continent constitue la source principale des matériaux sédimentaires. Ce phénomène intéresse aussi bien les roches magmatiques que les roches métamorphiques et sédimentaires. Les êtres vivants y contribuent également. Les actions purement mécaniques des agents d'érosion produisent des fragments qui sont à l'origine des roches détritiques. Les phénomènes chimiques donnent des solutions de lessivage qui sont les sources des minéraux néoformés des roches d'origine chimique.

Les roches érodées forment un manteau d'altération (éluvion) qui après lessivage peut donner des roches résiduelles riches en fer, en aluminium...etc. La contribution des organismes à cette couche, sous forme d'humus, aboutit à la formation d'un sol dont la nature et l'épaisseur varient selon les climats. Les composants de cette pellicule d'altération sont déblayés à leur tour et transportés sous forme solide ou en solution.

Ils peuvent se déposer temporairement dans des pièges continentaux (rivières, lacs) mais sont finalement remobilisés à plus ou moins longue échéance pour être déversés dans le milieu marin. Ces transformations, surtout chimiques, correspondent à une adaptation des roches aux conditions physico-chimiques de la surface.

Ce processus d'altération et remobilisation des minéraux originels et néoformés est très analogue à la description faite par Maignien (1966) (Figure 1-6).

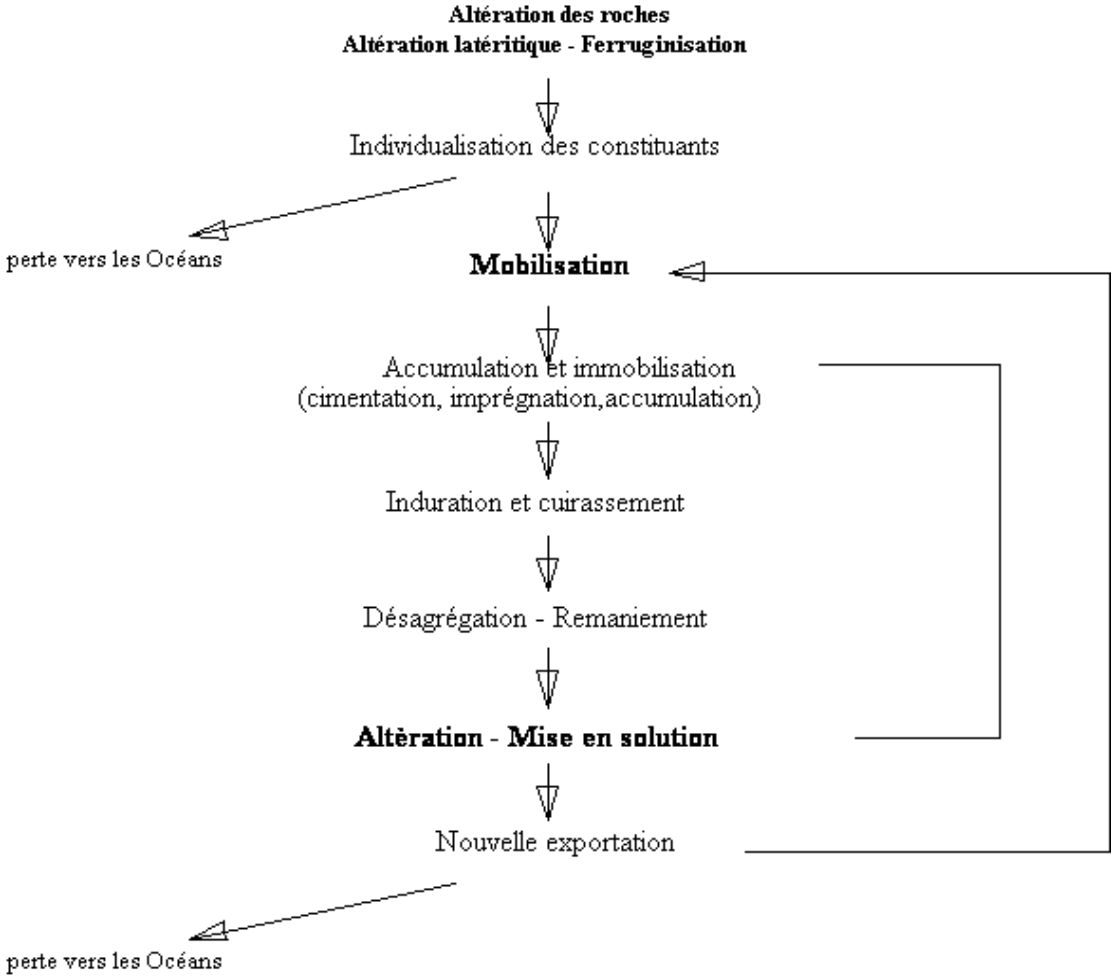


Figure 1-6: Pédogenèse et évolution du phénomène de latéritisation (Maignien, 1966).

Un certain nombre d'agents physiques produisent la fragmentation des roches. Les variations de température entraînent la dilatation ou la contraction des roches. Soumise à des variations incessantes de volume, une roche se fissure puis éclate. La fissuration est importante dans les roches composées de minéraux différents n'ayant pas le même coefficient de dilatation thermique : des microfissures apparaissent à la limite entre les minéraux.

La désagrégation mécanique est particulièrement importante sous les climats tropicaux où les variations de température peuvent dépasser 50°C entre le jour et la nuit. Elle est responsable de l'accumulation des manteaux d'éboulis caractéristiques des zones désertiques et des montagnes. Enfin, le transport par l'eau, et accessoirement l'action du vent, usent les matériaux et produisent des éléments plus fins: limons, poussières...

Une des caractéristiques les plus importantes de la surface de la terre est l'abondance de l'eau. Les molécules d'eau sont chargées électriquement et se comportent comme des dipôles; cette propriété est due à la liaison covalente asymétrique qui unit les atomes d'hydrogène à l'oxygène.

L'eau est un très bon solvant car les extrémités positives ou négatives de la molécule peuvent s'attacher aux ions négatifs ou positifs. Le groupement des molécules d'eau en tétraèdre explique la forte tension superficielle, la capillarité et la large plage de température selon laquelle l'eau est à l'état liquide. Les molécules d'eau s'ionisent en H^+ et OH^-. L'apport d'ions hydrogène diminue le pH; cette acidité est produite notamment par le CO_2 et les acides humiques du sol (Equation 1-1).

$$H_2O + CO_2 \longrightarrow H_2CO_3 \longrightarrow H^+ + (HCO_3).$$

Equation 1-1: Formation d'acide au contact de l'eau et du dioxyde dissout.

Les ions hydrogènes sont responsables de la destruction des réseaux silicatés: ils déplacent les cations métalliques qui se recombinent avec les hydroxydes OH^- (hydrolyse).

L'altération chimique des roches se fait en présence d'eau; elle a lieu essentiellement en climat humide. Les réactions sont des hydrolyses, accessoirement des oxydations, des hydratations, des décarbonatations pour les roches calcaires. Les éléments solubles sont lessivés. Les parties insolubles restent sur place, se recombinent et forment des minéraux de néoformation, principalement des argiles. Les organismes peuvent intervenir à tous les stades de ce processus.

C'est une incorporation de molécules d'eau à certains minéraux peu hydratés contenus dans la roche comme les oxydes de fer qui produisent un gonflement du minéral et donc favorise la destruction de la roche. Les hydrolyses, c'est à dire la destruction des minéraux par l'eau, sont les principales réactions d'altération. L'hydrolyse est totale lorsque le minéral est détruit en plus petits composés possibles (hydroxydes, ions). L'hydrolyse est partielle lorsque la dégradation est incomplète et donne directement des composés silicatés (argiles). Ces composés diffèrent selon les conditions du milieu. Par exemple l'hydrolyse partielle de l'albite donne soit de la kaolinite (Equation 1-2), soit des smectites (Equation 1-3).

$$NaAlSi_3O_8 + 11H_2O \longrightarrow Si_2\,O_5\,Al_2(OH)_4 + 4H_4SiO_4 + 2(Na^+, OH^-)$$

Albite + eau ⟶ kaolinite + acide silicique + ions

Equation 1-2: Formation de la kaolinite à partir de l'albite.

$$2{,}3NaAlSi_3O_8 + H_2O \longrightarrow Si_3{,}7Al\ 0{,}3\ O_{10}Al_2(OH)_2Na\ 0{,}3 + 3{,}2H_4SiO_4 + 2(\ Na^+, OH^-)$$

Albite + eau ⟶ Smectite + acide silicique + ions

Equation 1-3: Formation de la smectite à partir de l'albite.

Les nouveaux minéraux formés sont en général des phyllosilicates. Ces minéraux proviennent soit de la transformation d'un phyllosilicate préexistant, soit d'une néoformation à partir d'un silicate non en feuillet à la suite du réarrangement de la structure cristalline. Les réactions ont lieu surtout dans le sol. Selon Goldschmidt (1937), la mobilité d'un ion dépend de son rayon et de sa charge ionique. La taille des ions détermine leur arrangement cristallin; le nombre de coordinations d'un ion par rapport à l'oxygène est le nombre d'ions oxygène qui peuvent se disposer autour de l'ion considéré. Goldschmidt (1937) détermine le comportement des ions à travers le rapport Z/R (avec Z : la charge de l'atome et R : son rayon atomique). La classification établie (Figure 1-7) par celui-ci distingue trois groupes d'ions d'après la valeur du potentiel ionique.

- ✓ Z/R < ou = 3 : les cations solubles, gros ions faiblement chargés;
- ✓ 3 < Z/R < 10 : les hydrolysats, hydroxydes insolubles;
- ✓ Z/R > 10 : les oxyanions solubles, anions complexes avec oxygène.

La répartition des charges électriques à la surface de l'ion explique son comportement vis-à-vis de l'eau.

- ✓ cations solubles: leur potentiel ionique et leur densité de charge de surface sont faibles. Ils n'ont pas d'action sur la molécule d'eau et restent dispersés.
- ✓ hydrolysats: la dissociation de l'eau est partielle en H^+ et OH^-. Les cations s'unissent aux OH^- et forment des hydroxydes insolubles (Fe_2O_3, Al_2O_3...)
- ✓ oxyanions solubles: leur potentiel ionique est grand, leur surface est fortement chargée. Ces ions dissocient les H^+ des molécules d'eau et s'associent avec les O^-: les ions soufre donnent des sulfates $(SO4)^{2-}$, les ions carbone des carbonates $(CO3)^{2-}$, les ions phosphore des phosphates $(PO4)^{3-}$.

La valeur du potentiel ionique permet donc d'expliquer l'association de certains métaux dans les précipitations qui s'opèrent au sein d'un profil latéritique, le lessivage des cations solubles et des oxyanions comme le potassium, les sulfates, l'immobilité relative des hydrolysats comme les oxydes d'aluminium Al_2OH (gibbsite), de fer FeOOH (goethite)...etc.

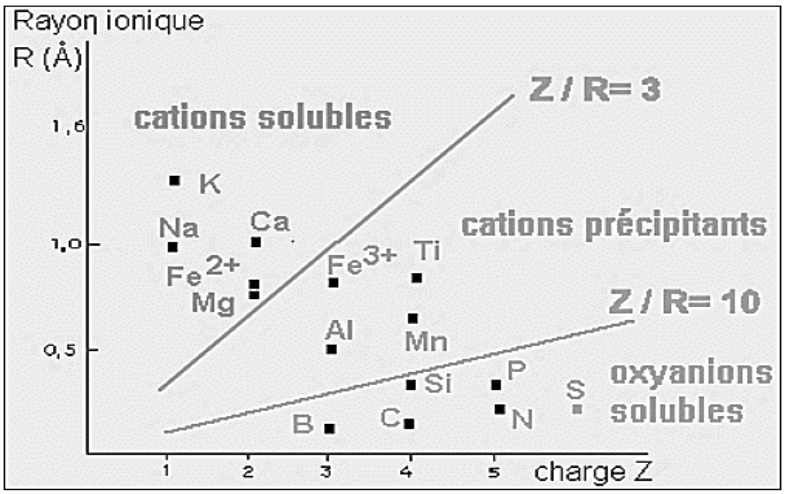


Figure 1-7: Classification des ions par Godschimdt (1937).

1.5 Caractéristiques morphologiques et physiques des latérites

1.5.1 Induration

Toutes les descriptions et définitions font mention d'une induration en place ou acquise après exposition à l'air. L'étude des échantillons montre que tous les degrés d'induration sont observables depuis des produits presque meubles à, à peine cohérents, jusqu'aux blocs les plus durs qui se cassent difficilement au marteau. L'appréciation de l'induration est empirique car aucune caractéristique liée à la mécanique du matériau ne peut être chiffrée (Alexander & Cady, 1962 ; Gidigasu, 1991). On considère généralement qu'il y a induration quand le milieu a une consistance dure et fragile qui se conserve avec l'humidité. On peut distinguer plusieurs degrés d'induration suivant que le matériau se casse ou non facilement à la main, se coupe ou non à la bêche, éclate ou non sous le choc du marteau (Maignien, 1958).

L'induration des échantillons selon Maignien (1958) dépend de plusieurs facteurs :

- ✓ de la composition et du degré de cristallisation des composants : plus les teneurs en sesquioxydes sont élevées, plus l'induration est forte ; les latérites les plus dures sont aussi les moins hydratées,
- ✓ de l'assemblage des éléments constituants : les cuirasses à assemblage compact sont plus indurées que les cuirasses à assemblage lâche ; les matériaux de composition homogène sont plus durs que ceux à composants ségrégés ; la présence de corps étrangers diminue la résistance de l'ensemble,
- ✓ du degré de vieillissement : pour un même type de latérite, les formations plus âgées sont souvent plus dures que les formations récentes.

1.5.2 Couleur

La couleur des latérites est variée, mais généralement d'intensités vives (D'Hoore, 1954). Les teintes les plus courantes sont : rose, ocre, rouge, brun, jaune, jaune orangée, etc. Cependant certaines formations présentent des taches et des trames violettes, d'autres des marbrures verdâtres. Un même échantillon peut présenter toute une gamme de couleurs passant plus ou moins sensiblement de l'une à l'autre, suivant des dessins et des formes variés. La pigmentation des latérites est due aux oxydes de fer plus ou moins hydratés et parfois aussi au manganèse (King & Foote, 1864 ; Maignien, 1966). Généralement, les sols latéritiques sont rouges en surface car fortement lessivés (fer ferrique ($Fe(OH)_3$) et jaune ocre en profondeur où se forme du fer ferreux ($Fe(OH)_2$, FeO) (Milot et al., 1961).

1.5.3 Densité

La densité réelle qui varie dans d'assez larges proportions (2,5 à 3,6) dépend de la composition chimique. Celle-ci augmente avec les teneurs en fer et diminue avec les teneurs en alumine. Les formes oxydées sont plus denses que les formes hydratées. La valeur de densité peut renseigner sur les dynamiques d'altération subies par les formations latéritiques (Alexandre, 2002).

Ainsi, la densité apparente est toujours plus élevée en surface qu'en profondeur, les cuirasses anciennes sont plus denses que les récentes. Les formations cimentées sont plus denses que celles à structures scoriacées et celles-ci, que celles à structures alvéolaires (Maignien, 1958).

1.5.4 Structure

La structure des latérites est extrêmement variée. Les modes d'assemblage peuvent se réduire à trois types (Maignien, 1966) :

- ✓ les éléments indurés formant un squelette cohérent et continu,
- ✓ les éléments indurés qui sont des concrétions ou des nodules libres au milieu d'un matériau terreux,
- ✓ les éléments indurés qui cimentent les matériaux préexistants.

En gros, le rôle des sesquioxydes immobilisés dans un matériau textural originel remplissent trois rôles :

- ✓ ils cimentent les particules texturales,
- ✓ ils imprègnent les formations en place,
- ✓ ils se concentrent et se concrétionnent.

Par ailleurs, la disposition du fer contribue à l'identification des assemblages :

- ✓ intertextique : les éléments figurés sont reliés par des ponts d'oxyde de fer ;
- ✓ enrobant : les oxydes de fer entourent entièrement les éléments figurés et de ce fait, les attachent entre eux.

Alexandre (2002), précise qu'il est rare qu'une cuirasse ne présente qu'un seul faciès. Bien souvent elle relève de deux, voire plusieurs types, avec des proportions variables suivant les plages considérées. Les faciès les plus fréquemment rencontrés, sont les suivants : massif, vermiforme, conglomératique, bréchique, lamellaire, nodulaire, gravillonnaire, pseudo-pisolithique, pisolithique. Quelques cas de faciès sont illustrés au §1.6 ci-dessous.

1.6 Processus de cuirassement des massifs latéritiques et types de structure mis en place

Le processus de cuirassement de certains horizons des sols tropicaux s'intéresse essentiellement au dynamisme des hydroxydes. Le cuirassement des sols en milieu tropical ne peut pas être confondu avec les phénomènes de latéritisation (Maignien, 1954). La latéritisation n'exclut pas cependant une mise en mouvement des hydroxydes; mais l'accumulation demande dans ce cas des millénaires, tandis qu'elle peut être rapide et ne réclamer que quelques décades dans le cas du cuirassement.

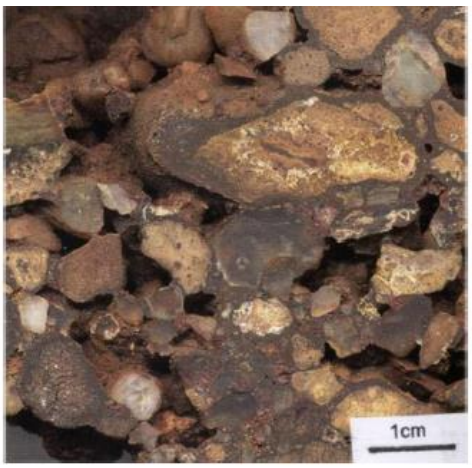
Les conditions nécessaires et suffisantes pour qu'il puisse y avoir cuirassement sont :

- ✓ présence d'une source d'hydroxydes ;
- ✓ mobilisation et transport de ceux-ci ;
- ✓ concentration et induration.

Les cuirasses qui ont été longtemps considérées comme irréversibles, peuvent s'altérer à la suite de l'installation de la végétation. Les apports organiques amènent une dissolution des ciments et un ameublissement de la masse. En effet la matière organique a une action dissolvante sur les hydroxydes. Ceux-ci, mis en solution, sont entraînés par gravité soit dans un sens vertical, soit plus fréquemment par lessivage oblique ou latéral (Maignien, 1954).

1.6.1 Cimentation

Elle n'affecte que les substrats grossiers jusqu'aux sables y compris. Les oxydes de fer s'introduisent dans le milieu par le moyen des eaux de gravité (rapide) et précipitent lors de la dessiccation, que favorise la taille des pores. Selon la proportion des oxydes de fer, la cimentation peut comporter de simples points de soudure entre les éléments, un enrobage complet de ceux-ci ou l'obturation totale des pores (Maignien 1954 ; Alexandre, 2002). Ce processus de cuirassement conduit le plus souvent à un faciès conglomératique (Figure 1-8**)**.

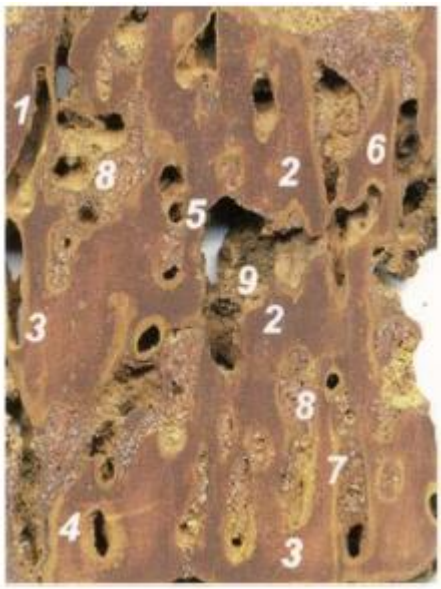


Ce faciès se définit de lui-même. La quantité de fer nécessaire pour assurer la cohésion, n'est pas nécessairement importante grâce à une structure intertextique.

Figure 1-8: Faciès conglomératique.

1.6.2 Imprégnation

Elle se produit sur des substrats à grains plus fins que le sable. La propagation plus lente des oxydes de fer est favorable à une diffusion à partir des lignes de moindre résistance où l'eau coule plus librement. La dessiccation est aussi plus malaisée et, comme cela se passe déjà dans les sables, il peut exister un délai relativement long entre le dépôt et l'induration par cristallisation, à telle enseigne que les termites peuvent y creuser des galeries (Alexandre, 2002). Ce type de cuirassement aboutit à la mise en place d'un faciès lamellaire (Figure 1-9).



Dans les exemples choisis, cet aspect met en relief les perturbations mécaniques que subissent les éléments de la future cuirasse sous l'impulsion des termites. La roche diversement imprégnée (2 et 3), est percée de galeries dont certaines suivent la stratification. Les galeries ont facilité une attaque préalable du fer (4). Un enduit léger s'est ensuite développé à partir de la surface de la cuirasse (5 et 6). Certaines galeries ont été comblées, après utilisation, par les termites (7), tandis que d'autres contiennent de petites boulettes, vestiges de leur passage récent (9).

Figure 1-9: Faciès lamellaire.

1.6.3 Concrétionnement

Le concrétionnement désigne la concentration du fer en certains points. Il peut se produire dans les sables et dans les substrats de granularité plus fine.

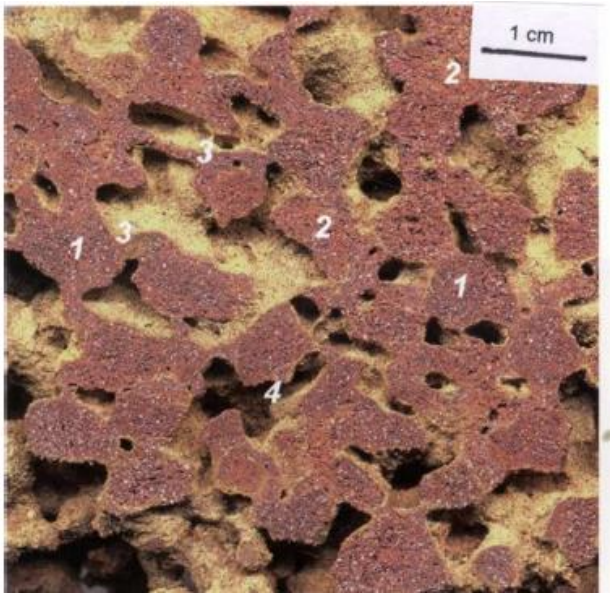
Il s'agit en fait d'une imprégnation se produisant par la fixation sur les cristaux de fer. Mais, un début de cristallisation, a rarement eu lieu à ce moment précis (Alexandre, 2002 ; Nguetnkam, 2006).

Le concrétionnement est un phénomène qui peut se produire aussi bien dans les sols ferrugineux que dans les sols ferralitiques (Faure, 1962). Il se produit par concentration, précipitation ou dépôts de films de sesquioxydes autour de nucleus variés (grains de quartz, débris de minéraux).

Les concrétions tiennent de l'imprégnation et de la cimentation, mais le phénomène est très concentré, d'où il résulte la formation de produits plus ou moins arrondis qui sont individualisés les uns par rapport aux autres.

Le concrétionnement peut également se réaliser par induration des sesquioxydes ségrégés d'un matériau plus argileux.

On peut aussi signaler la formation de pseudo-sables (liaisons étroites entre argiles et sesquioxydes). Le faciès généralement mis en place est gravillonnaire (Figure 1-10).



Des concrétions sableuses de deux générations : la première (1) a été dégagée de l'horizon tacheté où elle s'est formée par le ruissellement : la seconde (2) contient des éléments fins provenant du Précambrien sous-jacent et leur remontée implique le travail des termites, responsables des galeries (4). Un léger enduit (3) forme des ponts entre les concrétions, dans une structure intertextique.

Figure 1-10: Faciès oolithique ou concrétionnaire.

1.6.4 Le recouvrement

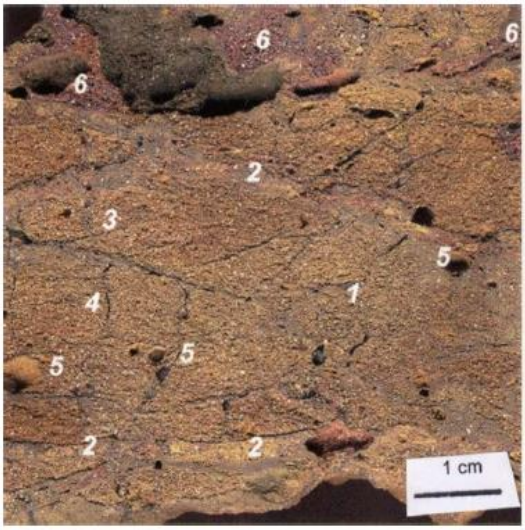
C'est la précipitation d'oxydes de fer à l'air libre ou en connexion avec la surface par des diaclases. Une partie du dépôt est constituée d'oxydes de fer assez purs, souvent en pellicules successives lui conférant un aspect rubané. Des éléments détritiques fins peuvent se déposer en même temps que le fer ou en alternance avec lui, soulignant ainsi la fine stratification (Alexandre, 2002). Le cuirassement type « recouvrement » conduit à la mise en place d'un faciès vermiforme (Figure 1-11).

Dans un contexte de faciès nodulaire (n et m), nombreux tubules perpendiculaires entre eux (1 et 2). Dans les tubules, un produit blanchâtre (3), éliminé partiellement par les termites (4 et 6) et quelques fois remplis à nouveau par un mélange de produit blanc (5).

Figure 1-11: Faciès vermiforme.

1.6.5 La métasomatose

Il s'agit d'une épigénie qui affecte les minéraux originels qui sont dissous et remplacés particule par particule par des oxydes de fer tout en préservant la forme du minéral par la structure originelle. Ce processus constitue, entre autres, une alternative pour expliquer les dépôts d'oxydes de fer dus au recouvrement (Alexandre, 2002). Ce processus de cuirassement donne lieu à un faciès massif (Figure 1-12).



Un sable grossier (1) traversé de lentilles silteuses (2) et présentant des stratifications entrecroisées faiblement visibles (3). Traces d'un âge ancien : fentes de dessiccation (4) et fragments de roche altérés (5). Remplissage de tubules postérieurs (6).

Figure 1-12: Faciès massif.

1.7 Caractéristiques chimiques et minéralogiques

1.7.1 Caractéristiques chimiques

Les latérites se caractérisent par des teneurs élevées en sesquioxydes de fer et (ou) d'alumine par rapport aux autres composants (Autret, 1983 ; Schellmann, 1994 ; Mahalinga-Iyer & Williams, 1997 ; Bello & Adegoke, 2010 ; Adewuyi & Okosun, 2013). Ces composants essentiels sont en mélange suivant des proportions variées. Dans certaines latérites les teneurs en Fe_2O_3 (hématite) peuvent dépasser 80%, alors que les teneurs en Al_2O_3 (gibbsite) sont très faibles (quelques %) ; dans d'autres, au contraire les teneurs en alumine peuvent atteindre 60% pour quelques pourcents de Fe_2O_3 (Alexander et Cady, 1962 ; Hamilton, 1964 ; Autret, 1983). Les teneurs en silice combinée sont faibles dans les latérites riches en sesquioxydes. La silice combinée se trouve essentiellement sous forme de kaolinite, argile caractéristique de la plupart des formations tropicales. Si l'alumine constitue parfois le principal composant, ce sont les sesquioxydes de fer qui sont les plus communs et les plus fréquents. Selon (Maignien, 1962 ; Hisham, 2013), certaines latérites contiennent des quantités, parfois appréciables de manganèse et peuvent être exploitées comme minerai (Côte d'Ivoire, Gabon). Il en est de même pour le titane, fréquemment reconnu et, à un degré moindre, pour le vanadium et le chrome. Si le quartz est parfois absent ou en faible quantité, il est plus généralement un composant significatif. Il s'agit surtout de quartz résiduel, en particulier, sur les formations dérivées des roches éruptives acides.

Le degré de latéritisation d'un gisement latéritique est le plus souvent apprécié par le rapport de la teneur en silice libre et/ou combinée par les teneurs des sesquioxydes (Equation 1-4) c'est-à-dire les oxydes de fer et d'aluminium (Gidigasu, 1972 ; Bagarre, 1990 ; Schellmann, 1986 ; 2003).

$$S/R = \frac{SiO_2/60}{Al_2O_3/102 + Fe_2O_3/160}$$

Equation 1-4: Relation empirique d'estimation du degré de latéritisation d'un profil latéritique.

Moins ce rapport est élevé, plus le profil est latéritisé. Des ordres de grandeurs du ratio S/R sont fournis dans le Tableau 1-1. Les sols de ratio supérieur à 2 sont non latéritiques.

Tableau 1-1: Degré de latéritisation des gisements latéritiques en fonction du rapport S/R.

$S/R < 1{,}33$	Latérites vraies
$1{,}33 < S/R < 2$	Roches latéritiques
$S/R > 2$	Matériaux non latéritiques

De très nombreux auteurs (Lacroix, 1913; Harrassowitz H., 1926 ; Martin & Doyne, 1927; Dreyfus, 1952), pendant de très longues années ont utilisé ce rapport pour caractériser les latérites. Cependant, cette définition ne fait pas l'unanimité, la controverse venant en partie du fait que ce rapport permet de séparer les latérites des argiles telles que les kaolinites ; en revanche, il classe dans les latérites le minerai de fer, la bauxite et de nombreux grès ferrugineux. Plusieurs auteurs (Florentin, et al., 1957 ; Autret, 1980 ; CEBTP, 1984 ; Bagarre, 1990 ; Robert & Clifford, 2002) réfutent ce paramètre. Selon Autret (1980), ce rapport dépend beaucoup de la fraction granulométrique (Tableau 1-2).

Tableau 1-2: Rapport S/R selon la fraction granulométrique (Autret, 1980).

Classes	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**S/R**
0/20 mm	55,4	15,35	23,9	3
0/2 mm	78,1	12,5	3,1	9
2/20 mm	32,7	18,2	44,7	1,2

La concentration du fer dans les pisolites (fraction 2/20) est manifeste (S/R = 1,2). Les variations des teneurs en silice, oxydes d'alumine et oxydes de fer doivent donc être appréciées par une méthode complémentaire, notamment la prise en compte des processus pédogénétiques (voir §1.8), comme indiqués par Maigien (1954, 1966).

1.7.2 Caractéristiques minéralogiques

Nombreux sont les chercheurs (Alexander et Cady, 1962 ; Maignien, 1966) qui ont tenté de compléter les analyses chimiques par des études minéralogiques. La plupart des études portent sur les lames minces sous microscope polarisant, l'absorption des colorants, les méthodes d'analyse thermique différentielle, de thermobalance. Aussi les études par la diffraction des rayons X se multiplient et précisent la composition minéralogique des latérites.

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

Les premiers sont représentés par des oxydes et hydroxydes d'aluminium, de fer, parfois de manganèse et de titane, de la silice fréquemment et des argiles. Les seconds constituent les éléments texturaux des sols en place, produits résiduels ou clastiques. Le fer se trouve dans les cuirasses sous des formes également variées dont les plus fréquentes sont la goethite $\alpha - Fe_2O(OH)$ et l'hématite Fe_2O_3. D'autres minéraux dérivant de l'évolution des latérites tels que les oxydes de fer résiduels (γFe_3O_4) et l'ilménite ($FeTiO_2$) ont également été observés dans certains échantillons provenant des sols intertropicaux. Les examens à la lame mince ont révélé la présence de titane et de manganèse. Le manganèse se concentre facilement en concrétions et donne des revêtements minces de dioxyde de manganèse de couleur noir-violacée.

Des corps arrondis comme la gibbsite et la boehmite (hydrates d'alumines) se retrouvent aussi noyés dans la masse de certains sols latéritiques. La gibbsite et la boehmite remplissent fréquemment les fissures et les pores de la masse et des nodules.

La silice présente dans les latérites, est souvent héritée d'un matériau originel. Elle se présente le plus souvent sous forme de quartz. La silice combinée est fréquente dans les latérites sous forme d'argiles. Il s'agit surtout de la kaolinite $Al_2Si_2O_5(OH_4)$, ou d'argiles du même groupe telles que les halloysites. La présence d'illite en quantité significative a été reconnue dans les latérites d'Afrique (Maignien, 1966).

Les latérites dérivant des matériaux quartzeux montrent des grains de quartz répartis au hasard à travers la masse et les produits concrétionnés. Du quartz, apparemment d'origine extérieure, s'observe dans les latérites formées sur des roches non quartzeuses (Alexander et Cady, 1962).

En résumé, les formations latéritiques indurées se caractérisent par la prédominance d'hydrate d'alumine (gibbsite et boehmite), de sesquioxydes de fer (goethite et hématite) en mélange variable avec des kaolinites plus ou moins cristallisées, le tout plus ou moins contaminé par des produits résiduels ou clastiques dont le plus courant est le quartz.

1.7.3 Caractéristiques analytiques

D'après Maignien (1966), peu d'études ont été consacrées aux sols latéritiques en fonction de leur matériau originel. D'une façon générale la majorité des études ne tient compte que des variations à travers les horizons d'un même profil. Or des recherches (McFarlane, 1991 ; Alexandre, 2002) tendent à démontrer qu'il y a des relations extrêmement étroites entre les sols qui s'étagent le long des pentes. Cela fait intervenir l'évolution géomorphologique du secteur d'étude. Il y a interdépendance entre les sols voisins sur les formes d'un modelé, ce qui introduit un facteur géographique indispensable à la compréhension des phénomènes de latéritisation. Ces sols doivent par conséquent être étudiés dans leur environnement et dans leur histoire. La plupart des latérites sont de très vieux sols parfois fossiles. Ils reflètent les conditions d'un milieu actuellement disparu (Lyon Associates, 1971). Ainsi les cuirasses des plus anciennes surfaces d'Afrique sont probablement d'âge Tertiaire (Greigert, 1957 ; Gidigasu, 1976 ; Autret 1983). Même s'ils évoluent encore, les profils ont certainement passé à travers plusieurs fluctuations climatiques.

À travers ces observations générales certaines caractéristiques restent constantes (Maignien, 1966) :

- ✓ les altérations sont extrêmement poussées avec pertes de bases et de silice,
- ✓ il y a une forte individualisation suivie d'une accumulation de sesquioxydes de fer et (ou) d'alumine,
- ✓ les néosynthèses kaoliniques sont constantes, mais variables en intensité,
- ✓ les complexes absorbants sont extrêmement désaturés et les tendances à l'acidification du milieu sont marquées.

1.8 Caractérisation à partir du processus pédogénétique

L'une des recommandations faites dans l'étude du Ghana est l'abandon de classification reposant sur des paramètres tels que Ki ou S/R au profit d'une classification reposant sur le processus pédogénétique. Les termes les plus descriptifs de sols ferrugineux, sols ferralitiques et ferrisols sont recommandés à la place du terme générique « sols latéritiques » (Lyon Associates, 1971 ; Autret, 1983).

1.8.1 Les sols ferrugineux

Ces sols se forment dans les régions à climat tropical avec une longue saison sèche. La végétation est de type savane et le drainage est médiocre ou mauvais. Pendant la saison sèche, les silicates, les oxydes de fer et d'aluminium libérés pendant la dissolution de la roche mère en saison de pluie remontent grâce à l'intense évaporation et le rehaussement du niveau de la nappe (zone de lithomarge), entraînant une migration des complexes ferro-siliciques (Lyon Associates, 1971 ; Gidigasu, 1976) (Figure 1-13). À l'approche de la surface, leur déshydratation progressive provoque en définitif la cristallisation d'oxydes, sous forme d'alumine (Al_2O_3) et d'hématite (Fe_2O_3) responsables de la couleur rouge brique des latérites.

Les sols ferrugineux se caractérisent par :

- ✓ une forte proportion de nodules ayant un ciment ferrugineux,
- ✓ des éléments fins qui contiennent assez peu de matériaux argileux,
- ✓ un indice de plasticité généralement faible (< 25),
- ✓ l'abondance de ciment ferrugineux en plus des nodules, qui peut aboutir à la formation d'une cuirasse dure et continue (Lyon Associates, 1971 ; Autret, 1983).

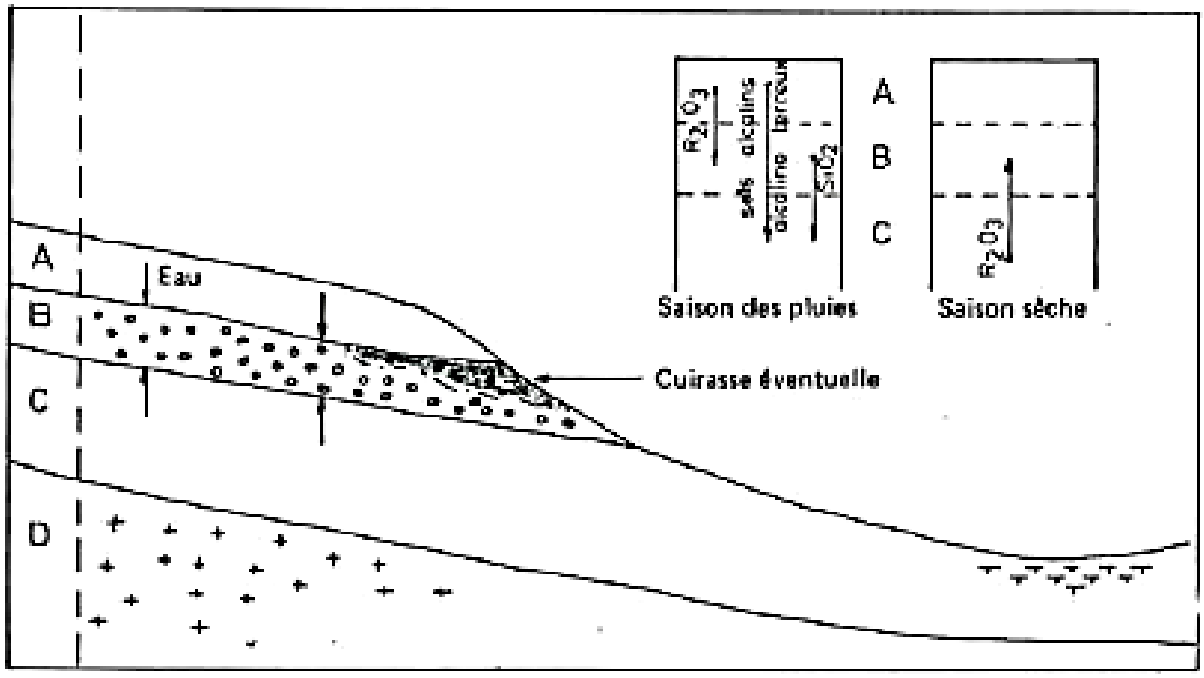


Figure 1-13: Processus de mise place des sols ferrugineux en savane (Lyon Associates, 1971).

1.8.2 Les sols ferralitiques

Ils se forment en zone tropicale humide (pluviométrie > 1500 mm, température moyenne > 25 C) sans saison sèche nettement marquée. La végétation est de type forêt et le drainage est médiocre. Le processus est continue et irréversible (Lyon Associates, 1971 ; Gidigasu 1976). Il n'y a pas de migration vers le haut. Les réactions d'hydrolyse ne sont pas les mêmes qu'en zone sèche, l'altération est plus rapide et plus complexe, les couches latéritisées sont plus épaisses (Figure 1-14). Tous les minéraux primaires excepté le quartz sont hydrolysés dans des conditions neutres, et une bonne part de la silice et des bases sont mises en solution. La partie restante de la silice se combine à l'aluminium pour former la kaolinite et la gibbsite. Sur les horizons supérieurs des profils, il y a une acidification faible causée par la décomposition organique qui provoque la dissolution et la mobilisation des oxydes de fer et d'aluminium. En fonction du pourcentage entre les oxydes de fer et d'aluminium, les sols ferralitiques peuvent être divisés en ferrites où les oxydes de fer dominent et qui se produit principalement sur les roches pauvres en aluminium, et en alites où l'oxyde d'aluminium (principalement la gibbsite) prédomine. Il est admis (Lyon Associates, 1971 ; Gidigasu, 1972 ; Ségalen, 1994) que la majorité des sols ferralitiques se forment sur une période de 10.000 ans et se développeraient plus rapidement sur des matériaux pauvres en silice par exemple les basaltes plus que sur des roches riches en silice comme le granite ou les sédiments très siliceux. La formation de kaolinite est encouragée par le mauvais drainage.

Les sols ferralitiques se caractérisent par :

- ✓ une assez importante proportion de nodules mais avec rarement un cuirassement,
- ✓ les éléments fins comprennent une forte proportion d'argile,
- ✓ l'indice de plasticité est en général élevé (> 25).

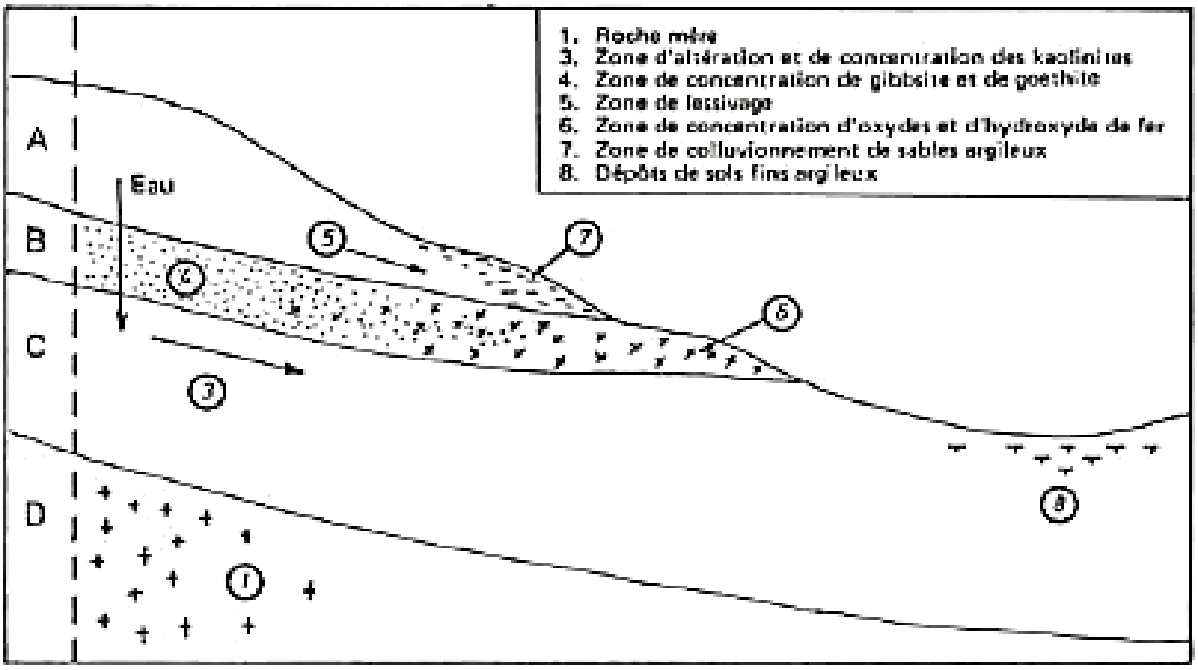


Figure 1-14: Processus de mise en place des sols ferralitiques en forêt (Lyon Associates, 1971).

1.8.3 Les sols fersialitiques

Ce sont les sols formés principalement en climat subtropical ou à la rigueur sous certaines conditions méditerranéennes, avec une moyenne de température de 13 à 20 °C, une pluviométrie comprise entre 500 et 1000 mm de pluies par an et une saison sèche ; des sous types sont aussi connus (Duchaufour, 1983 in Legros (2007)). Sous ces conditions, les horizons supérieurs sont sujets à une décalcification et à l'altération des minéraux primaires pendant la saison humide. Les éléments constitués par ces processus sont très largement retenus dans le profil suivant des phénomènes de succion capillaire pendant la saison sèche et aussi par l'effet de l'action végétative ou animalière dans le sol. Du fait de l'intense altération, ces sols contiennent beaucoup d'oxydes de fer. Le principal nouveau minéral d'argile formé est la smectite. La kaolinite apparaît sur des surfaces bien drainées et pauvres en silice, comme par exemple le basalte. Quand la roche parent est riche en minéraux argileux, la composition du sol peut être déterminée principalement par des minéraux issus de sédiments peu altérés. C'est seulement les quartzites sans fer, ni minéraux altérables qui ne produisent pas de sols fersialitiques même à des topographies ou des conditions climatiques favorables. La silice et les bases en solution peuvent aussi être mises en mouvement latéral et s'accumulent quand le drainage est empêché.

Dans certaines conditions, en recombinaison avec d'autres produits d'altération par exemple, la formation de minéraux gonflants résulte le plus souvent d'un dépôt de minéraux argileux.

1.8.4 Les ferrisols

Ce sont des sols ressemblant aux sols ferralitiques en ce sens qu'on les rencontre sous les climats les plus humides avec des profils d'altération qui ne présentent pas d'hétérogénéité. Ils diffèrent des sols ferralitiques par un rapport de Ki voisin de 2. Ces sols ne se forment qu'en profondeur à cause de l'activité des phénomènes d'érosion et sont décrits comme une classe intermédiaire entre les deux précédentes par l'étude de « Lyon Associates » (Lyon Associates, 1971 ; Autret, 1983).

1.9 Propriétés géotechniques et mécaniques des graveleux latéritiques

Selon les études sur les sols latéritiques d'Australie par les chercheurs (d'Hoore, 1954 ; Mahalinga-Iyer, 1997), il en ressort que les graveleux latéritiques sont utilisés comme matériau d'assise routière dans la majorité des pays intertropicaux et les spécifications régissant leur mise en œuvre nécessitent des adaptations particulières. Les routes constituant un véritable enjeu pour le développement économique d'un pays, leur utilisation doit être réglementée dans chaque pays afin de les utiliser de manière efficiente et appropriée. C'est dans ce sens que Gidigasu (1991), stipule d'une part la prise en compte des facteurs pédogénétiques, et d'autre part l'évaluation des paramètres géotechniques.

Les sols latéritiques sont souvent caractérisés à travers leur distribution granulométrique, les limites d'Atterberg, le retrait et gonflement linéaire, les caractéristiques de compactage, la capacité portante (CBR), la compressibilité, la résistance au cisaillement,…etc.

L'objectif principal de ce travail constitue l'apport de nouveaux éléments de proposition techniquement plausibles sur la base d'un programme expérimental rigoureux et interdisciplinaire sur une zone bien délimitée. Des mesures réalisées in-situ seront combinées à celles réalisées en laboratoire pour aboutir à un système de caractérisation efficace en réduisant substantiellement certaines incommodités liées à la reproductibilité des essais aussi bien en phase de prétraitement qu'en phase d'essai proprement dit. Les ingénieurs locaux doivent donc prendre en compte tous ces facteurs, afin de mettre en place une technique de préparation des échantillons et de procédure permettant d'obtenir des résultats représentatifs et une assez bonne reproductibilité des essais.

1.9.1 Identification et caractérisation des sols latéritiques

1.9.1.1 Les essais d'identification des graveleux latéritiques

La latérite a toujours été décrite comme "un sol à problème". Nanda et al. (1958) ont toujours considéré que les modes opératoires usuels dans les laboratoires de mécanique des sols n'étaient pas applicables. Il a été démontré (Gidigasu, 1976) qu'il n'en est rien et que ces considérations reflétaient uniquement l'incompréhension des phénomènes ayant donné naissance à ces sols. Les paramètres d'identification sont classiques. On procède toujours, en vue de situer les matériaux dans les classifications géotechniques, aux essais de granulométrie et aux limites d'Atterberg.

Concernant les propriétés mécaniques, le problème est plus complexe. Les paramètres influençant la résistance au cisaillement sont très divers et varient d'une latérite à une autre. Il en est de même pour la portance, un mode opératoire standardisé permettrait de réduire l'irrégularité des résultats.

1.9.1.1.1 Granulométrie des graveleux latéritiques

Il n'existe pas une définition type du graveleux latéritique du point de vue granulométrique. Mais, d'une manière générale, on retient (Vallerga et al., 1969 ; Lyon Associates, 1971 ; Ogunsanwo, 1988 ; Bagarre, 1990 ; Frank, 2014) que les graveleux latéritiques au sens géotechnique sont des sols meubles, de granulométrie 0/20 à 0/40 mm comportant 10 à 35 % de fines (passant au tamis de 80 µm ≠ASTM 200) et un squelette (passant au tamis de 0,425 mm ≠ASTM 10) de 20 à 60 %.

La courbe granulométrique montre généralement un palier entre 80 µm et 3 mm, et donc une discontinuité granulométrique qui traduit bien la dualité d'origine des composants du mélange naturel de ce matériau (Bagarre, 1990). On considère aussi qu'un sol latéritique contenant plus de 35 % de passant à 80 µm n'est plus un graveleux latéritique ; il entre alors dans la catégorie des sols fins, l'influence de la fraction fine devenant prépondérante sur celle du squelette. Généralement les courbes granulométriques entrent correctement dans le fuseau type (Figure 0-1) des sols latéritiques tel que défini par le CEBTP (1984). Mais pour des sols latéritiques présentant des éléments graveleux de grande dimension ou lorsque les fines sont en grande quantité, l'enveloppe granulométrique de l'échantillon déborde du fuseau type recommandé.

1.9.1.1.2 Limites d'Atterberg : Plasticité

Les résultats de l'essai standard des limites d'Atterberg sont rarement reproductibles. Ces résultats sont largement influencés par les méthodes de préparation des échantillons, mais surtout des procédures d'essai (Gidigasu, 1972). Ceci est bien connu dans les laboratoires de mécanique des sols. Pour le cas des sols résiduels tropicaux, le problème est tout particulier. Newill (1961a), Gidigasu (1976) attribuent ce comportement à la présence dans certaines latérites de micro-agrégats de particules individualisés et à l'oxyde de fer hydraté. Ainsi, sous l'effet du malaxage, ces micro-agrégats ont tendance à se désagréger. Cela est aussi valable pour l'oxyde de fer hydraté. Dans tous les cas, la tendance est à l'augmentation de la plasticité due au malaxage, par conséquent imputable à l'énergie apportée à l'échantillon. L'indice de plasticité (IP) des sols latéritiques varie en général entre 10 et 35 (Bagarre, 1990). Lyon Associates (1971) précise que l'influence du prétraitement et les procédures de détermination des limites d'Atterberg ont été étudiées et discutées. Les variations des résultats, dues au prétraitement et aux procédures d'essai, ont rendu leur interprétation très difficile. Newill (1961a) écrit que, lorsque les essais de détermination de la limite de liquidité ont été effectués, les agrégats de particules d'argiles furent cassés par les manipulations nécessitées par l'essai, ce qui rendit difficile l'obtention de valeurs reproductibles de la limite de liquidité. Le traitement appliqué au sol crée aussi des problèmes lorsqu'il s'agit de relier entre eux les résultats de laboratoire et le comportement du sol sur le chantier, où il ne reçoit pas un traitement équivalent.

1.9.2 Caractéristiques principales des latérites

1.9.2.1 La masse spécifique

L'évaluation de la masse spécifique des grains solides (γ_s) constitue une grande difficulté pour les sols fortement ferruginisés en particulier et pour les sols latéritiques en général. Le poids spécifique est un paramètre important pour la caractérisation de l'indice des vides, de la porosité et surtout de l'état de saturation d'un sol. Nanda et al. (1958), Maignien (1966) et Vallerga et al. (1969) estiment que les valeurs élevées de celui-ci sont généralement associées aux sols riches en oxydes de fer ou de titane. Evans (1958), Nascimento (1959) ont montré aussi que ces valeurs très élevées concernent la fraction graveleuse dans laquelle les oxydes de fer tendent à se concentrer. En conséquence, le poids spécifique comme l'indique le Tableau 1-3 pour la fraction fine est différent de celle de la fraction grossière pour tous les sols latéritiques.

Tableau 1-3: Densité Relative (γ_s/γ_w) de quelques latérites (Gidigasu, 1976).

Localisation	Valeurs selon les passants au tamis de 2,80 mm ASTM N°7	Ensemble	Références
Ouganda (6 sols)	2,69 - 2,91	2,93 - 3,04	Evans (1958)
Gambie (3 sols)	2,68 - 2,74	2,98 - 3,06	O'Reilly & Baker (1963)
Inde (38 sols)	2,2 - 4,6	-	Nanda and Krishnamachari (1958)
Ghana (2 sols)	2,77 - 2,78	3,25 - 3,33	De Graft-Jonhson et Irwin (1959)

1.9.2.2 Caractéristiques de compactage et de portance

1.9.2.2.1 Caractéristiques de compactage

En technique routière, le poids volumique sec maximal et la teneur en eau optimale sont déterminés classiquement par l'essai classique Proctor modifié. L'essai Proctor modifié permet d'obtenir les caractéristiques optimales (poids volumique sec et teneur en eau à l'optimum Proctor modifié) des échantillons utilisés en construction routière. Des énergies supérieures à celles du Proctor modifié montrent une évolution très sensible des matériaux. Selon Bagarre (1990), une teneur en fines initiale de 27 % passe à 39 % sous un compactage (Proctor Modifié) à 59 % et à 1,4 de cette énergie. L'effet du surcompactage est mis en relief. Le poids volumique sec, dans ces conditions augmente jusqu'à l'énergie Proctor modifié puis n'évolue plus au-delà, par contre, la teneur en eau optimale augmente puisque le pourcentage en fines augmente. Enfin, des études (Gidigasu, 1976 ; Malomo, 1981 ; Attoh-Okine & Fekpe, 1996 ; Oyediran & Durojaiye, 2011 ; Avwenagha et al., 2014) ont montré que le poids volumique sec du matériau est plus élevée si celui-ci a été séché à l'étuve, dans ce cas la teneur en eau optimale est plus faible que lorsque le matériau a été séché par un autre procédé (séchage à l'air libre par exemple). Cette dernière constatation est d'une grande importance car la teneur en eau et le poids volumique sec retenus pour le chantier sont ceux du laboratoire. On est amené à croire que ces valeurs sont mal évaluées, dans la mesure où, aussi bien le mode de compactage, que le mode de séchage diffèrent de ceux opérés en laboratoire.

1.9.2.2.2 L'indice CBR

Pour les différents éléments du corps de chaussée, on exige des performances sur la base d'un essai type normalisé, l'essai CBR (Californian Bearing Ratio). Jusqu'à présent cet essai reste et demeure incontournable pour le dimensionnement des chaussées à assises latéritiques. Le CBR est un essai simple pour évaluer les qualités routières. Le test est arbitraire en ce sens que les résultats sont difficilement corrélés à un paramètre de résistance du sol.

Evans (1958), De Graft-Johnson et al. (1968), Vallerga et al. (1969), Lyon Associates (1971) ont montré que l'utilisation de l'essai CBR est adaptée aux sols latéritiques pour l'évaluation de la stabilité des structures routières. On remonte à cette période pour les premières utilisations de l'essai CBR sur les graveleux latéritiques. Wooltorton (1947 ; 1968) rapporte les mêmes tentatives sur des latérites de l'Inde.

Cependant plusieurs questions restent encore posées. La détermination du temps nécessaire pour l'imbibition des sols en est une. Par exemple selon certains auteurs (Ackroyd, 1959 ; Mahalinga-Iyer & Williams, 1997), dans les conditions semi-arides, une période entre 24 et 48 heures d'imbibition semble être suffisante. Les matériaux qui montrent de fortes résistances (en termes de CBR) non imbibés, chutent considérablement de résistance en présence d'eau. D'après Evans (1958) le CBR décroît quand la teneur en eau augmente. Remillon (1967) trouve des résultats similaires sur des latérites de l'Afrique de l'Ouest. Ces résultats montrent clairement que les latérites sont des sols sensibles à l'eau et par la même occasion changent de caractéristiques au passage des divers états des sols en présence d'eau. Cette sensibilité à l'eau est telle que pour certaines latérites imbibées pendant 4 jours, la portance est considérablement diminuée, l'effet étant moindre pour des latérites compactées à la teneur en eau de l'optimum (Evans, 1958 ; De Graft-Johnson et al., 1969 ; Townsend et al., 1969). Selon le rapport de Bagarre (1990), le rapport CBR après imbibition de 4 jours sur CBR immédiat varie de 0,3 à 0,9, il est souvent voisin de 0,7. Enfin, il faut noter que le CBR déterminé avec le mode AASHTO est généralement plus important que celui du mode britannique (British Standard ou BS).

L'effet du degré de compaction ainsi que de la teneur en eau de moulage est très prononcé. Plus le degré de compactage est élevé, plus est importante la diminution de la résistance (en termes de CBR) quand la teneur en eau de compactage augmente. L'utilisation du CBR corrigé est due au fait que les couches de base de routes en terre peuvent supporter des déflexions importantes (Remillon, 1967). D'après cet auteur, il n'est pas rationnel de les dimensionner en partant du CBR à 2,5 mm d'enfoncement de la plateforme surtout si celle-ci est constituée de matériaux plastiques. Alors, après examen des courbes de poinçonnement (contrainte-déformation), on prend en compte un CBR correspondant à une sécurité de 2 par rapport à la rupture.

1.9.2.3 Résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement des sols latéritiques a fait l'objet de nombreuses études (Vargas, 1953 ; 1975 ; Lumb, 1962 ; Baldovin, 1969 ; Lohnes et al., 1971; Gidigasu, 1976 ; Malomo, 1983 ; Ogunsanwo, 1986 ; 1989 ; Fall et al., 1995 ; Samb et al., 2013 ; Lucas & Roger, 2015). Il est reconnu que les essais mécaniques sur des éprouvettes de latérite sont d'excellents moyens d'investigation pour évaluer la résistance au cisaillement.

Clare et O'Reilly (1960) et Lohnes et al. (1971) jugent que l'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande apporte d'informations utiles, en plus du fait que l'essai est relativement peu coûteux.

1.9.2.3.1 Facteurs influençant les propriétés géotechniques et mécaniques des sols latéritiques

Plusieurs facteurs peuvent influencer la résistance au cisaillement des sols latéritiques dont entre autres :

- ✓ l'influence des facteurs pédogénétiques et compositionnels ;
- ✓ l'influence des paramètres de compactage ;
- ✓ le caractère intact ou compacté de l'échantillon ;
- ✓ la texture et la porosité de la matrice initiale ;
- ✓ le mode de revêtement de la matrice par les oxydes de fer.

1.9.2.3.2 Influence des facteurs pédogénétiques et compositionnels

Les avis sont très partagés à l'heure actuelle sur la relation entre l'origine pédologique des sols latéritiques et la résistance au cisaillement. Par exemple, Madu (1977), à partir d'investigations sur des latérites du Nigéria montre qu'il n'existe pas de réelles corrélations entre les teneurs en oxydes de fer ou d'aluminium et les paramètres physiques ou mécaniques ; autrement dit les facteurs compositionnels ou génétiques ne sont pas prépondérants. Pour certains auteurs, au contraire les facteurs les plus déterminants sont les facteurs génétiques et compositionnels et, ainsi que les différentes méthodologies et procédures d'essais de laboratoire (Withehouse, 1940 ; Lohnes et Demirel, 1973). La résistance au cisaillement des sols latéritiques est reconnue dépendant significativement de leur origine, directement lié au degré d'altération de ces sols (degré de décomposition, ferruginisation, degré d'induration et état de dessiccation). Ces paramètres sont fonction de la position de l'échantillon au niveau des profils d'altération (Lumb, 1962 ; Lohnes et al., 1971; Wallace, 1973). Par exemple, Lohnes et al., (1971) trouvent des variations significatives de ces caractéristiques de résistance en fonction de la profondeur du profil pour des latérites provenant de cendres volcaniques et appartenant au même horizon pédologique. Concernant le degré d'altération ou de latéritisation, Baldovin (1969) conclut que plus le degré de latéritisation est élevé, plus est élevée la résistance au cisaillement. Sur la base d'études de sols résiduels de Hong Kong formés selon différentes roches mères, Lumb (1962) identifie trois groupes de sols résiduels en termes de résistance au cisaillement. D'après l'auteur, il existe des corrélations significatives selon que la latérite est formée à partir de roches mères différentes. Ceci est en relation avec la texture, la distribution granulométrique, la capacité de drainage (perméabilité) etc. Il propose une classification géotechnique des sols résiduels tropicaux en termes de résistance au cisaillement, incluant les paramètres de granulométrie et de texture (Tableau 1-4).

Lumb (1962) met en évidence les:

a) sols latéritiques frictionnels avec possibilité de drainage libre ;
b) sols latéritiques cohésifs ou imperméables ;
c) sols latéritiques intermédiaires à ces deux classes.

Tableau 1-4: Classification géotechnique de sols latéritiques de Hong Kong provenant de roches mères diverses (Lumb, 1962).

Types	Description	Critère	Origine
Frictionnel	Frictionnel	% sable et gravier ≥ 80	Sable de plage ou dépôts éluviaux
Frictionnel	Frictionnel avec un peu de cohésion quand non saturé	% sable et gravier 50 - 80	Granite décomposé
Cohésif	Frictionnel	% sable et gravier ≤ 50	Cendres
Cohésif	Cohésif	% argile < 20	Volcaniques, terre rouge
Frictionnel	Frictionnel avec une grande cohésion quand non saturé	% argile ≥ 20	Silt marin
Cohésif	Cohésif	Ip ≥ 30	Terre rouge

Les valeurs de résistance au cisaillement de ces différents groupes sont reportées dans le Tableau 1-5 ci -dessous.

Tableau 1-5: Paramètres de résistance au cisaillement de quelques latérites de Hong Kong (Lumb, 1962).

Paramètres de résistance	Granite décomposé	Terre rouge	Cendres volcaniques	Silt marin
Angle de frottement interne	35° - 40°	25° -35°	30° - 35°	-
Cohésion (kPa)	0 - 0,072	0 - 0,22	0 - 0,48	0 - 14,4

1.9.2.3.3 Influence des paramètres de compactage sur la résistance au cisaillement

Lumb (1962), De Graft-Johnson et al. (1969), Baldovin (1969), Gidigasu (1976), mettent en relief l'influence du degré de saturation et des teneurs en eau sur cette résistance. Ces auteurs proposent la relation empirique suivante (Equation 1-5) donnant la cohésion effective en fonction de la teneur en eau :

$$C = a.e^{-bWn}$$

Equation 1-5: Cohésion effective en fonction de la teneur en eau.

Wn = teneur en eau naturelle, a et b sont des constantes expérimentales, e étant la base du logarithme népérien

Terzaghi (1958), pour sa part, ne trouve pas d'influence concernant les variations de la teneur en eau sur les paramètres non drainés des argiles latéritiques de Sasumua (Kenya). Gidigasu (1976) aboutit aux mêmes résultats sur cette même argile latéritique de Sasumua compactée : les teneurs en eau de moulage et les pressions de confinement ont une influence négligeable sur les paramètres de résistance au cisaillement.

1.9.2.3.4 Paramètres influençant la résistance au cisaillement

De nombreux travaux sur les latérites montrent l'influence de l'énergie de compactage sur les paramètres de résistance au cisaillement (Daniel et al., 1959 ; Baldovin, 1969 ; Mahalinga-Iyer & Williams, 1994 ; Fall et al., 1995 ; Massamba, 2013 ; Lucas & Roger, 2015). De ces travaux on remarque une grande disparité du comportement selon que le compactage est opéré à des compacités supérieures à 95 % de l'Optimum Proctor Modifié (OPM) ou inférieures. Dans le premier cas le comportement est dit fragile avec présence d'un pic à la résistance maximale et dans le second le comportement est ductile. Omotosho & Akinmusuru (1992) ont étudié des sols latéritiques du Nigéria, compactés et reconstitués successivement. Ils les soumettent à des essais triaxiaux U.U et constatent l'influence de ce mode de préparation sur des paramètres tels que l'indice de plasticité (IP), les indices de granulométrie (Cc, Cu, la génération de fines particules), mais et surtout sur les caractéristiques de cisaillement ; avec une stabilisation de ces différents paramètres pour un nombre de cycles connu. Pour Gidigasu (1976) ; Michael (1996), l'influence du poids spécifique sur les paramètres de résistance est rarement prise en compte. Il est connu que le poids spécifique est une fonction du degré de latéritisation et directement lié à l'augmentation de la teneur en oxydes de fer ou de titane.

1.9.2.3.5 Comportement particulier observé sur des graveleux latéritiques intacts et compactés

Lohnes et Demirel (1973) ont observé pour la première fois sur des sols latéritiques soumis à des essais à la boîte de cisaillement un comportement dit d'effondrement (collapsible behaviour) généralement connu sur des argiles partiellement saturées. Ce comportement est tel qu'il existe une nette distinction de l'allure de l'enveloppe de rupture entre les contraintes faibles et celles à grande intensité (au-delà de 200 kPa généralement). Ce comportement n'a été observé que sur des latérites intactes et dans la littérature pour des sols résiduels intacts tropicaux. Malomo (1983), l'évalue pour la première fois sur des sols latéritiques du Nigéria, cette fois-ci compactés à l'OPM. Pour une teneur en eau donnée, une seule et unique ligne de rupture ne peut être tracée. Il y a deux lignes de rupture, la première à faible contrainte normale, la deuxième à forte contrainte normale. D'après cet auteur, il existe une limite de la contrainte normale pour laquelle le sol s'effondre (Figure 1-15). En faible contrainte, l'importance de la compaction due à la charge axiale et par la suite la désagrégation des concrétions est faible, l'effet de la contrainte de cisaillement n'est pas très apparent. Au-delà de cette zone de contrainte, l'effet de désagrégation apparaît et demeure constant. Ainsi, il existe une région initiatrice de l'effondrement et au-delà le phénomène se manifeste continuellement. Toujours selon Malomo (1983), en contraintes normales faibles le comportement est décrit comme celui d'un sable dense dans la mesure où la contrainte tangentielle augmente jusqu'à atteindre un pic et ensuite chute brusquement. En contraintes normales élevées, la contrainte tangentielle augmente très rapidement et n'atteint pas de maximum, même à très grandes déformations (≈ 20 %) ; ceci est attribué à un sable lâche.

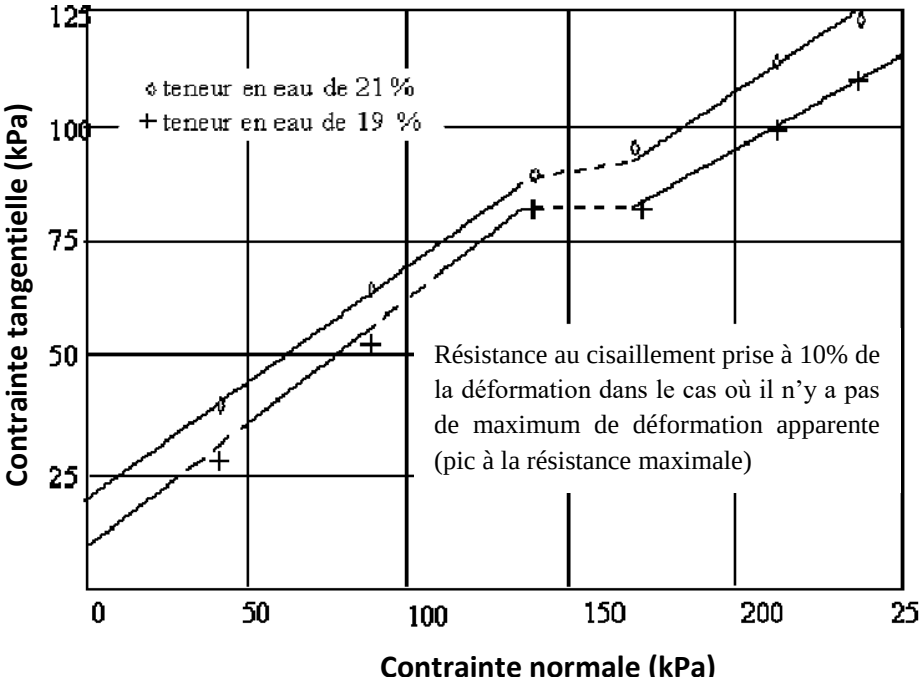


Figure 1-15 : Mise en évidence du comportement d'effondrement (Malomo, 1983).

Le comportement est à la fois fonction du niveau de contraintes et de la teneur en eau de compactage : les allures des enveloppes de rupture se trouvent changées. De la même manière, l'analyse des courbes de la variation de volume de l'échantillon au cisaillement (variation de la hauteur de l'échantillon) montre qu'en faibles contraintes, les échantillons se dilatent et en grandes contraintes se contractent. Ce changement de l'état dilatant à l'état contractant est aussi observé quand la teneur en eau de compactage varie. Si ce phénomène, attribué seulement à des sols latéritiques intacts, est observable sur des échantillons de latérites compactés ; les mécanismes devraient certainement être identiques. Seulement, en reconstituant au laboratoire des échantillons par compactage, on pourrait se mettre en partie dans des conditions in situ (la puissance des couches latéritiques pouvant dépasser 100 m dans certains cas). L'idée simple que les sols latéritiques intacts s'effondrent par la variation du niveau de contraintes, de la dislocation des interconnexions continues du squelette solide (cimentation) ne semble pas être applicable aux sols latéritiques compactés. Mais, l'idée d'un changement important de leur structure interne ne peut être exclue. Alors, la cimentation des agrégats par compactage peut être brisée sous contrainte et le phénomène est accru en cas de présence d'eau. Le changement vers un matériau moins dense justifie certainement un phénomène de dégradation et dans ces conditions l'augmentation de la teneur en eau accélère le phénomène. Pour les sols latéritiques compactés, la structure est une juxtaposition de nodules et de particules argileuses plus fines. Toute variation du niveau de contrainte a pour effet de fragmenter les pisolithes et concrétions d'où une génération de fines. On passe alors d'un état granulaire à un matériau plus plastique.

Enfin, Malomo (1981, 1983) et Ogunsanwo (1989), sont parvenus aux mêmes conclusions selon lesquelles il existe deux niveaux de structure pour les sols latéritiques compactés :

a) une combinaison entre le squelette solide constitué de particules en concrétion ou argileuses, de l'espace poreux et de l'eau. Leur disposition géométrique est essentiellement fonction de l'énergie de compactage et de la teneur en eau ;

b) une structure interne des particules elles-mêmes, identique aux sols intacts. Cette configuration est héritée de la structure originelle quand le sol latéritique se formait.

En définitive, si des sols latéritiques compactés à la même teneur en eau présentent différents comportements seulement par la variation du niveau de contrainte. Cela ne peut être dû qu'à la configuration (b). Dans ces conditions, le niveau structural constitué de la juxtaposition de particules très liées nécessite un niveau de contrainte élevé pour qu'il y ait désagrégation.

1.9.2.4 Compressibilité des sols latéritiques

Les travaux de Vargas (1953) et Lohnes et al. (1971) se sont essentiellement intéressés à l'étude de la compressibilité des sols latéritiques. Le but de ces études était essentiellement de vérifier que la théorie de la consolidation de Terzaghi était applicable sur des sols de ce type, en vue de travaux de fondation. L'aspect routier a rarement fait le cas de telles études, les pressions en jeu étant excessives. Selon Vargas (1953), la loi d'évolution de la déformation en essai de compressibilité des sols latéritiques, est similaire aux lois qui gouvernent les phénomènes de consolidation des argiles sédimentaires. D'après cet auteur, la pression de pré-consolidation décrite par Casagrande, est valable sur ces sols seulement après un certain niveau de contrainte.

Avant cette limite, la diminution de l'indice des vides pendant le chargement est très faible, jusqu'au niveau de contrainte où la relation entre la diminution de l'indice des vides et la contrainte appliquée suive la loi de la consolidation. D'après Vargas, ceci est dû à l'existence d'une pression de "pré-consolidation virtuelle" en relation avec l'histoire du matériau (nature du sol, sa position selon les profils pédogénétiques, sa structure). Le phénomène similaire existe quand il s'agit de latérites compactées. Plusieurs facteurs affectent cette compressibilité, la profondeur des sols en place, la nature de la roche mère et surtout la méthodologie d'essai.

L'aspect de la courbe de chargement œdométrique a fait l'objet d'une importante communication par le groupe de travail - [Sols résiduels tropicaux-(Engineering Geology, Vol.23, I-1990), (Jennings et Knight, 1957-58 ; Foss, 1973; Vargas, 1974)]. Selon ces auteurs, les sols latéritiques ont des potentialités d'effondrement. Ils ont une texture généralement lâche et peuvent supporter de grandes contraintes quand ils sont partiellement saturés, mais offrent une diminution de volume du à l'effondrement quand ils sont saturés, même à faibles contraintes. Les sols résiduels tropicaux ont tous généralement ce comportement. L'effondrement résulte de la perte ou la réduction de l'adhérence entre grains solides, due à l'écrasement et directement liée à la présence d'eau dans les sols résiduels tropicaux dont la roche mère a été enrichie en quartz.

Un autre mécanisme de l'effondrement s'explique par la perte de stabilisation de la tension superficielle entre les ménisques d'eau et les particules solides dans le cas des sols partiellement saturés et surtout de la perte de résistance des particules solides elles-mêmes quand elles sont saturées.

Ceci peut être évalué au laboratoire par l'utilisation de l'œdomètre : l'échantillon est chargé initialement à la teneur en eau optimale, à une pression égale à la pression limite déterminée in-situ. À l'équilibre (stabilisation), l'échantillon est saturé et l'effondrement s'observe aussitôt c'est à dire une diminution de l'indice des vides pour une même pression axiale donnée. Jennings & Knight (1957) proposent une méthode de détermination de la pression d'effondrement. L'échantillon est saturé après une mise en charge de 200 kPa. Ainsi, le potentiel d'effondrement (collapse potential) est défini par (Equation 1-6) :

$$\frac{\partial e}{1+e_0}$$

Equation 1-6: Relation permettant de calculer la pression d'effondrement (Jennings & Knight, 1957).

∂e : Variation de l'indice des vides initial

e_0 : Indice des vides initial

Des résultats analogues ont été observés sur les sables à très grandes contraintes (Bishop, 1966), ainsi, la déformation est une fonction du niveau de contrainte (Malomo, 1983 ; Ivan et al., 2015). Le phénomène est expliqué par un écrasement des grains à ce niveau de pression. À cet effet, l'influence de la granulométrie sur la compressibilité des sols pulvérulents a été rapportée par plusieurs auteurs (Lyon Associates, 1971 ; Ogunsanwo, 1988 ; Badmus, 2010). À ce propos, les matériaux bien gradués, doublés de particules à forme roulée, offrent du point de vue de cette propriété, les meilleurs résultats. Or l'écrasement des particules a pour effet de donner lieu à des formes plus aplaties et des résultats ont montré qu'il s'y associe une plus grande compressibilité et un angle de frottement interne plus faible. Si on devait appliquer un tel raisonnement au cas actuel des sols latéritiques, les désordres granulométriques ne s'expliqueraient plus en termes d'écrasement de particules, compte tenu des niveaux de contrainte σ'_{3c} relativement faibles (application routière).

Les ruptures se produiraient ailleurs où les liens sont beaucoup plus fragiles que ceux-là mêmes qui déterminent la microstructure des minéraux. Elles interviendraient d'abord au niveau de la matrice fine qui jusqu'ici, exerçait un effet structurant sous l'effet du compactage; ensuite au niveau des éléments grossiers par déconcrétion, en raison des efforts de contact. Par conséquent, tant et aussi longtemps que les niveaux de contraintes resteront relativement faibles, condition souvent satisfaite dans le cadre d'applications essentiellement routières, les pertes de caractéristiques devront être d'autant plus importantes que, d'une part la fraction fine est importante, et d'autre part le matériau a acquis un état d'induration peu avancé.

1.9.2.5 Perméabilité des sols latéritiques

Les mêmes facteurs qui influencent les caractéristiques mécaniques des sols latéritiques sont ceux-là même qui affectent leur perméabilité. Le Tableau 1-6 donne quelques ordres de grandeur de la perméabilité de certains sols résiduels tropicaux rapportés par Gidigasu (1976). Les résultats sont assez irréguliers, mais les études montrent qu'à l'état compacté ces sols sont en général peu perméables.

Tableau 1-6: Perméabilité de quelques sols résiduels tropicaux (Gidigasu, 1976).

Référence	Type de sol	Lieu	Roche mère	Perméabilité K (m/s)
Vargas et al. (1965)	Gneiss résiduel	Brésil	Gneiss	3.10^{-7} à 6.10^{-6}
	Basalte résiduel	Brésil	Basalte	2.10^{-7}
Terzaghi (1958)	Argile de Sasumua	Kenya	Cendre volcanique	$0,8.10^{-7}$ à 7.10^{-7}
Matyas (1969)	Argile de Sasumua	Kenya	Cendre volcanique	2.10^{-7} à 6.10^{-8}
Andrews (1936)	Latérite	Hawaii	Basalte	$1,48.10^{-4}$ à $5,4.10^{-7}$
De Graft-Johnson (1969)	Argile latéritique	Ghana	Granite	$7,5.10^{-5}$ à $1,7.10^{-7}$

1.9.3 Classification des sols latéritiques

Le but d'une classification géotechnique est de permettre à partir de constatations de terrain et d'essais simples de laboratoire, de prévoir le comportement mécanique d'un matériau. Elle indique par classe de sol la portance à laquelle l'on pourrait s'attendre. Les systèmes de classification communément utilisés en génie civil, basés sur la distribution des grains et la plasticité, sont limités quant à leur utilisation pour classifier les sols résiduels. Cette limitation est due essentiellement à deux facteurs :

- ✓ le caractère évolutif des sols résiduels rendant difficile l'application et la reproductibilité des essais classiques comme la granulométrie ou les limites d'Atterberg,
- ✓ le principe de l'élaboration de ces classifications sur la stabilité des grains de sols.

Les relations entre la latérite et les horizons indurés étant évidentes, les tentatives de classification ont cherché à préciser les relations les liant en s'appuyant soit sur des caractéristiques morphologiques, soit sur des critères génétiques. Les différents systèmes de classification sont nombreux et divers. Nous distinguons (Maignien, 1966 ; Lin, 1986) :

- ✓ Le système de l'ex-U.R.S.S. qui est basé sur des facteurs génétiques. Ce système distingue d'abord les latérites tropicales des sols latéritiques subtropicaux. Ces différences sont liées à des facteurs thermiques d'érosion et de formation des sols ; mais aussi sur l'ampleur du processus de cuirassement et la puissance des produits formés.
- ✓ Le système Français : dans ce système, il est fait une nette discrimination entre les sols d'altération latéritique appelés sols ferralitiques et les processus de cuirassement, ces derniers pouvant apparaître dans des sols génétiquement différents tels que les sols ferrugineux tropicaux, les sols ferralitiques, les sols hydromorphes. Il en résulte que la présence d'horizons à matériaux indurés riches en sesquioxydes (latérite) n'apparaît qu'au niveau du sous-groupe.

- ✓ Le système Portugais : il se rapproche de la classification française. Il distingue les sols fersialitiques tropicaux avec ou sans latérite, les sols para-ferralitiques, les sols ferralitiques avec ou sans les fines latéritiques.
- ✓ Le système Britannique : ce système s'inspire de l'étude faite sur les latérites du Ghana et se penche plutôt sur les latosols. Ces sols se regroupent dans l'ordre des « Climatophytic Earths » dont les principales caractéristiques sont liées à la fois à l'action du climat et de la végétation.
- ✓ Le système Australien : dans ce système quatre groupes de sols sont reconnus comme latéritiques : krasnozems, krasnozems latéritiques, terres rouges latéritiques et les sols podzoliques latéritiques.
- ✓ Le système U.S.A. : l'ensemble des sols latéritiques, cuirassés ou non, est groupé dans l'ordre des oxisols qui est défini comme suit : sols minéraux à horizon oxique ou ayant, à moins de 30 cm de la surface, de la plinthite qui forme une phase continue et qui n'est pas indurée. Dans la catégorie des oxisols, qui dérivent eux-mêmes des latosols, on peut citer les sous-classes suivantes: les aquox, les acrox, les udox, les ustox et les idox.
- ✓ Le système Belge : il s'agit d'un système morphologique. Les critères utilisés pour les différenciations des différentes catégories sont les suivantes : ordres, sous-ordres, petit groupe et grand groupe. La classification des sols latéritiques s'appuie essentiellement sur la définition de l'horizon : horizon B ferralitique qui est un horizon situé entre l'horizon A et la roche amollie. L'ensemble des sols latéritiques est groupé surtout dans l'ordre des kaolisols et quelques-uns dans l'ordre des kaolisols lessivés.
- ✓ Nous distinguons entre autres certaines classifications spécifiques comme le système S.P.I (d'Hoore 1963) et le système F.A.O. (Maignien, 1966).

Quoi qu'il en soit, une classification performante sur un territoire donné et pour un domaine précis doit être :

- ✓ complète : tous les sols doivent y trouver leur place,
- ✓ univoque : le même sol ne doit pas pouvoir se situer dans deux cases différentes du tableau de classification,
- ✓ simple d'emploi : classer un sol ne doit nécessiter qu'un nombre limité d'essais de laboratoire,
- ✓ utilitaire : les coupures doivent correspondre aux transitions dans les domaines d'emploi,
- ✓ fine : le nombre de classes doit être suffisant pour refléter les variétés dans les sols rencontrés,
- ✓ parlante : les désignations ou les symboles utilisés doivent être si possible faciles à mémoriser.

Un grand nombre de classifications de sols latéritiques a été proposé, mais jusqu'à présent aucune n'est parvenue à atteindre le « consensus final ». Néanmoins, ces classifications ont contribué à une meilleure connaissance des graveleux latéritiques. L'utilisation des classifications les plus connues comme l'American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO), l'Unified Soil Classification System (USCS) ou les Recommandations pour les Terrassements Routiers (RTR), permet de classifier tous les sols latéritiques dans une même classe.

Par exemple pour la classification AASHTO ou HRB, ces sols sont généralement rangés dans les classes A-2-4 à A-2-7. Dans les classifications USCS et RTR, ils sont respectivement classés GC (grave argileuse) et B6. Ceci démontre également l'insuffisance des classifications utilisées dans le cas des graveleux latéritiques, ces classes étant de nature différente. Plusieurs pays comme le Ghana, la Côte d'Ivoire, le Gabon, le Cameroun, le Burkina Faso, etc…, ont tenté d'établir une classification ou simplement résumer les caractéristiques des matériaux rencontrés dans ces régions. Parmi celles-ci, les plus importantes sont :

- ✓ la classification de Lyon Associates (1971) qui reprend la classification génétique d'Hoore (1963),
- ✓ la classification ivoirienne qui tient compte du facteur génétique établit en 1984 par le L.B.T.P. (Cougny, 1988),
- ✓ la classification du C.E.B.T.P. basée sur le pourcentage de fines, l'indice de plasticité et le produit pourcentage de fines par l'indice de plasticité.

1.9.3.1 Classification ivoirienne des graveleux latéritiques

Plusieurs classifications ont été élaborées en Côte d'Ivoire pour les graveleux latéritiques. Elles s'appuient essentiellement sur les travaux pédologiques de l'ORSTOM de Côte d'Ivoire. Le système de classification est le suivant :

- ✓ en géotechnique, classer en fonction de la granulométrie (tamisât à 80 µm ou teneur en fines) et de la plasticité (indice de plasticité IP),
- ✓ en géologie, préciser la roche mère,
- ✓ en pédologie, préciser la position occupée par l'échantillon dans le profil type ABC, préciser la nature de l'altération (ferralitique ou ferrugineuse) et le faciès de la couche.

Trois classes de graveleux latéritiques ont été mises en évidence (Tableau 1-7) correspondant à des qualités géomécaniques décroissantes (G1, G2, G3). Les classifications successives ont abouti à affiner les distinctions, mais les trois classes ont subsisté.

Tableau 1-7: Classification des graveleux latéritiques naturels de Côte d'Ivoire.

Catégorie	Indice de Plasticité IP	% de fines C80µm	Valeurs moyennes des caractéristiques de compactage		
			ICBR à 95% OPM après 4 jours d'immersion	Poids volumique sec optimal (kN/m3)	Teneur en optimale (%)
G1	5 - 15	5 - 15	30 à 80	21 à 23	5 à 8
G2	15 - 25	15 - 25	20 à 30	20 à 22,5	9 à 10
G3	25 - 35	25 - 35	14 à 40	19 à 22	8 à 12

1.9.3.2 Les études du Congo Démocratique (Zaïre)

Au Congo Démocratique, les recherches effectuées sur les sols concernant la capacité d'absorption des sols à l'essai de bleu de méthylène, confirment la dispersion des résultats notée par les autres auteurs, mais notent que, si la valeur de bleu déterminée sur la fraction 0/5 mm rapportée à la masse totale du matériau (0/D) est supérieure à 0,4 g/100 g, l'indice CBR est toujours inférieur à 40 (à 95% de l'OPM) (Figure 1-16).

Pour les auteurs congolais, une valeur VB (0/D) inférieure à 0,3 g/100 g serait caractéristique de graveleux latéritiques à fines peu actives et de bonne portance.

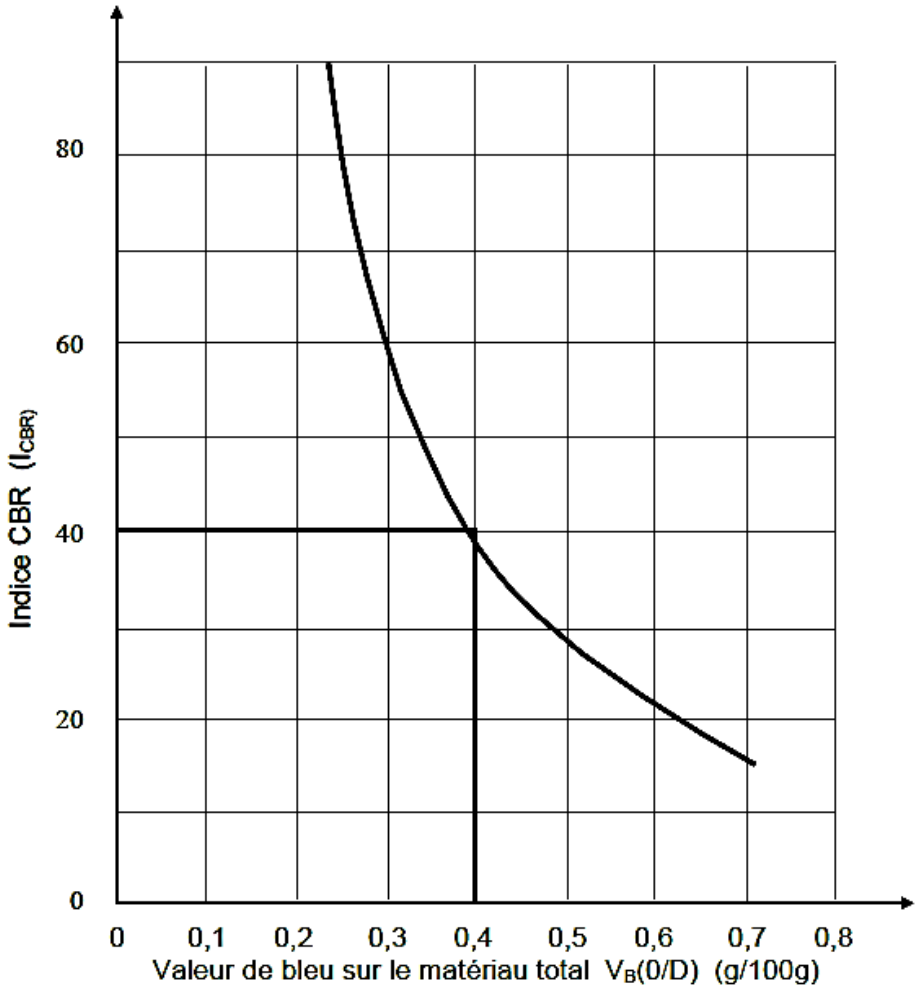


Figure 1-16: Relation entre ICBR 95%OPM et valeur de bleu sur matériau total (Congo RDC).

Une manière commode de représenter les paramètres d'identification d'un graveleux latéritique sur un diagramme où l'on fait croître ou décroître ensemble les valeurs qui évoluent dans le même sens a été proposée (Figure 1-17 et Tableau 1-8). Elle fait varier dans le même sens d'une part :

- ✓ le refus à 2 mm (fraction graveleuse) : $R_{2mm} = 1 – C_{2mm}$,
- ✓ le poids volumique sec à l'OPM γd_{OPM},
- ✓ l'indice CBR (I_{CBR}).

Et d'autre part :

- ✓ la teneur en fines ou passant à 80 µm ($C_{80\mu m}$),
- ✓ la limite de liquidité W_L,
- ✓ l'indice de plasticité I_P,
- ✓ la teneur en eau optimale à l'OPM W_{OPM}.

Chaque type de matériau se trouve ainsi représenté par un zigzag continu recoupant une certaine position dans le diagramme (Figure 1-17)

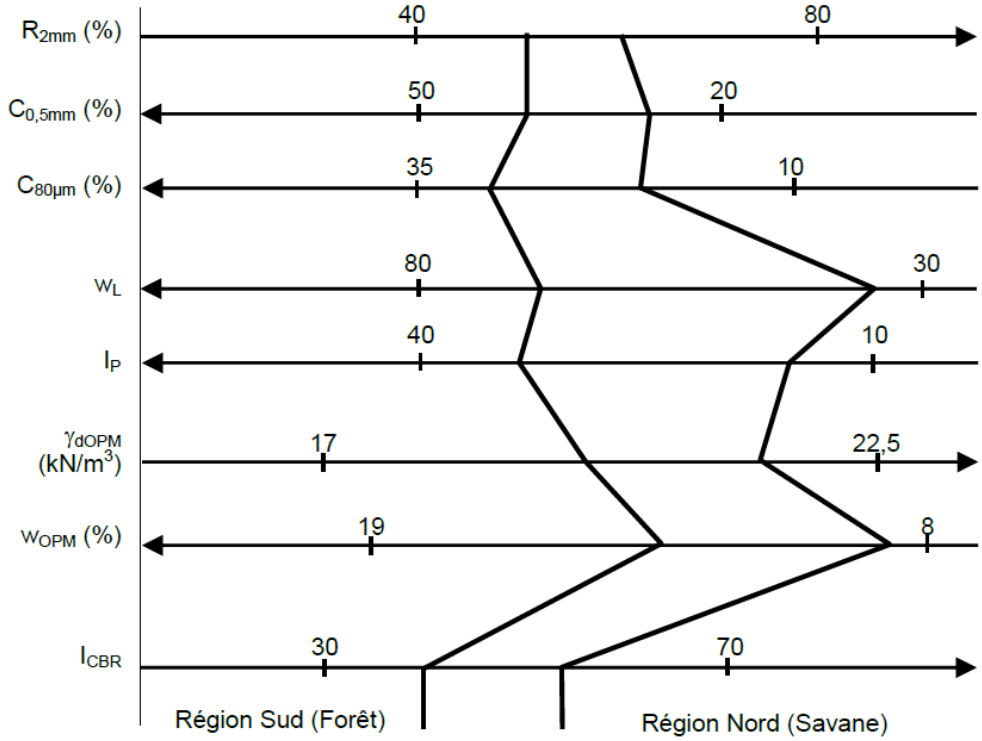


Figure 1-17: Diagramme d'identification géotechnique des graveleux latéritiques proposé par les études du RDC.

Tableau 1-8: Définition des classes de graveleux latéritiques du RDC.

	GL1	GL2	GL3
Refus à 2 mm (%)	63 - 85 (74)	53 - 75 (66)	44 - 71 (57)
Passant à 80 µm	8 - 18 (13)	16 - 26 (21)	25 - 37 (31)
Limite de liquidité (w_L)	26 - 52 (39)	32 - 58 (45)	36 - 66 (50)
Indice de plasticité I_p	9 - 25 (16)	14 - 26 (20)	14 - 34 (24)
C80µm x I_p	125 - 265 (195)	300 - 520 (410)	535 - 915 (725)
ϒs (KN/m^3)	> 30	> 29	> 28
ϒdOPM (KN/m^3)	21 - 24 (22,5)	19,8 - 23,2 (21,5)	18,5 - 21,5 (20)
Teneur en eau w_{OPM} (%)	6 - 11 (9)	8 - 13 (11)	10 - 16 (13)
I_{CBR} (95%OPM)	22 - 102 (62)	14 -68 (41)	14 - 46 (30)
Gonflement (moule CBR)	0,1	0,4	0,8

1.9.3.3 Les études du Nigéria

Lyon Associates (1971) a étudié les sols du Nigéria, comme l'ont été ceux du Ghana. Ces études, réalisées en faisant intervenir les facteurs « roche mère » et « degré d'altération », donnent les propriétés géotechniques des sols du Nigéria en relation avec la roche mère (Figure 1-18, Tableau 1-9).

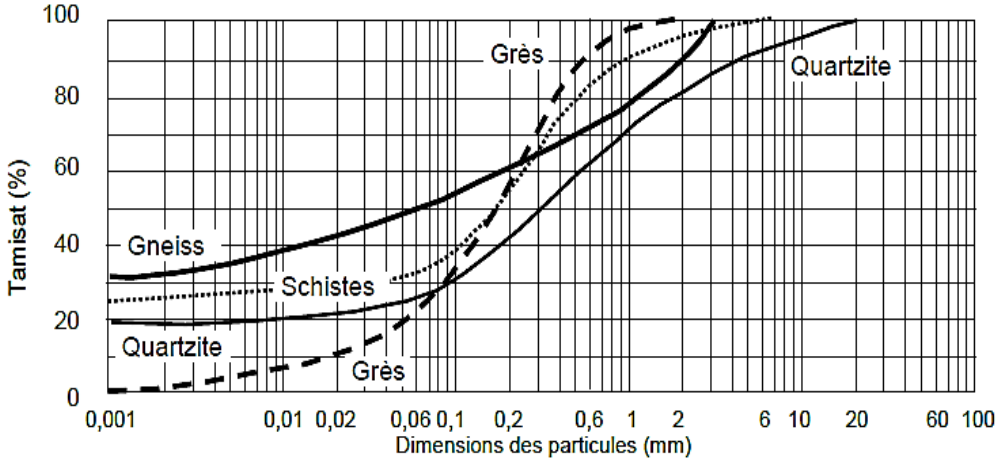


Figure 1-18: Courbes granulométriques des sols du Nigéria en fonction de la roche mère.

Tableau 1-9: Caractéristiques géotechniques des sols de Nigéria en fonction de la roche mère.

	Schiste	Quartzite	Gneiss	Granite	Grès
Teneur en eau (%)	6,9	12,5	25,4	26,6	7,2
Limite de liquidité (w_L)	36,4	40,6	60,2	53,7	26,9
Limite de plasticité (w_p)	32	31,9	48,5	50,1	21
Indice de plasticité Ip	4,4	8,5	11,7	13,6	5,9
Retrait linéaire (%)	5	11,6	14,1	7,3	2,2
ϒs (g/cm3)	2,59	2,56	2,71	2,59	2,54
Capacité d'absorption d'eau (%)	51,7	85,8	73,3	103	48,3
Cohésion (kPa)	40	20	40	25	10
Angle de frottement interne (°)	25	27	31	28,5	27
Teneur en SiO^2 (%)	48,09	68,52	57,42	53,91	63,97
Teneur en Fe_2O_3 (%)	24,31	8,01	10,22	11,3	7,58
Teneur en Al_2O_3 (%)	27,44	22,79	9,5	23,04	29,83

1.10 Processus de dégradation des routes latéritiques

Le processus de dégradation des chaussées est un phénomène bien connu mais difficile à décrire ou à maitriser. En effet, les chaussées sont soumises à diverses sollicitations dont les effets directs ne sont pas toujours connus (CEBTP, 1984 ; Fekpe & Attoh-Okine, 1995). Et plus, d'autres facteurs tels que les familles de chaussées concernées (revêtue / non revêtue) ainsi que le comportement des différents types de structures sous sollicitations viennent favoriser les risques de dégradation des chaussées. Il devient donc indéniable de connaître le processus de dégradation des chaussées pour chaque type de structure (voir les types de désordres au §0.4).

1.11 Amélioration des propriétés des latérites par l'ajout d'un produit industriel ou naturel

1.11.1 Amélioration à la chaux

La chaux vive ou la chaux éteinte peuvent être utilisées ; la chaux vive étant évidemment plus efficace que la chaux éteinte, mais pose des problèmes de sécurité et d'hydratation en pays humide. Selon les recommandations de (Lyon Associates, 1971 ; CEBTP, 1984 ; Bagarre, 1990), le matériau doit avoir une plasticité supérieure à 10, et un pourcentage de mortier (passant à 0,425 mm) supérieur à 15. On doit obtenir un CBR minimal de 60 pour 95% du poids volumique maximal à l'OPM après 3 jours de cure à l'air et 4 jours d'immersion. Les exemples de traitement à la chaux de graveleux latéritiques sont surtout Kenyans, Ougandais mais des opérations du même type ont été envisagées dans plusieurs autres pays qui ont la possibilité de produire de la chaux (Congo, Cameroun, Sénégal…). Les pourcentages de chaux utilisés pour l'amélioration des performances mécaniques sont le plus souvent compris entre 4 et 7%.

1.11.2 Amélioration au ciment

La technique d'amélioration des couches de chaussée en graveleux latéritiques améliorés par l'ajout de ciment a fait l'objet de nombreuses études dans plusieurs pays se situant en zones tropicales et intertropicales (Wooltorton, 1947 ; De Graft-Jonhson & Irwin, 1959 ; Autret, 1980 ; Gense, 1984 ;). Le pourcentage de ciment ajouté varie dans de larges proportions en fonction des caractéristiques géotechniques du sol latéritique à améliorer et des performances mécaniques escomptées.

Pour que le résultat soit acceptable, les caractéristiques des graveleux latéritiques devront être les suivants :

- ✓ teneur en matières organiques < 1,5%,
- ✓ passant à 80 µm < 35%,
- ✓ indice de plasticité < 30,
- ✓ module de plasticité (m* x IP) < 2 500.

Avec m: le passant à 0,425 mm

1.11.3 Amélioration aux nodules latéritiques (litho-stabilisation)

L'évaluation de la dureté des nodules sur les sols résiduels utilisés en construction routière est une notion qui pendant longtemps a fait l'objet de recherche. Mais jusqu'à l'époque contemporaine, la question sur l'impact réel de ces nodules sur le sol latéritique compacté n'est pas résolue. Aucun procédé universel n'est utilisé pour l'évaluer (Tockol, 1993).

En Côte d'Ivoire, il a été adopté l'utilisation de l'essai Los Angeles standard pour évaluer la dureté des nodules. Un coefficient Los Angeles inférieur à 50 a été retenu comme critère de validité de l'aptitude des matériaux en utilisation routière.

Novais-Ferreira & Correia (1965) avaient tenté de mettre au point un essai permettant d'évaluer la dureté des nodules contenus dans les graveleux latéritiques. Cet essai consiste à déterminer le « Hardness Index » ou indice de dureté, qui est le rapport entre la somme des refus sur les tamis suivants : 25 mm ; 20 mm ; 12,5 mm ; 10 mm ; 5 mm ; 0,8 mm ; 0,40 mm ; 0,080 mm avant et après un essai Los Angeles modifié, c'est-à-dire sans utilisation de boulets en imprimant 200 à 300 tours à la machine. Un indice de dureté de 0,80 serait la limite inférieure acceptable. Mais cet essai n'a pas été normalisé.

Au Ghana, Lyon Associates (1971), c'est « l'Agregate Impact Value » qui est utilisé pour déterminer la dureté des nodules. Une valeur inférieure à 40 est requise pour les bons matériaux. En inde, par exemple, pour qu'un sol amélioré aux nodules latéritique ait un comportement satisfaisant, on exige que son coefficient Los Angeles soit inférieur à 48 et son Agregate Index Value inférieur à 47 (Gidigasu & Yeboa, 1972 ; Gidigasu, 1980).

Afin de mieux se rapprocher de la réalité, on a tendance de plus en plus à utiliser l'essai de compactage pour évaluer la dureté des nodules (Lompo, 1980 ; Tockol, 1993). Le même principe que l'essai de Novais-Ferreira & Correia est appliqué pour déterminer l'indice de dureté, mais cette fois-ci en considérant les granulométries avant et après compactage. La plupart des rares études portées sur les sols latéritiques « lithostabilisés » ont été entreprises dans le but d'évaluer leur impact sur les performances mécaniques et géotechniques. Cependant, peu d'études ont été consacrées à une recherche fine et poussée sur les modifications microstructurales des graveleux latéritiques contenant un fort taux de nodules après compactage. La teneur en nodules pouvant éventuellement avoir des effets sur les performances mécaniques, une analyse de la microstructure permettrait de mieux interpréter les résultats géotechniques. On pourrait également tenter de mettre en relation l'aspect microstructural et l'aspect mécanique avant et après mélange et compactage.

1.11.4 Comportement mécanique des assises traitées au liant hydraulique ou à la chaux

Le CBR du matériau traité, pour une densité correspondant à 95% de la densité maximale à l'OPM et après 3 jours de cure à l'air et 4 jours d'immersion devra être au moins égal à 100. Compte tenu de la très grande rigidité des matériaux traités aux liants hydrauliques ou à la chaux, les contraintes verticales transmises au sol support sont très faibles.

En revanche, l'assise traitée subit des contraintes de traction-flexion qui s'avèrent déterminantes dans le comportement de la chaussée. L'interface couche de roulement / couche de base et la partie supérieure de la couche de fondation constituent des zones sensibles qui supportent des contraintes normales et de cisaillement importantes et qui peuvent présenter des caractéristiques plus faibles que le reste de la structure en raison des conditions de mise en œuvre; celles-ci entraînent une plus grande sensibilité de cette zone aux agressions du trafic et du climat.

Les assises traitées aux liants hydrauliques sont sujettes au retrait thermique et au retrait de prise. Le retrait provoque des fissurations transversales qui, sans dispositions constructives sérieuses (par exemple l'utilisation de géo-membranes ou géo-grilles pour reprendre les efforts de traction à l'interface couche de fondation et couche de base), remontent à travers la couche de roulement. Celles-ci apparaissent en surface avec des espacements réguliers et une ouverture variant avec la température entre quelques dixièmes de millimètres et quelques millimètres. Souvent franches lors de leur apparition en surface, les fissures de retrait tendent à se dédoubler et se ramifier sous l'effet du trafic. En l'absence de colmatage de ces fissures, l'eau pénètre dans la structure et provoque une diminution de la qualité du collage entre la couche de roulement et l'assise. Il s'en suit une aggravation de la fissuration puis de la dégradation de la partie supérieure de l'assise.

Ces phénomènes s'accompagnent d'une remontée de boues puis d'affaissements et de nids de poule. En outre, la faible capacité de déformation de ces assises les rend très sensibles aux mouvements, même faibles. Ceci conduit à la fissuration de l'assise (tassements, retrait hydrique du sol ...). Quant au revêtement, il est de même nature que pour les chaussées souples et l'on assiste pratiquement aux mêmes phénomènes. Cependant, sa faible épaisseur amplifie ces phénomènes et peut conduire à une dégradation rapide de la surface de la chaussée.

1.11.5 Effets de l'amélioration des performances de sols latéritiques sur les couches de chaussées

Lorsque l'on ajoute une certaine quantité de concassé caillouteux (exemple : nodules latéritiques) à un graveleux latéritique, on renforce son squelette. On agit donc sur l'angle de frottement interne du matériau que l'on améliore. L'ajout de liant hydraulique ou de la chaux transforme le produit naturel en un matériau plus raide en mettant à profit l'affinité chimique de ses fines pour le liant.

D'après les études de De Graft-Jonhson & Irwin (1959), O'Reilly & Baker (1963), Bagarre (1990), Adewuyi & Okosun (2013) selon la nature et le pourcentage de liant utilisé, on distingue :

- ✓ les sols améliorés au ciment ou à la chaux, lorsque la teneur est faible (2 à 3%),
- ✓ les sols stabilisés au ciment : 4 à 6%,
- ✓ les sols ciments : bétons latéritiques maigres (10 à 12%).

Selon la rigidification apportée, le comportement de la couche traitée sera différent. Tant que le module est relativement faible, la chaussée reste souple, le rapport de modules de la couche améliorée et de son support n'entrainant pas le développement de fortes contraintes de traction. Lorsque le rapport des modules devient plus important, supérieur à 4, la couche traitée se comporte comme une dalle (Bagarre ; 1990); la répartition des pressions verticales est très réduite sur la couche support et des contraintes de traction élevées apparaissent à la partie inférieure de la couche traitée et peuvent entrainer sa rupture. Le mode de calcul de la chaussée n'est plus alors celui d'une structure souple.

Notons que, des études de Bagarre (1990), il en ressort que les graveleux latéritiques traités au ciment ou à la chaux subissent souvent des fissurations qui conduisent à un maillage de la couche traitée que l'on ne peut plus considérer rigoureusement comme un milieu parfaitement continu et élastique.

1.11.5.1 Couche de fondation

On peut être amené à traiter la couche de fondation lorsque son matériau est un peu trop plastique ou s'assèche mal. L'utilisation de la chaux, lorsqu'elle est produite dans le pays, ce qui n'est malheureusement pas fréquent en Afrique, permet d'abaisser les teneurs en eau (d'environ 1% par 1% de chaux) et de renforcer sa cohésion ; les conditions de compactage et la portance se trouvant améliorées.

1.11.5.2 Couche de base

Le traitement de la couche de base aux liants hydrauliques est le procédé le plus classique. Plusieurs études ont été consacrées aux graveleux latéritiques améliorés ou stabilisés au ciment en précisant comment travaillent ces matériaux. L'action intime du ciment au sein des graveleux latéritiques n'est pas encore bien connue.

Une des premières études fondamentales consacrée à cette question a été réalisée à l'occasion de l'élaboration de ce travail par Gense (1984). Les expériences ont été effectuées sur des graveleux latéritiques du Cameroun traités à 3 et 6% de ciment. Les graveleux latéritiques destinés en couche de base après traitement au ciment ont des caractéristiques suffisantes pour que les performances que l'on attend du mélange ne soient pas obtenues au prix d'un pourcentage de ciment trop élevé. Ces graveleux latéritiques ont un CBR voisin de 60, un pourcentage de fines $C_{80m\mu}$ n'excédant pas 35 et un indice de plasticité IP inférieur à 25.

Pour un traitement en place, on admet un module de plasticité maximal de 1500 MPa et pour un traitement en centrale un module de 700 MPa. Les critères habituellement retenus pour les mélanges sont les résistances à la compression simple à 7 jours avec ou sans immersion (R'7 et R7) et des résistances à la traction obtenues au moyen de l'essai Brésilien (Rt7). Les valeurs admissibles ont été définies à la suite d'essais effectués sur des moulages CBR ; l'élancement des éprouvettes est de 1 (Φ = H = 152 mm) et non de 2 selon l'usage courant des essais de compression et de traction sur les éprouvettes de béton. Les résultats obtenus avec des éprouvettes d'un élancement de 1 sont généralement plus élevés qu'avec celles d'élancement 2. Les valeurs ainsi demandées constituent une première approche que l'on vérifie ensuite par le calcul rationnel pour s'assurer que la chaussée est bien dimensionnée. On requiert les résistances suivantes obtenues avec des pourcentages de ciment de 3 à 6% :

- ✓ R_{C7} : (après 7 jours de cure à l'air) [1,6 MPa < R_{C7} < 3 MPa],
- ✓ R'_{C7} : (3 jours de cure à l'air – 4 jours d'immersion) [R'_{C7} > 0,5 MPa],
- ✓ R_{t7} : (Brésilien après 7 jours de cure à l'air) [R_{t7} > 0,3 MPa].

Pour pallier certains effets néfastes après l'ajout du ciment, Bagarre (1990), stipule que le compactage soit effectué dans les 2 heures après le malaxage. La circulation doit être interdite pendant 7 jours et la couche de base doit être protégée d'un enduit de cure répandu moins de 4 heures après la fin du compactage. Ces prescriptions sont souvent négligées, ce qui entraîne de graves désordres dus à un développement de microfissures consécutives à un défaut de prise correct du ciment. La prise en compte de la portance comme critère de spécification pour les graveleux latéritiques traités au ciment est très discutée et certains auteurs (Autret, 1983 ; Bagarre, 1990) contestent qu'on puisse continuer à le retenir comme tel. Il est certain qu'en toute rigueur, le poinçonnement d'éprouvettes reflète mal la façon dont travaille une couche traitée au ciment sous le trafic. D'autre part, pour les valeurs de CBR élevées requises (> 160), la précision de l'essai n'est pas très bonne. Il n'en demeure pas moins que des corrélations assez satisfaisantes existent entre le CBR et la résistance à la compression et à la traction, liées aux modules des matériaux. Il est légitime que pour des raisons pratiques les laboratoires puissent continuer, dans le cas de faibles dosages, à s'appuyer sur l'essai CBR pour définir les pourcentages de ciment à ajouter aux graveleux latéritiques à améliorer pour les rendre acceptables en couche de base. Lorsque les matériaux sont simplement améliorés par l'ajout d'une faible quantité de ciment (≤ 3%) et qu'ils ne sont pas rigidifiés, c'est-à-dire dans le cas de chaussées souples, le CBR reste le critère à retenir. En revanche, pour les matériaux stabilisés (à fort taux de ciment), il est recommandé de prendre en compte les résistances en flexion et la droite de fatigue obtenues au moyen d'un essai spécial. La portance CBR des graveleux latéritiques dépend du pourcentage de ciment et de la teneur en eau de compactage. Le CBR de 160 est obtenu pour des teneurs en ciment de 2,5% et 3,5%. Ce dosage peut être réduit de 1% si l'on augmente la compacité de 95 à 100% de l'OPM. Si on abaisse la teneur en eau, il faut accroître soit la compacité, soit la teneur en ciment pour obtenir la même portance. On recommande de compacter le matériau sur chantier à la teneur en eau optimale du Proctor modifié ou à la teneur en eau un peu plus faible si on est assuré de pouvoir réaliser le compactage dans des conditions satisfaisantes. On mesure le CBR au laboratoire après 3 jours de cure à l'air des éprouvettes et 4 jours d'imbibition dans l'eau.

1.12 Conclusion

Les sols latéritiques sont des matériaux meubles formés en milieu tropical, composés d'une fraction granulaire constituée de pisolithes ou de nodules ferrugineux emballés dans une matrice fine limono-argileuse. Les pédologues distinguent les processus géologiques conduisant à la configuration des paysages, des processus pédologiques qui aboutissent à la formation de ces sols et donnent à ces derniers la définition suivante : « les sols latéritiques sont des complexes dynamiques formés à partir d'une roche mère par l'action des facteurs du milieu ». Ces matériaux sont caractérisés par leur teneur particulièrement élevée en oxydes et hydroxydes de fer et/ou d'alumine (sesquioxydes). La teneur en oxydes de fer peut atteindre dans certains cas jusqu'à 80% du produit dû à la ferralitisation. Le fer est généralement retrouvé sous forme de goethite FeOOH ou d'hématite Fe_2O_3, l'alumine sous forme de gibbsite $Al(OH)_3$ ou boehmite AlO(OH) et les argiles dont la plus commune aux sols résiduels tropicaux est la kaolinite $Al_2Si_2O_5(OH)_4$. Ce matériau renferme aussi une grande quantité de silice libre ou combinée.

Les profils latéritiques au sens pédologique sont caractérisés par des niveaux ou horizons A, B, C et D dans le cas où les quatre horizons sont bien différenciés. Dans les profils latéritiques les oxydes et hydroxydes de fer s'accumulent dans l'horizon B. L'horizon D correspond à celui de la roche saine, l'horizon C la zone de lessivage ou horizon de roche altérée, appelé également la saprolithe. La confusion sur les théories de la genèse et définition des matériaux latéritiques qui a subsisté pendant au moins un siècle et demi a rendu leur caractérisation difficile.

Il apparaît que le phénomène de latéritisation se manifeste essentiellement par une altération chimique et physico-chimique et/ou transformation des minéraux originels de la roche mère tels que les minéraux argileux et les constituants latéritiques majeurs (Fe, Al, Ti et Mg).

Trois principales phases de latéritisation sont à distinguer :

- la *première phase* (lessivage primaire) : se manifeste par une altération physico-chimique complète ou partielle des minéraux originels de la roche mère et une libération de faibles quantités de minéraux originels et de gels de sesquioxydes.

- la *deuxième étape* (lessivage secondaire ou latéritisation) : se caractérise par un lessivage partiel ou complet des bases et la silice combinée, couplé à d'autres processus chimiques favorisant la dissociation, la mobilisation, la migration et l'accumulation des éléments insolubles tels que les oxydes de fer et d'aluminium.

- la *troisième étape* consiste : à une déshydratation partielle ou complète des colloïdes hydratés tels que les oxydes de fer et d'aluminium.

Ces processus sont couplés aux conditions de drainage, à la topographie du modelé, au climat et à la composition chimique de l'eau de percolation. L'intensité du lessivage dépend également de la nature et de l'importance de l'altération chimique des minéraux originels.

Sous climat subtropical à faible intensité d'altération chimique et à faible vitesse de transformation des sols, l'altération physico-chimique ne dépasse guère le stade de la formation des argiles, les produits néo-synthétisés étant riches en minéraux argileux avec une prédominance pour la kaolinite. Des minéraux d'oxydes hydratés de fer et d'aluminium peuvent être retrouvés en faible quantité.

Sous climat à alternance de périodes chaudes et humides avec un couvert végétal dense, le lessivage est intense et continu de sorte que les minéraux argileux jadis silicates d'aluminium hydratés sont détruits dans une altération continue, une partie de la silice est lessivée et l'autre partie entre dans la synthèse des oxydes d'aluminium comme la gibbsite.

La complexité liée au phénomène de latéritisation au fil de plusieurs périodes géologiques a eu pour conséquence la mise place d'une grande variété de sols latéritiques. Ces sols peuvent se différencier en fonction de plusieurs facteurs propres à chaque localité.

La plupart des données de la littérature font ressortir les principaux facteurs influençant la genèse et les propriétés mécaniques de ces sols. Nous distinguons essentiellement les facteurs tels que l'origine de la roche mère, les facteurs pédogénétiques, la texture matricielle dans laquelle se produit l'accumulation des sesquioxydes, le degré de latéritisation, la morphologie, la composition minéralogique, les facteurs climatiques…etc.

Il n'est pas nécessaire d'insister sur l'importance des graveleux latéritiques dans les projets de construction en génie civil (routes, barrages en terre, ouvrages d'accès, digues…) dans les pays tropicaux et subtropicaux. Cependant, l'utilisation de ces matériaux en construction routière requiert un minimum de conditions pour s'assurer de leur bonne capacité portante vis-à-vis des niveaux de sollicitation auxquels ils sont soumis.

Les tentatives de mise en place de techniques universelles de caractérisation de ces matériaux se sont butées à de nombreuses difficultés justement à cause de leur caractère évolutif spécifique aux conditions particulières de leur mise en place. De nombreuses études et recherches menées sur les sols latéritiques ont abouti à la conclusion selon laquelle, une étude représentative de caractérisation de ces sols ou la mise en place de spécifications relatives à leur utilisation doit se faire sans perdre de vue les facteurs géologiques, génétiques et minéralogiques d'une part et d'autre part les essais géotechniques standards (si possibles adaptés localement).

Actuellement les études de génie civil portent sur les propriétés géotechniques de ces matériaux, principalement la portance, la plasticité et la teneur en fines…etc., pour évaluer leur aptitude en construction de routes, de barrages en terre et de tout autre ouvrage de génie civil faisant appel à l'utilisation de ces sols.

La majorité des routes des tropiques sont construites avec les sols latéritiques concrétionnés, ce qui provoque l'apparition d'ondes régulières appelées "tôle ondulée", phénomènes liés à des processus vibratoires cycliques imprimés à la chaussée par le passage des poids lourds.

Un choix adéquat des matériaux latéritiques supposerait donc une étude représentative et interdisciplinaire (géologie, géotechnique, pédologique, mécanique, minéralogique, chimique,…etc.) en prenant en compte tous les principaux facteurs de mise en place des gisements latéritiques et la caractérisation de ces derniers conformément aux techniques appropriées. Un intérêt particulier pour une utilisation efficiente de ces sols serait la mise en relation des facteurs génétiques et minéralogiques d'une part et les méthodes de caractérisation physico-mécaniques et géotechniques d'autre part.

CHAPITRE II

METHODOLOGIE GENERALE D'ETUDE

2 CHAPITRE II : METHODOLOGIE GENERALE D'ETUDE

2.1 Introduction

L'évaluation de l'aptitude des graveleux latéritiques en couches de chaussée, dans la grande majorité des projets d'étude routière en Afrique tropicale ne s'intéresse qu'à la caractérisation mécanique et géotechnique. Les analyses fines ne sont en aucun cas considérées dans le cadre des études de projet. Or de nombreuses études montrent que ces analyses apportent des détails considérables sur le rôle de la microstructure et la composition minéralogique sur les performances mécaniques des graveleux latéritiques. À ce problème s'ajoute le manque de spécification exclusivement dédiée à une caractérisation plus réaliste. La plupart des techniques de caractérisation des sols résiduels sont basées sur des spécifications étrangères dont les procédures d'essai ont été déduites à partir des expériences effectuées sur des sols aux facteurs environnementaux forts différents des conditions climatiques qui règnent en zone tropicale. Par ailleurs, les données retrouvées dans la littérature montrent que les propriétés mécaniques et géotechniques des sols latéritiques sont très souvent en relation avec les facteurs compositionnels et environnementaux tels que le drainage, la nature de la roche-mère, la pluviométrie, etc. La morphologie et l'aspect textural représentent aussi des informations très utiles à l'étude des sols résiduels.

Les travaux effectués dans le cadre de la thèse concernent les graveleux latéritiques situés dans la partie centrale du sud-ouest du Niger. Cette étude a pour objectif principal d'estimer l'effet des facteurs génétiques et environnementaux sur les propriétés considérées pour l'évaluation de l'aptitude des graveleux latéritiques en construction. L'étude concerne un ensemble de sept (7) gisements latéritiques. D'autres facteurs climatiques tels que la pluviométrie, le mode de drainage, les températures moyennes, le modelé et la végétation sont considérés au besoin pour étayer certaines tendances au cas où les données recueillies ne suffisent pas à dégager des conclusions plus précises. Les échantillons ont été prélevés dans l'horizon B d'accumulation des oxydes de fer car c'est généralement l'horizon qui comporte les graveleux latéritiques aux propriétés satisfaisantes. L'ensemble des données géotechniques sont réunies et exploitées statistiquement afin de procéder à une analyse de leur variabilité. Les caractéristiques de portance sont également évaluées via les méthodes courantes de détermination de la densité sèche à l'optimum Proctor et l'évaluation de l'indice CBR par l'essai de poinçonnement. Les caractéristiques mécaniques de cisaillement et de compressibilité respectivement évaluées à l'aide de la boite de cisaillement et la cellule œdométrique complètent la caractérisation en favorisant une compréhension de leur comportement mécanique vis-à-vis des sollicitations extérieures apportées par les charges roulantes lorsque ces sols sont utilisés en couche d'assise.

Par ailleurs, les analyses chimiques et minéralogiques permettent de mettre en relief l'effet de la composition chimique sur les propriétés géotechniques et mécaniques des sols latéritiques. Parmi les méthodes utilisées, les unes permettent une évaluation qualitative et les autres une évaluation semi-quantitative des composés chimiques. Le bilan qualitatif des minéraux contenu dans les sols est obtenu par la diffractométrie des rayons X.

La méthode permet de distinguer qualitativement les minéraux mais aussi une semi-quantification grossière de la proportion de chaque phase minérale. En revanche, la technique ne donne pas d'information sur la combinaison et l'arrangement des différentes phases minérales contenues dans les échantillons de sol. Ceci justifie l'utilisation de la microanalyse X à l'EDS via le Microscope Électronique à Balayage (MEB). L'observation au MEB combinée à la microanalyse X par EDS est très complémentaire à la DRX qui est plus macroscopique. L'analyse EDS permet notamment de décrire l'association et l'arrangement des différentes phases minérales. Les analyses DRX et au MEB sont complétées par les analyses ATD-ATG, basées sur la calcination des échantillons de sol à haute température. Les départs de masse à des températures spécifiques correspondent à certaines phases minérales contenues dans le sol. Les résultats ainsi déduits sont utiles à une étude plus structurée et plus réaliste du comportement géotechnique et géomécanique des sols latéritiques avant leur sélection en couche de chaussée. Cette analyse, pour être efficiente ne saurait se passer de la prise en compte de l'influence de la variabilité induite par les facteurs compositionnels et environnementaux.

Dans ce chapitre, nous feront tout d'abord un bref résumé des caractéristiques in-situ des gisements latéritiques de la zone d'étude c'est-à-dire la situation géographique, le contexte géologique et les informations sur la végétation, le modelé et la pluviométrie. Nous présenterons ensuite les procédures de caractérisation géotechnique, mécanique et minéralogique de ces sols en précisant l'appareillage utilisé pour la réalisation de chaque essai.

2.2 Données générales des sols latéritiques de la zone d'étude et facteurs de mise en place

2.2.1 Présentation de la zone d'étude

Les zones d'emprunt latéritique retenues pour notre étude sont réparties dans deux régions du Niger (Figure 2-1).

- ✓ La région de Tillabéry (Figure 2-1-A) regroupant les sites de Torodi, Tillabéry (chef-lieu de la Région), Ouallam, Say et Fillingué.
- ✓ La région de Dosso (Figure 2-1-B) comprenant la ville de Dosso (chef-lieu de la Région) et le village de Guéchémé.

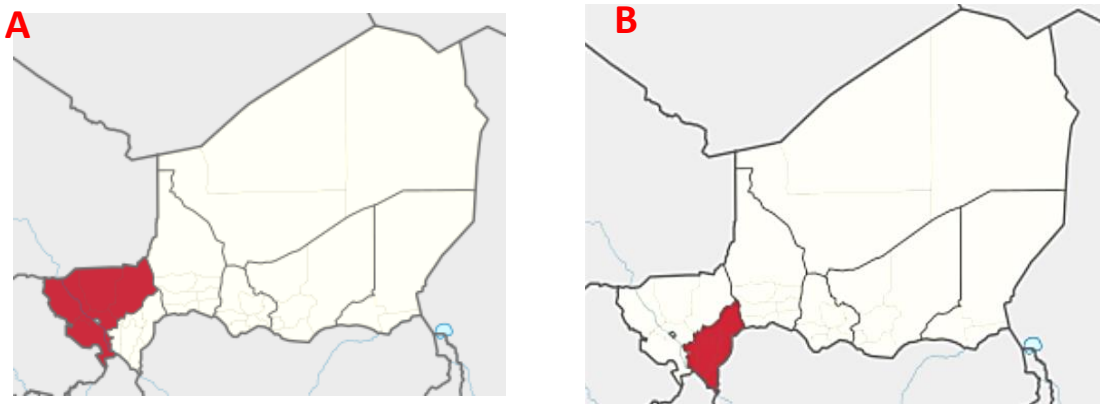


Figure 2-1 : Localisation de la zone d'étude A) Région de Tillabéry ; B) Région de Dosso.

Les coordonnées GPS et les altitudes moyennes des sites retenus pour l'étude sont regroupées dans Tableau 2-1.

Tableau 2-1: Coordonnées GPS et altitudes moyennes des sites de la zone d'étude.

	Coordonnées GPS		Altitude moyenne (m)
Sites	**N**	**E**	
Torodi	13°07'04.2"	1°48'11.1"	200
Tillabéry	14°12'37,1"	1°27'10,4"	215
Ouallam	14°19'02,2"	2°05'11,7"	235
Say	13°06'12.0"	2°22'12.6"	180
Fillingué	14°21'07."	3°19'22,3"	226
Dosso	13°02'46.0"	3°11'50.0"	230
Guéchémé	12°54'19.4"	3°52'44.6"	202

Les zones d'étude sont concentrées dans la partie centrale du Sud-ouest du Niger et entourent quasiment la capitale Niamey avec Say situé à 55 km au Sud de Niamey, Torodi à 50 km au Sud-ouest, Ouallam à 100 km au Nord, Fillingué à 175 km au Nord-est et la ville de Tillabéry à 110 km au Nord-ouest (Figure 2-1). Dans la partie concernée par l'étude de la région de Dosso, deux zones ont été retenues dont celles de la ville de Dosso et du village de Guéchémé situé à environ 70 km au Sud-est de Dosso. Les villes de Dosso et de Niamey sont distantes l'une de l'autre de 140 km, Dosso se situant au Sud-est de Niamey.

La zone d'étude délimitée entre les méridiens 1°20'E et 3°50'E et les parallèles 12°30'N et 14°20'N, totalise environ 24 535 km^2, soit 1,9% de la superficie du Niger. Elle est constituée de 7 sites latéritiques aux contextes géologiques différents. La zone d'étude est inscrite entre les isohyètes 300 mm et 700 mm.

2.2.2 Zonage climatique et pédologique du Niger

Du Nord au Sud le territoire nigérien est traversé par trois zones climatiques successives ayant chacune un contenu pédologique distinct. La zone d'étude est quasiment constituée de sols ferrugineux selon les isohyètes moyennes annuelles :

- ✓ Le Sahel, à moins de 350 ou 450 mm de pluies. Le paysage est formé de glacis mous, fortement ensablés, à reliefs résiduels peu nombreux. La couverture est constituée de sols ou de faciès subarides, la plupart dunaires, quelques-uns autochtones et alors diversement argileux.
- ✓ La zone soudanienne Nord, jusqu'à 450 ou 600 mm de pluies. Les glacis sont très souvent dominés des restes tabulaires étagés de vieux modelés cuirassés. De larges fenêtres s'ouvrent dans les ensablements dunaires. Les sols ferrugineux, peu lessivés ou lessivés, dominent.
- ✓ La zone soudanienne sud, (> 600 mm) où les glacis fonctionnels sont eux-mêmes concrétionnés, cuirassés ou gravillonnaires. Les dunes ne sont plus représentées que par quelques édifices isolés aux pieds de reliefs. Les sols ferrugineux lessivés sont souvent exclusifs. Les premiers sols faiblement ferralitiques y font leur apparition.

2.3 Contexte géologique

2.3.1 Structure générale

Elle se résume à deux vastes cuvettes sédimentaires centrées aux deux extrémités Est et Ouest du territoire (Figure 2-2), recouvrant le vieux socle précambrien plissé et arasé ; respectivement nommés bassin des Iullemmeden (Figure 2-2-A) et bassin du Tchad (Figure 2-2-B), avec :

a- La première qui forme le Niger central et occidental (bassin des Iullemmeden ; Figure 2-2-A) et est constitué d'un ensemble isoclinal de couches à faible pendage Sud-ouest s'abaissant de l'Aïr vers le centre de la cuvette de Dosso.
Dans ce bassin affleurent successivement en auréoles approximativement concentriques, les grès du Continental Intercalaire, du Continental Hamadien, les calcaires paléocènes, les grès du Continental Terminal, limités à l'ouest par le môle infra-Cambrien du Gourma-Liptako (Urvoy, 1942 ; Greigert, 1954).

b- La seconde dépression, subsidente, est celle de la cuvette Tchadienne à l'Est (bassin du Tchad ; Figure 2-2-B). Elle est limitée au Nord-est par les reliefs cristallins du Damagaram et du Mounio.

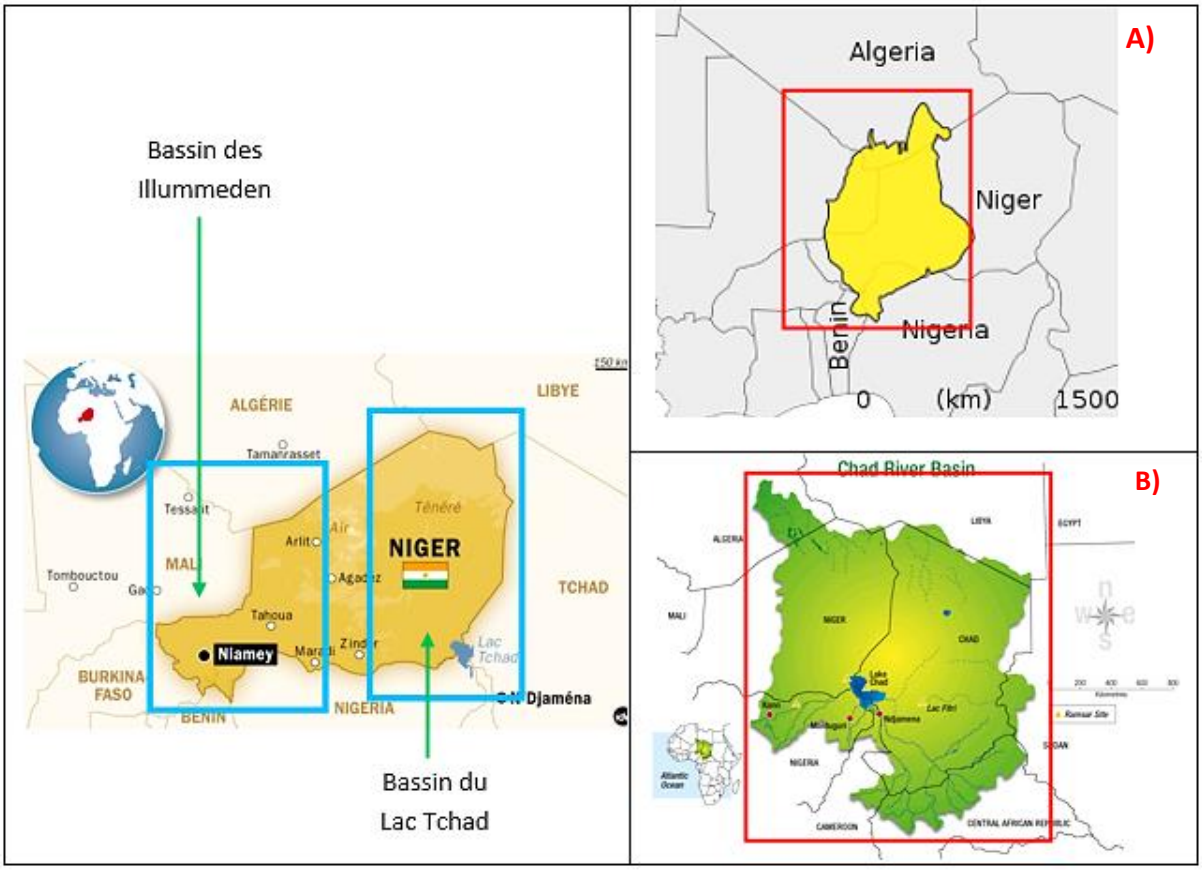


Figure 2-2: Localisation des deux principaux bassins versants du Niger. **A)** Bassin des Iullemmeden. **B)** Bassin du Tchad.

2.3.2 Cadre géologique de la zone d'étude

La zone d'étude couvre une partie du socle Birimien du Liptako-Gourma et une grande partie du bassin des Iullemmeden. Nous détaillerons dans les paragraphes suivants les formations géologiques du socle Birimien et les séries sédimentaires du Bassin des Iullemmeden, plus spécifiquement celles qui sont situées dans la zone d'étude.

2.3.2.1 Le socle du Liptako Gourma

Le socle du Liptako-Gourma d'âge Protérozoïque inférieur est situé sur la bordure Nord-est du craton ouest-Africain. Les déformations birimiennes de ce socle sont attribuées à 3 ou 4 phases D1, D2, D3 (Milési et al., 1989 ; Fabre, 1995) et D4 (St-Julien, 1992 ; Soumaila, 2000). Il comprend des ceintures de roches vertes constituées de métavolcanites (roches basiques) et métasédiments associés au Birimien et de roches intermédiaires (métadacites et métarhyodacites), avec des batholithes granitiques syn- et post-tectoniques liés à l'orogénèse éburnéenne datée vers 2,1 GA (Reichelt, 1961 ; Machens, 1973 ; Bessoles, 1977 ; Milési et al., 1989 ; Dupuis et al., 1990). Les formations qui recouvrant le Birimien, attribuées au Tarkwaien, résultent de l'érosion de la chaîne birimienne ; ce sont des conglomérats et grès typiques de dépôts de « Fan delta » (Milési et al., 1989). Les formations archéennes sont uniquement représentées par des gneiss, des leptynites / amphibolites, des schistes et micaschistes sous formes de reliques ou d'enclaves au sein des granitoïdes éburnéens.

2.3.2.2 Le bassin des Iullemmeden

2.3.2.2.1 Les contours naturels du Bassin

Décrit pour la première fois par Radier (1957), le bassin des Iullemmeden (Figure 2-3) tire son nom de l'importante fédération Targuie qui peuplait sa partie centrale. Ce bassin est délimité par les méridiens 1° et 9°E et les parallèles 10° et 21°N (Greigert, 1966a). Il est limité au nord par le massif du Hoggar (Algérie) et ses prolongements méridionaux, l'Adrar des Iforas au Mali et l'Aïr au Niger ; au nord-ouest par le fossé de Gao ou détroit soudanais ; à l'est par le socle du Damagaram-Mounio et l'Aïr et au sud par le bouclier nigérian. Le bassin des Iullemmeden couvre une surface de plus de 500.000 km^2 (Projet PNUD/DCTD - NER86/001/NEX, 1997). Il s'étend sur une longueur de nord-sud d'environ 1100 km et une largeur est-ouest de l'ordre de 800 km (Greigert, 1966b).

2.3.2.2.2 Les séries sédimentaires du bassin selon les données générales

La sédimentation dans le bassin des Iullemmeden datée du Silurien inférieur a débuté au Nord du 17ème parallèle. Le remplissage sédimentaire est essentiellement constitué de grès, de sables et de silts à intercalations argileuses datés du Silurien au Quaternaire et de calcaires et marnes du Crétacé supérieur/Yprésien (Guero, 2003). Le bassin comprend de bas en haut (Greigert, 1966) :

- ✓ Les ***formations du Paléozoïque*** : constituées de grès fins, de schistes et de grès fins argileux respectivement du Dévonien inférieur, moyen et supérieur de 300 à 400 mètres d'épaisseur. Au-dessus, se sont déposés des grès grossiers, argilites et argiles ligneuses du Viséen inférieur sur 500 m d'épaisseur.

Les dépôts du Namurien sont constitués par une alternance de séries marines et continentales gréseuses, argilo-gréseuses, silteuses et calciteuses d'environ 400 mètres d'épaisseur. Au sommet, la série des sédiments continentaux d'âge Permien sont représentés par des arkoses fines à grossières avec un ciment argileux et calciteux. Ils constituent selon Greigert (1966) la base du Continental Intercalaire.

- ✓ Les ***formations du Secondaire*** : du Trias au Cénomanien inférieur, la sédimentation est uniquement continentale sur 1300 à 1600 mètres d'épaisseur fait de dépôts du domaine fluvio-lacustre avec la série des argiles de L'Irhazer (500 m) et la Formation du Farak (300 à 800 m de grès et argiles) pour les deux plus importantes.

Au Cénomanien quatre transgressions marines ont envahi le territoire sur toute l'étendue du bassin des Iullemmeden, (Greigert, 1966 ; Lang et al., 1980). Parallèlement à ces transgressions se déposa suivant les secteurs, du Cénomanien supérieur à l'Eocène inférieur la série lagunaire du Continental Hamadien (300 à 600 m d'épaisseur). Les dépôts du secondaire sont constitués de bas en haut des :

- *Dépôts continentaux allant du Continental Hamadien* : ce sont les grès d'Agadez d'âge Trias-Jurassique moyen, les argilites d'Irhazer, le groupe de Tégama d'âge Néocomien à Albien et les dépôts continentaux du Crétacé supérieur, le Continental Hamadien.

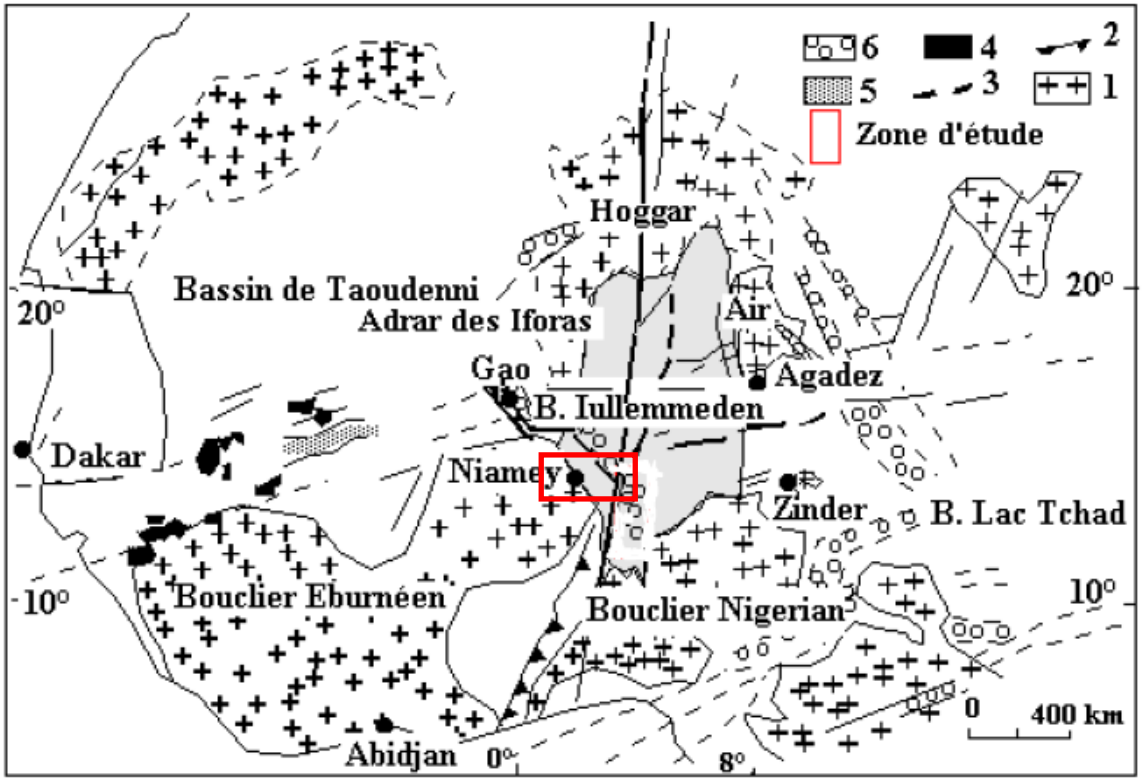


Figure 2-3: Localisation du bassin paléozoïque à phanérozoïque des Iullemmeden (en grisé), avec les principaux linéaments et fossés mésozoïques de l'Afrique de l'Ouest (Bellion et al., 1989). 1 : Socle précambrien métamorphique ; 2 : chevauchement panafricain ou paléozoïque ; 3 : Linéament ou faille majeure ayant joué ou rejoué au Mésozoïque ; 4 : Dolérites liasiques ; 5 : Fossé jurassique de Nara ; 6 : Fossé crétacé. Le rectangle rouge est la zone d'étude.

- *Dépôts marins du Crétacé supérieur* (Cénomanien supérieur – Masestrichtien) : il s'agit des argiles grises ou vertes et de grès, à efflorescences salines et lentilles de gypse surmontés par des grès, des grès calcaires glauconieux à gastéropodes et Nigericeras du Cénomanien supérieur au Turonien inférieur. Au Turonien Supérieur, la série est constituée de calcaires blancs (Greigert, 1966). Le Cénomanien inférieur est marqué par le dépôt d'un ensemble argileux fossilifère. Au sommet, les dépôts du Maestrichtien sont composés d'argilites, siltites, sables et une alternance marnes/grès/sables dans l'Ader Doutchi. Ces formations finement détritiques se sont déposées en milieu réducteur (Greigert, 1966).

✓ Les ***dépôts du Tertiaire*** : ils sont constitués :
- *Dépôts marins du Paléocène à l'Eocène*. Du Paléocène à l'Yprésien, une transgression marine a permis le dépôt de roches calcaires, marno-calcaires à operculinoïdes, marnes et schistes argileux.
- *Dépôts continentaux du Tertiaire* : le Continental Terminal. Il s'agit de formations détritiques quartzo-kaoliniques à faciès sidérolithique. Dans ce complexe du Continental Terminal, (Greigert ; 1966 ; Gavaud, 1969) distinguent trois séries, décrites de bas en haut : série sidérolithique de l'Ader (CT1), la série argilo-sableuse à lignites (CT2) et la série des grès argileux du moyen – Niger (CT3).

✓ Les ***dépôts du Quaternaire*** : les formations du Quaternaire sont essentiellement représentées par des alluvions d'âges variés comblant les vallées fossiles ou en voie de fossilisation et des sables éoliens fixés ou non, formant des ergs (Gavaud, 1970).

Le socle du bassin des Iullemmeden est affecté par des accidents régionaux. Le rejet de certains de ces structures durant le Secondaire et le Tertiaire a induit, dans la couverture sédimentaire, des plis et des flexures pouvant être localement importants.

2.3.2.2.3 Séries sédimentaires selon les coupes géologiques synthétiques

Nous détaillons dans ce paragraphe les traits de la géologie du socle du Liptako-Gourma et les séries sédimentaires du bassin des Iullemmeden, spécifiquement celles situées dans la zone d'étude. La description générale prend en compte les éléments existants sur la géologie du secteur ainsi que les coupes lithologiques des forages réalisés dans le cadre des différents programmes d'hydraulique villageoise (Projet FAO/SF : 281/NIR 8, 1970 ; Programme hydraulique villageoise, 1997; FORACO, 2014) ou des reconnaissances hydrogéologiques.

Les différentes coupes synthétiques I, II, III et IV (Figure 2-5 à Figure 2-8) sont matérialisées sur la Figure 2-4. Sur cette dernière, nous pouvons constater qu'une partie des sites de la zone d'étude est située sur le socle Birimien (sites de Torodi et Tillabéry) et l'autre partie (sites de Ouallam, Say, Fillingué, Dosso et Guéchémé) dans le bassin des Iullemmeden. La présentation de la géologie est basée sur l'emplacement des différents sites constituant la zone d'étude. Les dépôts concernent la partie sud-ouest du bassin des Iullemmeden. La localisation de chaque gisement latéritique ainsi que la formation géologique qu'il surplombe sont indiquées sur la Figure 2-4.

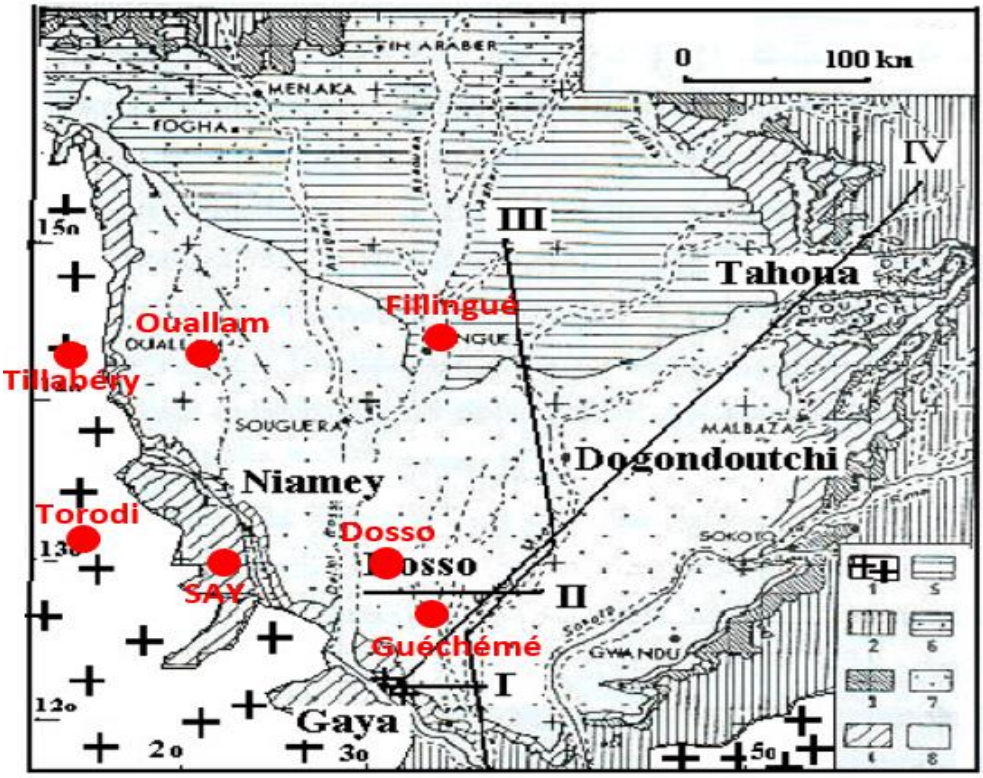


Figure 2-4: Carte géologique de la bordure Sud-ouest du bassin des Iullemmeden et la position des différents sites de la zone d'étude.
1 : socle précambrien, 2 : Continental Hamadien ou grès et calcaire Sénoniens. 3 : marnes et calcaires du Paléocène-Yprésien. 4 : CT1 ; 5 : CT2 ; 6 : CT2/CT1 indifférenciés. 7 : CT3. 8 : Quaternaire (d'après Greigert & Pougnet, 1965 ; Lang et al., 1980 (in; Favreau, 2000)). Les traits indiquent les traces des coupes synthétiques des Figure 2-5 à Figure 2-8.

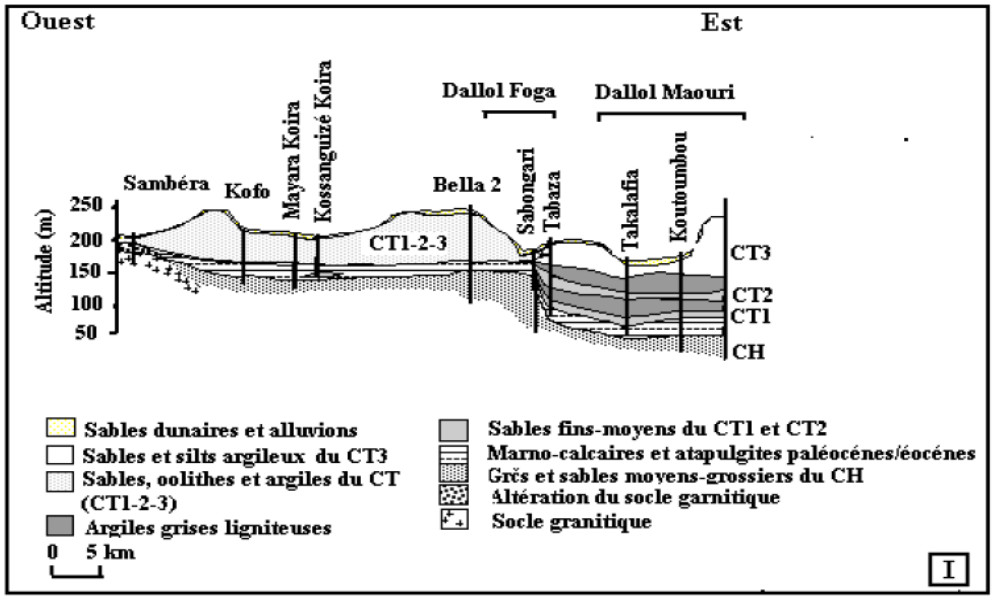


Figure 2-5: Coupe géologique synthétique I de la bordure sud-ouest du bassin des Iullemmeden montrant qu'à l'ouest de la coupe le site de Guéchémé se situe sur des sables oolithiques CT3.

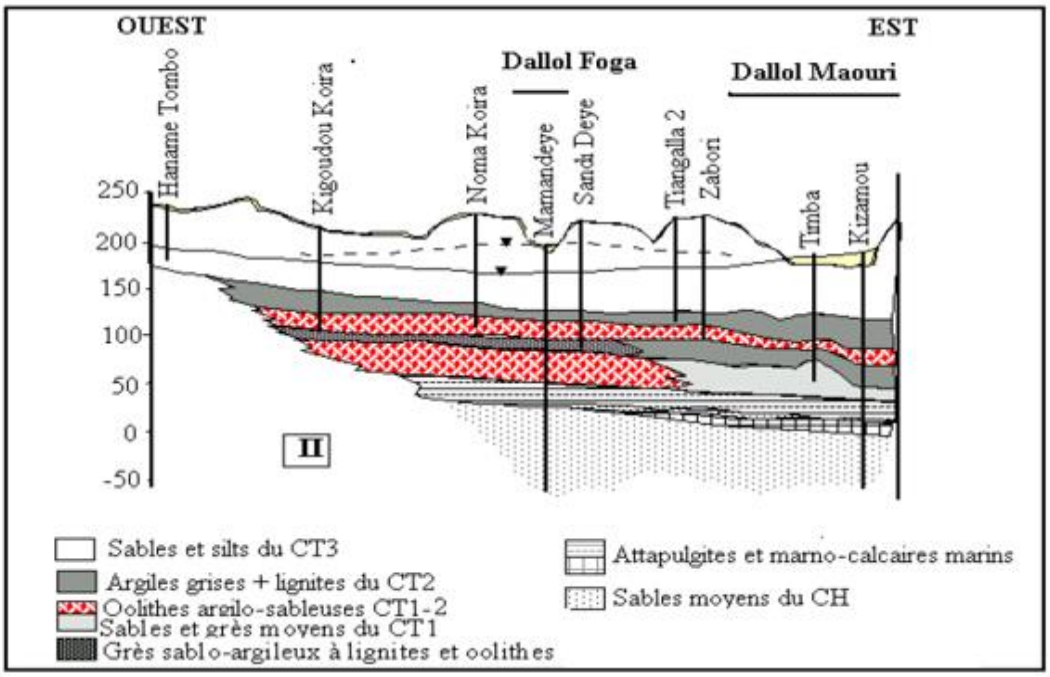


Figure 2-6*:* Coupe géologique synthétique II de la bordure sud-ouest du bassin des Iullemmeden montrant qu'à l'ouest de la coupe le site de Dosso se situe sur des sables et silts du CT3.

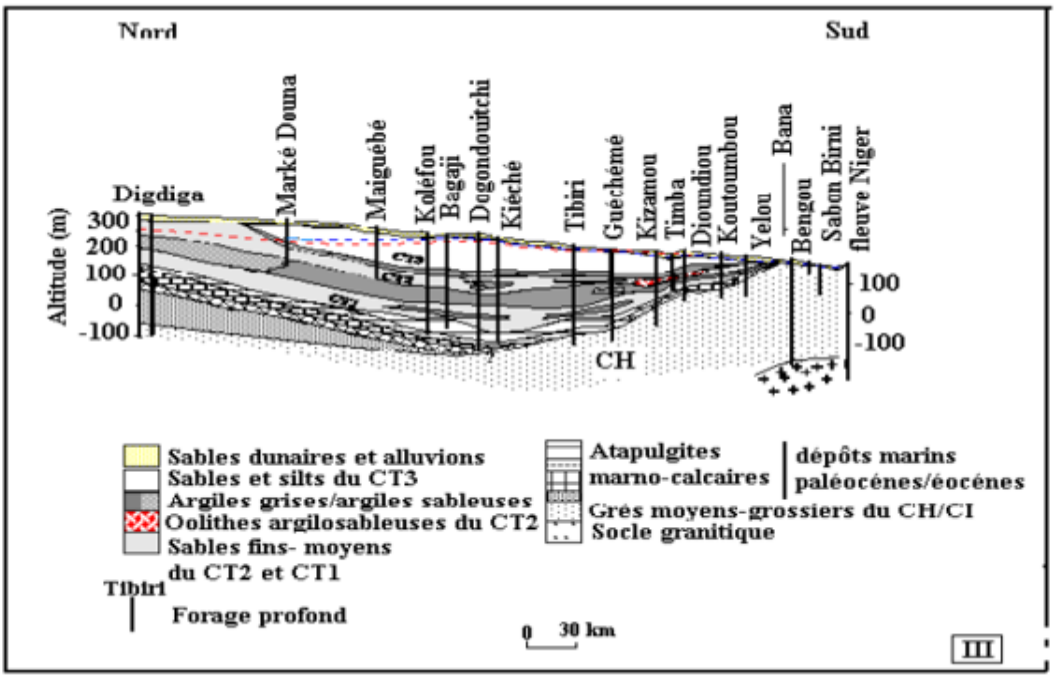


Figure 2-7 *:* Coupe géologique synthétique III de la bordure sud-ouest du bassin des Iullemmeden montrant qu'au Nord le site de Fillingué se situe sur les argiles ligneuses et sables fins moyens du CT2.

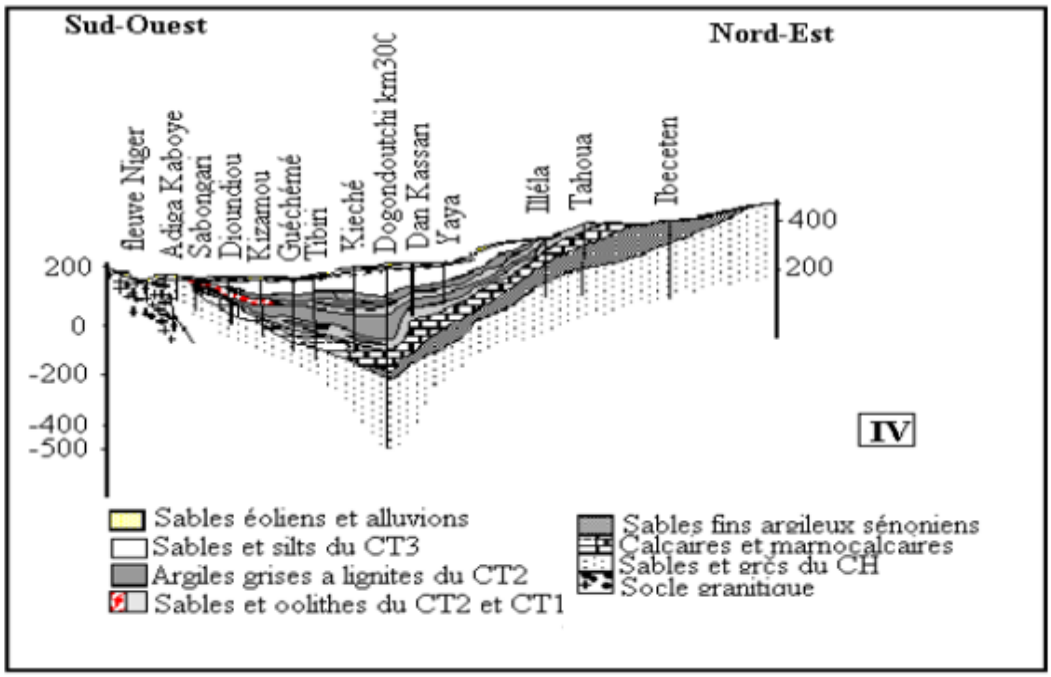


Figure 2-8 : Coupe géologique synthétique IV de la bordure sud-ouest du bassin des Iullemmeden montrant qu'au Sud-ouest de la coupe le site de Guéchémé se situe sur des sables et argiles du CT3.

L'analyse et l'interprétation des différentes coupes de forage montrent une stratigraphie comprenant de bas en haut (Figure 2-5 à Figure 2-8) :

✓ **L*e socle précambrien*** (granites et gneiss) sub-affleurant en bordure du fleuve Niger (entre Koulou et Sia). En dehors de ce secteur, il n'est atteint par les forages qu'à Sambéra et à Bengou à des profondeurs respectives de 375,0 et 342,0 m.

✓ ***La série du Continental Hamadien*.** Elle est constituée de grès fins à grossiers à ciment kaolinique et de sables moyens à grossiers plus ou moins consolidés dans le Dallol Maouri (Figure 2-5 et Figure 2-7). Le faciès paraît plus grossier et plus homogène vers le Sud. Dans la partie centrale de la zone (secteur de Dogondoutchi ; Figure 2-7 et Figure 2-8) ainsi que dans le Nord-dallol Bosso (secteur de Bonkoukou), le Continental Hamadien présente un faciès plus fin et argileux constitué d'alternances de sables fins et d'argiles sableuses d'âge Sénonien reposant sur des grès fins à grossiers du Continental Intercalaire.

✓ **L*es dépôts marins du Paléocène/Yprésien :*** Constitués de calcaires, marnes, marno-calcaires et d'argilites (attapulgite) au sommet, la série Paléocène-Yprésienne est reconnue dans tous les forages profonds de la zone d'étude. Le faciès lithologique essentiellement marno-calcaire, passe verticalement ou latéralement à des marnes et argiles gris-bleues (attapulgites) à l'Ouest du Dallol Foga, et vers le Nord (Nord dallols Maouri et Bosso). L'épaisseur de la série varie de 0 m dans le sud-dallol Maouri (à la hauteur de Bana ; Figure 2-7) à 50 m et plus dans les environs de Dogondoutchi et de Bonkoukou (Figure 2-7 et Figure 2-8).

✓ **L*a série du CT1*** se caractérise également par des variations de faciès et d'épaisseur dans la zone d'étude. Elle repose soit sur les calcaires et marno-calcaires, soit sur les argiles gris-bleues (attapulgites). Le faciès essentiellement sableux moyen à grossier passe à des alternances de sables fins argileux et d'argiles sableuses à traces d'oolithes ferrugineuses, de pyrite dans la partie Nord du Dallol Maouri (entre Guéchémé et Koléfou) et dans le secteur de Dosso (Figure 2-7 et Figure 2-8). À l'Ouest du Dallol Foga (Secteur Sabongari – Mamandeye ; Figure 2-6 et Figure 2-7), la série du CT1 est constituée de grès tendres oolithiques tandis que dans le Dallol Bosso (Bonkoukou - Gao Sabon Gari) elle est représentée par des graviers et des oolithes dans une matrice argileuse et d'argiles peu silteuses à éléments détritiques et passées charbonneuses.

✓ ***la série du CT2*** est constituée par deux couches d'argiles grises à lignites et tourbes contenu au sein d'une couche de sables et/ou d'oolithes ferrugineuses. La couche inférieure d'argiles (base du CT2) présente un faciès sablo-argileux ou argilo-oolithique riche en lignites et en pyrite et passe à des grès tendres oolithiques et lignites à l'ouest du Dallol Foga (secteur de Mamandeye – Kigoudou Koira ; Figure 2-5 et Figure 2-6). Elle disparaît par biseautage dans le bas-dallol Maouri (au sud de Yelou) et n'existe pas dans la partie Sud-ouest de la zone (à l'Ouest de Sabongari), (Figure 2-5). L'épaisseur maximale de cette couche est observée entre Tibiri et Dogondoutchi où elle atteint 65 m (Figure 2-7). La couche supérieure d'argiles grises (sommet du CT2) est absente dans le bas-dallol Maouri (au Sud de Koutoumbou) et dans la partie Sud-ouest de la zone d'étude (à l'ouest de Sabongari), (Figure 2-7). La couche intercalée entre les deux niveaux d'argiles, est essentiellement formée de sables fins à moyens plus ou moins argileux sur la majeure partie de la zone d'étude. Des lentilles argileuses y sont fréquemment observées. Dans le Dallol Bosso (secteur de Bonkoukou – Gao Sabon Gari) cette couche correspond à des argiles sableuses contenant des éléments détritiques grossiers et de nombreux débris végétaux houillifiés. Le faciès passe à des grès friables et à des sables oolithiques ou à des oolithes sablo- argileuses dans les environs de Baléyara (Dallol Bosso) et au Sud de la latitude 13°.

✓ **l*a série du CT3*** est constituée essentiellement de sables, de grès hétéro-granulaires et de silts plus ou moins argileux. Elle présente de brusques et fréquentes variations latérales et verticales des faciès lithologiques. Le CT3 comporte une proportion importante d'argiles silteuses bariolées et de latérites dans ses termes supérieurs et des sables et silts plus ou moins argileux vers sa base. La série est constituée de sables fins à moyens consolidés ou non et de silts plus ou moins argileux avec de rares oolithes ferrugineux disséminés en partie centrale de la zone d'étude. La puissance de la série du CT3 varie de 0 m dans le bas-dallol Maouri et 175 m à l'aplomb du forage de Dogondoutchi (Km - 300), (Figure 2-5 à Figure 2-8).

2.3.2.2.4 Synthèse

Le contexte litho-stratigraphique de la zone d'étude est essentiellement représenté par des sédiments continentaux crétacés supérieurs (Continental Hamadien) et tertiaires (Continental Terminal) séparés par des marno-calcaires marins Paléocènes/Yprésiens.

La série crétacée est constituée de sables et grès fins à grossiers d'épaisseur dépassant 600 m dans le secteur du forage de Dogondoutchi au point kilométrique 300. Les faciès lithologiques des différents termes du Continental Terminal tels que livrés par les forages de la région d'étude, montrent que:

- ✓ le CT1 est constitué pour l'essentiel de sables moyens à grossiers, le faciès sidérolithique riche en oolithes ferrugineux ne s'observe que dans les secteurs de Kiessé, Say et Dosso et au Sud-ouest du Dallol Foga. Dans les secteurs de Dogondoutchi et dans le Dallol Bosso, le CT1 présente un faciès plus fin et argileux.

- ✓ le CT2 est caractérisé par une abondance de débris végétaux et de lignite, particulièrement dans les secteurs de Dogondoutchi et de Bonkoukou. La fraction détritique grossière est essentiellement sableuse (sables fins à moyens), passant à des grès et sables oolithiques ou à des oolithes sableux et argileux.

- ✓ le CT3 est essentiellement constitué de sables, de grès et de silts plus ou moins argileux dans la majeure partie de la zone d'étude. Des faciès plus argileux sont observés dans les secteurs de Gagila –Dogondoutchi et de Loga.

2.3.3 Description des séquences pédologiques retrouvées au droit des gisements étudiés

2.3.3.1 Sites de Torodi et Tillabéry

2.3.3.1.1 Torodi

À Torodi, la roche mère ayant abouti à la formation des sols latéritiques est un granite. Il s'agit donc de sols résiduels. Nous constatons une succession de nombreux horizons structuralement bien distincts (Figure 2-9 - Torodi). Sur le profil, la partie sommitale est constituée d'un horizon sableux surmontant une cuirasse latéritique à pisolithes. Les échantillons étudiés ont été prélevés dans cet horizon. En dessous, on retrouve un horizon sableux de transition entre la cuirasse et l'argile schisteuse verdâtre sous-jacente. Cet horizon d'argile correspond à une concentration de kaolinite peu ferritisée, c'est la zone de lessivage. En profondeur, se trouvent les horizons granitiques altérés et la roche granitique saine.

2.3.3.1.2 Tillabéry

Le site de Tillabéry se positionne à l'aplomb des granites syntectoniques du Liptako à passages graphiteux sombres et poudreux. Ces granites se sont mis en place au sein des formations métamorphiques birimiennes lors des phases de plissements de l'orogénèse éburnéenne (Milési et al, 1989 ; Soumaïla et Konaté, 2005). Ils occupent plus de la moitié du Liptako nigérien et se poursuivent vers le Sud-ouest au Burkina Faso. Ils apparaissent en trois gros massifs séparant les formations métamorphiques birimiennes. Les horizons retrouvés sont peu différenciés. La cuirasse latéritique est nodulaire et moins épaisse, environ 2,00 m. En dessous de la cuirasse se trouve l'horizon de schiste verdâtre surmontant le socle altéré et alterné de passages de filon de quartz.

Le socle rocheux granitique constituant ici la roche mère se trouve en dessous d'une formation andésitique peu fracturée à priori sans lien direct avec la cuirasse latéritique. Cette formation andésitique est probablement à l'origine d'accidents structuraux ayant permis la mise en place des modelés actuels (Figure 2-9 - Tillabéry). La différenciation en horizons est le fait de la combinaison d'un gradient vertical de concentration et de déshydratation des sesquioxydes de fer et d'une tendance à la nodulation à partir des centres privilégiés.

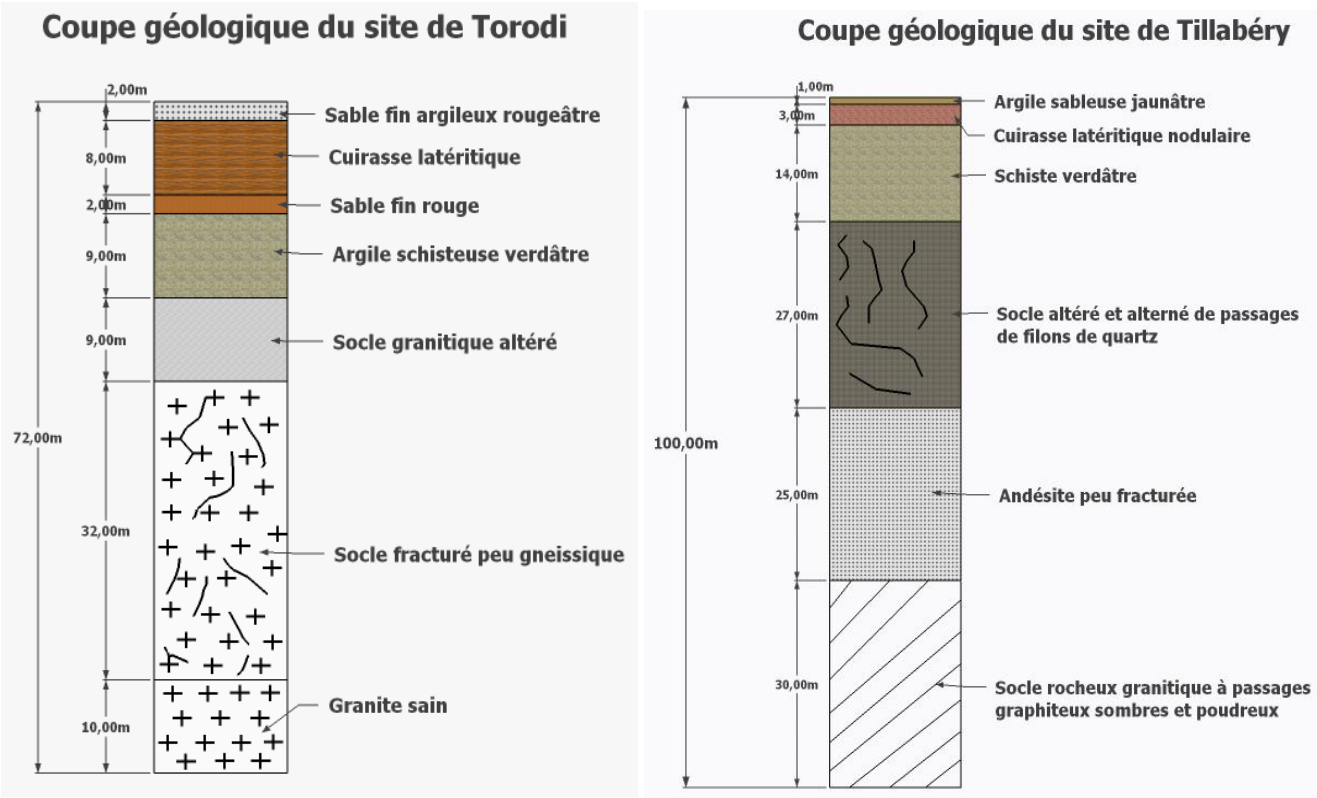


Figure 2-9 : Profils latéritiques des sites situés sur le socle du Liptako (Torodi et Tillabéry).

2.3.3.2 Sites de Ouallam, Dosso et Guéchémé

Les sites de Ouallam, Dosso et Guéchémé reposent sur le CT3 constitué de la série des grès argileux et sables fins du moyen-Niger. Les grès sont siliceux et peu cimentés, plus ou moins argileux, plus ou moins consolidés, avec des grès massifs à « faciès termitière ». Le complexe Continental Terminal (CT) couvre environ 150.000 Km^2 (Dubois et Lang, 1981) et présente une puissance atteignant 450 m dans la région de Dogondoutchi (Figure 2-7). Les résultats des forages profonds de reconnaissance, apportent quelques précisions sur le contenu lithologique des séries définies par Greigert (1966). Ainsi, il identifie la couche d'oolithes ferrugineux associée à la partie supérieure du CT1. Les études de Lang et al. (1980), Dubois et Lang (1981), Bui et al. (1990), Salard-Cheboldaeff et al. (1995) apportent des précisions sur le concept du CT en se basant sur des informations micro-paléontologiques et palynologiques. Ainsi, pour ces auteurs, la série sidérolithique de Greigert (1966) d'âge Eocène inférieur à moyen constitue une entité transitionnelle qui clôturerait la série marine du Paléocène–Eocène et dont le sommet détritique annoncerait le sidérolithique.

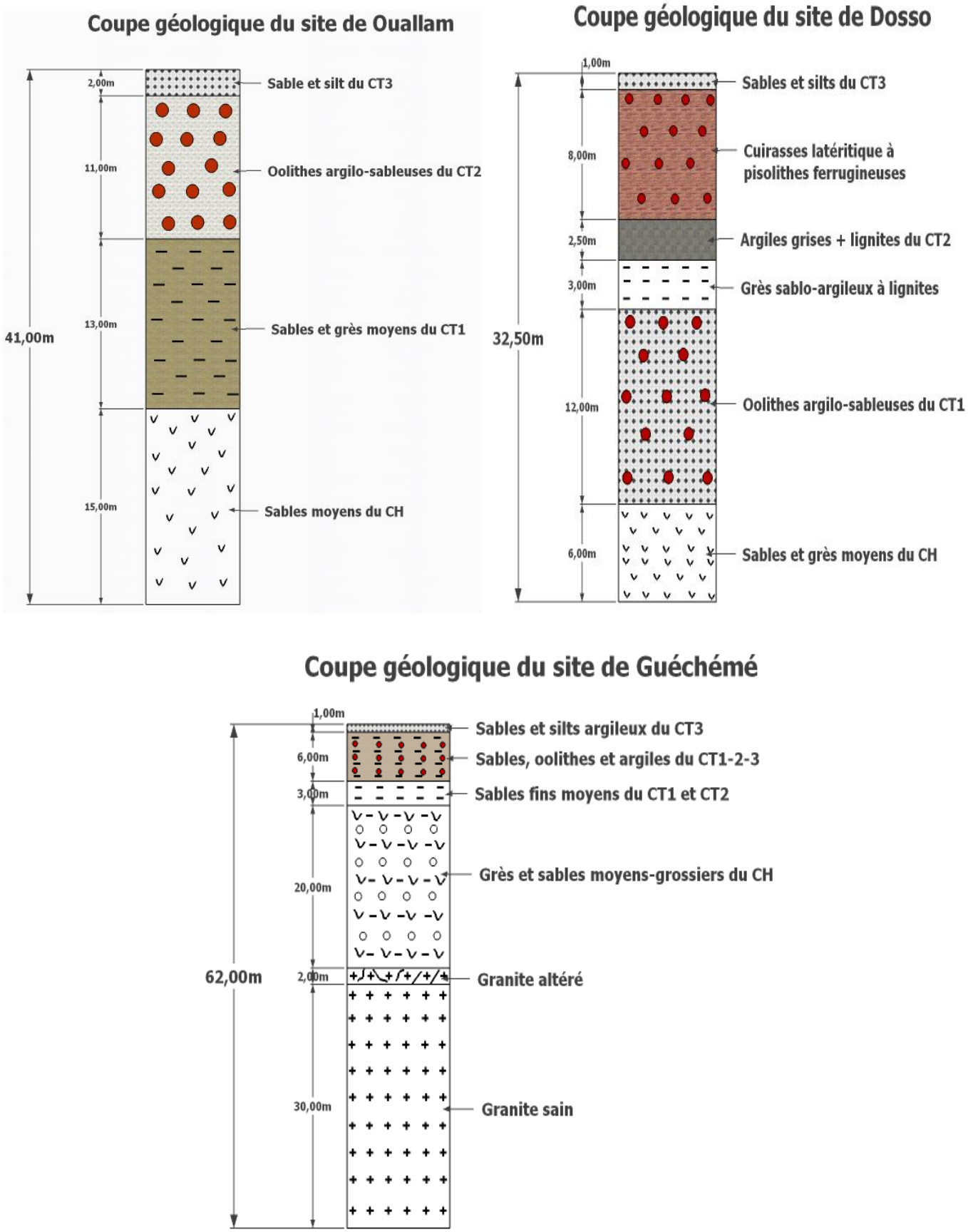


Figure 2-10 : Profils latéritiques des sites du Continental Terminal 3 (Ouallam, Dosso et Guéchémé).

Pour ces sites situés dans le bassin des Iullemmeden, seul le forage de Guéchémé a permis d'atteindre le socle rocheux mais la cuirasse latéritique ne semble pas avoir de lien génétique avec la roche mère. L'ensemble des cuirasses situées dans le CT3 sont des formations sédimentaires détritiques c'est-à-dire que le dépôt s'est effectué après transport (Figure 2-10). Les horizons sont moyennement différenciés et les niveaux de cuirassement sont absents. Les horizons latéritiques au sein desquels les sols ont été échantillonnés pour notre étude sont des oolithes argilo-sableuses faiblement indurés.

Les sols retrouvés ici sont d'origine variée dont les principaux sont :

- Pour Ouallam (Figure 2-10 – Ouallam) : les oolithes du CT2 constituant l'horizon de prélèvement surmontant les sables et grès du CT2 qui à son tour repose sur les sables du CH ;
- Pour Dosso (Figure 2-10 – Dosso) : les horizons différentiés sont plus nombreux. L'horizon de cuirasse latéritique à pisolithes surmontant les sables et silts du CT3 constitue l'horizon de prélèvements des échantillons. Cette cuirasse, peu indurée est détritique et repose sur des argiles grises à lignites du CT2 reposant sur les grès sablo-argileux de l'horizon CT2/CT1 indifférencié. En dessous des grès se trouve un horizon d'oolithes argilo-sableux du CT1 surmontant les sables et grès moyens du CH.
- Les échantillons du gisement de Guéchémé (Figure 2-10 – Guéchémé) sont prélevés dans l'horizon des sables et oolithes du CT3 complexés aux formations sédimentaires du CT2/CT1. Cet horizon surmonte une fine épaisseur de sables et silts argileux du CT3. En dessous de l'horizon latéritique se trouvent les sables fins du CT1 et CT2 situés au-dessus des grès et sables moyens-grossiers du CH. L'ensemble des horizons ci-dessus décrits reposent sur un socle granitique dont la partie supérieure est altérée. Ces horizons sédimentaires, à priori détritiques ne semblent pas avoir de lien génétique avec le granite sain situé en profondeur.

2.3.3.3 Site de Say

Le site de Say se situe sur la formation du CT1 représentée par la série sidérolithique de l'Ader Doutchi. Elle est constituée de sables et d'oolithes du CT2 et CT1 et des grès ferrugineux plus ou moins oolithiques à oolithes ferrugineux libres ou d'oolithes emballés dans un ciment de calcite, de sables fins clastiques, de sables fins argileux sénoniens et de sables et grès du CH (Figure 2-11).

Les horizons précédemment cités se situent sur un socle granitique constituant la roche mère dont les liens pédologiques ne semblent pas clairs. L'horizon de sables à oolithes dans lequel les échantillons ont été prélevés pourrait être à la fois d'origine détritique et/ou résiduelle.

Les horizons successifs sont peu différentiés et constituent quasiment des dépôts continentaux crétacés et tertiaires. La grande partie du matériel sédimenté dans ce secteur provient des produits d'altération des roches situées tout autour du bassin. Les produits d'altération sont quasiment détritiques.

La mise en place de l'horizon latéritique résulterait également de l'accumulation ascendante d'oxydes de fer provenant de l'altération du socle granitique sous-jacent. Les éboulis de roches ferrugineuses à structure oolithique et de grès ferrugineux attestent que cette formation s'est étalée sur des reliefs du Crétacé supérieur situés à l'est de la vallée de la Tarka et sur le Damergou.

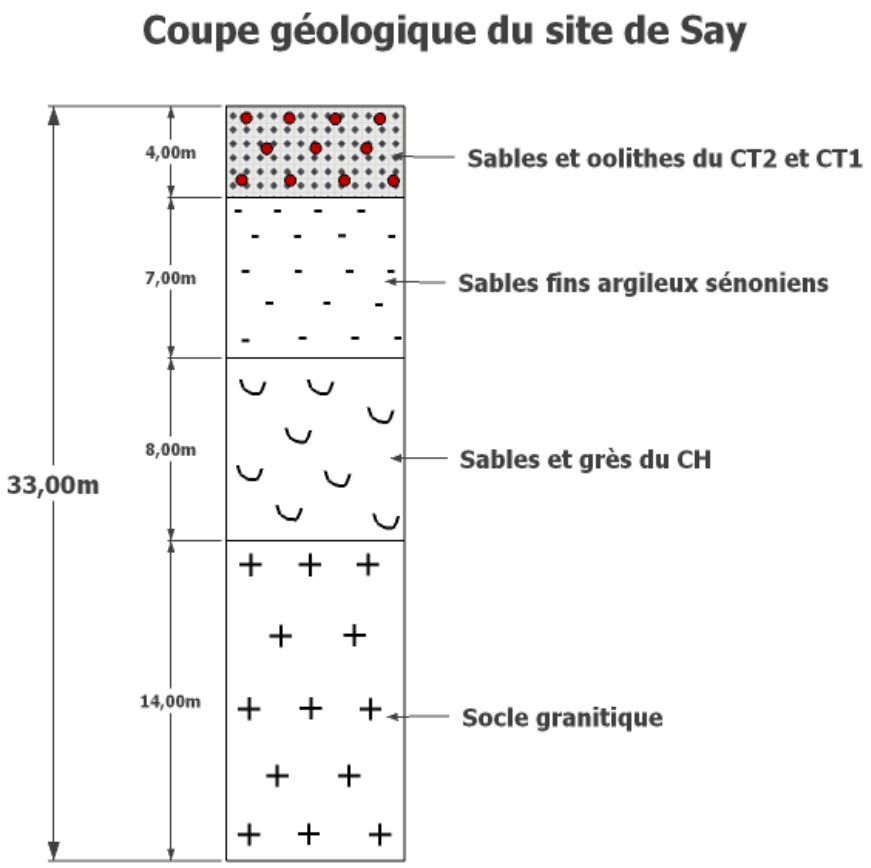


Figure 2-11 *:* Profil latéritique du site de Say (CT1).

2.3.3.4 Site de Fillingué

Le site de Fillingué est à l'aplomb de la série argilo-sableuse à lignites du CT2, caractérisée par l'alternance de séries sableuses et argileuses. Les séries sableuses se terminent fréquemment par des carapaces de grès ferrugineux assez grossiers et les argiles par des niveaux ferruginisés à oolithes ou pisolithes.

Les argiles contiennent des restes de végétaux (lignite, bois plus ou moins houillifiés et débris charbonneux). La pyrite y est abondante en grains isolés ou en amas mélangés à l'argile. La série affleure dans toute la moitié nord du domaine Continental Terminal et présente une puissance atteignant 100 m dans les environs de Dogondoutchi. Les oolithes de goethite se rencontrent avec une densité variable dans des sables, des vases ou des argiles à débris végétaux (Greigert, 1957). La plupart des horizons sont dominés par les sables CT1 et CT2 ainsi que le niveau argileux sporadiquement recoupé, parfois sous forme de lentilles entre le CT1 et le CT2 (Figure 2-12).

L'horizon de formation latéritique est complexé à des argiles du CT2 et celle-ci est détritique car aucun lien génétique n'a été retrouvé entre cet horizon et les horizons sous-jacents. La formation du niveau ferrugineux est due à une association intime de l'altération allitique et la ferralitisation en goethite et hématite d'une trame kaolinique aboutissant par toute une succession d'aspects micromorphologiques, pour lesquels interviennent des mécanismes de décomplexation et de cristallisation, à l'édification d'une charpente ferrugineuse d'où la phase argileuse est partiellement éliminée puis remplacée par des sesquioxydes (Figure 2-12).

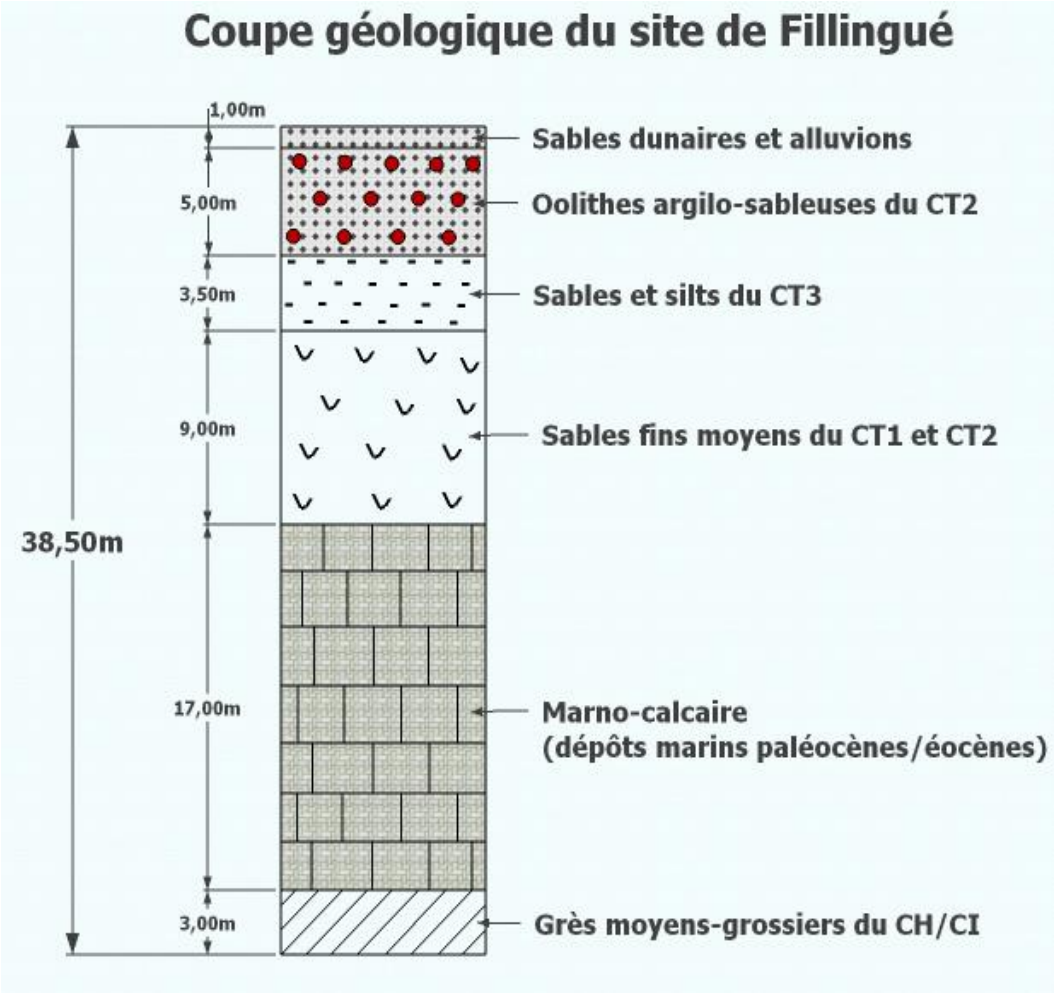


Figure 2-12 : Profil latéritique du site de Fillingué (CT1).

2.4 Déterminisme des sols par les roches

Au Niger la liaison entre les sols et les roches passe par la minéralogie du plasma ou résidu minéral libéré par l'altération de la roche préexistante (désagrégation in situ) et contenu dans le sol résiduel.

La détermination de la roche préexistante est donc définie par l'intensité de l'altération et par la minéralogie du sol résiduel (Priard, 1964 ; Gavaud, 1977). La couverture sédimentaire décèle deux altérations anciennes, l'une modérée et bi-siallitique au Crétacé, l'autre très intense et siallitique au Paléocène.

La poursuite de cette altération pendant la plus grande partie du Quaternaire donne une extrême monotonie aux sols par pédogenèse (sols ferralitiques et ferrugineux de la première formation). Plus tard la diminution de l'agressivité climatique combinée avec la mise à nu des vieux fronts d'altération permet aux roches de s'exprimer au travers de leur transformation en sols.

Ce déterminisme par le plasma ou résidu minéral ne joue pas pour les sables éoliens déplacés (origine différente de la roche in-situ) qui forment une séquence à sols ferrugineux particuliers.

2.5 Le modelé caractéristique des gisements de la zone d'étude

Les formes de terrain n'ont pas été définies indépendamment des sols révélées par leur répartition, aussi n'en présenterons-nous ci-dessous qu'une brève description. Dans la zone d'étude, la plupart des terrains latéritiques retenus présentent les caractères généraux suivants (Figure 2-13) :

- De hauts plateaux tabulaires à entablement ferrugineux qui sont les témoins d'une surface de cuirassement généralisé fin-Tertiaire scellant les grès continentaux et les bordures du socle. Il n'existe pas de restes de surfaces similaires plus anciennes au Niger méridional bien que des pédo-reliques incluses dans cette cuirasse supérieure en indiquent l'existence passée.
- Au-dessous s'étagent des plateaux tabulaires à monoclinaux, des cuvettes perchées, des interfluves isolés, restes des deux à trois modelés à glacis peu inclinés correspondant à des niveaux de base successifs. Ils sont creusés dans des formations kaoliniques et couverts d'une couche résiduelle ou détritique : éboulis, pavages, cailloutis.
- Plus bas on trouve des glacis de pente plus récents sur des roches ou altérations argileuses de nature très variée, d'extension plus septentrionale. Le niveau grossier situé à la base des sols, éluvial et variablement remanié, peut porter les traces de crises érosives attribuées à des périodes climatiques arides ou désertiques.
- Enfin l'ensemble décrit ci-dessus peut être dominé ou parsemé de reliefs résiduels de roches nues de signification variable. Les unes sont des éléments d'une topographie différentielle exhumée de sous une couverture de roches gréseuses du Crétacée (Mounio) et du Tertiaire (région de l'Ouest). Les autres sont des volumes inaltérés jadis inclus dans un épais manteau d'altération du Birimien du Liptako.

Selon Gavaud, (1977) cette dalle ferrugineuse est tronquée, disloquée par suffusion, secondairement ferritisée, couverte d'une mince formation meuble, kaolinique et ferrugineuse, où se différencient des sols reliques à faciès ferrugineux.

Ces témoins tabulaires débordent largement en latitude, leur abondance dépendant du substrat géologique. Ils sont dominants au centre du bassin Continental Tertiaire et définissent des plateaux avec des vallées ensablées qui les séparent sur de grandes étendues. Leur ensemble dessine une vaste cuvette structurale, centrée sur le bassin, à pentes faibles et régulières.

Ils sont parsemés de zones d'effondrements, découpés en tables alvéolaires, surmontés d'un recouvrement détritique à aspect de reg de dissociation, fossilisée de voiles et d'alignements éoliens. À l'ouest cette surface dessine un vaste versant drainant du socle Birimien du Liptako, aux pentes plus fortes et irrégulières (Jeambrun et Machens, 1962). L'érosion n'a laissé qu'un semis de petites buttes-témoins, plus abondantes sur les schistes que sur les granites. À l'Est, après une lacune des argilites tertiaires (Ct. 2), les très grands plateaux du sidérolithique (Ct. 1) dominent topographiquement le versant oriental. Leur entablement n'est cependant pas formé par une cuirasse, mais constitué de grès ferrugineux plus cohérents que le reste de la formation avec des traces d'altération.

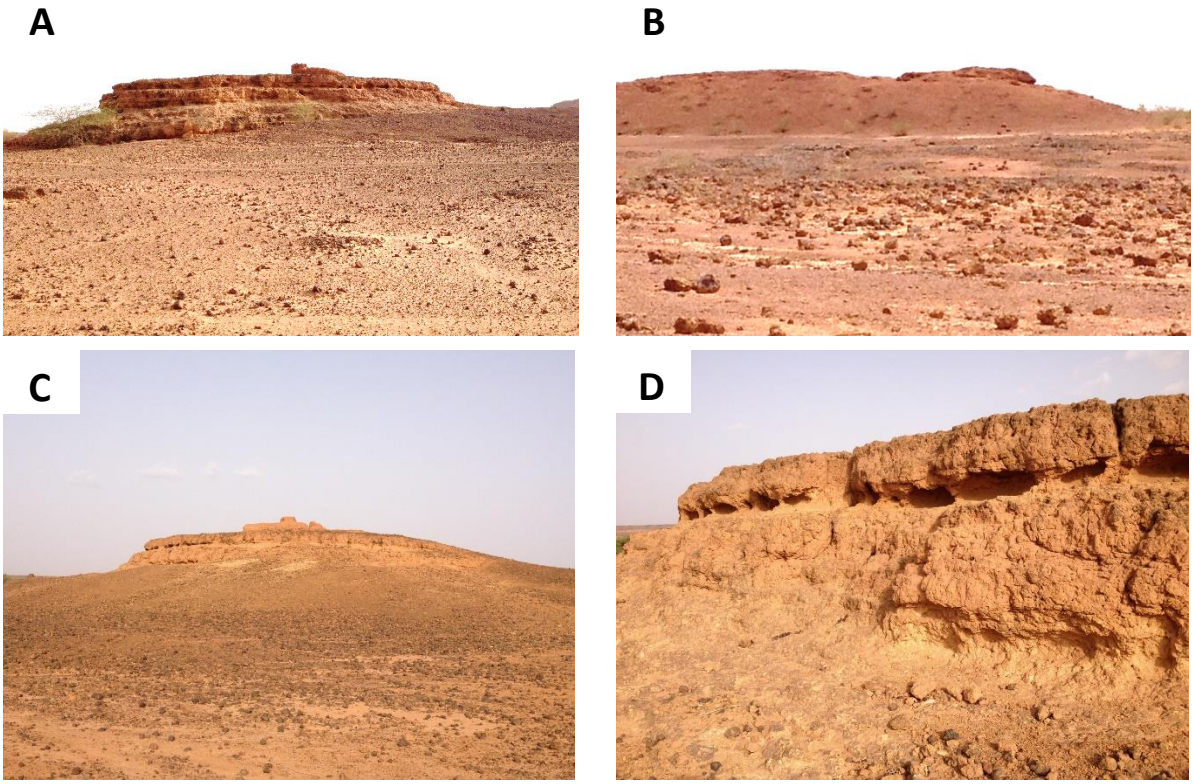


Figure 2-13 *:* Photographies caractéristiques de profils latéritiques entablés dans la zone d'étude. **A)** Profil latéritique de Torodi (Birimien) (à entablement ferrugineux). **B)** Profil latéritique de Ouallam. (CT3) **C)** Profil latéritique de Say (CT1). **D)** Profil latéritique de Fillingué (sous de buttes-témoins) (CT2).

2.6 Facteurs environnementaux des sites latéritiques de la zone d'étude

2.6.1 La végétation

L'aridité appauvrit la végétation et en diminue le volume vers les hautes latitudes. Le type de couvert végétal varie en fonction des localités. En général, l'environnement est celui d'une savane de *brousse dégradée*, nettement arboré dans la partie méridionale (acacias, caicedras, baobabs). Au nord du 14éme parallèle, la savane est herbeuse à rares arbustes disséminés (acacias). Ainsi nous distinguons (Aubreville, 1949) :

- ✓ le **compartiment nord-soudanien occidental :** la flore est constituée de combrétacées (*Combretum micranthum, Combretum nigricans, Combretum collinum*, etc.) sur les plateaux, de *Nauclea latifolia, Daniellia olivieri, Kigelia africana* dans les galeries, de *Butyrospermum paradoxum, Neocarya macrophylla, Andropogon gayanus, Adansonia digitata* (Baobab), dans les vallées sèches, de *Vitex doniana, Sterculia setigera, Parkia biglobosa, Cymbopogum giganteus Bambax costatum* (kapokier), *Acacia albida, Balanites aegyptiaca* (adoua) *Butyrospermum parkii* (Karité) sur les dunes fixées.
  Le bas-dallol Maouri (affluent du fleuve Niger) est essentiellement occupé par une rôneraie (*Celtis integrifolia*) dense, de *Hyphaene thebaïca* (palmiers doum*)* de *Mangifera indica* (manguiers) et *d'Adonsonia digitata*.
- ✓ dans le **compartiment sud-sahélien occidental** s'observe une végétation constituée de fourrés à Combretum sur les plateaux latéritiques, des steppes arbustives sur les terrasses et les dunes fixées. La flore est représentée par *Guiera senegalensis, Commiphora africana, Combretum micranthum, Acacia macrostachya, Lannea acida, Acacia ataxacantha, Combretum nigricans, Boscia senegalensis, Boscia angustifolia* sur les plateaux latéritiques, *Hyphaene thebaica, Bauhinia rufescens, Combretum glutinosum, Acacia albida* dans les vallées sèches.
- ✓ dans le **compartiment nord-sahélien occidental**, la végétation est représentée par des fourrés à *Combretum* sur les plateaux et de steppes arbustives dans les zones basses et sur les sables. La flore comprend des *Acacia raddiana, Acacia senegal, Leptadenia pyrotechnica, Aristida mutabilis, Tragus racemosus, Tephrosia nubica* sur les dunes, *Acacia seyal, Schoenefedia gracilis, Balanites aegyptica, Cordia Sinensis* dans les zones basses.

Il faut noter que la zone d'étude s'inscrit dans le compartiment sud-sahélien occidental. Les types de végétation qu'on rencontre généralement sur les formations latéritiques sont les fourrés à *Combretum, Balanites aegyptiaca* et quelques rares *Acacia*. Les sols latéritiques sont dans la plupart des cas dépourvus de bases chimiques (les bases étant lessivées lors du processus de latéritisation) (Maignien, 1966). Les racines des plantes présentes sur les gisements latéritiques ne pénètrent pas assez dans les horizons latéritiques à cause de la carence des sols en bases nécessaires à leur croissance. La teneur en matières organiques des sols latéritiques de la zone d'étude s'est révélée faible et n'a donc pas d'impact sensible sur leur comportement mécanique.

2.6.2 Le climat

Compris entre les isohyètes 300 mm au nord et 600 mm de pluies annuelles au sud, le secteur d'étude s'étend sur les zones sahélienne et sahélo-soudanienne avec une saison sèche (octobre à mai) et une saison humide (juin à septembre).

La saison des pluies présente un maximum de précipitation en juillet–août. Les fortes chaleurs se situent en avril–mai, alors que la période fraîche est centrée sur décembre–janvier. Aux environs de Niamey les moyennes maximales et minimales sont respectivement de 41°C et 27°C en avril–mai, 32°C et 15°C en décembre–janvier.

Au nord, les minimales de cette période peuvent descendre en dessous de 10°C et les maximales de la saison chaude dépassent les 45°C.

À partir de janvier, l'harmattan, (vent continental sec et chaud) entretient des brumes sèches qui voilent le paysage, allant jusqu'à réduire fortement la visibilité.

Sur toute l'étendue du Niger méridional on observe :

- deux passages zonaux rapprochés, le 15 mai et le 28 juillet sur le quatorzième parallèle nord ;
- une courte saison estivale des pluies, à vents humides de sud-ouest ;
- une saison très sèche de 7 à 10 mois à vents continentaux de nord-est (harmattan) ;
- une insolation très forte, de l'ordre de 3000 heures par an ; des températures excessives, une hygrométrie moyenne très faible ;
- une pluviosité décroissant régulièrement vers le nord-nord-est de 875 mm à la frontière du Bénin à 250 mm sur la rive nord du lac Tchad.

Ces facteurs climatiques sont potentiellement favorables à l'altération des roches mères et à l'enclenchement du processus de latéritisation, plus spécifiquement à la genèse des sols ferrugineux.

2.6.3 Les températures

Le cycle annuel des valeurs extrêmes et moyennes passe partout par deux maxima et par deux minima. La période relativement fraîche de décembre à février contraste avec les rigueurs thermiques d'avril-mai avec des températures dépassant les 45°C à l'ombre. La saison des pluies apporte une faible évaporation qu'efface rapidement la pointe de septembre-octobre. La zone la plus chaude se situe entre les isohyètes 400 mm et 800 mm/an. Il fait plus frais en hiver au Nord, plus frais en été au Sud. Ces variations sont de peu d'importance à côté de l'excès thermique général qui porte les moyennes annuelles à 28-29°C.

Le sol superficiel est toujours, à l'échelle du mois, plus chaud que l'air. Il en résulte un flux thermique dirigé vers la surface qui ne peut qu'accentuer l'évaporation, cela d'autant plus que le sol est plus sec. Ces rigueurs thermiques sont très favorables à l'altération mécanique des roches mères dont le processus de dissolution de celles-ci aboutit à la genèse des formations latéritiques. Il est reconnu que le faciès et la morphologie des sols latéritiques dépendent des affinités thermiques locales. Les sites étudiés étant proches à l'échelle du compartimentage thermique de la zone d'étude, les températures sont peu contrastées d'un site à l'autre et ne constituent donc pas un facteur potentiellement discriminant sur les propriétés mécaniques des sols étudiés.

2.6.4 Les précipitations

Au Niger la pluviométrie annuelle est inférieure à 75mm/an dans le Nord (zone saharo-sahélienne), 75 à 156 mm/an au centre (zone Sahélienne) et 200 à 800 mm /an vers le Sud (zone sahélo-soudanaise à soudanaise).

Les pluies ont partout une répartition annuelle similaire, avec un maximum en août, mais diminuent en importance et croissent en concentration, à diverses échelles de temps, vers le nord. Elles sont le fait d'averses à intensités semblables, ces dernières sont de l'ordre de 60 à 200 mm/h, mais plus courtes et moins nombreuses aux hautes latitudes. La variabilité intra-annuelle, fort élevée, croit également de 15% (écart réduit) sur l'isohyète 800 mm/an à 40 % sur l'isohyète 200 mm/an. Les variations de niveaux lacustres (Bouchardeau & Lefevre, 1957 ; Faure, 1962) mettent également en évidence des fluctuations pluviométriques de plus grande amplitude. Les phases sèches (1910-1920, 1941-1946, 1965-1970, 1982-1989, 1998-2006 et 2011-2014) se traduisent par des crises érosives et ont beaucoup contribué au façonnage des gisements latéritiques épars qu'on observe dans une grande partie du Niger méridional.

Les données de pluviométrie relevées de 1985 à 2008 à la station de mesure de l'aéroport permettent de déduire des ordres de gradeurs sur les sites étudiés. Les sites de Dosso, Guéchémé et Say sont les plus arrosés (≥ 550 mm/an). Les sites de Torodi et Tillabéry reçoivent quasiment les mêmes quantités de pluie par an, soit environ 475 mm/an. Les sites les moins arrosés (≤ 375 mm/an) sont Fillingué et Ouallam (Figure 2-14).

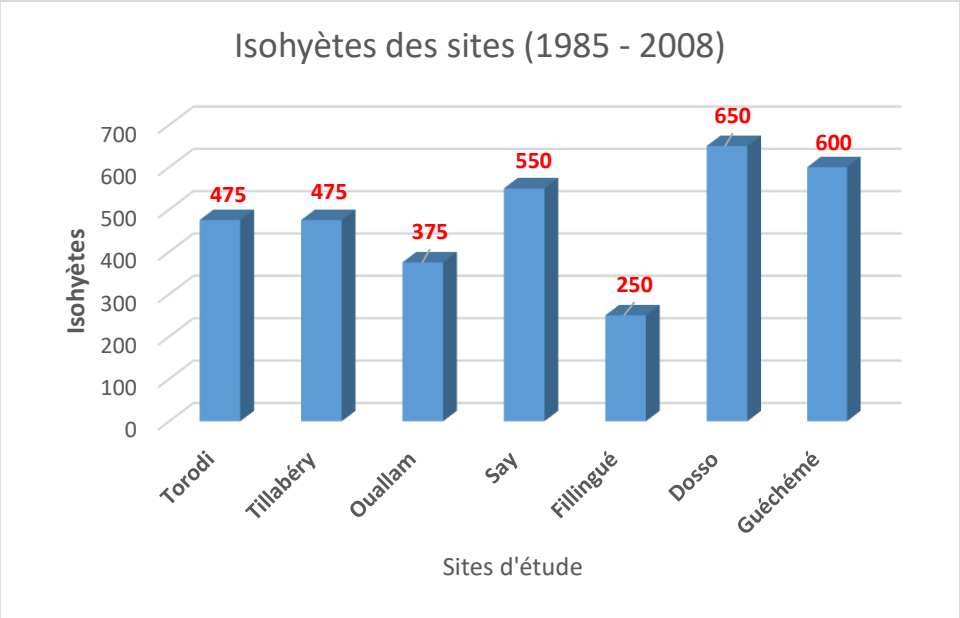


Figure 2-14 : Données pluviométriques des sites (Source : station de mesure de l'aéroport de Niamey [1985 – 2008]).

2.7 Facteurs texturaux, morphologiques et physiques des latérites de la zone d'étude

2.7.1 Densité

Les sols latéritiques étudiés sont principalement composées d'éléments chimiques tels que le quartz, la kaolinite, la goethite et où l'hématite, et dans de moindres proportions la gibbsite, la boehmite et l'anatase.

Les proportions de ces éléments chimiques sont très variables suivant le degré de lessivage, le modelé, l'intensité de l'altération et aussi la nature minéralogique de la roche mère. Cela a pour conséquence une large variation de la densité. Les oxydes de fer qui jouent un rôle important dans la cimentation et l'imprégnation des éléments texturaux et la teneur en quartz font rapidement varier la densité. La densité des échantillons latéritiques recueillis varie de 2,2 à 3,1. Celle-ci augmente avec les teneurs en fer et en quartz.

2.7.2 Couleur

Les échantillons latéritiques prélevés dans la zone d'étude sont généralement d'intensités vives. Les teintes les plus courantes sont : ocre, rouge, brun (Figure 2-15). Un même échantillon peut présenter toute une gamme de couleurs passant plus ou moins sensiblement de l'une à l'autre, suivant des dessins et des formes variés. La coloration des latérites est due aux oxydes de fer plus ou moins hydratés. Généralement, les sols latéritiques sont rouges en surface car fortement lessivés, fer ferrique $Fe(OH)_3$ et jaune ocre en profondeur où se forme du fer ferreux $Fe(OH)_2$, FeO.

a) Faciès latéritique de teinte jaune-orangée

b) Faciès latéritique de teinte beige à brunâtre

c) Faciès latéritique de teinte rouge

d) Faciès latéritique de teinte ocre

Figure 2-15 : Photographies caractéristiques des teintes des formations latéritiques de la zone d'étude.

2.7.3 Structure

Les échantillons latéritiques prélevés dans la zone d'étude présentent les principales structures suivantes (Figure 2-16) :

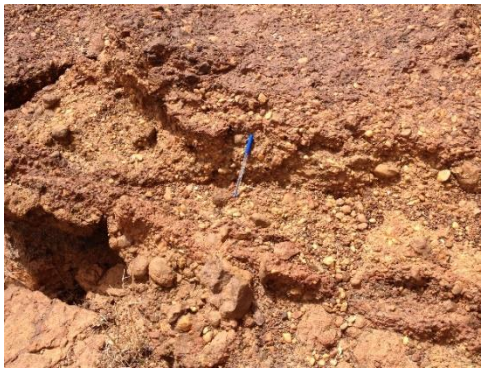
- Structure nodulaire (Figure 2-16-a) ;
- Structure massif (Figure 2-16-b) ;
- Structure alvéolaire (Figure 2-16-c) ;
- Structure pisolithique (Figure 2-16-d) ;
- Structure gravillonnaire (Figure 2-16-e) ;
- Et la structure conglomératique (Figure 2-16-f).

a) Structure nodulaire

b) Structure massive

c) Structure alvéolaire

d) Structure pisolithique



e) Structure gravillonnaire

f) Structure conglomératique

Figure 2-16 : Photographies caractéristiques des faciès latéritiques rencontrés dans la zone d'étude.

Les oxydes de fer enrobant les faciès conduisent parfois à la mise en place de structures intertextiques le plus souvent massif-nodulaire et nodulaire-alvéolaire.

Les oxydes de fer servent à créer des ponts reliant plusieurs types de faciès au sein de la formation et enrobent ceux-ci individuellement. De tels faciès comportent plusieurs dispersions au sein d'un même profil latéritique et par conséquent un comportement mécanique imprévisible et préférentiel suivant les textures rencontrées. Les principales textures qui y sont retrouvées sont illustrées sur la planche de photos de la Figure 2-16.

2.7.3.1 Structure nodulaire

Les nodules contenus dans la masse sont lithorelictuels (Figure 2-16-a), car ils proviennent pour la plupart de la délapidification des formations gréseuses constituant le CT : ils sont compacts et contiennent des grains de quartz, de la kaolinite et des oxydes de fer concrétionnés. La matrice brune souligne la silhouette des nodules. Ces nodules sont donc issus d'un mélange mécanique de fragments du substrat, parfois modérément décomposés et de grains de quartz.

2.7.3.2 Structure massive

Le faciès massif affecte principalement les substrats sableux (Figure 2-16-b). Le substrat sur lequel s'est fixé le fer est constitué de lentilles de sable grossier, relativement épaisses et de lentilles de sable silteux, de plus faible extension et d'épaisseur moindre. Le faciès se caractérise par un amas de sable grossier traversé par de lentilles silteuses et présentant des stratifications entrecroisées, le tout imprégné d'oxydes de fer superficiellement ou en profondeur suivant l'intensité des phénomènes de latéritisation.

2.7.3.3 Structure alvéolaire

Au sein d'une cuirasse gravillonnaire sableuse, des alvéoles de deux types se sont développés : les uns sont dus au défaut d'occupation des espaces libres et les autres proviennent de l'altération et l'élimination de fragments de roche, altérés après la formation de la cuirasse. Les alvéoles sont le plus souvent occupés par des oxydes de fer (goethite ou hématite) (Figure 2-16-c).

2.7.3.4 Structure pisolithique

Dans les faciès pisolithiques (Figure 2-16-d), les enduits ferrugineux acquièrent une grande épaisseur ; ils sont fixés sur la surface matricielle reliant sous forme de ponts les nodules. Dans la partie inférieure, les pisolithes sont peu développées et intégrés dans une matrice sableuse, avec des fragments de roche ou des blocs de sable imprégnés par les oxydes de fer. La partie supérieure est caractérisée par des pisolithes jouissant d'une certaine liberté jusqu'à ce que les couches successives de l'enduit les emprisonnent et forment la partie supérieure de la cuirasse.

2.7.3.5 Structure gravillonnaire

Un gravillon est, ici, un nodule qui, non seulement a été détaché du milieu où il s'est formé (Tardy, 1993) mais qui a, en outre, séjourné à la surface du sol. Les critères qui peuvent être utilisés en faveur d'une présence, à un moment donné, à la surface du sol, ont été interprétés différemment par certains auteurs. Les concrétions sableuses sont de dimension assez homogène. Elles sont entourées d'un sable meuble de couleur beaucoup plus claire où il subsiste quelques traces. Certaines concrétions sont reliées entre elles par des ponts de sable fortement imprégnés de couleur rouge formant ainsi une structure intertextique. Les concrétions sont faites d'éléments sableux et dégagées d'un horizon tacheté par le ruissellement. De nodules, elles sont passées au stade de gravillons (Figure 2-16-e).

2.7.3.6 Structure conglomératique

Le faciès conglomératique (Figure 2-16-f) a été très peu retrouvé dans les échantillons prélevés. Seuls les échantillons de Say présentent ce type de structure. La quantité de fer reliant les éléments texturaux est relativement faible favorisant une faible liaison entre ces derniers. La masse principale de cette formation ferrugineuse est constituée d'oxydes de fer emprisonnant de petits fragments de roche profondément altérés et presque entièrement éliminés ultérieurement.

2.8 Matériel et méthodes

2.8.1 Essais géotechniques et mécaniques: méthodologie d'échantillonnage et de caractérisation

Les paramètres d'identification des sols latéritiques sont classiques des normes d'essais géotechniques. Il est systématique de procéder aux essais de granulométrie et de limites d'Atterberg en vue de situer les matériaux dans les classifications géotechniques.

Dans le cadre de cette étude, des sols latéritiques ont été échantillonnés dans les différentes zones retenues pour l'étude. Des mailles de 20m x 20m ont été réalisées et les prélèvements répartis de manière à couvrir l'ensemble de la zone d'étude.

Globalement, l'échantillonnage des sols latéritiques est fait de telle sorte que le produit latéritique obtenu soit un mélange dans lequel les blocs dépassant un D_{max} (diamètre maximum) en référence des critères standards sont écartés (Mahalinga-Iyer & Williams, 1994 ; 1997). Les échantillons ainsi prélevés sont sommairement décrits sur le site selon les paramètres d'état et la texture. Tous les échantillons recueillis ont été d'abord séchés à l'air libre, car c'est la méthode de prétraitement qui impacte peu les résultats des essais géotechniques (Lyon Associates, 1971).

Afin de procéder à une identification complète et précise, des essais géotechniques sont effectués sur les échantillons après leur acheminement en laboratoire. L'analyse granulométrique et les limites d'Atterberg constituent les essais effectués pour caractériser et classer ces sols.

L'analyse granulométrique permet de déterminer les pourcentages pondéraux des différentes tailles de grains constituant les échantillons et les limites d'Atterberg donnent une idée sur leur plasticité. Des essais comme la sédimentométrie et la mesure de la masse volumique des particules solides ρs ont permis de compléter les essais standards de classification.

Les essais Proctor modifié permettent quant à eux de déterminer les références de compactage, à savoir la teneur en eau et le poids volumique sec à l'optimum Proctor modifié. Ces données optimales sont utilisées pour la fabrication des éprouvettes de sols soumises aux essais de poinçonnement afin d'évaluer leur portance CBR. L'utilisation des graveleux latéritiques à un niveau déterminé des terrassements ou du corps de chaussée dépend des performances obtenues en soumettant des échantillons représentatifs à un certain nombre d'essais. La portance reste le paramètre essentiel. L'essai CBR continue d'être considéré comme représentant le mieux la résistance au poinçonnement des sols. Les valeurs du CBR obtenues à 98% et à 95% du poids volumique optimal OPM et après 4 jours d'imbibition de l'échantillon est la référence de base de la portance d'un sol prise en compte pour le dimensionnement des couches de chaussée.

Par ailleurs, les essais mécaniques (essai œdométrique et essai de cisaillement) permettent d'évaluer les propriétés rhéologiques des graveleux latéritiques. Ces essais permettent également de caractériser leur comportement mécanique à travers les paramètres de compressibilité et de cisaillement ainsi que les comportements dilatant ou contractant.

Tous les essais géotechniques (analyse granulométrique, limites d'Atterberg, essais Proctor et CBR) ont été réalisés au Niger au Laboratoire d'Analyse des Sols et de Suivi des Travaux Publics (LASTRAP) avec l'aide précieuse du Directeur général M. Souley ZAKOU et du chef laboratoire de LASTRAP M. Aboubacar MAHAMADOU.

Des données ont été recueillies au Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment (LNTP/B) avec la collaboration du Directeur général du LNTP M. Ousmane SANDA et le Directeur technique du LNTP M. Mamadou DJIBO.

Les essais œdométriques ont été réalisés au laboratoire I2M et les essais de cisaillement à l'Institut de Technologie de Bordeaux sous l'assistance de M. Mehdi SBARTAÏ.

2.8.1.1 Essais géotechniques

2.8.1.1.1 Analyse granulométrique et sédimentométrie

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulé sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.

L'analyse granulométrique s'effectue jusqu'à 80 µm par tamisage du matériau par voie sèche ou par voie humide. Les dimensions des mailles des tamis utilisées sont les suivantes : 80 mm; 50 mm ; 32 mm ; 20 mm ; 10 mm ; 5 mm ; 2 mm ; 1 mm ; 0,4 mm ; 0,1 mm ; 0,08 mm. L'analyse granulométrique des échantillons a été effectuée selon la norme NF P 94-056. L'essai permet d'obtenir la distribution pondérale de l'échantillon à partir de laquelle la courbe granulométrique est tracée dans un graphique semi-logarithmique (diamètre des tamis en abscisse et le passant en échelle linéaire en ordonnée). Cette courbe permet de déterminer des paramètres tels que le passant à 80 µm, à 0,400 mm à 2 mm et à 5 mm constituant respectivement la fraction fine, le mortier, la fraction sableuse et la fraction graveleuse ainsi que les coefficients d'uniformité Cu et de courbure Cc. Ces paramètres, couplés aux propriétés de plasticité (WL, WP et IP) permettent de classer le sol selon un système de classification choisi. Les courbes granulométriques des échantillons provenant de chaque zone d'étude sont tracées sur un même graphique afin de visualiser l'allure générale du fuseau granulométrique des particules.

Au-dessous de 63 µm, le tamisage n'est plus possible car les tamis s'encrassent et se déforment. L'analyse granulométrique se poursuit alors par sédimentométrie. La méthode est basée sur la loi de Stokes, applicable aux suspensions de faible concentration, qui donne la valeur limite de la vitesse de décantation de particules sphériques en suspension dans un liquide au repos, en fonction de leur diamètre (Equation 2-1):

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\mu} D^2$$

Equation 2-1: Relation permettant le calcul de diamètre des particules de sol décantées (loi de Stokes).

Avec :

v : vitesse de décantation (cm/s),
η : viscosité dynamique du fluide en Pa.s,
D : diamètre de la particule en cm,
γ_s : poids volumique des particules du sol en kN/m^3,
γ_w : poids volumique de l'eau en kN/m^3.

L'essai de sédimentométrie réalisé selon la norme NF P 94-057 consiste à mesurer au densimètre la densité de la suspension à divers instants et permet donc de compléter la courbe granulométrique obtenue par tamisage. L'intérêt de cet essai reside également dans la determination de la quantité d'argile (% de passants à 2µm). Pour les particules fines et très fines d'un sol ayant des formes irrégulières (disques ou plaquettes), la loi de Stokes ne permet de définir qu'un diamètre équivalent de la particule.

2.8.1.1.2 Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg des sols latéritiques (selon la norme NF P 94-051) est un essai réalisé en deux phases :

- recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se referme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés ;
- recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement se fissure.

Ces essais permettent d'évaluer : la limite de liquidité (WL), la limite de plasticité (WP), l'indice de plasticité (IP) et l'indice de consistance (IC).

2.8.1.1.3 Essais Proctor – Essai CBR

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un matériau sont déterminées à partir de l'essai Proctor modifié. Le principe de l'essai consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé (norme NF P 94-093) et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau. D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor modifié. Les échantillons collectés sur les sites d'étude ont été compactés dans des moules Proctor de dimensions (116,5 mm de hauteur et 101,5 mm de diamètre) en cinq couches de 56 coups avec une dame de compactage de dimensions (51 mm le diamètre du mouton), une hauteur de chute de 457 mm et une masse de 4 535 g conformément à la norme NF P 94-093. Ces essais ont permis de déterminer les valeurs optimales de compactage (γ_{dopm} et W_{opm}) ainsi que l'indice de portance I_{CBR} des sols une fois compactés et après imbibition de 96 heures dans l'eau. Le séchage à l'air libre est également choisi comme méthode de prétraitement avant l'exécution des essais. L'indice CBR (évalué selon la norme NF P 94-078) est un paramètre important pour le dimensionnement des couches de chaussée. Le principe général de l'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels sont respectivement rapportés aux valeurs des forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements. L'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur, exprimée en pourcentage, des deux rapports ainsi calculés. La valeur seuil requise pour l'utilisation d'un graveleux latéritique en couche de fondation est 30 au minimum et 80 pour une couche de base (CEBTP, 1972 ; 1984 ; Vadagbalkar, 2014).

2.8.1.2 Essais mécaniques

2.8.1.2.1 Essai œdométrique

L'essai œdométrique est réalisé selon la norme XP P 94-090-1. L'essai s'effectue sur une éprouvette de matériau placée dans une enceinte cylindrique rigide (cellule œdométrique). Un dispositif applique sur cette éprouvette un effort axial vertical, l'éprouvette étant drainée en haut et en bas et maintenue saturée pendant l'essai.

La charge est appliquée par paliers maintenus constants successivement croissants et décroissants suivant un programme défini. Les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge. Les essais œdométriques ont été réalisés en utilisant une cellule œdométrique de 50 mm de diamètre et 20 mm de hauteur. Les principaux paramètres déduits de l'essai sont le coefficient de compressibilité (Cc), le coefficient de gonflement (Cg), les indices de vides (e_0), les poids volumiques humide (γ_h) et sec (γ_d), la contrainte de pré-consolidation (σ'_p) ainsi que la perméabilité (k) des sols latéritiques.

L'appareil utilisé pour la réalisation de cet essai ainsi que l'éprouvette de sol après essai sont illustrés sur la Figure 2-17.

Figure 2-17 : Dispositif permettant de réaliser l'essai œdométrique et éprouvette de sol après test de compressibilité.

2.8.1.2.2 Essai de cisaillement rectiligne à la boîte

Les caractéristiques de cisaillement des échantillons sont déterminées à l'aide de l'essai à la boîte de cisaillement direct afin de déduire les propriétés mécaniques intrinsèques des sols latéritiques (la cohésion c' et l'angle de frottement interne φ', en pic de rupture et en résiduel). Les essais de cisaillement sont réalisés en référence à la norme NF P 94-071-1 sur des échantillons provenant des sept sites de la zone d'étude.

L'essai consiste à soumettre le sol à un cisaillement direct, rectiligne, suivant un plan imposé. L'éprouvette de sol (section carrée = 60 mm) est placée à l'intérieur de deux demi-boîtes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre. Un piston permet d'exercer sur le sol un effort N maintenu constant pendant toute la durée de l'essai. Le cisaillement est effectué après consolidation jusqu'à l'apparition d'un palier au niveau de la courbe de consolidation. Après stabilisation, l'échantillon est cisaillé suivant le plan imposé. Ces essais ont été réalisés sur la fraction 0/5 mm des sols latéritiques. Des précautions ont été prises lors de la confection des éprouvettes pour que celles-ci soient aussi semblables que possible.

On effectue une remise sous contrainte qui a pour but, en revenant aux conditions in –situ de pression interstitielle et de contrainte effective, de modifier le moins possible les valeurs des paramètres qui pourraient influer sur la résistance au cisaillement. Cette remise sous contrainte est effectuée avant tout essai de cisaillement et particulièrement des essais lents comme c'est le cas pour notre étude. Le cisaillement commence après que l'échantillon ait été consolidé sous l'effet de la contrainte normale σ (kPa) sur quatre éprouvettes correspondant aux contraintes de 28, 56, 112 et 222 kPa, la charge de chaque palier étant le double du précédent. La vitesse de cisaillement est lente (0,286 mm/min), pour permettre le drainage de l'échantillon et éviter de générer des surpressions interstitielles pendant le cisaillement. Dans ces conditions les contraintes produites sont des contraintes effectives et les caractéristiques déterminées sont les paramètres c' et φ' du comportement à long terme.

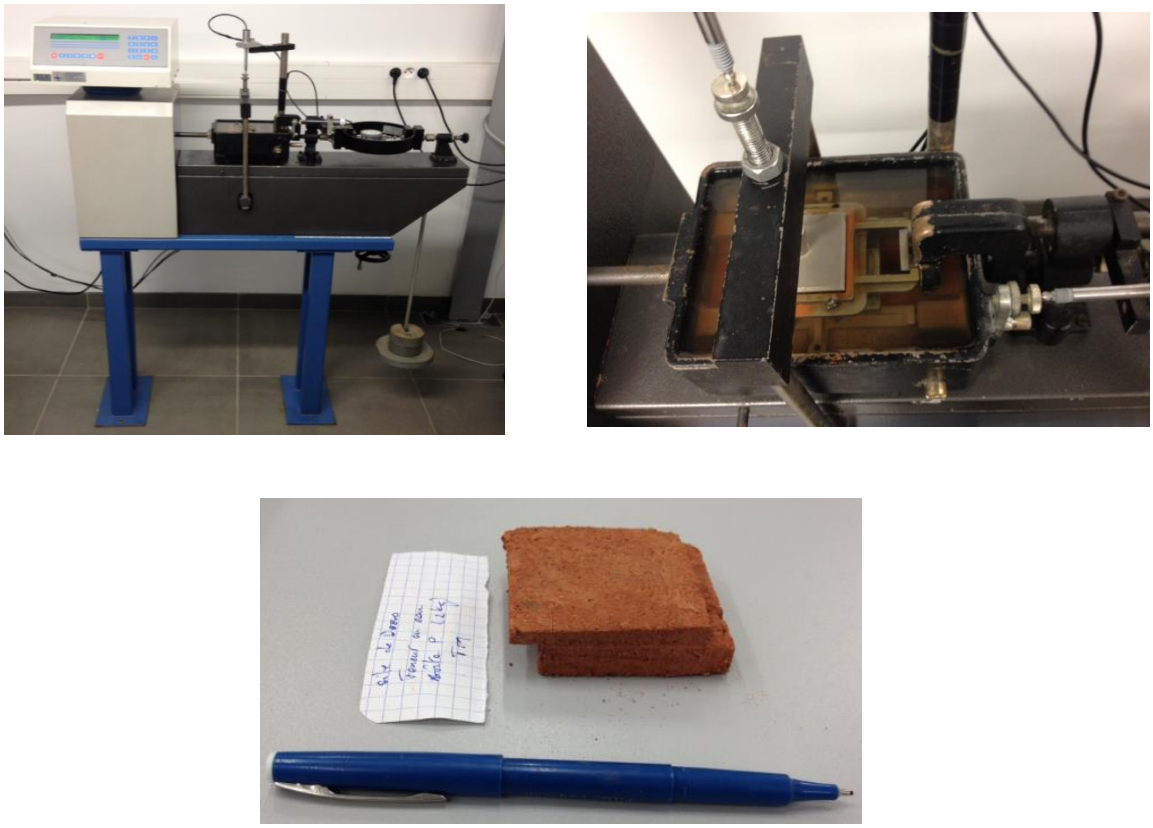


Figure 2-18: Boite de cisaillement et éprouvette de sol après cisaillement.

Les paramètres c' et φ' permettent d'analyser le comportement du sol notamment sa susceptibilité à la rupture par cisaillement lorsque les niveaux de contrainte ultime sont atteints ou dépassés.

Pour toutes les éprouvettes d'échantillons latéritiques cisaillés, nous n'avons pas relevé de contrainte tangentielle résiduelle ou du moins pour des cas isolés pour un certain niveau de contrainte. Celle-ci est généralement confondue à la contrainte de cisaillement au pic de rupture. Ces échantillons latéritiques subissent une rupture élasto-plastique au-delà d'un certain déplacement horizontal. La boîte de cisaillement ayant permis la réalisation des essais de cisaillement est présentée (Figure 2-18) ainsi que l'éprouvette de sol après cisaillement. En outre, grâce à l'essai de cisaillement les comportements de dilatance et de contractance des échantillons pendant les essais de cisaillement ont pu être étudiés à travers les déformations horizontales et verticales.

2.8.2 Analyses minéralogiques et chimiques

La présentation des matériels et méthodes abordés dans cette section est notamment inspirée d'une synthèse inclue dans la thèse de Clément Lelabousse (2012)

2.8.2.1 Analyse cristalline par diffractométrie aux rayons X

2.8.2.1.1 Présentation de la méthode

Pour déterminer la composition minéralogique des échantillons provenant des sites, nous avons tout d'abord effectué des analyses de diffractométrie des rayons X (DRX). Les échantillons ont été préalablement broyés à une granulométrie < 80 µm puis séchés à l'air.

L'étude des échantillons de sols latéritiques par diffraction des rayons X a permis :

a) – la détermination des caractéristiques de la maille cristalline élémentaire (distances interréticulaires) des minéraux contenus dans les échantillons latéritiques. La détermination de la distance interréticulaire *d* permet ainsi l'identification de la phase cristalline correspondant à chaque minéral contenu dans l'échantillon. Il faut noter que l'analyse des échantillons par la diffractométrie aux rayons X est principalement qualitative, la compétence et la connaissance du matériau de l'utilisateur étant les principaux atouts pour une analyse beaucoup plus pertinente.

b) – les différentes phases cristallines ainsi retrouvées ont été quantifiées par la méthode de Riedvelt. Celle-ci consiste à simuler un modèle de diffractogramme à partir de la base de données de l'ICDD (International Centre for Diffraction Data) et l'ajuste ainsi graduellement au modèle le plus proche du diffractogramme de l'échantillon analysé. La composition chimique de la simulation la plus proche du diffractogramme de l'échantillon testé est considérée comme étant la composition chimique de celui-ci. Au sens rigoureux du terme, il s'agit plutôt d'une approximation des phases minérales contenues dans les échantillons de sol latéritique. La méthode reste donc semi-quantitative.

Le principe de la méthode est détaillé en Annexe 2-1.

2.8.2.1.2 Le diffractomètre utilisé

Les analyses sont réalisées sur environ 1 gramme de la fraction $C_{80\mu m}$ des échantillons latéritiques. L'échantillon est délicatement étalé sur le porte échantillon du diffractomètre. La préparation et l'installation de la poudre sur le porte échantillon ont été réalisées avec minutie de sorte que les cristallites soient orientées aléatoirement. Les analyses ont été effectuées avec l'aide de M. Adrien LECLESH de B.R.G.M. avec un diffractomètre SIEMEN D5000 automatisé opérant à 40kV et 30mA équipé d'un porte échantillon rotatif et d'une source λ Kα1 $\approx$ 1.789 Å (anticathode de cobalt). Les diffractogrammes ont été dépouillés à l'aide des données de référence internationale de l'ICDD.

Les caractéristiques des essais sont les suivantes :

- Balayage de 4 à 84°2Θ,
- Vitesse de balayage de 0,02°2Θ/seconde,
- Temps de comptage : 5 secondes/pas.

2.8.2.1.3 Résultats

Les diffractogrammes obtenus donnent l'intensité des photons X en fonction de l'angle de diffraction 2θ. Après avoir identifié les pics de diffraction significatifs (cf. e.g., Tucker, 1988), on convertit la valeur 2θ en distance interréticulaire *d*. Le diffractogramme permet ainsi d'identifier, de façon qualitative, les différentes phases cristallines du matériau réduit en poudre (chaque phase cristalline a un diffractogramme unique). L'utilisation de base de données (e.g. ICDD) s'avère souvent nécessaire.

2.8.2.2 Analyse pétrographique

Une série de sept lames minces polies imprégnées et non recouvertes provenant des sept sites d'étude ont été réalisées. Toutes les lames ont été usinées par Bernard MARTIN au département de Géologie et d'Océanographie (DGO, EPOC, UMR 5805, Talence). La Figure 2-19 indique un exemple de lame mince.

Les lames minces ont été observées au département TREFLE-I2M sur un microscope optique Leica polarisant DM 750 P (modes réfléchis et transmis) avec M. Yanick ANGUY et Mme Cécile GABORIEAU.

Ce microscope est aussi doté d'une caméra permettant de photographier en temps réel la lame observée avec des objectifs x4 à x63 (grossissement total x40 à x630 ; oculaire x10).

L'intérêt d'observer une lame mince de latérite imprégnée de résine amorphe entre un polariseur et un analyseur croisés est que les cristaux biréfringents, qui influencent le plan de polarisation, apparaissent plus ou moins lumineux liés à leurs orientations différentes par rapport au plan de polarisation. Lorsque l'on tourne la platine du microscope, la teinte d'un objet biréfringent (e.g. le quartz) change, l'objet biréfringent s'éteignant quatre fois suivant deux directions perpendiculaires. En lumière polarisée analysée (LPA), les cristaux de quartz sont facilement identifiables grâce à leur changement de teinte au cours d'une rotation.

La porosité, remplie d'une phase amorphe reste éteinte. Ainsi, la microscopie photonique permet de repérer rapidement les différentes phases (exemples : quartz, oxydes de fer, kaolinite…).

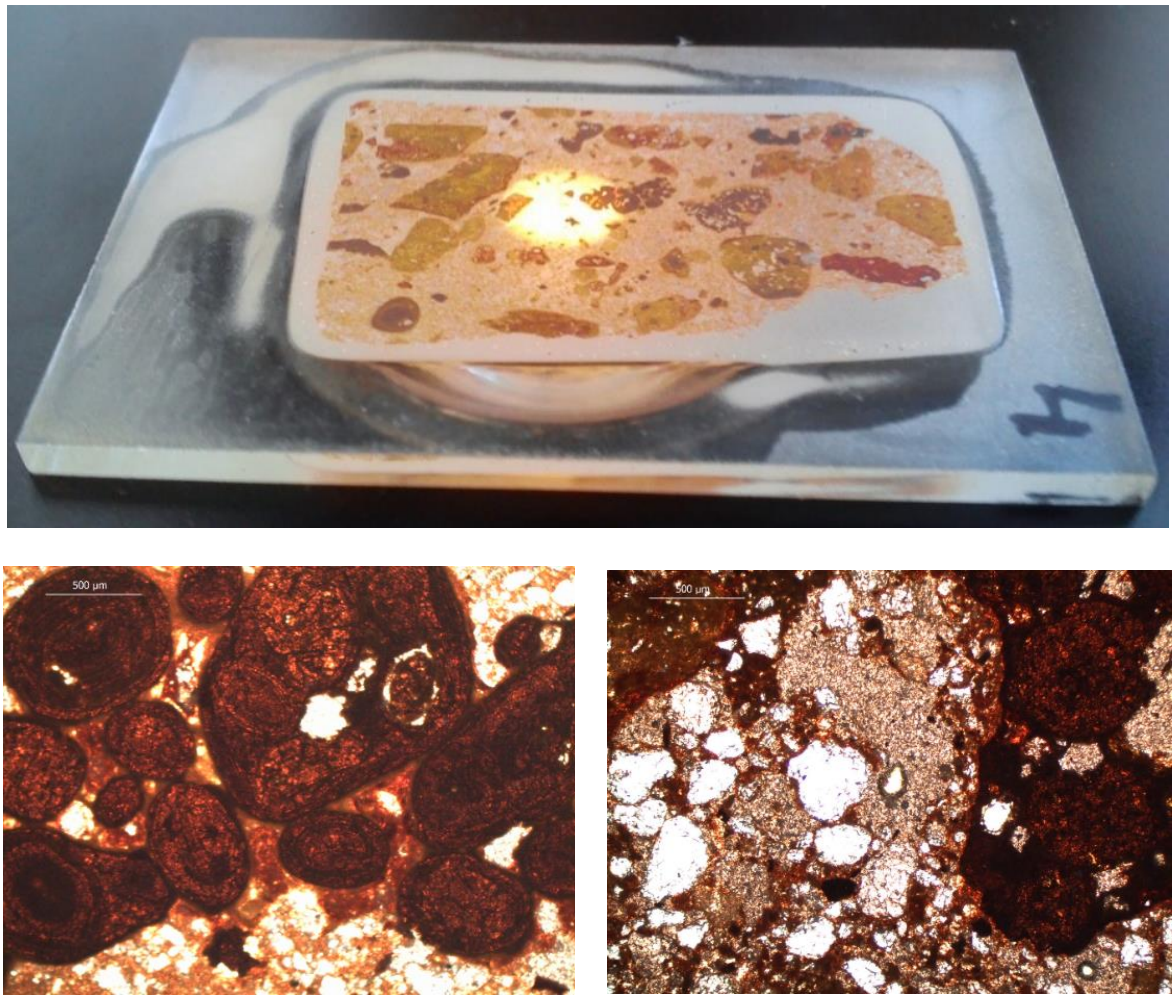


Figure 2-19: Observation en lumière naturelle polarisée (LNP ; grossissement x40) d'une lame mince de latérite. La résine amorphe apparaît en gris-beige. Les différents minéraux apparaissent en teintes ocre et blanche.

2.8.2.3 Microscopie électronique

L'étude de la microstructure et de la composition chimique des sols latéritiques a été possible grâce à l'imagerie électronique, largement utilisée dans le cadre de nos travaux. Celle-ci donne accès à davantage de détails que la microscopie optique. La microscopie électronique à balayage permet de réaliser un examen très rapide et détaillé des phases minérales ainsi que leur répartition. Il permet également de faire ressortir les différentes familles de pores caractérisant les échantillons de sol latéritique.

Le principe de fonctionnement du microscope électronique à balayage est détaillé en Annexe 2-2. Sur la Figure 2-20 est illustrée la photographie du MEB utilisé pour l'analyse de nos échantillons. Toutes les analyses au MEB et au Raman ont été effectuées en collaboration avec M. Yanick ANGUY et Mme Cécile GABORIEAU au département TREFFLE-I2M.

Figure 2-20: Photographie d'un Microscope Électronique à Balayage (MEB).

En mode électrons secondaires, le pouvoir séparateur des MEB à effet de champs utilisé est de l'ordre de quelques nanomètres. La quantité d'électrons secondaires émise est surtout liée à la topographie de surface de l'échantillon. Elle est en fait aussi fonction du numéro atomique Z du matériau puisque les électrons rétrodiffusés contribuent à l'émission d'électrons secondaires.

Ainsi, les images formées par la détection d'électrons secondaires contiennent deux types d'information : (1) contraste de relief et (2) contraste de phase. Ce dernier contraste est d'autant plus visible que le contraste de relief est doux et/ou la différence de numéro atomique est grande. La combinaison des deux types d'information peut ainsi parfois aider à mieux discriminer les interfaces.

2.8.2.4 Spectrométrie Raman

On ne considère que l'effet Raman spontané (Barbillat et al., 1999). La spectrométrie de diffusion Raman est une technique permettant l'observation des états vibrationnels des molécules formant la matière. La spectrométrie Raman a été principalement utilisée pour discriminer les variantes d'oxydes de fer (goethite – hématite) non différenciées en microanalyse X. L'analyse consiste à l'aide d'un faisceau laser de déterminer les pics caractéristiques d'une grande palette de minéraux contenus dans les échantillons. L'interprétation des résultats est basée sur le calage des pics majeurs caractéristiques du minéral recherché. Le détail du principe de l'analyse est fourni en Annexe 2-3.

Les observations ont été effectuées avec un spectromètre Raman confocal Renishaw inVia (Figure 2-21) équipé de deux excitatrices laser à 785 nm et à 532 nm de longueurs d'onde.

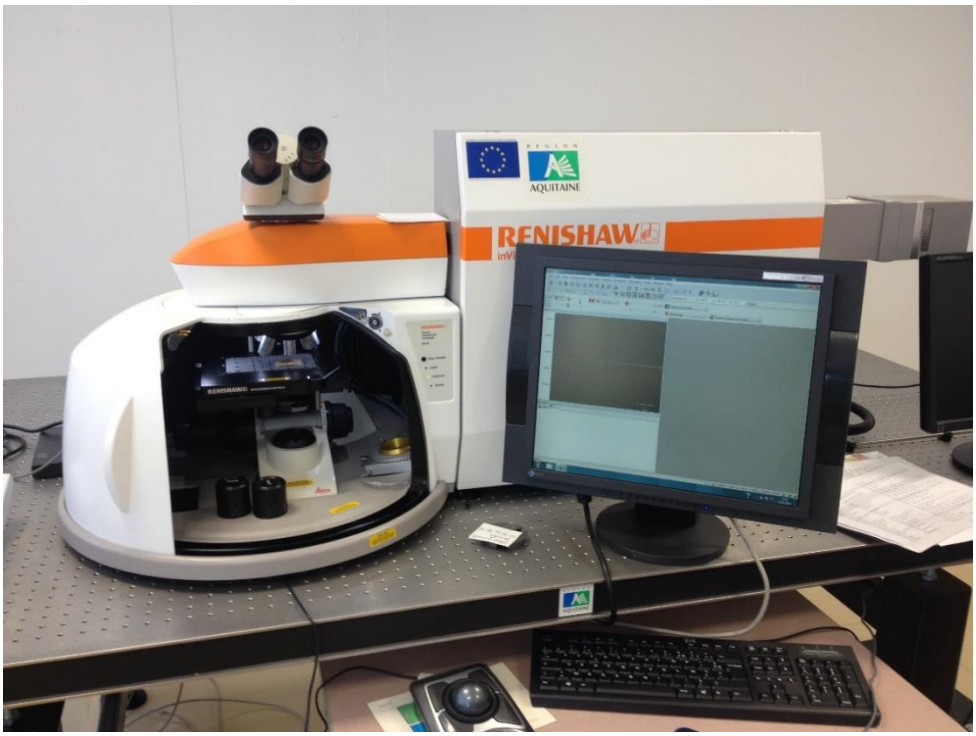


Figure 2-21: Photographie d'un spectromètre de diffusion Raman.

2.8.2.5 Microanalyse X

2.8.2.5.1 Techniques de caractérisation

La microanalyse X à la sonde électronique est une méthode d'analyse chimique à l'échelle du µm^3. Elle consiste à analyser le spectre caractéristique de rayons X générés par un faisceau d'électrons finement focalisé sur l'échantillon. On distingue :

- Le microanalyseur X à sonde électronique, dénommée « microsonde de Castaing », qui utilise des spectromètres de rayon X à cristaux monochromateurs (spectromètres à dispersion de longueur d'onde WDS pour *Wavelength Dispersive Spectrometer*), mais également une imagerie électronique par balayage (Ruste, 2009b).
- La microanalyse X en tant que complément analytique des microscopes électroniques et qui utilise surtout des spectromètres de rayons X à détecteur solide dit spectromètre à sélection d'énergie (EDS) (Ruste, 2009b).

La microanalyse X à la sonde est l'observation et la caractérisation de la microstructure des sols et des roches par analyse des signaux transmis par un échantillon sous l'effet du bombardement d'un faisceau d'électrons (électrons secondaires, rétrodiffusés, RX). L'analyse au MEB combinée à la microanalyse X permet de caractériser l'arrangement des grains et des vides ainsi que les différents minéraux présents.

Le principe de la méthode est détaillé en Annexe 2-4

Le choix et la préparation des échantillons ont été réalisés avec beaucoup de soin afin qu'ils soient représentatifs du bloc ou de la formation à caractériser. Les échantillons étant granulaires résiduels (latérite), les essais ont été réalisés sur la fraction fine $C_{80\ \mu m}$ légèrement remaniée. L'échantillon est soumis à un vide poussé, puis bombardé par un faisceau d'électrons. La réponse de l'échantillon au bombardement d'électrons est restituée sous forme d'images (exemple de cliché MEB en Figure 2-23) ou de spectre (exemple de spectre en Figure 2-22).

Les résultats obtenus grâce à la microanalyse X ont été exploités et interprétés de deux manières :

- A) En réalisant des tirs en « ponctuel » ou sur une fenêtre réduite « reduced scan » sur les différentes phases qui paraissent pertinentes sur le cliché obtenu en imagerie MEB. Nous obtenons ensuite des spectres (Figure 2-22) correspondant au signal des différents atomes caractérisant la zone de tir.

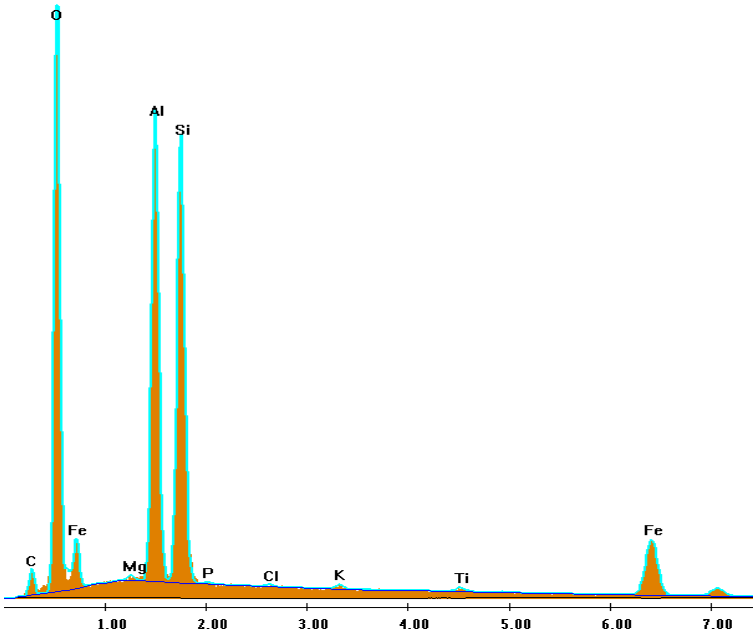


Figure 2-22: Exemple de spectre recueilli à l'EDS faisant apparaître les atomes contenus dans l'échantillon analysé.

B) En réalisant des cartographies X 2D. Dans ce type d'acquisition, « l'abondance » de chaque élément chimique est disponible en chaque pixel de la zone balayée par le faisceau primaire sous la forme de cartographies élémentaires. En outre comme un spectre X-EDS complet peut être acquis en chaque pixel, on peut a posteriori procéder à une reconstitution de phases (minérales) via une approche statistique qui permet d'apprécier l'arrangement / association des différents minéraux de l'échantillon.

Sur la Figure 2-23, un cliché en électrons rétrodiffusés en mode BSE (ci-après BSE pour *Back Scattered Electrons*) pris au GAD (*Gaseous Analytical Detector*) de la zone retenue pour la cartographie 2D en microanalyse X à l'EDS (*Energy Dispersive Spectrometer*).

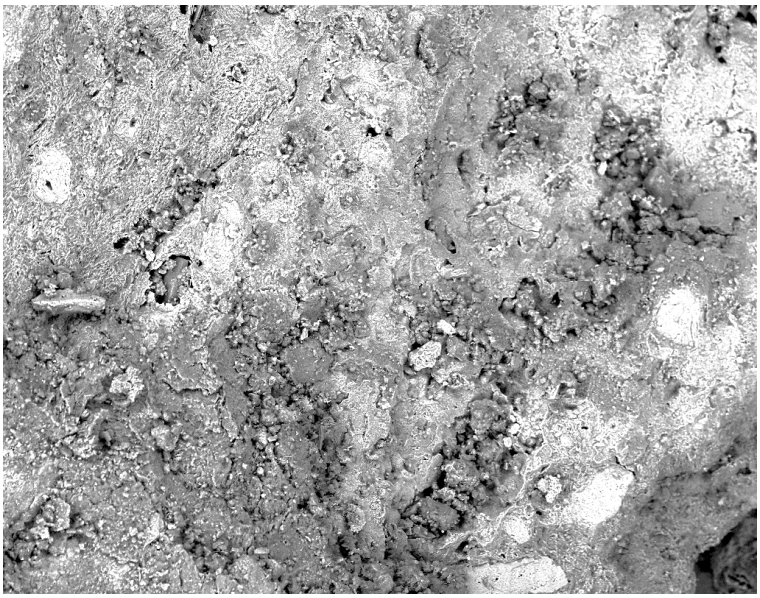


Figure 2-23: Vue à x 900 en BSE (électrons rétrodiffusés) au GAD (contraste de topographie et de numéro atomique Z). Taille de l'image : 366 x 286 µm. Cliché recueilli sur un échantillon latéritique de Tillabéry.

Le spectre moyen (Figure 2-24) recueilli à partir du cliché ci-dessus (Figure 2-23) a fait ressortir approximativement tous les atomes constituant les phases minérales (silice, sesquioxydes et argiles) de la zone à cartographier comme nous pouvons le voir sur le spectre.

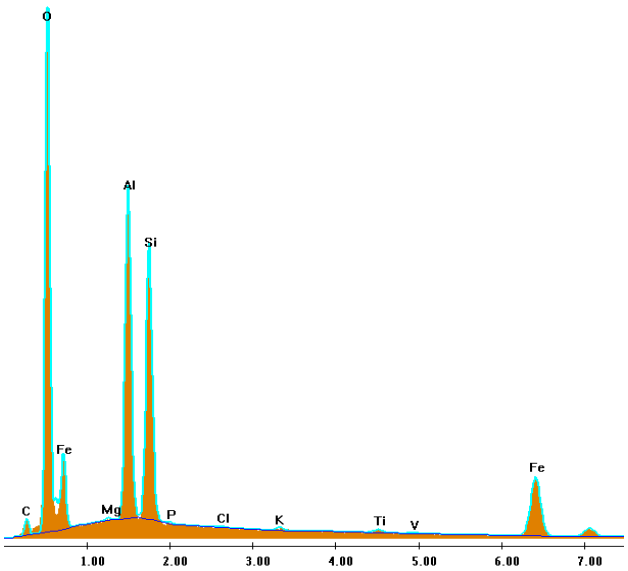


Figure 2-24: Spectre EDS moyen enregistré sur la surface entière du cliché de la Figure 2-23.

L'ensemble des éléments identifiés sur le spectre moyen de la Figure 2-24 permet d'établir des cartographies élémentaires en 2D pour tous les éléments détectés à l'EDS (Figure 2-25). La cartographie des différents éléments présents sur la vue de la Figure 2-23 (à l'exception des atomes Cl et S présents en traces très diffuses). Pour chaque élément, au plus la couleur (arbitraire) est vive, au plus l'élément est présent.

Chaque cartographie élémentaire est normalisée entre 0 et 255 (8 bits) à partir du nombre de coups vu par le pixel où l'élément est le moins présent et du nombre de coups vu par le pixel où l'élément est le plus présent. En d'autres termes, l'intensité d'une couleur ne se compare pas d'une cartographie à l'autre. Les zones noires (0) des cartographies élémentaires cf e.g., Figure 2-25 sont des zones où l'élément chimique d'intérêt n'est pas présent. En mode cartographie, outre les cartographies élémentaires rapportées sur la Figure 2-25, on enregistre en chaque pixel le spectre (ponctuel) EDS complet. L'ensemble des spectres peut être, *à postériori*, analysé d'un point de vue statistique. Cet exercice constitue l'analyse en composition / reconstitution de phases. La démarche consiste à identifier N classes de spectres. Chaque classe de spectres est représentée par son spectre type et l'appartenance du spectre local mesuré en tout pixel à une classe donnée (appartenance exclusive) se fait au sens d'un critère de similarité (au sens statistique du terme).

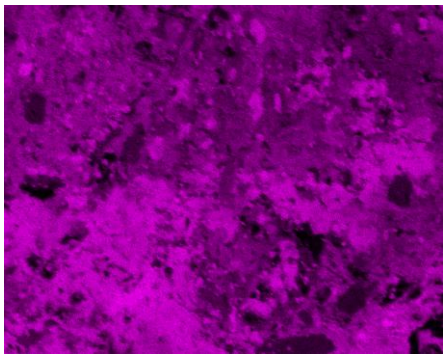


Figure 2-25.a) Raie K de Al : Al_K

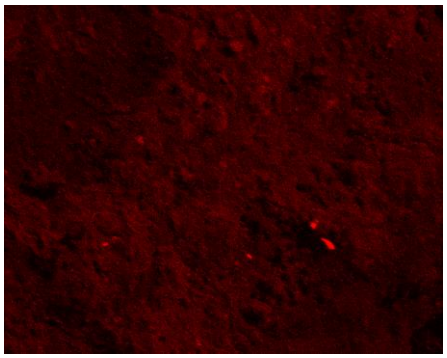


Figure 2-25.b) Raie K de C : C_K

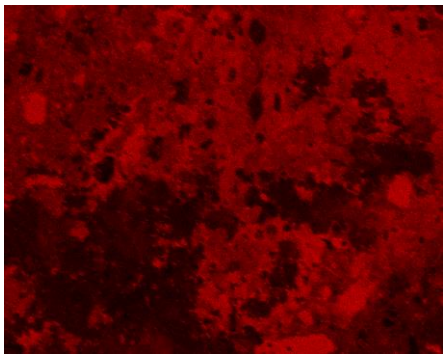


Figure 2-25 c) Raie K de Fe : Fe_K

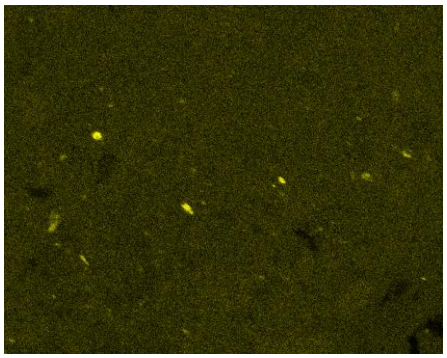


Figure 2-25.d) Raie K de K : K_K

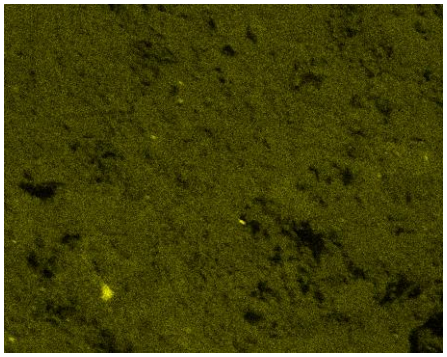


Figure 2-25.e) Raie K de Mg : Mg_K

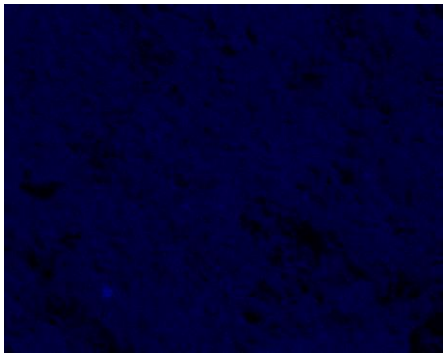


Figure 2-25.f) Raie K de Na : Na_K

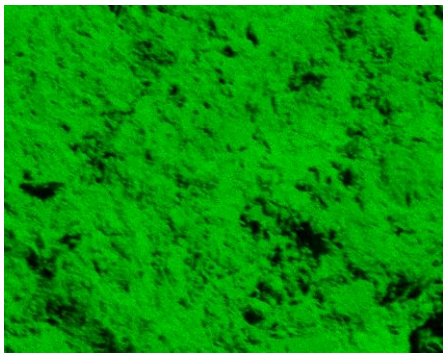


Figure 2-25.g) Raie K de O : O_K

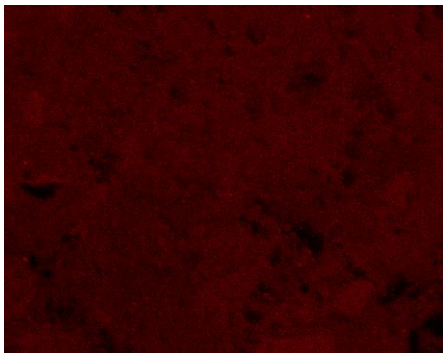


Figure 2-25.h) Raie K de P : P_K

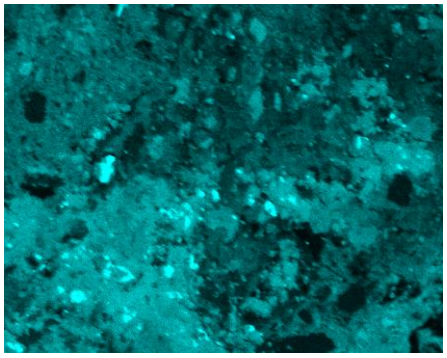


Figure 2-25.i) Raie K de Si : Si_K

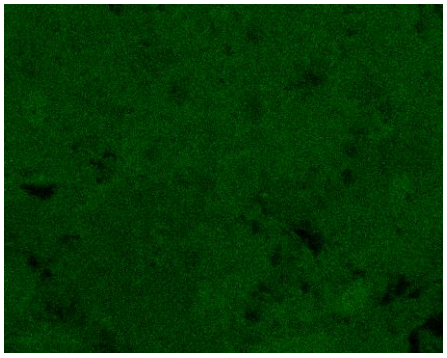


Figure 2-25.j) Raie K de S : S_K

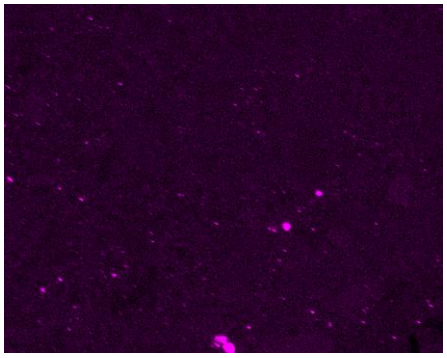


Figure 2-25.k) Raie K de Ti : Ti_K

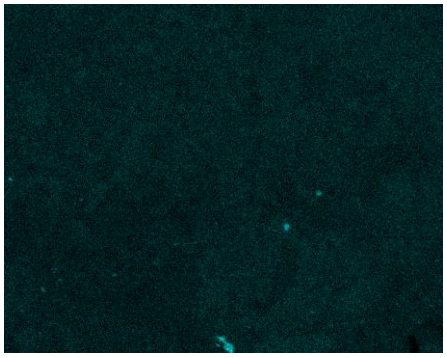


Figure 2-25.j) Raie K de V : V_K

Figure 2-25: Cartographies élémentaires des différents éléments chimiques identifiés sur le spectre EDS moyen (Figure 2-24) mesuré sur la Figure 2-23 (site de Tillabéry).

La Figure 2-26 est la reconstitution de phases minérales obtenue à partir de l'analyse statistique des données spectrales (spectres EDS) acquises en chaque pixel de la Figure 2-23.

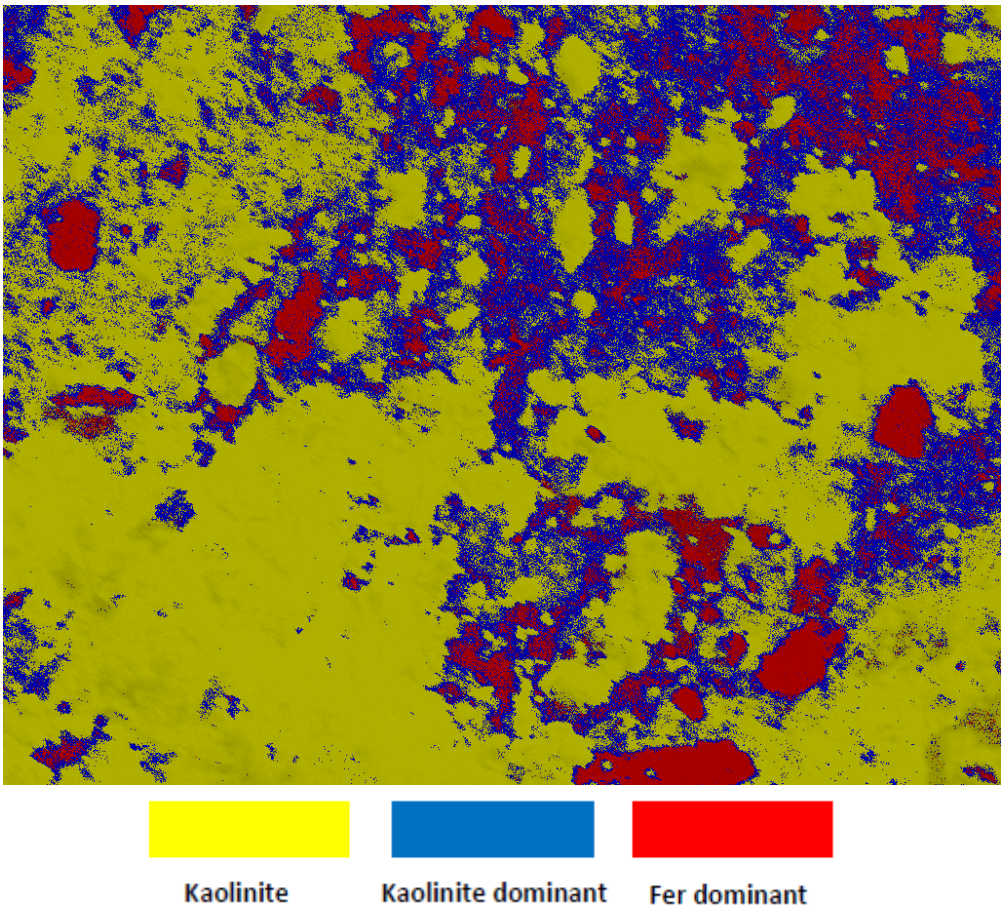


Figure 2-26: Reconstitution statistique de phases tirée de l'analyse à l'EDS en mode cartographie de la Figure 2-23 (site de Tillabéry). La phase jaune qui couvre 61.5% de la surface est dominée par la kaolinite. La phase rouge (11% de la surface) est la plus riche en oxydes de Fe et Al (goethite et gibbsite). La phase bleue (28% de la surface est intermédiaire).

2.8.2.5.2 Analyse quantitative

La détermination du titre massique (%) de chaque élément présent sur un spectre EDS est l'opération de quantification. Nous avons utilisés ici la méthode ZAF sans standards. Cette méthode permet pour un élément ad hoc (appelons le B) de relier l'intensité brute I_B du signal X collecté sur le détecteur de l'EDS au titre massique (ou encore concentration massique par abus de langage) de l'élément A (C_B) en appliquant une correction de matrice ZAF prenant en compte les effets liés au numéro atomique Z de l'élément, à l'absorption (A) et à la fluorescence (F). Dans tout ce qui suit, le titre massique est exprimé en pourcentage atomique (At %).

2.8.2.5.3 Interprétation minéralogique de la quantification At % d'un spectre X-EDS

On présente ici sur une base intuitive d'interpréter en terme de minéralogie d'un spectre EDS dont la composition élémentaire (At %) globale a été quantifiée par exemple par la méthode ZAF. Si le spectre EDS reflète un minéral pur, l'exercice est généralement aisé. En cas de mélange de plusieurs minéraux « candidats », l'idée est de commencer l'interprétation à partir d'un élément chimique qu'on ne trouve que dans un minéral du mélange « à tester ». Supposons que cet élément soit le titane (Ti) dans du rutile (TiO_2).

Connaissant le % At de Ti, on déduit via la stœchiométrie du rutile la fraction du %At de l'oxygène total du spectre EDS lié à la présence de rutile. On déduit alors la proportion surfacique en divisant (par exemple) le % At de Ti du spectre par le pourcentage de Ti qu'on aurait si l'échantillon n'était fait que de rutile (soit 33.33%). Et on itère le processus en considérant un autre minéral dont on suppose la présence.

Pour certains mélanges complexes (mélanges d'argiles par exemple) l'exercice peut devenir hasardeux et on a souvent besoin de techniques complémentaires, par exemple la spectroscopie Raman, pour guider et orienter l'interprétation minéralogique. Dans certains cas, l'identification de l'ensemble des minéraux formant un mélange avec l'occupation surfacique de chaque composante peut s'avérer impraticable, nécessitant de refaire une acquisition EDS sur une zone plus simple.

À titre d'exemple la Figure 2-27 montre un spectre EDS et sa quantification At % associée (méthode ZAF) relatif à un échantillon de Torodi. L'interprétation minéralogique conduit à un mélange de 60% de silice (SiO_2), 33% de kaolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) et 7% de goethite FeO(OH).

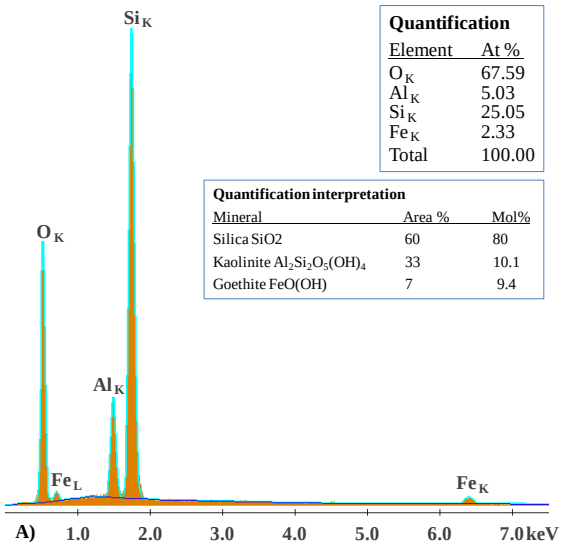


Figure 2-27: Interprétation minéralogique d'un spectre EDS relatif au site de Torodi quantifié (At %) par la méthode ZAF.

2.8.2.6 Analyse Thermo-Différentielle (ATD) / Analyse Thermo-Gravimétrique (ATG)

2.8.2.6.1 Analyse Thermo-Différentielle (ATD)

L'analyse thermique différentielle permet de mettre en évidence la quantité de chaleur dégagée (réaction exothermique) ou absorbée (réaction endothermique) lors des différentes transformations chimiques et minéralogiques pouvant se produire au cours de la cuisson (frittage) d'un échantillon (Millogo et al., 2008).

En ATD, 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 DRX, l'ATD constitue un moyen privilégié d'identification qualitative des constituants d'un échantillon. D'une manière générale, les réactions endothermiques (DT<0) correspondent successivement au départ de l'eau absorbée, de l'eau inter-foliaire et de l'eau de cristallisation. Les réactions exothermiques (DT>0) correspondent à la formation de nouveaux minéraux (néocristallisation).

2.8.2.6.2 Analyse Thermo-Gravimétrique (ATG)

La thermogravimétrie couplée à la spectrométrie de masse fournit une indication précise et globale sur la masse des départs de matière en fonction de la température et du temps ainsi que sur la nature précise de ces départs. En effet, les molécules gazeuses formées sont ionisées puis séparées en fonction de leur masse. Nous pouvons ainsi remonter aux masses molaires des molécules à l'origine des départs de masses mesurées (Millogo, 2008). Un exemple de courbes ATD-ATG est illustré à la Figure 2-28.

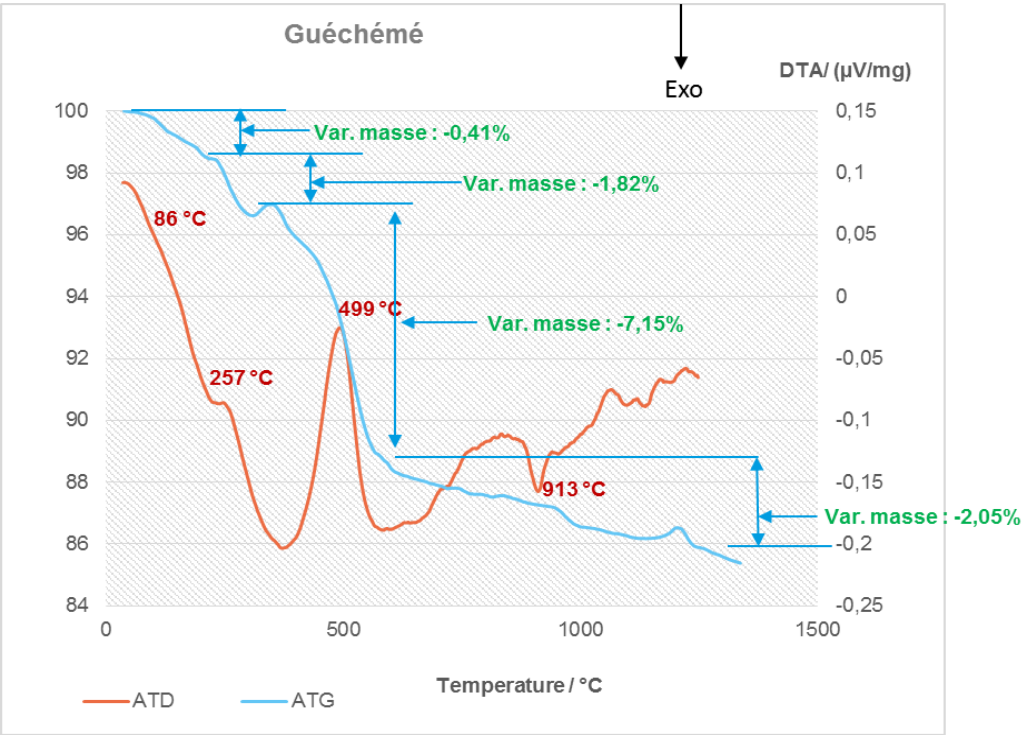


Figure 2-28: Exemple de spectres ATD-ATG du site d'étude de Torodi.

Les analyse ATD-ATG/Sm ont été réalisées à l'Institut des Sciences Moléculaires (ISM – UMR – 5255 – Groupe C2M) à l'université de Bordeaux avec l'aide de Mme Odile BABOT.

Le système de mesure est composé :

- ✓ d'une thermobalance : STA 409 Netzsch équipée d'un thermocouple Type S Tmax : 1500°C supportant des creusets en céramique de 50µl, balayé, à raison de 60ml/mn, par de l'Argon Alphagaz 2 (Air Liquide). Le gradient de température programmé est de 10°/mn sur une plage de température allant de 30 à 1300°C.
- ✓ d'un spectromètre de Masse : ThermoStar de Balzers (0-300 amu) de type quadripôle (ligne de transfert chauffée à 190°C).

2.8.2.7 Analyse chimique par dosage des éléments majeurs et mineurs

Selon Schellmann (1986) les sols latéritiques sont des produits d'une intense altération contenant de fortes quantités d'oxydes de fer et d'aluminium et de faibles quantités de silice. Les oxydes de fer et d'aluminium constituent donc les minéraux les plus abondants. Schellmann considère que le rapport de $SiO_2/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ doit être le plus faible possible pour que le sol soit réellement considéré comme latéritique. Les analyses chimiques ont donc consisté à l'estimation de ces composés chimiques par le dosage des éléments majeurs et mineurs afin d'estimer via le ratio S/R le degré de latéritisation du profil étudié. Pour chaque site, la silice et les sesquioxydes sont quantifiés et utilisés pour le calcul de ce rapport. Ce rapport au final permet de comprendre le degré de latéritisation de chaque site étudié. Le ratio S/R est également utilisé en combinaison avec d'autres grandeurs pour permettre une interprétation claire de certains phénomènes observés.

2.9 Synthèse sur la caractérisation mécanique et minéralogique

La méthodologie générale de caractérisation suppose de mener des investigations sur 3 principaux aspects différents mais complémentaires (Tableau 2-2) :

Tableau 2-2: Méthodologie générale de caractérisation.

<table>
<tr><th colspan="8">Méthodologie générale de caractérisation</th></tr>
<tr><th colspan="2">Caractérisation de la composition minéralogique</th><th colspan="5">Caractérisation géotechnique et mécanique</th><th rowspan="3">Facteurs environnementaux</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Détermination des espèces minérales</td><td rowspan="2">DRX</td><td colspan="3">Géotechnique</td><td colspan="2">Mécanique</td></tr>
<tr><td>C80µm</td><td rowspan="8">Granulométrie</td><td rowspan="9">Classification</td><td rowspan="2">e0</td><td rowspan="8">Caractéristiques de compressibilité</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Confirmation de la présence des principales espèces minérales</td><td rowspan="2">ATD/ATG/Sm</td><td>C2µm</td><td>ɣh</td></tr>
<tr><td>Dmax</td><td>ɣd</td><td>Géologie</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Description de la texture</td><td rowspan="2">Optique</td><td>C2mm</td><td>K</td><td>Pédologie</td></tr>
<tr><td>C5mm</td><td>Cc</td><td>facteurs morphologiques</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Description de la microstructure</td><td rowspan="2">MEB</td><td>Cc</td><td>Cg</td><td>Pluviométrie</td></tr>
<tr><td>Cu</td><td>σ'p</td><td>Roche mère</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Evaluation des espèces chimiques et leur combinaisaon</td><td rowspan="2">Microanalyse X</td><td rowspan="2">LL</td><td rowspan="3">Plasticité</td><td>φ'</td><td rowspan="6">Carctéristiques de cissaillement et comportement</td><td>Température</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Différenciation de phases minérales</td><td rowspan="2">Spectroscopie Raman</td><td>IP</td><td>C'</td><td>Modelé</td></tr>
<tr><td>ɣdopm</td><td colspan="2" rowspan="3">Compactage - Portance</td><td>Comportement</td><td>Drainage</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Evaluation de du degré de latéritisation</td><td rowspan="2">S/R</td><td>Wopm</td><td>Dilatant</td><td>Densité</td></tr>
<tr><td>ICBR</td><td>Contractant</td><td>Couleur</td></tr>
</table>

- ✓ On s'intéresse dans un premier aux facteurs environnementaux : le but principal est de réunir un maximum d'informations sur les données générales in-situ. Il s'agit principalement de déterminer le contexte géologique du site en question et de trouver des renseignements sur les caractéristiques pédologiques nécessaires à l'explication des processus de genèse du gisement concerné.

L'altération, de la roche mère jusqu'à la formation des sols latéritiques étant graduelle, certains indices tels que la morphologie, la température, le modelé, la densité, la couleur, etc. peuvent être utiles à leur description. La litho-dépendance des sols latéritiques est de nos jours acceptée et validée. Ces informations s'avèrent donc nécessaires pour vérifier un éventuel lien entre le produit latéritique et la roche primitive sous-jacente.

- ✓ Après l'étude en place, un échantillonnage représentatif permettra d'obtenir des sols représentatifs afin de mettre en place un programme expérimental rigoureux en laboratoire qui puisse permettre une assez bonne caractérisation du gisement concerné. Le programme comprend à la fois les essais géotechniques et mécaniques. Les essais géotechniques ont pour vocation principale de déterminer les propriétés usuelles prises en compte dans la conception et la réalisation des couches de chaussées. Les plus importantes sont la granulométrie, la plasticité et la portance. La combinaison des critères de granulométrie et de plasticité sont nécessaires à la classification des sols favorisant une estimation efficiente de leur comportement. Les essais de portance permettent d'évaluer les performances des matériaux afin de définir leur aptitude en construction routière. Les essais mécaniques constituent un moyen de fournir des informations supplémentaires sur le comportement des sols considérés vis-à-vis d'autres types de sollicitation induites par les charges d'exploitation. Ils permettent tout de même d'appréhender les effets d'attrition des graveleux latéritiques lorsque certains niveaux de contraintes sont dépassés. L'ensemble des données géotechniques et mécaniques peuvent enfin être combinées pour vérifier une éventuelle corrélation et tirer d'informations utiles sur les caractéristiques des graveleux latéritiques.

- ✓ Les paramètres mécaniques et géotechniques seront ensuite validés par les des analyses fines basées sur une investigation pluridisciplinaire. Les échantillons de sol latéritique dont les propriétés mécaniques et géotechniques sont évaluées seront utilisés pour déterminer leur composition minéralogique. Les investigations commencent d'abord par l'estimation des espèces minérales à l'aide de l'analyse DRX. Les divers composés minéraux sont ensuite quantifiés. L'identification de certains minéraux n'apparaissant pas clairement à la DRX a été rendue possible par les analyses ATD/ATG couplées à la spectrométrie de masse. Ces analyses sont qualitatives et permettent de valider la présence de certaines phases minérales. La description de la structure et la morphologie est effectuée par les analyses au microscope optique qui permet une meilleure description macroscopique des échantillons. Cependant, le caractère limité de la microscopie optique justifie l'utilisation de la microscopie électronique à balayage qui permet une description plus poussée de la microstructure et permet le choix de zones judicieuses pour la microanalyse X. Néanmoins, le MEB et la microanalyse ne suffisent pas à différencier certaines formes de minéraux principalement les sesquioxydes. Cette lacune est comblée par la spectroscopie Raman qui permet une nette discrimination des minéraux polymorphes. Enfin le degré de latéritisation du gisement étudié peut être évalué par le ratio S/R dont l'estimation est basée sur le dosage des éléments majeurs et mineurs contenus dans les sols latéritiques.

2.10 Conclusion

La caractérisation des échantillons latéritiques comprend dans un premier temps, des investigations réalisées sur le terrain dans le but d'effectuer des mesures en place et la description du modelé de la zone retenue pour l'étude ainsi qu'une brève description de l'environnement immédiat du site latéritique. Les échantillons sont prétraités au laboratoire conformément aux modes de prétraitement recommandés.

La procédure expérimentale de caractérisation des sols latéritiques est établie de manière à dégager dans un premier temps le maximum d'informations sur les profils latéritiques étudiés notamment le relief, le mode de drainage, les facteurs pédologiques, le degré de cuirassement, la végétation…etc., et les facteurs entrant dans les processus de latéritisation des gisements latéritiques. Cette étude in-situ permet également d'affiner le choix des zones d'investigation pour permettre une étude représentative du gisement.

Les essais géotechniques fournissent les résultats nécessaires à la caractérisation du comportement mécanique des échantillons. Ces essais permettent également d'estimer grossièrement l'aptitude des sols en application routière. Une analyse statistique portée sur ces paramètres géotechniques permettra de déterminer les différents assemblages de propriétés géotechniques influençant ou non leur capacité portante lorsqu'ils sont compactés en couches de chaussée. Les résultats issus des essais mécaniques (compressibilité et cisaillement) permettront de confirmer ou d'infirmer l'impact de la variabilité des propriétés géotechniques prises individuellement ou en combinaison sur la variabilité de la portance de ces sols en référence aux critères granulométriques, de plasticité et l'argile caractéristique de la matrice.

Il arrive que l'exploitation des résultats des essais géotechniques et mécaniques ne suffise pas à dégager des tendances claires sur le comportement des sols étudiés. Une façon plus judicieuse de conforter les tendances moyennement établies par le biais des résultats géotechniques et mécaniques serait donc de déterminer parallèlement leur composition minéralogique.

Pour cela, plusieurs techniques de caractérisation ont été combinées. L'étude pétrographique effectuée sur les lames minces au microscope optique permet de donner une appréciation globale sur la texture des échantillons ainsi que leur composition minéralogique grossière. Les analyses ATD/ATG couplées à la spectrométrie de masse permettent à titre qualitatif de différentier et préciser certaines phases minérales non dissociables sur les lames minces.

La liste presque exhaustive des différents minéraux ainsi que leurs teneurs est établie grâce aux analyses DRX réalisées sur des poudres d'échantillon latéritique. Une analyse plus fine de la microstructure (description des vides, arrangement et combinaison des phases, etc.) est obtenue grâce à la microanalyse X effectuée au MEB. Ces données obtenues sur la minéralogie des échantillons sont reliées aux caractéristiques mécaniques et géotechniques afin d'évaluer les processus ou éléments liés à la variabilité de la portance des sols latéritiques.

Par ailleurs, il a été constaté que les propriétés des sols latéritiques dépendent dans beaucoup des cas du degré de latéritisation du profil latéritique. Les résultats obtenus des analyses chimiques par dosage des éléments majeurs et mineurs permettent d'estimer les quantités de silice et sesquioxydes utilisés pour estimer le ratio S/R. La valeur du ratio S/R permet à son tour de fournir des éléments d'appréciation sur le degré de latéritisation du gisement dans lequel l'échantillon a été prélevé.

De manière générale, la caractérisation des graveleux latéritiques sur la base de plusieurs approches permet de déterminer des résultats qui se complètent et qui fournissent *in fine* des tendances cohérentes sur l'explication des facteurs influençant leurs propriétés géotechniques et mécaniques.

CHAPITRE III

PROPRIETES GEOTECHNIQUES ET MECANIQUES

3 CHAPITRE III : PROPRIETES GEOTECHNIQUES ET MECANIQUES

3.1 Introduction

Les graveleux latéritiques selon Aubert (1954), sont des sols issus d'un phénomène d'altération extrêmement poussé de la roche mère. Durant le processus de dissolution de celle-ci, on assiste à une individualisation d'éléments tels que la silice, les oxydes et hydroxydes métalliques, en particulier de fer, d'aluminium, de manganèse et de titane. Le sol latéritique obtenu à la fin de ce processus contient aussi bien des éléments néoformés que des minéraux originels de la roche mère. La genèse des graveleux latéritiques est tributaire des facteurs du milieu. De nombreux auteurs (Maignien, 1966 ; Gidigasu, 1983 ; Faniran et Jeje, 1983 ; Wilson, 1986 ; Adeyemi, 1992 ; Adebisi, 1999 ; Attoh-Okine, 2004) ont expliqué les différents processus d'altération par l'eau et d'autres agents de la roche mère lors de la genèse des profils latéritiques. Le type et la teneur des éléments compositionnels de la roche et les éléments chimiques néosynthétisés retrouvés dans les sols latéritiques conditionnent leurs propriétés géotechniques et mécaniques. Du point de vue pédologique, les travaux de MacFarlane (1991) sur les latérites d'Ouganda ont montré qu'ils peuvent se retrouver bien à l'état résiduel (sol latéritique à l'aplomb de la roche mère altérée) qu'à l'état détritique (après transport et dépôt). Cela sous-entend donc que les sols détritiques peuvent ne donc pas avoir de lien génétique avec la roche sous-jacente. De manière générale, l'ensemble de tous ces facteurs font que deux sols latéritiques de caractéristiques texturales communes peuvent être très dissemblables en termes de propriétés géotechniques. Les échantillons latéritiques, prélevés dans l'horizon B d'accumulation des sesquioxydes ont été soumis aux essais géotechniques et mécaniques afin de déterminer les principales propriétés permettant l'identification des différentes classes de sol et déterminer leur aptitude en utilisation de couches de chaussée. De fortes dispersions ont été obtenues sur les résultats géotechniques. Une recherche de corrélations linéaires entre les propriétés deux à deux constitue un moyen privilégié pour déterminer les éventuelles relations existant entre celles-ci. L'étude de corrélation sera ensuite complétée par la détermination de classes de fréquence des propriétés couramment prises en compte pour la sélection des graveleux latéritiques en construction routière. Nous pourrons ensuite effectuer une recherche d'interconnexions multiples des variables à travers une analyse en composantes principales (ACP). L'analyse ACP permet de dégager une approche conceptuelle de la variabilité des propriétés géotechniques des graveleux latéritiques étudiés. Cette étude pourrait en fonction de la pertinence des résultats obtenus permettre de dégager l'impact de la variabilité des propriétés géotechniques sur la portance. Il faut noter que les deux paramètres fondamentaux pour le dimensionnement d'une couche de chaussée sont : le trafic et la capacité portante du sol d'assise (CEBTP, 1984). Le trafic est le plus souvent estimé après plusieurs campagnes de comptage. L'indice CBR est quant à lui estimé par le biais d'un essai de laboratoire normalisé. L'étude s'est donc faite en référence à la variabilité de l'indice de portance CBR en fonction des autres propriétés géotechniques.

3.2 Procédures de caractérisation géotechnique

Les propriétés géotechniques et mécaniques des graveleux latéritiques de la partie Sud-ouest du Niger sont présentées dans ce chapitre. Ces propriétés sont les principaux éléments considérés pour la sélection des graveleux latéritiques en travaux d'aménagement routier. Par ailleurs, il est admis que la mise en place des gisements latéritiques dépend dans une large mesure de la géologie et des facteurs pédogénétiques. Pour ces raisons, l'échantillonnage a été effectué en prenant en compte le contexte géologique des gisements latéritiques étudiés et les descriptions pédologiques. Il est admis que les classifications pédologiques corrélées aux propriétés géotechniques (Lyon Associates, 1971 ; Gidigasu, 1976) permettent une meilleure appréciation du comportement des graveleux latéritiques. Il a été tout de même constaté que les termes pédologiques sont les plus appropriés pour différencier les diverses catégories regroupées sous le même vocable de « sols latéritiques ». Les investigations sur site et en laboratoire ont consisté à faire un échantillonnage représentatif des graveleux latéritiques après un maillage du terrain dans l'horizon B d'accumulation des oxydes de fer et d'aluminium. Les essais réalisés en laboratoire concernent la distribution granulométrique des graveleux latéritiques, leur plasticité via les limites d'Atterberg, la densité des grains solides, les caractéristiques de compactage, l'indice California Bearing Ratio (ICBR) et les caractéristiques mécaniques. Le mode d'échantillonnage et les procédures d'essais sont les mêmes pour tous les gisements latéritiques retenus pour notre étude. Les résultats ainsi obtenus permettent une interprétation cohérente du comportement de ces sols vis-à-vis des sollicitations extérieures.

Les essais au bleu de méthylène auraient pu être inclus dans le programme expérimental mis en place. L'avantage de tels essais est l'accès à des propriétés permettant la caractérisation et la classification des échantillons de sol. L'essai de bleu (VBS) dont le mode opératoire est décrit par la norme NF P 94-068 consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être absorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau, notamment l'absorption par les particules argileuses. Cependant, cet essai n'a pas été réalisé car des études (Alexander & Tardy, 1962 ; Lyon Associates, 1971 ; Autret, 1980) ont montré qu'il n'est pas bien adapté aux sols latéritiques. Ces études indiquent que le bleu de méthylène n'est pas uniquement absorbé par les particules argileuses mais aussi par les colloïdes d'oxydes de fer en suspension dans la solution. La prise en compte d'un tel paramètre, biaisé pour un sol latéritique ne peut conduire qu'à une interprétation erronée. Nous avons alors préféré les limites d'Atterberg qui permettent d'obtenir des propriétés similaires (principalement pour la classification). Certes, les données de la littérature montrent aussi que les limites d'Atterberg sont également susceptibles d'être impactées par le mode opératoire et le pré-traitement sous réserve de procéder à une technique de réalisation appropriée. Mais il est clair que l'impact sur les limites est moindre comparé à l'essai au bleu. Aussi en évaluant les limites conformément au mode opératoire approprié on parvient le plus souvent à une valeur assez bien reproductible et présentant une faible incertitude.

3.3 Propriétés géotechniques

3.3.1 Granulométrie

Des études ont montré que les caractéristiques granulométriques ont une influence non négligeable sur les propriétés géotechniques des graveleux latéritiques (Odalele et al., 2012; Avwenagha, et al., 2014). La granulométrie est également un critère fondamental pour l'identification et la classification des sols. Conséquemment, une grande importance a été accordée à la distribution granulométrique des latérites. Des études récentes ont révélé que les sols latéritiques sont rigoureusement différents des sols de zones tempérées en termes de genèse et de structure (Lyon Associates, 1971). La structure concrétionnaire des latérites constitue une différence sensible par rapport à celle des sols de climat tempéré, cela justifie la nécessité d'adaptation de leur caractérisation mécanique et géotechnique (Remillon, 1967). D'importantes études ont été effectuées sur la variabilité des caractéristiques granulométriques en fonction des méthodes de prétraitement. Schofield (1957) a trouvé que le tamisage par voie humide augmente la fraction limoneuse et argileuse de 7 à 20% comparée à la méthode par voie sèche. Cependant, la plupart des études (Gidigasu, 1972 ; Bagarre, 1990) montrent que la méthode de prétraitement par séchage à l'air ambiant et le tamisage par voie humide offrent des résultats plus cohérents.

La suite de l'analyse granulométrique (%Passants < $C_{80\mu m}$) a été réalisée via l'essai de sédimentométrie. Il faut noter que la méthode de séchage de l'échantillon affecte l'essai de sédimentométrie également. Ainsi, les sols latéritiques présentent une fraction argileuse plus faible lorsqu'ils sont séchés à l'étuve en comparaison à la méthode de séchage à l'air ambiant (Terzaghi, 1958 ; Nascimento, 1959 ; Novais-Ferreira & Correia, 1965 ; Moh & Mazhar, 1969). La réduction de la fraction argileuse s'accompagne de l'augmentation de la fraction limoneuse et sableuse résultant de l'enrobement et la cimentation des particules argileuses par les oxydes de fer, principalement dans les cortex.

L'analyse granulométrique des échantillons, effectuée selon la norme NF P 94-056 a permis de déterminer des paramètres tels que le pourcentage de passants à 80 µm, à 0,5 mm, à 2 mm et à 5 mm correspondant respectivement à la fraction fine, au mortier, à la fraction sableuse et à la fraction graveleuse. Les coefficients d'uniformité C_u et de courbure C_c ont également été estimés sur les courbes granulométriques.

3.3.1.1 Interprétation des résultats de l'analyse granulométrique

Dans le Tableau 3-1 sont regroupées les valeurs moyennes des paramètres d'état et les résultats des caractéristiques granulométriques. L'ensemble des valeurs obtenues de l'analyse granulométrique sont regroupées par site en Annexe 3-1. Les propriétés telles que la teneur en eau et le diamètre maximal des grains (D_{max}) font ressortir une dispersion notable. Les teneurs en eau naturelles des échantillons de sol varient de 3,7 à 10,5% et le diamètre maximal de 33 à 55 mm. L'utilisation des graveleux latéritiques présentant un diamètre maximal supérieur à 20 mm favorise dans la plupart des cas une hétérogénéité au sein du remblai compacté et donc une détérioration précoce des couches de chaussée.

Les échantillons provenant de Ouallam et Fillingué présentent des éléments plus grossiers, 52 mm en moyenne et ceux de Tillabéry, Say et Guéchémé, un D_{max} relativement faible, 33 mm en moyenne. Les autres propriétés telles que les pourcentages de passants à 5 et 2 mm varient dans les mêmes proportions. La fraction fine $C_{80\mu m}$ est en moyenne égale à 12% pour les sites de Torodi, Tillabéry, Say, Dosso et Guéchémé. Les valeurs enregistrées sur les échantillons prélevés sur les sites sont dans les ordres de grandeur de fraction fine des graveleux latéritiques ferrugineux (Gidigasu 1972 ; Ogunsanwo, 1988 ; Bagarre 1990, Aginam 2015). La valeur moyenne de la fraction fine est plus élevée pour les échantillons du site de Ouallam ($C_{80\mu m}$ = 17,6%) et largement au-dessus des valeurs recommandées pour le site de Fillingué ($C_{80\mu m}$ = 26%). La forte valeur de la teneur en fines des échantillons de Fillingué s'explique par la nature argileuse dominante de l'horizon latéritique (sable argileux oolithique). Le faciès en place cimenté par les oxydes de fer est dominé par une présence argileuse du CT2 qui constitue une couche d'intercalation entre deux niveaux sableux. Ces horizons, à priori détritiques proviennent du démantèlement des roches éburnéennes entourant le bassin des Iullemmeden (Cf. § 2.3.3.4).

Les coefficients d'uniformité (coefficient de Hazen) C_u et de courbure C_c estimés graphiquement à partir des courbes granulométriques fournissent une information supplémentaire sur la distribution des grains au sein de l'échantillon. Ces sols ont une granulométrie uniforme mais mal graduée. Les résultats obtenus à partir de l'analyse granulométrique indiquent que les sols latéritiques de la zone d'étude présentent une forte variabilité en termes de granulométrie. Cette variabilité fait que parmi ces sols, les uns peuvent sont utilisables en construction routière. Cela n'est pas le cas pour les autres, les critères d'aptitude en termes de granulométrie n'étant pas favorables.

Tableau 3-1: Valeurs moyennes des caractéristiques granulométriques.

Sites	$W_{nat\%}$	D_{max} (mm)	C_{5mm}	C_{2mm}	$C_{0,5mm}$	$C_{80\mu m}$	$C_{2\mu m}$	C_u	C_c
Torodi	6,5	46,7	43,7	32,5	24,0	13,2	8,3	153,7	4,9
Tillabéry	10,5	33,7	44,3	28,7	20,1	12,9	5,3	129,3	5,4
Ouallam	5,4	50,9	54,1	40,6	35,2	17,6	11,6	284,9	3,1
Say	3,7	33	34,5	27,2	23,8	10,3	4,4	137,2	3,7
Fillingué	7,0	54,2	48,4	40,1	35,5	26,0	12,0	304,3	0,9
Dosso	8,7	45,5	34,5	33,6	23,8	11,5	12,5	170,1	5,8
Guéchémé	9,2	34,9	40,0	31,5	27,3	12,2	5,5	138,5	2,9

La fraction argileuse $C_{2\mu m}$ des échantillons a été déterminée par l'essai de sédimentométrie. De cette analyse, deux tendances semblent se dégager avec une première catégorie de sols aux faibles valeurs de fraction fine et l'autre de fraction argileuse élevée. Les valeurs de la fraction argileuse sont faibles pour les sites de Tillabéry, Say et Guéchémé, respectivement 5,3 ; 4,4 et 5,5%.

On peut également constater que la faible teneur en fines n'a pas de lien direct avec la géologie car l'échantillon latéritique de Tillabéry provient d'une zone de socle (produit d'altération de roche granitique) et les sites de Guéchémé et Say sont inscrits dans des formations sédimentaires (Bassin des Iullemmeden). Du point de vue pédologique, l'horizon B des gisements de Guéchémé et de Say présentent des similitudes (sables à oolithes et argiles du CT) mais l'horizon B de Tillabéry comporte une cuirasse latéritique nodulaire. La fraction argileuse est plus élevée pour les autres, de l'ordre de 11% à l'exception du site de Torodi (socle granitique du Liptako) dont la valeur est égale à 8,3% (Tableau 3-1).

3.3.1.2 Interprétation des fuseaux granulométriques

Dans cette section, une comparaison est établie entre les fuseaux granulométriques des échantillons et les fuseaux granulométriques types recommandé par le CEBTP (1984) pour l'utilisation des graveleux latéritiques en couche de fondation et de base. Au total, 60 échantillons provenant de l'ensemble des sites de la zone d'étude ont été soumis à l'analyse granulométrique. Le nombre d'échantillons prélevés varie d'un site à l'autre selon la taille du gisement étudié (Tableau 3-2). Dans ce tableau, on constatera que le nombre d'échantillons prélevés sur le site de Fillingué est quasiment le double des autres. Cela s'explique tout simplement par son étendue plus importante car la surface du gisement est entièrement maillée avant tout prélèvement afin d'obtenir un échantillonnage représentatif. Le nombre d'échantillons est par conséquent plus élevé. Les courbes granulométriques (branches inférieure et supérieure de l'enveloppe des échantillons de sol) ont été tracées à l'aide des valeurs minimales et maximales des différents tamis utilisés pour l'analyse granulométrique. Cette opération a été effectuée pour chaque site. Globalement, les enveloppes granulométriques des échantillons de sol latéritique (Figure 3-1 et Figure 3-2) ne sont pas correctement inscrites dans le fuseau type recommandé par le CEBTP pour la couche de base. Cependant, on peut constater que les échantillons issus des zones de Tillabéry (formation birimienne : socle du Liptako-Gourma) et Guéchémé (Continental Terminal 3) ont des enveloppes granulométriques presque inscrites dans le fuseau de référence (Figure 3-1).

Pour ces sites, seule la fraction graveleuse (12/20 mm) déborde du fuseau de référence. La branche supérieure de l'enveloppe est quasiment inscrite dans le fuseau type.

Tableau 3-2: Nombre d'échantillons prélevés par site.

Sites	Nbre d'éch. /site
Torodi	7
Tillabéry	8
Ouallam	7
Say	7
Fillingué	16
Dosso	7
Guéchémé	8
Total	60

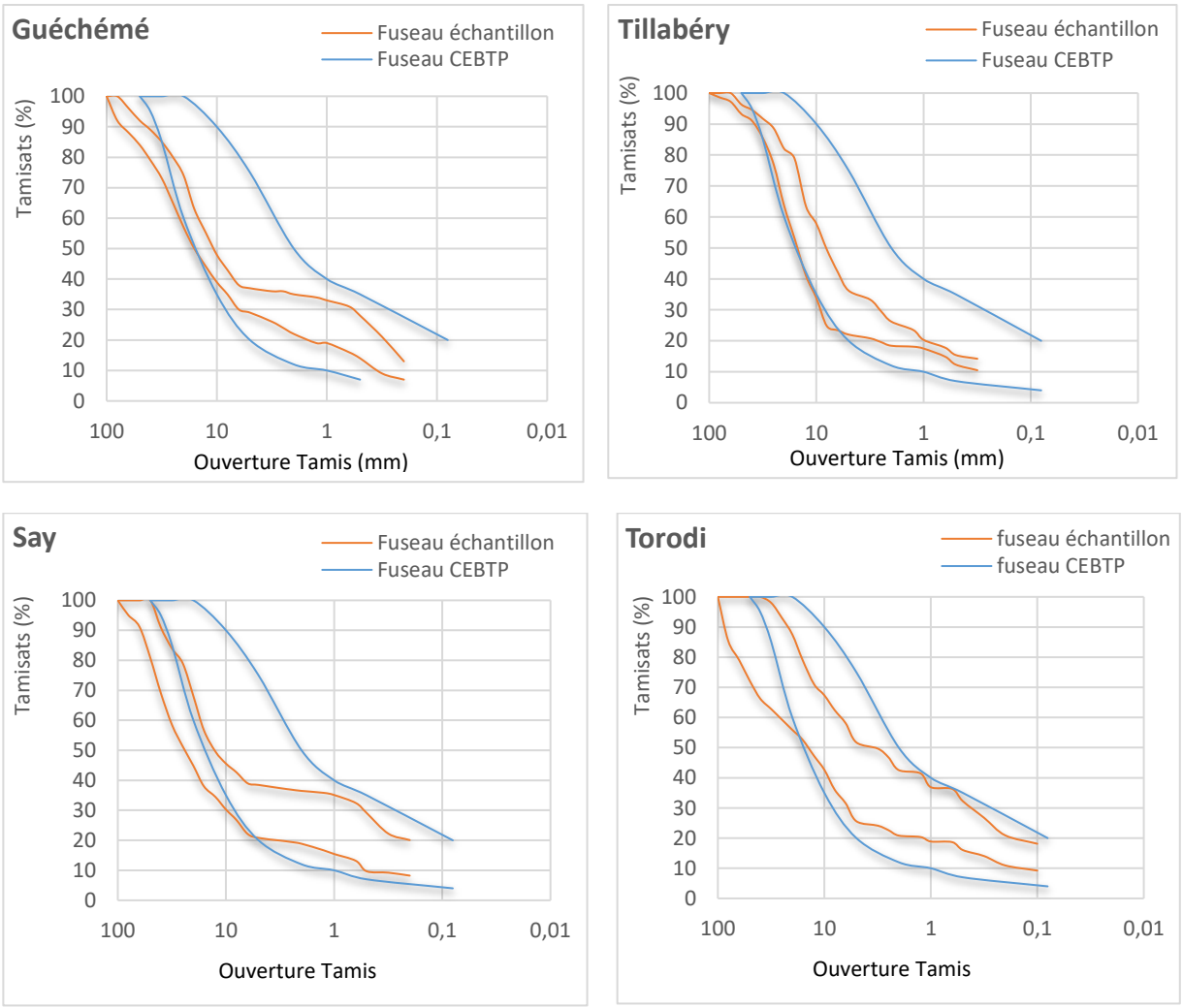


Figure 3-1: Enveloppes des sols relativement bien inscrits dans le fuseau type recommandé par le CEBTP (1984) en couche de base.

Les échantillons provenant des sites de Say (CT1) et de Torodi (socle Birimien) ont présenté une enveloppe quasi similaire aux sols des deux précédents sites mais avec une fraction graveleuse relativement plus élevée faisant significativement déborder la branche inférieure de l'enveloppe hors du fuseau type (Say et Torodi Figure 3-1). La branche supérieure quant à elle est bien inscrite dans le fuseau de référence. La fraction 5/20 mm de la branche inférieure du fuseau des échantillons est pondéralement en surplus.

Les sites de Ouallam, Fillingué et Dosso présentent des différences notables en termes de distribution granulométrique par rapport au groupe précédent (Figure 3-2). Pour ces échantillons, les branches supérieure et inférieure des enveloppes débordent du fuseau de référence. Plus précisément, la partie supérieure de la branche inférieure et la partie inférieure de la branche supérieure débordent du fuseau type. Cela veut dire que les seuils des éléments grossiers et fins vis-à-vis des valeurs recommandées sont soit largement dépassés ou insuffisants aussi bien quantitativement que qualitativement.

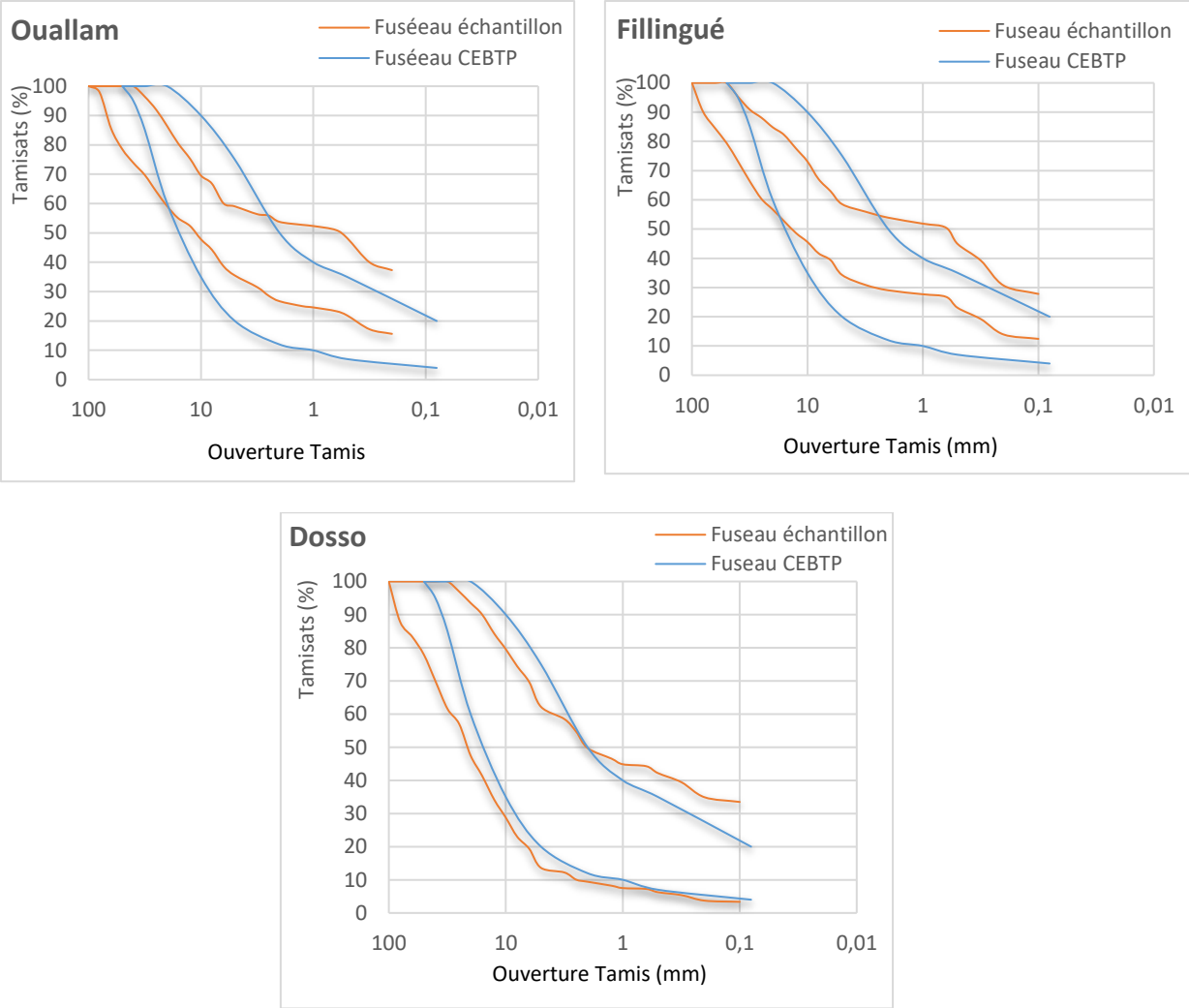


Figure 3-2 : Enveloppes des sols mal inscrites dans le fuseau type recommandé par le CEBTP (1984) pour l'utilisation des graveleux latéritiques en couche de base.

3.3.1.3 Étude des classes de fréquence

La description des caractéristiques granulométriques des échantillons latéritiques est complétée par une étude des classes de fréquence. L'analyse porte sur 4 paramètres ; la fraction fine $C_{80\mu m}$, le diamètre maximal D_{max}, les coefficients d'uniformité C_u et de courbure C_c (Figure **3-3**).

La fraction fine $C_{80\mu m}$ varie dans un intervalle assez étroit. La classe [5-10%] cumulant presque 60% de la fréquence constitue l'intervalle dans lequel tombent la plupart des valeurs de fractions fines. Ces valeurs correspondent à celles des sols latéritiques ferrugineux, typiques de la zone sahélienne (Lyon Associates, 1971).

Le diamètre maximal D_{max} des particules solides des échantillons de sol est très variable en fonction de la zone d'étude considérée. Une forte dispersion a été enregistrée pour ce paramètre. La forte amplitude de variabilité de celui-ci s'explique par l'origine diverse des éléments constitutifs (principalement les éléments grossiers) contenus dans les sols.

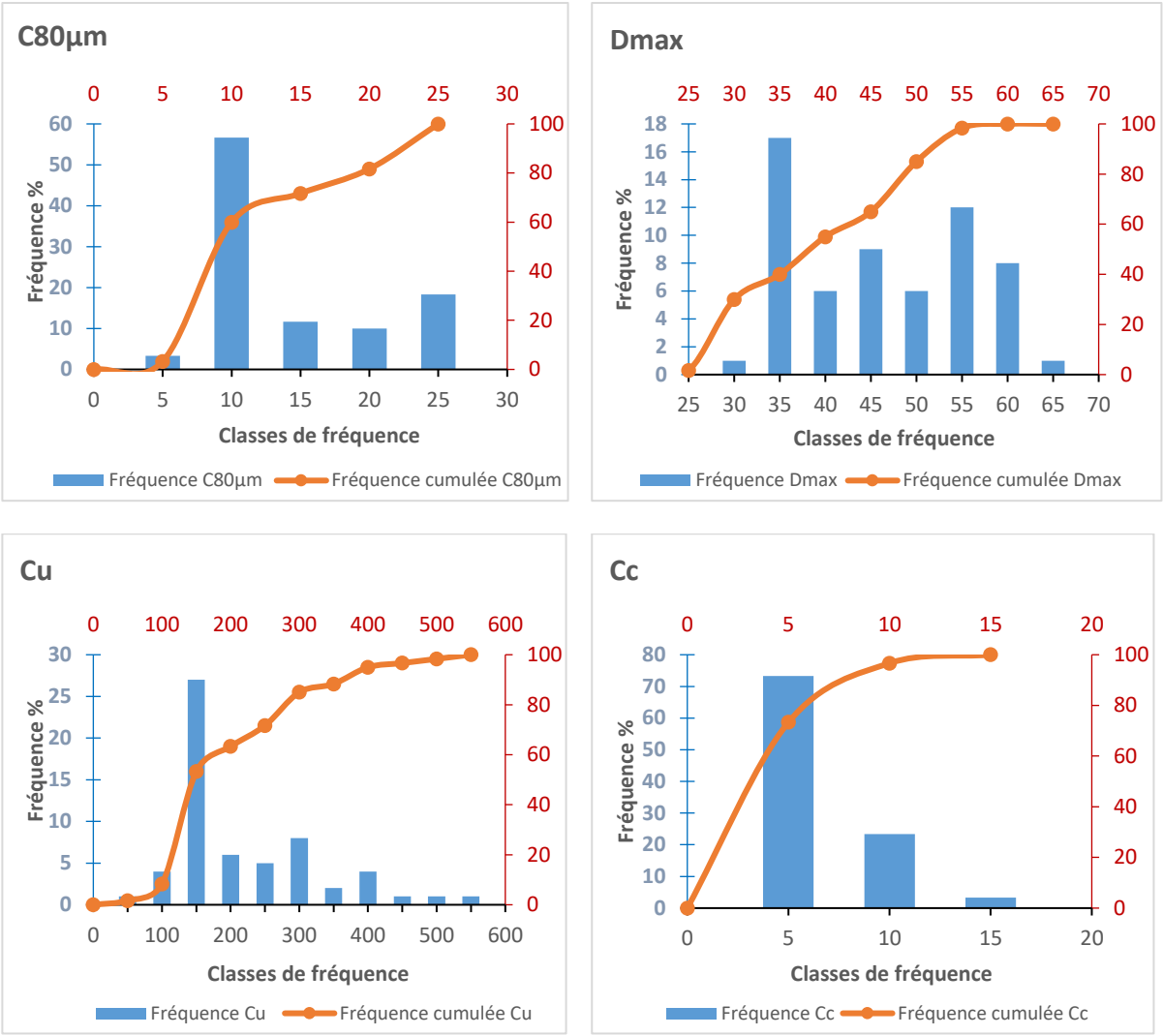


Figure 3-3 : Classes de fréquence des paramètres $C_{80\mu m}$, D_{max}, C_u et C_c.

Les éléments grossiers comme le quartz sont soit détritiques clastiques (Gavaud, 1977), soit originels (sans transport) provenant directement de la roche mère lors du processus pédologique de formation des sols. Les minéraux ou les grains sont donc d'origine diverse dépendant de la géologie et des facteurs pédologiques.

Les classes les plus fréquentes de D_{max} sont 30-35 mm (17%) et 50-55 mm (12%). De manière générale, cette grandeur fluctue entre 30 et 65 mm.

La classe la plus fréquente du coefficient d'uniformité C_u est 100-150, soit 27% de fréquence. L'amplitude de variation s'étale globalement sur une plage de 0 à 600 avec un écart de 50 entre les sous-classes (Figure 3-3). La dispersion de ce paramètre est également élevée.

Concernant le coefficient de courbure C_c, la plupart des valeurs tombent dans l'intervalle compris entre 0 et 5 avec plus de 70% de fréquence individuelle. Le coefficient de courbure C_c, paramètre caractéristique de la gradation des échantillons latéritiques présente donc une faible variabilité (Figure 3-3).

3.3.2 Limites d'Atterberg

Des nombreuses études (Clare, 1960 ; Remillon, 1967 ; Bohi, 2008) menées en Afrique de l'ouest (zone sèche) et en Afrique centrale (zone humide) sur les graveleux latéritiques ont abouti à une intéressante corrélation entre le critère de consistance et la pluviométrie liée au climat. Ainsi, ces auteurs ont pu différencier les sols ferrugineux issus de la zone sèche (savane ; pluviométrie < 1200 mm) des sols ferralitiques issus de la zone humide (forêt ; pluviométrie > 1200 mm). Les données disponibles sur la fraction argileuse des graveleux latéritiques de l'Afrique de l'ouest et l'Afrique orientale indiquent que la roche mère et les conditions de drainage conditionnent la nature du minéral argileux dominant. Selon Baldovin (1969), la position de l'échantillon dans le profil latéritique influence les caractéristiques de plasticité. La formation de profils latéritiques est le plus souvent caractérisée par un lessivage différentiel important, induisant une migration et accumulation des minéraux mis en solution, essentiellement les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium. La variation des caractéristiques de plasticité en fonction de la profondeur ne peut être prédite même au sein de profils lithologiques proches et de topographie différente.

3.3.2.1 Interprétation des résultats

Les essais de limite d'Atterberg ont pareillement été effectués sur les 60 échantillons, tous provenant de la zone d'étude. Après détermination de la teneur en eau naturelle, les échantillons ont été séchés à l'air libre. Les résultats découlant de ces essais ont permis de déterminer les caractéristiques de plasticité des sols latéritiques. L'essai réalisé sur les sols selon la norme NF P 94-051, a permis d'évaluer : la limite de liquidité (WL), la limite de plasticité (WP), l'indice de plasticité (IP) et l'indice de consistance (Ic). Les valeurs moyennes des résultats de ces essais sont réunies dans le Tableau 3-3 et l'ensemble des résultats estimés sur les propriétés de plasticité sont regroupés par site en Annexe 3-2. Ces paramètres combinés avec les propriétés granulométriques ont également contribué à la classification des sols dans les systèmes de classification GTR et HRB.

Tableau 3-3: Caractéristiques moyennes déterminées à partir des limites d'Atterberg.

Sites	WL (%)	WP (%)	IP	Ic
Torodi	29,3	16,4	12,9	1,82
Tillabéry	29,1	13,4	15,7	1,19
Ouallam	26,5	13,3	13,2	1,29
Say	23,5	12,8	10,7	1,89
Fillingué	31,6	11,9	19,7	1,36
Dosso	17,3	10,5	6,8	1,25
Guéchémé	24,5	12,5	12,0	1,21

Les diagrammes de la Figure 3-4 et les valeurs du Tableau 3-3, permettent de constater que les valeurs de limite de liquidité sont moyennement dispersées 23% < WL < 32%, à l'exception des échantillons du site de Dosso dont la valeur moyenne égale à 17,3% est relativement basse.

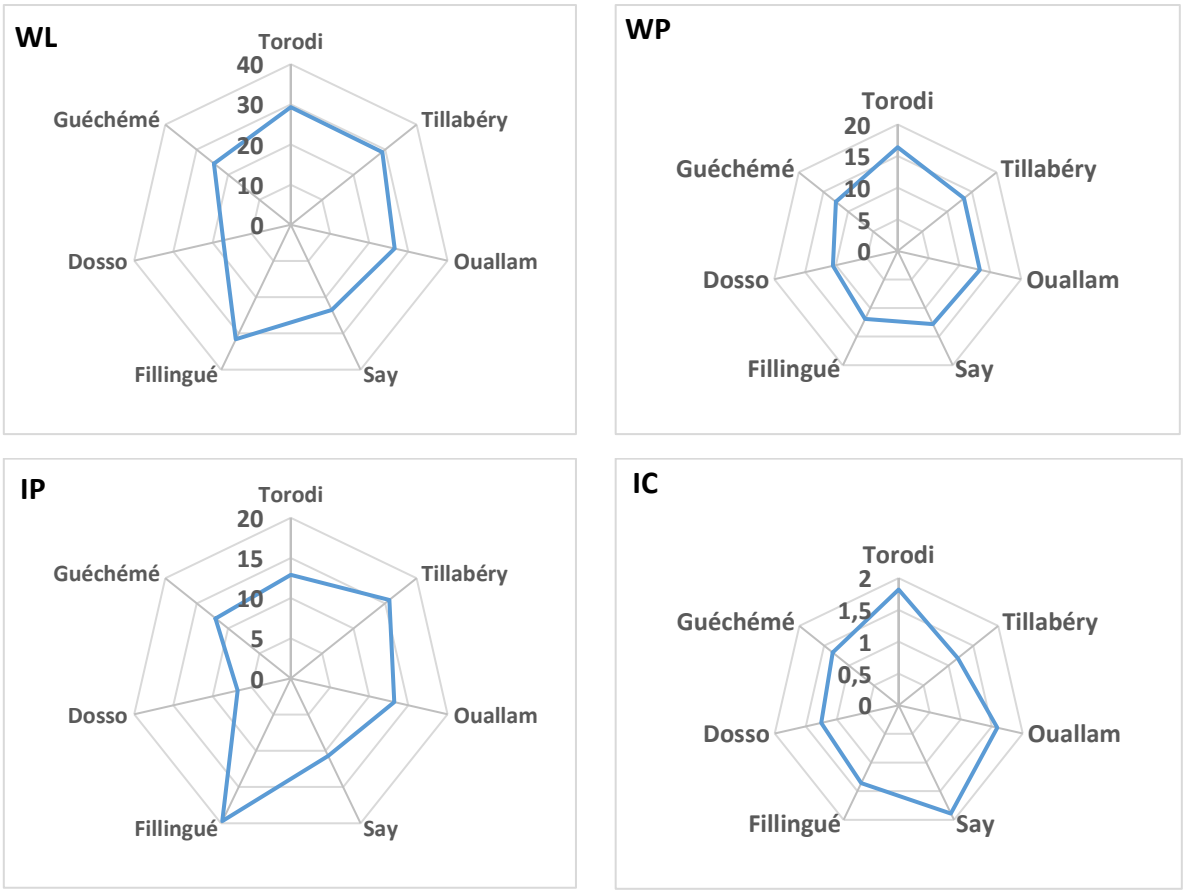


Figure 3-4 : Valeurs moyennes des propriétés de plasticité (WL, WP, IP et IC).

La limite de liquidité est élevée pour les sols de Torodi et Tillabéry (29,2% en moyenne). Les valeurs obtenues sur les sols de Guéchémé, Say, et Ouallam sont plus faibles (25% en moyenne). La valeur la plus élevée de limite de liquidité (WL = 31,6%) est obtenue pour le site de Fillingué. Concernant la limite de plasticité, la dispersion est également faible et les valeurs varient entre 10 et 14% ; mais le site de Torodi présente une valeur moyenne légèrement élevée, soit WP = 16,4% (Figure 3-4).

Contrairement aux paramètres WL et WP, l'indice de plasticité IP varie dans un large intervalle d'un site à l'autre avec des valeurs moyennes comprises entre 6,8 et 19,7%. La limite de liquidité et l'indice de plasticité des échantillons de Dosso et de Fillingué constituent les seuils extrêmes de la variabilité de l'ensemble des résultats avec de faibles valeurs pour Dosso (WL =17,3 ; IP =6,8) et des valeurs élevées pour Fillingué (WL =31,6 ; IP =19,7) (Figure 3-4).

L'indice de consistance Ic montre des sols de consistance peu variable, avec des sols plus consistants pour les sites de Torodi et Say (Ic moyen = 1,85 pour les deux sites), moyennement consistants pour les sites de Guéchémé, Ouallam et Dosso (Ic moyen = 1,40) et peu consistants pour les sites de Tillabéry (Ic moyen = 1,20). La valeur moyenne de l'Ic, pour tous les sites est supérieure à 1; les échantillons sont donc dans un état de consistance dure, lors de l'échantillonnage sur site, imputable à l'hydratation des oxydes de fer qui est la cause de l'induration de l'horizon B latéritique (Figure 3-4 et Tableau 3-3).

3.3.2.2 Étude des classes de fréquence

L'étude est portée sur les classes de fréquence des paramètres IP et WP (Figure 3-5).

- ✓ Pour le paramètre IP trois classes de fréquence cumulant environ 95% de fréquence ont été retrouvées. La classe [10% - 15%] s'avère la plus fréquente, soit 50% de fréquence. Les autres classes [5% - 10%] et [15% - 20%] encadrant la classe précédente cumulent 48% soit environ 25% de fréquence par classe.
- ✓ Pour W_L, les classes [20% - 25%] et [25% - 30%] cumulant plus de 75% de fréquence ont été retrouvées. Les 25% restants de la fréquence sont repartis sur les classes de fréquence [15% - 20%], [30% - 35%] et [35% - 40%] respectivement 10%, 13% et 1,6% de fréquence.

La valeur moyenne de l'IP étant 12,2 ces sols sont pour la plupart peu plastiques, à l'exception de ceux provenant du site de Dosso qui se sont révélés les moins plastiques. En dehors des échantillons de Dosso et Fillingué, Ils sont donc adaptés à l'utilisation en couches de chaussée vis-à-vis des critères de plasticité en référence aux valeurs du (CEBTP, 1984).

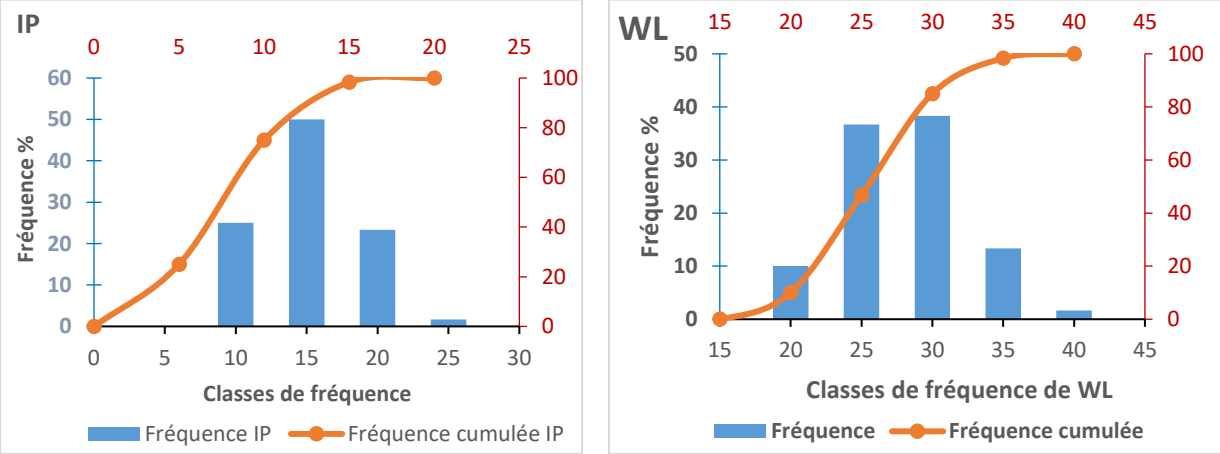


Figure 3-5 : Classes de fréquence des paramètres IP et WL.

3.3.3 Classification GTR et HRB des sols

Les résultats de la classification selon les systèmes GTR et HRB en fonction de l'indice de plasticité IP et de la teneur en fines $C_{80\mu m}$ (Tableau 3-4), permettent de tirer les conclusions suivantes :

Tableau 3-4: Résultats des classifications GTR et HRB.

	Torodi	Tillabéry	Ouallam	Say	Fillingué	Dosso	Guéchémé
$C_{80\mu m}$	13,2	12,9	17,6	10,3	26	11,5	12,2
I_P	12,9	15,7	13,2	10,7	19,7	6,8	12
C_{2mm}	32,5	28,7	40,6	27,2	40,1	33,6	31,5
Classe GTR	**B6**	**B6**	**B6**	**B2**	**B6**	**B4**	**B6**
Classe HRB	**A-2-6 (0)**	**A-2-6 (0)**	**A-2-6 (0)**	**A-2-6 (0)**	**A-2-6 (0)**	**A-2-4 (0)**	**A-2-6 (0)**

- ✓ Selon le GTR les différentes classes retrouvées sont :

- **Classe B2** : Il s'agit de sable argileux à peu argileux. La plasticité de leurs fines rend ces sols sensibles à l'eau. Leur temps de réaction aux variations de l'environnement hydrique et climatique est court, tout en pouvant varier assez largement (en fonction de la perméabilité).

- **Classe B4** : Il s'agit de graves argileuses (peu argileuses). Ils sont plus graveleux que les sols B2 et leur fraction sableuse est plus faible. Pour cette raison, ils sont en général perméables. Ils réagissent assez rapidement aux variations de l'environnement hydrique et climatique (humidification – séchage).

- **Classe B6** : Il s'agit de sables et graves argileux à très argileux ; leur comportement se rapproche de celui d'un sol fin ayant même plasticité que les fines, avec toutefois une plus grande sensibilité à l'eau due à la présence de la fraction fine en plus grande quantité.

- **Classe B2** : Il s'agit de sables et graves argileux à très argileux. L'influence des fines est prépondérante comme pour le sol B6.

- ✓ Selon le HRB, les classes retrouvées sont :

- **Classe A-2-4 ()** : Graviers et sables limoneux.

- **Clase A-2-6 ()** : Graviers et sables limoneux ou argileux (plus plastiques que les sols de classe A-2-4).

Selon la classification GTR, la classe B6 est la plus fréquente. Les échantillons des sites de Say et Dosso comportent des sols de classes différentes respectivement B2 et B4. Mais il faut noter que ces classes sont proches les unes des autres ; il s'agit globalement de matériaux graveleux comportant une fraction sableuse moyenne et une fraction argileuse faible.

Selon la classification HRB, nous retrouvons quasiment la classe A-2-6 avec un indice de groupe nul, à l'exception des sols de Dosso, pour lesquels le faible indice de plasticité a permis de les ranger sous la classe A-2-4 avec toujours un indice de groupe nul. Au final, la classification via HRB permet de ranger les sols dans deux classes aux comportements proches les uns des autres, avec une plasticité un peu plus élevée pour les sols de classe A-2-6. Selon le GTR, il s'agit plutôt des graveleux mélangés avec des proportions argileuses faibles et sableuses moyennes. La classe HRB A-2-4 des sols de Dosso indique que ces derniers sont moins plastiques à cause de leur faible plasticité (plus faible valeur de l'IP).

3.3.4 Caractéristiques de compactage et de portance

3.3.4.1 Paramètres influençant la compacité des graveleux latéritiques

La plupart des résultats disponibles sur la densité et les caractéristiques de compactage des sols latéritiques de l'Afrique intertropicale ont une limite d'applicabilité parce qu'aucune spécification systématique et précise n'a été mise en place pour prendre en compte tous les facteurs pour chaque projet d'étude. La raison de cette carence s'explique par l'absence de conclusions claires et les résultats auxquels sont parvenus de nombreuses études sont conflictuels. L'analyse des données du poids volumique sec à l'OPM et les caractéristiques de compactage des graveleux latéritiques montrent que les facteurs influençant leurs propriétés peuvent être séparés en deux groupes. Le premier groupe de facteurs concerne la genèse des profils latéritiques et le deuxième les procédures de prétraitement avant essais.

Les plus importants facteurs génétiques des graveleux latéritiques sont la texture et la position de l'échantillon dans le profil latéritique. D'autres facteurs génétiques moins importants que les précédents sont la topographie, le mode de drainage et l'intensité du lessivage.

Les facteurs tels que la nature de la roche mère, le faciès du sol enrobé par les sesquioxydes, l'aspect de la porosité et la composition chimique sont des données importantes pour la caractérisation des sols latéritiques ainsi que leur comportement mécanique.

Concernant le mode de prétraitement, l'effet de l'étuvage sur les caractéristiques de compactage des latérites a été étudié par de nombreux chercheurs (Frost, 1967 ; Novais-Ferreira & Meirles, 1968 ; 1969). Ces derniers ont abouti à la conclusion selon laquelle l'étuvage des sols latéritiques a pour effet d'augmenter le poids volumique sec et de diminuer la teneur en eau à l'optimum Proctor. Le constat est différent lorsque les échantillons sont séchés à l'air ambiant avant les essais, dans ce cas le poids volumique sec à l'OPM est faible et la teneur en eau élevée.

Il faut noter que le broyage des concrétions latéritiques pendant le compactage a une influence sur les caractéristiques de compactage. L'obtention d'une valeur de densité sèche faible ou élevée dépend de la composition chimique des concrétions broyées et de leur degré de broyabilité, lui-même fonction du degré de latéritisation et des caractéristiques physiques des particules (exemple : angularité, rugosité, etc.).

La capacité portante d'un sol latéritique varie principalement avec la texture. Remillon (1967) a trouvé après l'étude des sols ferrugineux de l'Afrique de l'ouest et des sols ferralitiques de l'Afrique centrale que les variations de la portance des sols latéritiques sont dues à la variation du degré de latéritisation et d'homogénéité des faciès au sein des profils latéritiques. L'essai le plus répandu pour la détermination de la capacité portance des graveleux latéritiques utilisés en couche de chaussée est la détermination de l'indice CBR (Californian Bearing Ratio) (Remillon, 1967 ; Ackroyd, 1959 ; Meirles, 1967, Fall, 1995, Autret, 1980 ; 1983 ; Mahalinga-Iyer, 1997 ; Westshondo, 2012). Il est reconnu que la portance est tributaire de la composition chimique, de l'âge et de l'homogénéité des différents horizons.

3.3.4.2 Matériel de mesure et méthodologie d'essai

Avant la détermination de l'indice CBR, les échantillons sont d'abord compactés dans des moules Proctor de dimensions 116,5 mm de hauteur et 101,5 mm de diamètre, en cinq couches de 56 coups avec une dame de compactage de dimensions 51 mm le diamètre du mouton, une hauteur de chute de 457 mm et une masse de 4 535 g conformément à la norme NF P 94-093. L'essai Proctor a permis de déterminer les valeurs optimales de compactage (γ_{dopm} et W_{opm}). Ces caractéristiques optimales sont ensuite utilisées pour la confection des éprouvettes de sol qui seront destinées à l'évaluation de l'indice de portance ICBR après 96 heures d'imbibition dans l'eau. Les échantillons testés sont au préalable séchés à l'air ambiant, car c'est le moyen le plus fiable d'obtenir des valeurs représentatives et reproductibles (Gidigasu, 1974 ; Bagarre 1990 ; Adebisi, 2013).

3.3.4.3 Résultats des essais Proctor et de poinçonnement

Les valeurs moyennes de poids volumique sec à l'optimum Proctor consignées dans le Tableau 3-5, font ressortir principalement deux classes (voir la globalité des résultats des essais Proctor en Annexe 3-3 et des essais CBR en Annexe 3-4). Les sites de Tillabéry, Say et Guéchémé ont les plus fortes valeurs, soit γ_{dopm} = 23 kN/m^3. Le poids volumique sec est moyen (20 kN/m^3) pour les sites de Torodi, Fillingué et Ouallam. Cette valeur est relativement faible pour le site de Dosso (18 kN/m^3).

Les valeurs de la teneur en eau à l'OPM sont plus dispersées mais de variabilité semblable à celles du poids volumique sec à l'OPM. La valeur moyenne de la teneur en eau est égale à 9% pour les sites de Tillabéry, Say et Guéchémé, mais élevée pour les graveleux des autres sites avec une valeur moyenne autour de 12,5%.

Tableau 3-5: Caractéristiques de compactage et indices de portance.

Sites	Y_{dopm} (kN/m^3)	W_{opm} (%)	ICBR98	ICBR95
Torodi	20	12,2	33	19
Tillabéry	23	8,5	102	79
Ouallam	19	12,2	32	11
Say	23	8,8	89	48
Fillingué	20	13,2	20	10
Dosso	18	9,9	29	19
Guéchémé	24	9,2	125	114

En résumé, nous constatons que les graveleux latéritiques de la zone d'étude ayant présenté de bonnes caractéristiques de compactage (poids volumique sec élevé) ont une teneur en eau relativement faible, W_{opm} = 9%. Les sols de bonnes caractéristiques de compactage contiennent une faible teneur en fines par rapport à ceux qui en présentent de faibles caractéristiques de compactage (Cf. §3.3.1.1).

Pendant l'opération de compactage, les fines représentent la fraction qui absorbe le plus d'eau permettant de rapprocher les différentes tailles de grains les uns des autres, assurant ainsi une bonne compacité de l'ensemble. Plus la teneur en fines est faible, moins l'échantillon de sol absorbe de l'eau. La valeur seuil de l'indice CBR requise pour l'utilisation d'un graveleux latéritique en couche de fondation est 30 au minimum et 80 pour la couche de base (CEBTP, 1984). Les valeurs moyennes d'indice ICBR98 (Tableau 3-5) obtenues pour les sites de Say, Tillabéry, et Guéchémé sont respectivement 89, 102 et 125. Précisons que les gisements latéritiques de ces sites sont développés sur des formations géologiques différentes. Les échantillons provenant des sites de Torodi, Ouallam et Dosso ont des valeurs moyennes d'indice CBR autour de 30 à 98% du poids volumique sec à l'OPM et ceux de Fillingué ont une faible portance (ICBR = 20). Les paramètres ICBR98 et ICBR95 étant bien corrélés, les mêmes tendances que l'ICBR98 ont été relevées pour l'ICBR95.

3.3.4.4 Étude des classes de fréquence

Parmi les classes obtenues, les plus fréquentes pour les paramètres γ_{dopm} et W_{opm} sont respectivement [18 - 20 kN/m^3] et [8 – 10%] (Figure 3-6).

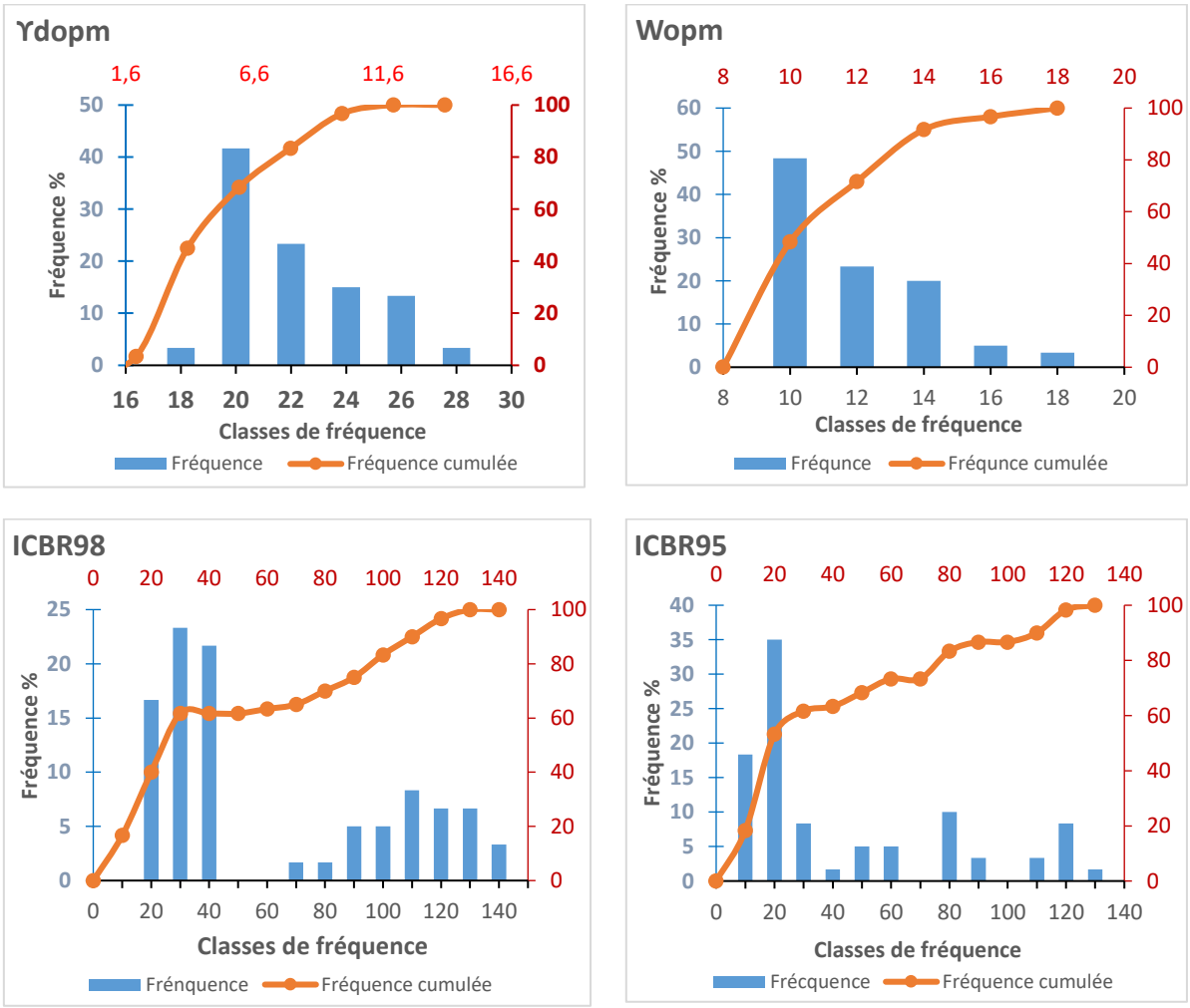


Figure 3-6 : Classes de fréquence des paramètres γ_{dopm}, W_{opm}, I_{CBR95} et I_{CBR98}.

Pour le poids volumique sec (γd à l'OPM), la classe [18 - 20 kN/m^3] occupe environ 42% de la fréquence, les autres valeurs sont majoritairement distribuées dans les classes [20 – 22 kN/m^3], [22 – 24 kN/m^3] et [24 – 26 kN/m^3], respectivement 23, 15 et 13%. Concernant la teneur en eau W_{opm}; environ un échantillon sur deux a une valeur comprise dans la classe [8 – 10%].

Les autres valeurs de teneur en eau sont réparties dans les classes de fréquence [10 – 12%] et [12 – 14%]. Les sols dont les valeurs de teneur en eau à l'OPM tombent dans les deux derniers intervalles ont une capacité d'absorption d'eau relativement élevée, par rapport aux sols appartenant à la classe [8 – 10%].

Une grande partie des 60 individus pris en compte dans l'étude présente des valeurs d'indice ICBR98 comprises dans l'intervalle de portance [20 – 40] avec 60% de fréquence, les valeurs les plus élevées étant les moins fréquentes. La distribution des valeurs de l'indice CBR à 98% de l'OPM est bimodale. Cette distribution est centrée sur l'intervalle [40 – 60]. Les autres valeurs de portance, principalement plus élevées sont dispersées dans les intervalles compris entre les classes de portance 70 à 140%.

La classe la plus fréquente pour l'ICBR95 est [10 – 20] cumulant 35% de fréquence individuelle. Ensuite, viennent les classes [0 – 10] et [20 – 30], avec respectivement 18 et 8% de fréquence individuelle. Les autres valeurs de fréquence sont dispersées dans les classes comprises entre les valeurs 40 et 140.

3.3.5 Synthèse et discussion des résultats géotechniques

Les caractéristiques géotechniques (granulométrie, plasticité et portance) des graveleux latéritiques de la zone d'étude font ressortir globalement des dispersions notables. Le constat qui ressort de ces essais est la cohérence entre certaines propriétés géotechniques, notamment la portance et la teneur en fines. Les sols de bonne portance (ICBR > 80) présentent une teneur en fine faible à moyenne de l'ordre de 12%. La plasticité IP des échantillons de sol est en moyenne 12 à 15 avec un poids volumique sec élevé et une teneur en eau à l'OPM de l'ordre de 9%. Pour les sols de faible portance, le poids volumique sec à l'OPM est faible et la teneur en eau reste élevée, de l'ordre de 12%. L'optimisation de l'arrangement granulaire pendant le compactage pour une teneur moyenne en fines semble fort logiquement conduire à l'augmentation de la portance.

Concernant les sols latéritiques de faible portance, leur forte teneur en eau à l'OPM se justifie en partie par la fraction fine élevée, principalement pour l'échantillon de Fillingué dont les facteurs génétiques montrent un horizon argileux plus ou moins cimenté d'oolithes ferrugineux. La teneur élevée en fines est conforme à la formation de latérite détritique à argile ligneuse dont les processus pédologique ont permis de mettre en place sur le site de Fillingué. Ces sols ont également une plasticité élevée.

3.3.5.1 Granulométrie

Concernant les caractéristiques granulométriques, on peut constater que les sols étudiés contiennent généralement une faible teneur en fines ($5 < C_{80\mu m} < 10$). Après l'étude des classes de fréquence nous obtenons pour la classe [5 – 10%] une fréquence individuelle de 57%. Certains sols, principalement ceux de Fillingué et de Ouallam présentent une teneur en fines élevée d'environ 22% en moyenne (respectivement comprises entre 26 et 17%). Le zonage pluviométrique indique que ces sites sont inscrits dans des zones faiblement arrosées (pluviométrie < 375 mm/an cf. Figure 2-14 – Chapitre 2) ne favorisant pas un lessivage important des horizons cuirassés nécessaire à la mobilisation des oxydes de fer. Ces zones sont donc faiblement enrichies en oxydes de fer et donc riches en matériaux argileux (argiles ligneuses du CT2). Ils présentent un D_{max} (diamètre du plus gros grain) très variable. La forte variabilité de ce paramètre s'explique par l'origine diverse des grains de sol latéritique lors du processus de la genèse des profils latéritiques (fragments de roches difficilement solubles, grains de quartz, nature du faciès de l'horizon d'accumulation des sesquioxydes, apport d'éléments clastiques par accumulation absolue, formations détritiques, etc.). Les facteurs pédologiques sont donc la source de cette dispersion.

Les valeurs élevées des coefficients d'uniformité C_u déterminés à partir des courbes granulométriques montrent que ces sols ont une granulométrie étalée incluant plusieurs fractions granulaires (graveleuse, sableuse, limoneuse et argileuse) avec un palier de discontinuité généralement entre les tamis de 2 mm et 80µm.

Ces sols sont par contre mal gradués d'après les valeurs de coefficient de courbure C_c (3,7 à 5,8 ; Cf. Tableau 3-1). L'étude des fuseaux granulométriques semble discriminer deux groupes en fonction de leur position par rapport au fuseau type recommandé par le CEBTP pour l'utilisation des graveleux latéritiques en couches de chaussée.

- ✓ Le premier groupe, de portance moyenne à bonne se positionne relativement bien dans le fuseau type pour les échantillons provenant des sites de Tillabéry, Guéchémé, Say et Torodi. La branche supérieure de leur enveloppe est parfaitement inscrite dans le fuseau mais la partie supérieure de la branche inférieure se trouve légèrement hors du fuseau type.
- ✓ Les deux branches de l'enveloppe du deuxième groupe de faible portance sont toutes situées hors du fuseau de référence.

3.3.5.2 Plasticité

Les caractéristiques de limites sont peu dispersées à l'exception de l'indice de plasticité IP et la limite de liquidité WL. L'étude des classes de fréquence du paramètre IP indique que trois valeurs sur quatre tombent dans l'intervalle 10 – 20%, sauf pour le site de Dosso (6,8%). La limite de liquidité WL varie dans un intervalle encore plus large, 24 – 32%, excepté le site de Dosso (17,3%). Dans le cas des échantillons de Dosso, les valeurs de IP et WL sont très faibles.

Les faibles valeurs des propriétés de plasticité des échantillons de Dosso se justifient par les facteurs pédologiques. Bien que ce site s'inscrive dans une zone relativement bien arrosée (isohyète 650 mm/an cf. Figure 2-14 – Chapitre 2) le mauvais drainage ne favorise pas une forte altération, en d'autres termes une carence en matériaux argileux (kaolinite) nécessaire à une bonne plasticité des sols. En outre, le site de Dosso se trouve dans le CT3, constitué de grès et de sables fins, donc riches en silice dont l'altération fournit très peu de matériaux argileux. Le défaut de portance des échantillons provenant de ce site s'explique par la faible teneur en fines.

Les échantillons de Fillingué ne sont pas directement utilisables en construction routière vis-à-vis du critère de plasticité à cause de sa valeur élevée. Ces paramètres sont faibles pour les sols de Dosso. L'utilisation des échantillons provenant des autres sites est envisageable en considérant le critère de plasticité puisque leurs valeurs entrent dans la gamme des prescriptions techniques requises.

3.3.5.3 Portance

Les échantillons provenant de la zone d'étude se répartissent en 3 groupes selon les caractéristiques de compactage et de portance.

- ✓ Ceux provenant de Guéchémé, Tillabéry et Say présentent un indice CBR élevé (en moyenne >100) justifiant leur utilisation en couches de chaussée (base et fondation). Leur poids volumique sec à l'OPM élevé de 23 kN/m^3 est bien corrélé avec la portance. La teneur en eau à l'OPM est relativement faible pour la plupart des sols (de l'ordre de 9%), sauf pour ceux des sites de Ouallam, Fillingué et Torodi (valeurs de 12 à 13%).
- ✓ Les sols moyennement portants (ICBR = 30), proviennent de Dosso et de Ouallam. Ces sols ont un poids volumique sec optimal de 20 kN/m^3 et une teneur en eau optimale de l'ordre de 12,5%.
- ✓ Et enfin les sols faiblement portants (ICBR = 20), proviennent de la zone de Fillingué. La faible portance s'explique par une forte teneur en fines, un faible lessivage et une forte plasticité. Les caractéristiques pédologiques indiquent également que l'horizon latéritique est dominé par une argile à lignite responsable d'un drainage médiocre empêchant l'évolution du processus de latéritisation. Ce facteur est accentué par la présence d'un modelé quasiment horizontal.

3.4 Propriétés mécaniques

3.4.1 Méthodologie générale

Les essais mécaniques ont été réalisés sur des échantillons reconstitués avec écrêtement à partir des caractéristiques géotechniques estimées in-situ. La reconstitution des échantillons se fait à partir des valeurs de masse volumique totale et de teneur en eau naturelle mesurées in-situ. Au laboratoire, les essais sont réalisés sur la fraction 0/5 mm du mélange homogène obtenu à partir des échantillons de sols latéritiques prélevés dans les différents sondages réalisés sur le site.

Le choix de la fraction 0/5 mm se justifie par la nature graveleuse des sols étudiés et les dimensions de la boite de cisaillement ainsi que de la cellule œdométrique. Il est admis que le comportement des sols latéritiques est principalement gouverné par la fraction fine. L'utilisation de cette classe granulaire permet donc de déterminer des résultats plus représentatifs puisque au-delà de 5 mm les blocs de roche contenus dans le sol ne permettent pas d'obtenir une surface régulière de cisaillement à cause des aspérités induites par les graveleux. Lorsque les sols sont totalement homogénéisés à l'aide d'un échantillonneur approprié, ils sont séchés à l'air ambiant. Le mode de prétraitement choisi est le séchage des échantillons à l'air. Il permet d'atténuer fortement les risques d'une estimation erronée et garantit une bonne reproductibilité des essais. Les échantillons de sols sont mouillés à la teneur en eau estimée in-situ. Connaissant la masse volumique du sol et le volume de la cellule œdométrique ou de la boîte de cisaillement, on peut évaluer la masse à déduire afin de déterminer une valeur approchée de la masse volumique estimée in-situ. Les éprouvettes de sol obtenues après reconstitution sont ensuite imbibées dans l'eau pendant au moins 24 heures jusqu'à saturation totale avant le démarrage des essais.

3.4.2 Caractéristiques de compressibilité

Les essais œdométriques ont été effectués sur les éprouvettes de sol conformément à la norme XP P 94-090-1. Les caractéristiques dimensionnelles de la cellule œdométrique utilisée sont : diamètre 50 mm et hauteur 20 mm. L'essai permet d'établir :

- la courbe de compressibilité, qui indique le tassement total correspondant aux paliers de chargement en fonction du logarithme de la contrainte appliquée,
- les courbes de consolidation, qui donnent le tassement de l'échantillon en fonction du temps sous application d'une contrainte constante. Ces courbes permettent la détermination expérimentale du coefficient C_v,
- les essais œdométriques ont aussi permis de mesurer la contrainte de pré-consolidation (σ'_p), le coefficient de compressibilité (Cc), le coefficient de gonflement (Cg), les indices de vides (e_0), les poids volumiques humide et sec (respectivement γ_h et γ_d) ainsi que la perméabilité (k) des sols latéritiques.

3.4.2.1 Méthodes d'estimation des propriétés de compressibilité

3.4.2.1.1 Détermination de la pression de consolidation σ'_p

La courbe de compressibilité permet de faire la détermination graphique de la pression de pré-consolidation σ'_p. La méthode la plus simple consiste à considérer l'abscisse du point d'intersection des deux directions asymptotiques.

Sur la Figure 3-7, on observe que :

- ✓ pour $\sigma'_z < \sigma'_p$ le sol se déforme très peu parce qu'il a déjà été consolidé, au cours de son histoire, sous l'effet d'une pression qui, à sa valeur maximale, était égale à σ'_p,

- ✓ pour $\sigma'_z > \sigma'_p$ le sol est beaucoup plus déformable, il est soumis à des contraintes supérieures à toutes celles qu'il a connues. La partie correspondante de la courbe est appelée courbe vierge.

La méthode utilisée pour la détermination de la contrainte de pré-consolidation des échantillons latéritiques étudiés est celle de Casagrande. Ce dernier a proposé une méthode à partir de la bissectrice TC le point T de rayon de courbure minimal (Figure 3-7 : Méthode de détermination graphique de la contrainte de pré-consolidation σ'p par Casagrande.

Après avoir tracé les deux directions asymptotiques des deux parties de la courbe, une bissectrice (TC) est tracée à partir du sommet T correspondant au rayon minimal de la courbe de compressibilité. La projection sur l'axe des abscisses du point d'intersection entre la bissectrice (TC) et le segment I correspondant à l'asymptote de la courbe vierge correspond à la contrainte de pré-consolidation σ'_p.

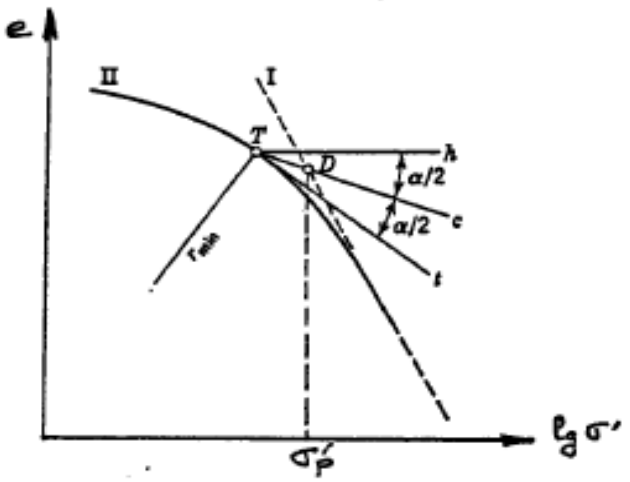


Figure 3-7 : Méthode de détermination graphique de la contrainte de pré-consolidation σ'_p par Casagrande.

3.4.2.1.2 Évaluation du coefficient de consolidation Cc et du coefficient de gonflement Cg

L'indice de compression Cc (Equation 3-1) est la pente (au signe près) de la courbe vierge, soit :

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta(\lg\sigma'_z)} \text{ (Pour } \sigma'_z \geq \sigma'_p\text{) avec } \Delta(\lg\sigma'_z) = \lg(\sigma'_z + \Delta\sigma'_z) - \lg\sigma'_z = \lg(1 + \frac{\Delta\sigma_z'}{\sigma'_z})$$

Equation 3-1: Formule permettant le calcul de l'indice de compression Cc.

L'indice de gonflement Cg (Equation 3-2) est la pente moyenne (au signe près) d'un cycle déchargement-rechargement, soit :

$$C_g = -\frac{\Delta e}{\Delta(\lg\sigma'_z)} \text{ (Pour } \sigma'_z \leq \sigma'_p\text{) avec } \Delta(\lg\sigma'_z) = \lg(\sigma'_p) - \lg(\sigma'_z) = \lg(\frac{\Delta\sigma_p'}{\sigma'_z})$$

Equation 3-2: Formule permettant le calcul de l'indice de gonflement Cg.

3.4.2.1.3 Détermination expérimentale du coefficient de consolidation Cv

Le paramètre Cv a été déterminé en utilisant la méthode graphique proposée par Taylor. Elle consiste à dessiner le tassement en fonction de la racine carrée du temps. La première partie de la courbe est une droite, puisque U < 60%, on a Tv = π/4.U (avec U la pression interstitielle), on trace donc la droite expérimentale correspondante D1.

Un tassement immédiat (Si) apparaît sur la courbe qui n'est pas pris en compte pour la détermination de Cv. À partir de cette droite D1 tangente à la courbe expérimentale de tassement, on obtient l'origine à l'ordonnée S0. Ensuite on trace à partir de S0 une droite D2 dont la pente est égale à 1,15 fois la pente de la partie droite obtenue précédemment. On considère alors que le point d'intersection de cette nouvelle droite avec la courbe expérimentale correspond à U = 90%, ce qui permet de déterminer t90 et de calculer le coefficient de consolidation Cv (Equation 3-3 et Figure 3-8) :

$$Cv = \frac{Tv_{90} \times d^2}{t_{90}} \quad \text{Avec U = 90%, Tv = 0,848}$$

Equation 3-3: Formule permettant de calculer le coefficient de consolidation Cv.

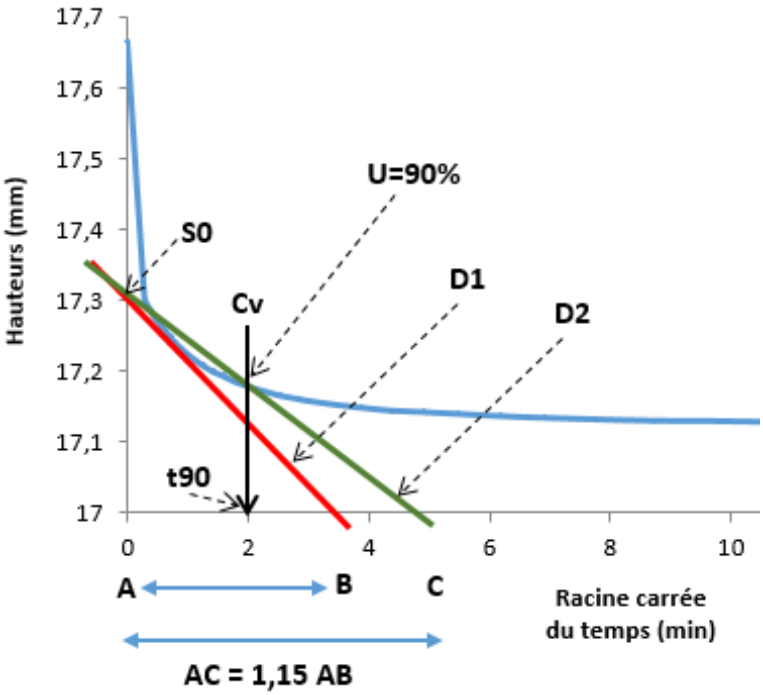


Figure 3-8 : Méthode de détermination graphique du coefficient de consolidation Cv.

3.4.2.1.4 Détermination de la perméabilité k à partir des essais de consolidation

Pour un intervalle de chargement donné, il est possible de calculer la valeur de k en utilisant la définition de Cv (Equation 3-4) ; il suffit de calculer la valeur de mv dans l'intervalle de charge. Cette méthode permet d'estimer la valeur du coefficient de perméabilité pour les sols de perméabilité faible comme le cas des graveleux latéritiques.

$$Cv = \frac{K \times E_{oed}}{\gamma_w} \quad \text{d'où} \quad K = \frac{Cv \times \gamma_w}{E_{oed}}$$

Equation 3-4: Formule permettant le calcul du coefficient de perméabilité k (m/s).

Le module œdométrique E_{oed} est un paramètre qui, dans une loi de comportement, relie les déformations aux contraintes. Dans le cas d'une sollicitation œdométrique (déformation mono axiale), on peut écrire (Equation 3-5) :

$$\Delta\sigma' = -E_{eod} \cdot \frac{\Delta H}{H} \quad \text{d'où} \quad E_{oed} = -\frac{\Delta\sigma'}{\frac{\Delta H}{H}}$$

Equation 3-5: Calcul du module œdométrique E_{oed}.

Le module œdométrique a donc été déduit sur la courbe de compressibilité pour un intervalle de chargement donné. Il apparait que ce module n'est pas constant (contrairement au module d'Young d'un matériau élastique linéaire) il dépend à la fois de l'état de contrainte initial considéré σ' et de l'intervalle de contrainte Δσ'.

3.4.2.2 Interprétation des propriétés de compressibilité

À la fin de chaque palier de chargement, c'est-à-dire lorsque la consolidation se stabilise (généralement après 24 heures), la charge est doublée aussi bien pour les cycles de chargement que de déchargement jusqu'à la fin de l'essai.

Un essai œdométrique est réalisé pour chaque site après homogénéisation des échantillons provenant des sondages effectués. Les courbes de compressibilité des sites sont représentées sur les Figure 3-9 et Figure 3-10. Après dépouillement des essais œdométriques et traçage de la courbe de compressibilité des échantillons, deux comportements ont été observés. Les uns présentent de fortes amplitudes de compressibilité et les autres de faibles amplitudes. Les échantillons de Guéchémé, Tillabéry et Say (Figure 3-9) sont caractérisés par une amplitude de compressibilité relativement faible. Les paramètres déduits des essais sont fournis dans le Tableau 3-6. Les valeurs obtenues pour ces 3 sites permettent de constater que la plupart des propriétés de compressibilité sont du même ordre de grandeur. Ces échantillons présentent néanmoins des écarts au niveau des indices de vides initiaux et finaux. La différence entre les indices de vides initiaux et finaux (Δe) évolue entre 0,045 et 0,11 (Tableau 3-6). Ces faibles écarts entre les indices et les valeurs élevées de poids volumiques humides et secs avant et après chargement montrent qu'ils sont peu déformables à cause de leur état de cuirassement avancé. Les échantillons de Guéchémé sont les plus portants (ICBR élevé), suivi de ceux de Tillabéry et ensuite ceux de Say. Nous constatons une bonne corrélation entre l'indice CBR et l'indice des vides. Moins l'indice des vides est important, plus la portance est élevée. Nous comprenons donc que les sols qui sont dans un état de compacité relativement élevée (fort cuirassement lors de la genèse des horizons latéritiques) présentent une portance élevée après compactage.

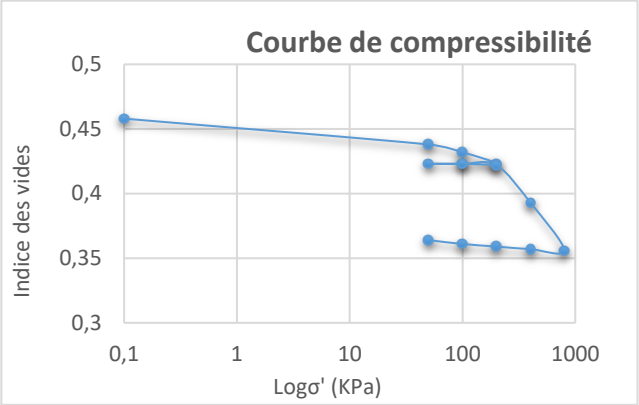
Les contraintes de pré-consolidation σ'_p des échantillons de Tillabéry et Say respectivement 28 et 30 kPa sont relativement faibles en comparaison avec la forte contrainte de pré-consolidation de 110 kPa de ceux de Guéchémé. Nous comprenons donc que l'influence des facteurs pédologiques (cuirassement ou induration) est non négligeable sur les propriétés de portance des sols latéritiques. Cependant, on constate que le site de Guéchémé de forte portance se trouve sur le CT3, à priori détritique, c'est-à-dire après transport et dépôt. L'horizon latéritique du site de Guéchémé repose sur les sables fins moyens du CT1 / CT2 qui reposent à leur tour sur les grès du Continental Hamadien. L'altération du socle granitique qui constitue la roche mère semble fort probablement être à l'origine de cet intense cuirassement le tout complexé aux processus de transport et de dépôt. Enfin, la situation géographique (importante pluviométrie, isohyète 600 mm cf. Figure 2-14), la forme du modelé et le mode de drainage contribuent notablement à cet important cuirassement. Sur le site de Tillabéry, de pluviométrie également élevée (isohyète 475 mm cf. Figure 2-14), l'horizon de cuirasse latéritique nodulaire est résiduel, c'est-à-dire produit d'altération du socle rocheux granitique sous-jacent. La bonne portance des sols est liée à la structure naturellement indurée de l'horizon B d'accumulation des oxydes de fer. Enfin à Say (isohyète 550 mm cf. Figure 2-14), l'horizon latéritique affleure en surface. Bien que les sols de ce site soient probablement détritiques, ils sont potentiellement génétiquement liés au socle granitique conduisant à un faible cuirassement de l'horizon latéritique. La structure poreuse des sables sous-jacents du Continental Hamadien est favorable à un fort lessivage du socle granitique et donc à une migration ascendante des oxydes de fer conduisant à l'enrichissement et à l'induration de l'horizon latéritique.

Le coefficient de perméabilité pour ces sols moins compressibles, varie de 2,70E-07 m/s à 4,21E-07 m/s. Ces valeurs permettent de classer ces sols parmi ceux ayant une très faible perméabilité. Cette tendance est cohérente avec les faibles indices de vides obtenus. Le coefficient de compressibilité Cc des matériaux est compris entre 0,111 et 0,128 correspondant aux ordres de grandeur de la kaolinite. Le coefficient de gonflement Cg est faible voire très faible. L'argile que comportent ces sols est donc peu gonflante, confirmant ainsi la kaolinite comme argile caractérisant la matrice fine des sols latéritiques de ces 3 sites (Tableau 3-6). En résumé, l'on peut dire que la faible valeur de l'indice de vides et la forte contrainte de pré-consolidation constituent de réels indices de cuirassement à l'origine de la bonne portance des sols étudiés, principalement ceux provenant du site de Guéchémé.

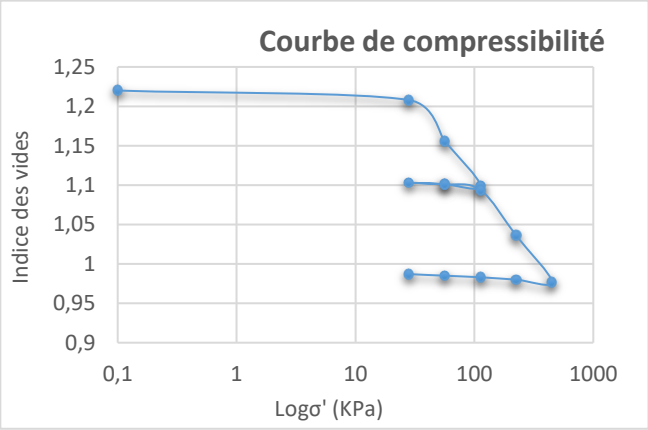
Tableau 3-6: Résultats des essais œdométriques réalisés sur les éprouvettes des sols latéritiques peu compressibles; sites de Guéchémé, Tillabéry et Say.

	Teneur en eau		Poids volumique				Indice des vides e			Cvmoy (m2/s)	Emoy (MPa)	K0moy (m/s)	Cc	Cg	σ'p (kPa)
			Poids volumique humide		Poids volumique sec										
	Wi (%)	Wf (%)	γhi (kN/m3)	γhf (kN/m3)	γdi (kN/m3)	γdf (kN/m3)	ei	ef	Δe						
Tillabéry	3,9	9,8	19,4	15,8	21,3	17,6	0,643	0,533	0,11	3,30E-07	29,8	3,20E-07	0,127	3,30E-03	28
Say	5,2	8,5	18,8	15,9	20,9	16,8	0,701	0,656	0,045	1,66E-07	27,6	4,21E-07	0,128	5,00E-03	30
Guéchémé	6,2	8,8	20,8	18,7	22,4	20,1	0,459	0,364	0,095	2,88E-07	29,3	2,70E-07	0,111	1,70E-03	110

GUECHEME



TILLABERY



SAY

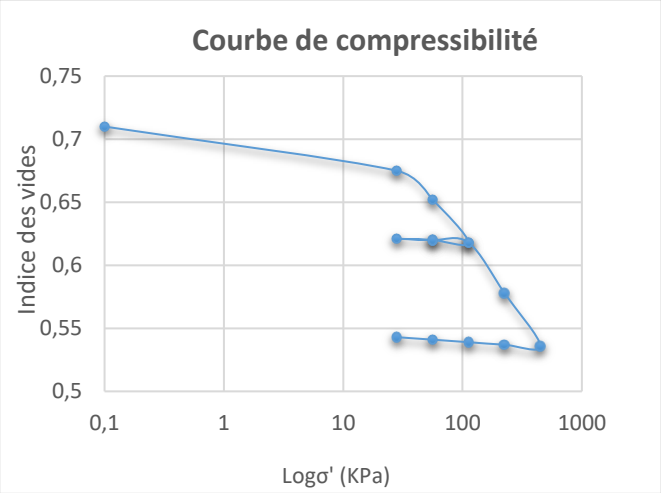


Figure 3-9 : Courbes de compressibilité des sols de faible amplitude de tassement.

Le second lot d'échantillons aux caractéristiques de compressibilité différentes, regroupe les échantillons des sites de Torodi, Fillingué, Ouallam et Dosso. Les échantillons de ces zones ont une amplitude de compressibilité plus élevée que les précédents (Figure 3-10).

Ces échantillons bien que plus compressibles que ceux du lot précédent, ont des allures de courbe œdométrique différentes. Les paramètres de compressibilité déduits des essais œdométriques sur les échantillons latéritiques de ces zones regroupés dans le Tableau 3-7 montrent une dispersion appréciable selon le paramètre considéré.

Tableau 3-7: Résultats des essais œdométriques réalisés sur les éprouvettes des sols latéritiques compressibles ; sites de Torodi, Ouallam, Fillingué et Dosso.

	Teneur en eau		Poids volumique				Indice des vides e			Cvmoy (m2/s)	Emoy (MPa)	K0moy (m/s)	Cc	Cg	σ'p (kPa)
			Poids volumique humide		Poids volumique sec										
	Wi (%)	Wf (%)	γhi (kN/m3)	γhf (kN/m3)	γdi (kN/m3)	γdf (kN/m3)	ei	ef	Δe						
Torodi	4,7	10,5	13,7	11,4	19,4	15,8	1,402	0,987	0,415	2,33E-06	19,8	1,51E-05	0,198	6,60E-03	30
Ouallam	3,5	11	15,8	13,5	18,4	15,7	0,958	0,567	0,391	5,80E-07	24,5	2,10E-06	0,158	7,20E-03	40
Fillingué	4,9	12,7	13,4	10,8	15,2	12,3	1,104	0,603	0,501	6,48E-08	16,2	4,11E-08	0,208	9,20E-03	70
Dosso	5,3	8,2	17,8	15,11	19,6	17,1	0,78	0,515	0,265	7,33E-06	22	1,41E-08	0,180	6,60E-03	45

Les échantillons de Torodi (Cc=0,198) et Fillingué (Cc=0,208) ont les plus grands coefficients de compression et donc de plus fortes amplitudes de tassement. Ces valeurs sont relativement faibles pour les échantillons de Ouallam et Dosso, respectivement 0,158 et 0,180. Les contraintes de pré-consolidation varient entre 30 et 70 kPa. Les échantillons du site de Torodi ont une contrainte de pré-consolidation du même ordre de grandeur que ceux de Tillabéry. L'horizon latéritique est une cuirasse surmontée par 2 m de sables fins argileux du Quaternaire. Cet horizon est le produit d'altération du socle granitique sous-jacent. La cuirasse latéritique surmontant des sables fins rouges n'est pas nodulaire et présente un état de cuirassement peu avancé. Il s'agit de latérite résiduelle moyennement à faiblement portante justement à cause de son faible niveau d'induration. L'horizon latéritique du site de Ouallam, de faible portance est constitué d'oolithes argilo-sableux du CT2 surmontant 2 m de sables et silts du CT3. C'est un horizon détritique non cuirassé contenant une teneur en argile relativement élevée justifiant leur faible portance (IP=17). Cet horizon s'est mis en place grâce aux processus pédologiques et ne semblent pas avoir de lien génétique avec le substrat rocheux et les horizons sous-jacents de sables et grès moyens du CT1, de même que les sables moyens du Continental Hamadien. Le lessivage des horizons est faible à cause de la faible pluviométrie (isohyète 350 à 400 mm). Sur le site de Fillingué l'horizon oolithique est inscrit dans le CT2 dominé par une forte teneur argileuse (IP=26). L'horizon latéritique est intercalé entre les sables dunaires et alluvionnaires du Quaternaire et les sables et silts du CT3. Ces niveaux détritiques ont donc été très complexés aboutissant même à une inversion des niveaux sableux du CT. Les formations sous-jacentes constituées de dépôts marins (marno-calcaires) et de grès moyens grossiers du CH/CI ne semblent pas avoir de lien génétique avec l'horizon d'accumulation des oxydes de fer.

Le lessivage est également pauvre à cause de la faible pluviométrie et la faible perméabilité des niveaux argileux. La contrainte de pré-consolidation plus élevée (σ'_p=70 kPa) témoigne d'un niveau jadis surmonté par une forte épaisseur de formations quaternaires (cordons de sables dunaires) et d'une érosion superficielle intense. À Dosso, l'horizon B correspond à une cuirasse latéritique à pisolithes ferrugineuses épaisse de 8 m surmontant seulement 1,00 m de sables et silts du CT3. La contrainte de pré-consolidation, moyennement élevée (σ'_p=45 kPa) se justifie par la structure indurée. Cet horizon, à priori détritique repose sur les argiles grises du CT2. Une couche d'oolithes-sableuses du CT1 se trouve entre 3,00 m de grès sablo-argileux et 6,00 m de sables et grès moyens du Continental Hamadien, plus en profondeur. L'induration de la cuirasse est également faible.

Le coefficient de perméabilité retrouvé pour les échantillons de Fillingué et de Dosso est faible mais élevé pour les sites de Torodi et de Ouallam.

Les coefficients de gonflement Cg sont peu élevés et sont caractéristiques d'une fraction argileuse kaolinique de la matrice fine. La forte compressibilité des échantillons provenant de Ouallam et Fillingué s'explique par leur teneur élevée en fines ($C_{80\mu m}$). Cela n'est pas le cas pour les graveleux latéritiques de Torodi, leur compressibilité est principalement due à leur indice de vides élevé (e_0= 1,402).

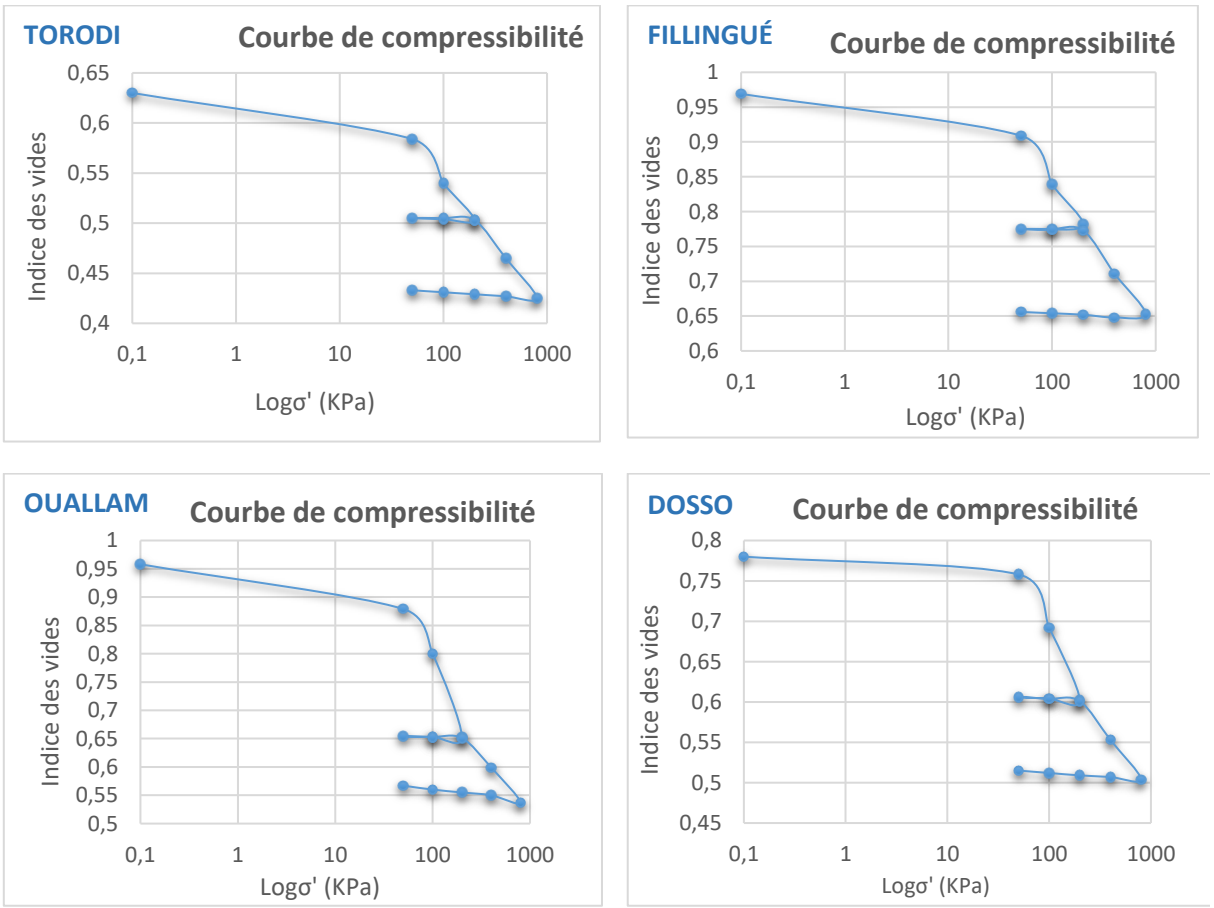


Figure 3-10 : Courbes de compressibilité des sols de plus fortes amplitudes de tassement.

3.4.3 Caractéristiques de cisaillement

Avant le démarrage des essais mécaniques, les échantillons de sol de l'ensemble des sondages réalisés in-situ sont préalablement homogénéisés par site dans un petit échantillonneur de capacité 5 litres. Ils sont ensuite reconditionnés dans la boîte de cisaillement en fonction des caractéristiques mesurées sur place (teneur en eau, poids volumique, compacité) afin de reproduire approximativement les caractéristiques de prélèvement. La teneur en eau et le poids volumique évalués in-situ constituent donc les principales références de reconditionnement des échantillons de sol. Les valeurs de teneur en eau et de poids volumiques des échantillons légèrement remaniés sont regroupées dans le Tableau 3-8 Ces valeurs ont servi au reconditionnement des éprouvettes de sols dans la boîte de cisaillement avant le lancement des essais de cisaillement.

Tableau 3-8: Valeurs moyennes de teneurs en eau et de poids volumiques humides ayant servi au reconditionnement des échantillons de sol dans la boîte de cisaillement.

	Torodi	Tillabéry	Ouallam	Say	Fillingué	Dosso	Guéchémé
W_{nat} (%)	5,3	5,1	4,2	7,2	6,7	5,8	6,5
γ_h (kN/m^3)	17,8	20,4	17,2	19,7	16,6	17,3	21,9

Les résultats des tests de résistance au cisaillement permettent de constater 3 catégories de sols vis-à-vis de leur comportement au cisaillement. Après détermination des caractéristiques de cisaillement, il apparaît que les échantillons des sites de Torodi, Tillabéry, Say et Guéchémé présentent une plus grande résistance au cisaillement. Les échantillons provenant de Ouallam et Fillingué présentent une résistance moyenne au cisaillement et ceux de Dosso une faible résistance. Les valeurs de résistance limite au cisaillement et les caractéristiques mécaniques sont déduites à partir des courbes de contrainte tangentielle en fonction de la contrainte normale appliquée ($\tau = f(\sigma)$).

La notion de contrainte limite au cisaillement est à préciser. En effet cette valeur dépend du déplacement horizontal maximal imposé à l'échantillon et celle-ci varie d'un échantillon à l'autre. Les échantillons au comportement fragile rompent très souvent de manière brutale et présentent un pic à peine visible. Quant aux échantillons à comportement élasto-plastique de type ductile, la résistance au cisaillement se stabilise et présente un palier horizontal qui ne varie plus même au-delà d'un déplacement horizontal important. Pour ces derniers, l'essai est arrêté avant un déplacement horizontal total de 10 mm. Par conséquent, la valeur de contrainte limite de cisaillement des échantillons au comportement fragile est déduite à la rupture au pic. Celle des échantillons élastoplastiques est déterminée à la valeur correspondant au déplacement horizontal maximum fixé.

3.4.3.1 Les sols latéritiques de résistance élevée au cisaillement

Dans le Tableau 3-9, sont consignées les valeurs obtenues sur les échantillons des 4 sites présentant une résistance élevée au cisaillement à partir des essais, suivant les contraintes de cisaillement et le déplacement horizontal maximal des échantillons de sol latéritique à la rupture pour des contraintes normales de 28, 56, 111 et 222 kPa.

Tableau 3-9: Valeurs des contraintes de cisaillement (τ) et de déplacement maximum (hf) pour les 4 sites (Figure 3-11).

	Torodi	**Tillabéry**	**Say**	**Guéchémé**
τ1 (kPa) – σ1 (kPa)	21 – 28	37 – 28	32 – 28	45 – 28
τ2 (kPa) – σ2 (kPa)	53 - 56	62 – 56	62 – 56	76 – 56
τ3 (kPa) – σ3 (kPa)	94 - 111	101 – 111	99 – 111	104 – 111
τ4 (kPa) – σ4 (kPa)	174 - 222	206 - 222	198 - 222	220 - 222
hf **[28 kPa] (en mm)**	7,947	6,718	8,957	8,896
hf **[56 kPa] (en mm)**	8,995	7,671	9,035	8,948
hf **[111 kPa] (en mm)**	8,956	7,062	9,011	9,134
hf **[222 kPa] (en mm)**	8,952	8,984	9,335	8,968

Les graveleux latéritiques ayant présenté une résistance élevée au cisaillement proviennent des sites de Torodi, Tillabéry, Say et Guéchémé. Sur les courbes de résistance (Figure 3-11), les contraintes ultimes de cisaillement (τ) varient entre 174 et 220 kPa pour la contrainte normale σn = 222 kPa correspondant au dernier palier.

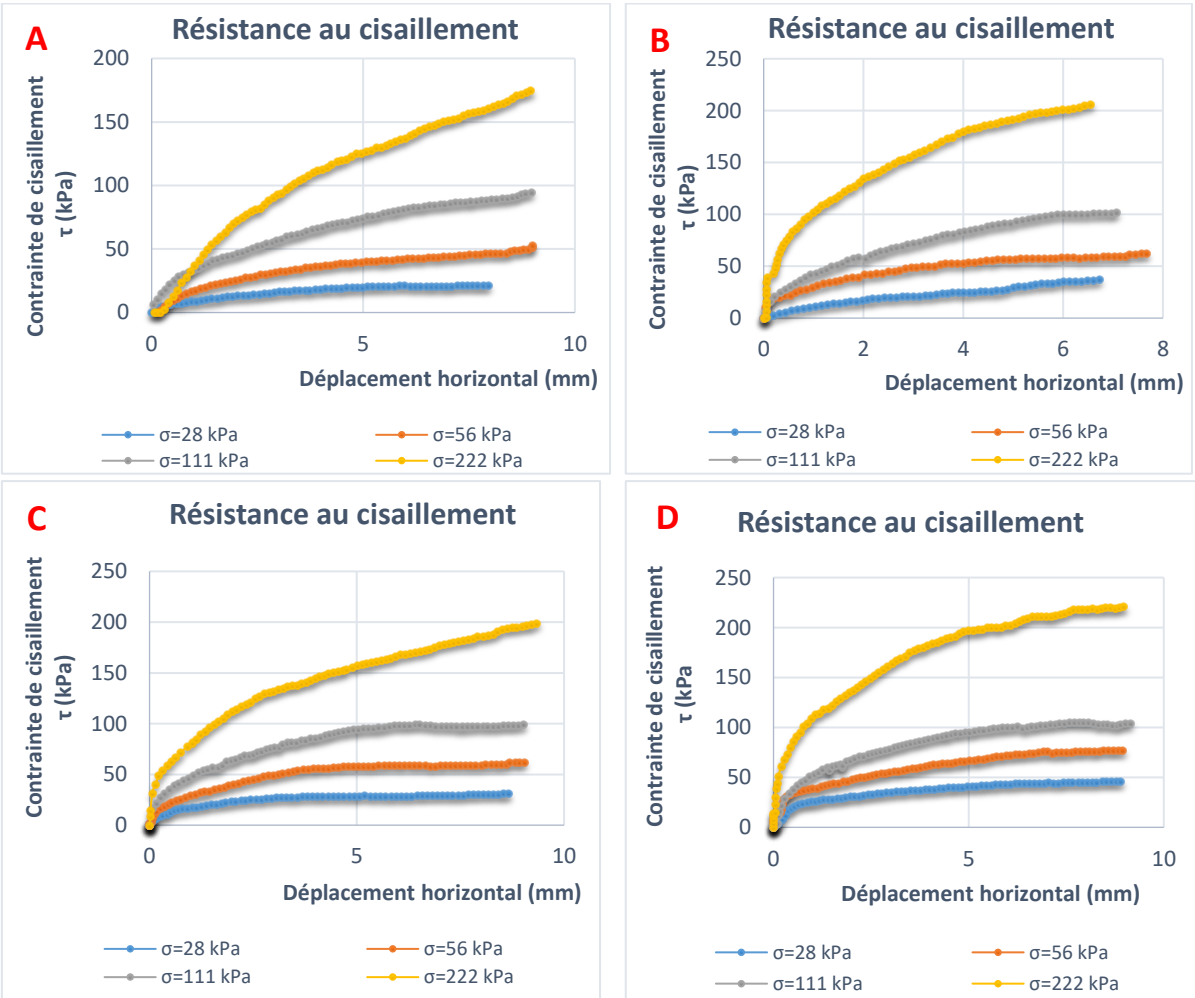


Figure 3-11 : Courbes de résistance au cisaillement ; A : Torodi ; B : Tillabéry ; C : Say ; D : Guéchémé.

Les contraintes ultimes de cisaillement (τ) des paliers inférieurs varient de 21 à 104 kPa selon les paliers de chargement (contrainte verticale). La rupture des sols se produit pour tous les échantillons pour des déplacements horizontaux maximums de l'ordre de 9 mm en moyenne ; soit 13 % de taux de déformation (Tableau 3-9). Le déplacement horizontal maximum imposé est inférieur ou égal à 10 mm mais certains échantillons de sol arrivent à la rupture bien avant cette valeur. La rupture à des déplacements horizontaux variables (Tableau **3-9**) dépend de la qualité (relief) de la surface de cisaillement, du niveau de contrainte verticale appliquée et de l'hétérogénéité des mélanges soumis aux essais.

La déformation des éprouvettes de sol latéritique a été étudiée durant le cisaillement via les courbes de déformation verticale en fonction de la déformation horizontale (Figure 3-12).

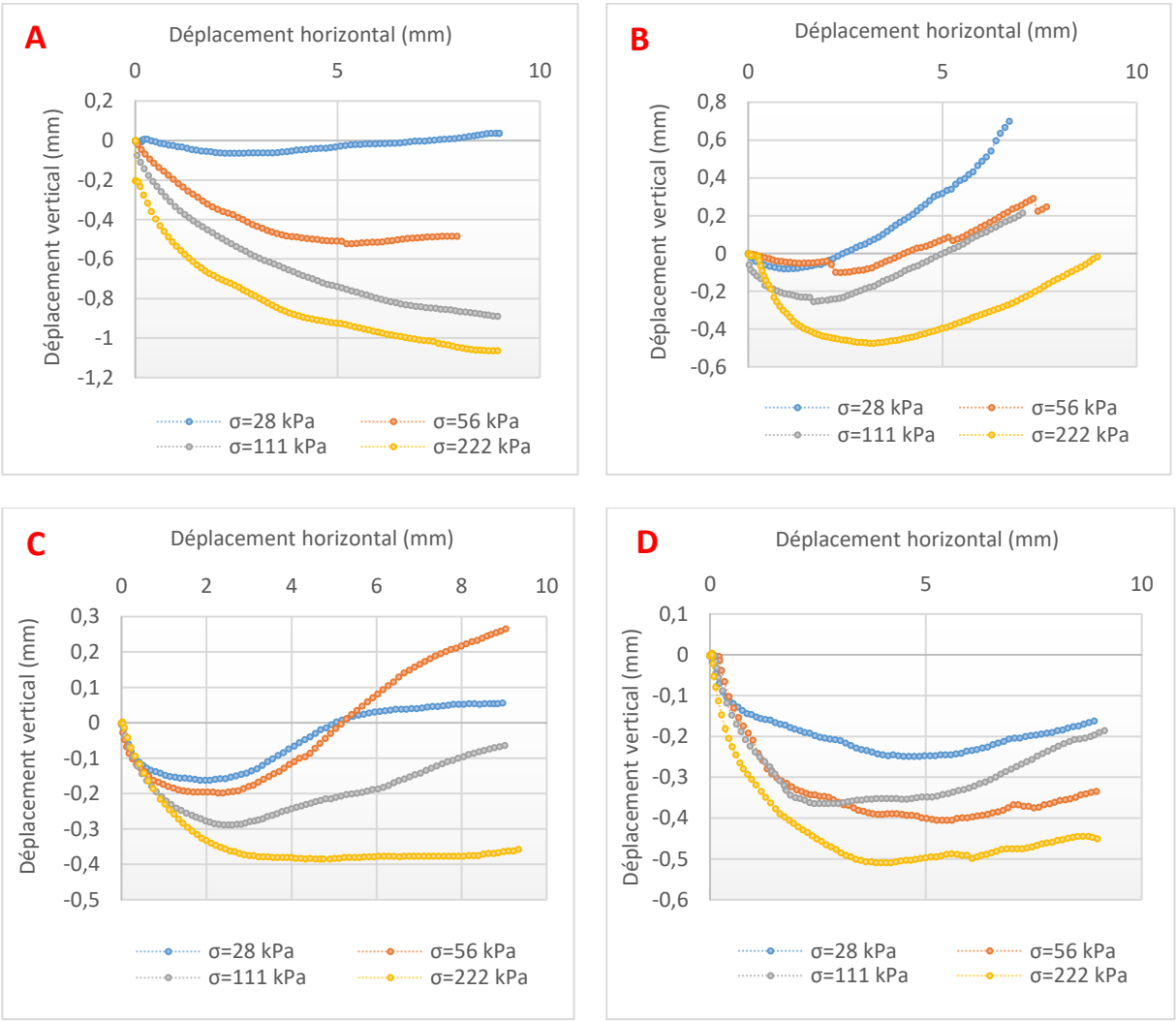


Figure 3-12 : Courbes de déformation volumique en fonction du déplacement tangentiel ; A : Torodi ; B : Tillabéry ; C : Say ; D : Guéchémé.

Les courbes de déformation volumique enregistrées sur les échantillons ont révélé un comportement dilatant (matériaux denses). En observant l'allure des courbes (Figure 3-12), on peut constater que le comportement est faiblement contractant en début d'essai, et dilatant jusqu'à la fin.

Ce comportement permet de déduire que les matériaux latéritiques des sites de Tillabéry, Say et Guéchémé sont denses. Ce résultat est cohérent avec le faible indice de vide obtenu aux essais œdométriques (cf. §3.4.2.2). Les échantillons de Torodi augmentent de volume lors du cisaillement mais seulement pour de faibles niveaux de contrainte normale (Cf. courbe bleue Figure 3-12-A). Pour des valeurs de contrainte normale élevée, la déformation se fait avec diminution de volume jusqu'à la fin du cisaillement. La diminution de volume au début de l'essai se justifie par le rapprochement des particules de sol les unes des autres et le comblement du peu de vides contenus au sein de la matrice initiale. Une fois tous les vides interstitiels comblés, les grains rentrent immédiatement en collision sans réarrangement lors du cisaillement, et on assiste à une augmentation de volume tout au long de l'essai de cisaillement.

Par ailleurs, après chaque essai, il est déduit un couple de contraintes, la contrainte normale (σ) appliquée est maintenue constante pendant toute la durée de l'essai pour chaque palier de chargement, et la contrainte tangentielle (τ) déduite à la rupture de l'éprouvette. Dans le cadre de notre étude, quatre paliers de contraintes normales ont été appliqués. Nous obtenons donc quatre couples (σ, τ) utilisés pour tracer la courbe intrinsèque (Figure 3-13). Sur cette courbe est déduite la pente de la droite et l'ordonnée à l'origine, donnant respectivement l'angle de frottement interne effectif φ' et la cohésion effective c'. Les résultats obtenus pour les échantillons de Torodi, Tillabéry, Say et Guéchémé sont consignés dans le Tableau 3-10. Les échantillons de sol recueillis sur ces sites ont une résistance relativement élevée au cisaillement.

L'angle de frottement interne effectif φ' pour ces sols est en moyenne 40° et la cohésion effective c' = 10,5 kPa. L'angle de frottement interne et la cohésion sont élevés, mais confirment bien la nature graveleuse de ces sols. Les caractéristiques mécaniques sont relativement faibles pour les échantillons de Torodi. La cohésion est quasiment la moitié comparativement aux données des autres sites. Ce fait s'explique par un faible niveau de cuirassement (faible contrainte de pré-consolidation et faible teneur en fines). De même, les essais de compressibilité indiquent que les poids volumiques initiaux et finaux avant et après chargement sont également faibles. Néanmoins, l'angle de frottement interne effectif est dans le même ordre de grandeur que les échantillons des sites de Tillabéry, Say et Guéchémé tous de bonne portance. La valeur élevée de l'angle de frottement des échantillons prélevés à Torodi est cohérente avec la fraction graveleuse en plus grande proportion. L'ensemble des résultats de portance et de caractéristiques mécaniques évoluent dans le même sens. On peut donc conclure que les graveleux latéritiques de portance élevée présentent une bonne cohésion et un angle de frottement élevé. Leur teneur en fines est de l'ordre de 10 à 15% et la plasticité IP entre 12 et 15.

Les changements de comportement dilatant et contractant en fonction du niveau de contrainte appliquée s'explique par l'attrition évidente du sol sous des hauts niveaux de sollicitation. Ce phénomène conduit à une modification de la granulométrie et donc potentiellement en perturbant localement la compacité.

Tableau 3-10: Valeurs des paramètres mécaniques effectifs, (c' et φ') déduites des courbes intrinsèques (Figure 3-13) pour les 4 sols latéritiques au comportement dilatant.

	Torodi	Tillabéry	Say	Guéchémé
c' (kPa)	5,6	11,5	10,2	10,5
φ' (°)	37,5	40,8	41,2	39,9

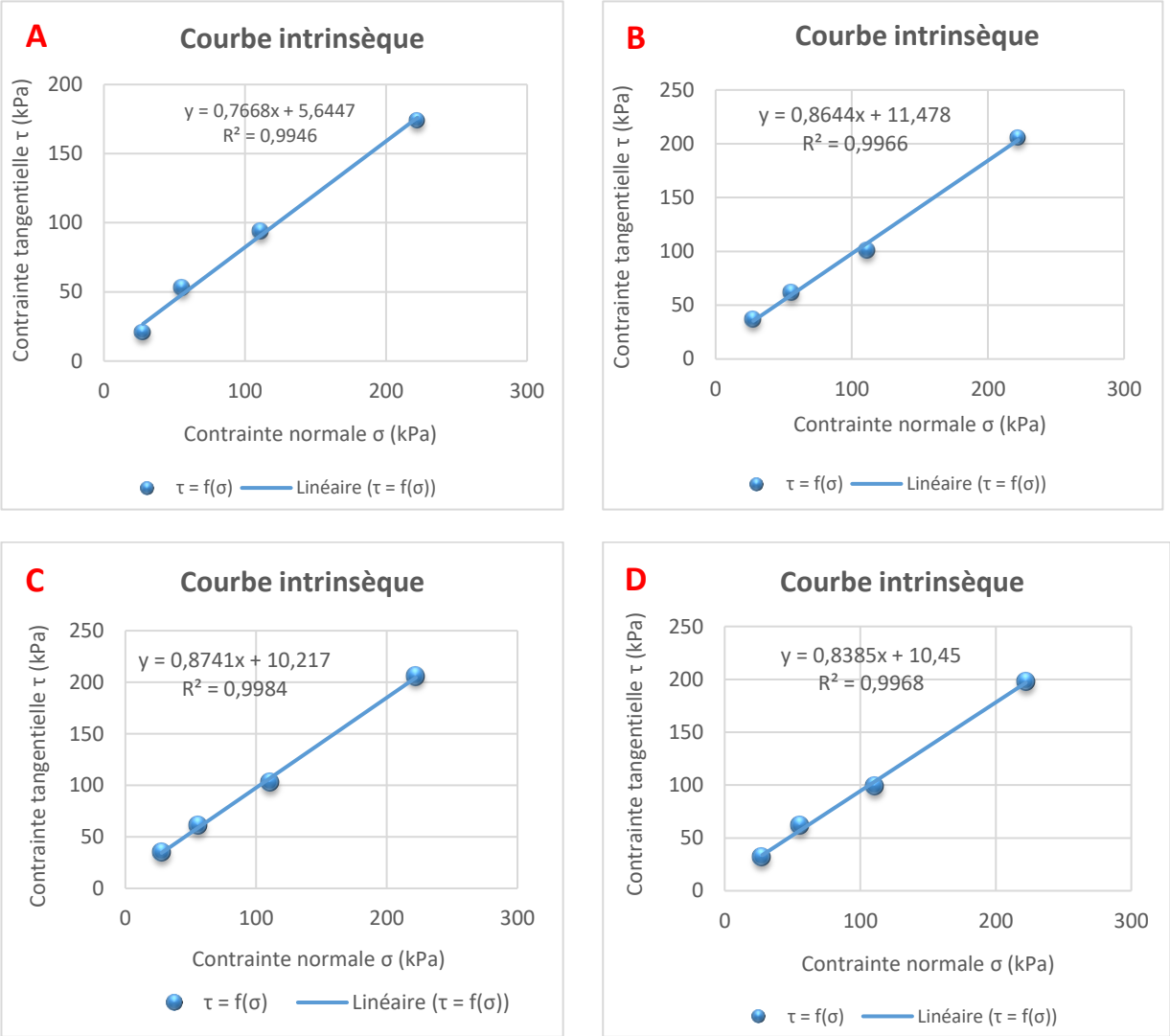


Figure 3-13 : Courbes intrinsèques déduites des essais de cisaillement τ = f(σ), pour les sites de ; A : Torodi ; B : Tillabéry ; C : Say ; D : Guéchémé.

3.4.3.2 Les sols latéritiques de résistance moyenne au cisaillement

Les valeurs de contrainte limite τ et de déplacement horizontal maximum hf des échantillons prélevés sur les sites de Ouallam et Fillingué sont regroupées dans le Tableau 3-11. Elles indiquent que les sols résistent moyennement au cisaillement. Les résistances de cisaillement correspondant aux différents paliers de chargement (contraintes normales σ) sont proches les unes des autres et les déplacements horizontaux sont en général compris entre 8 et 10 mm à l'exception du premier palier pour le site de Fillingué en rupture après un déplacement horizontal maximum de 6 mm.

Après analyse des courbes de résistance des échantillons (Figure 3-14), nous obtenons également une rupture élasto-plastique de type ductile pour la plupart des échantillons soumis aux essais de cisaillement, la résistance de cisaillement en pic étant confondue avec la résistance résiduelle. Par contre, il a été constaté que les échantillons de Fillingué présentent un léger pic de ductilité ou pseudo-ductilité plus ou moins marquée pour des niveaux de contrainte élevés (courbe correspondant à la contrainte verticale de 222 kPa Figure 3-14-B).

Tableau 3-11: Valeurs des contraintes de cisaillement et des déplacements des échantillons de Ouallam et Fillingué.

	Ouallam	**Fillingué**
τ1 (kPa) – σ1 (kPa)	27 – 28	20 – 28
τ2 (kPa) – σ2 (kPa)	41 - 56	40 – 56
τ3 (kPa) – σ3 (kPa)	76 - 111	85 – 111
τ4 (kPa) – σ4 (kPa)	165 - 222	155 - 222
hf [28 kPa] (en mm)	8,956	6,022
hf [56 kPa] (en mm)	9,98	8,114
hf [111 kPa] (en mm)	9,403	9,126
hf [222 kPa] (en mm)	9,225	9,225

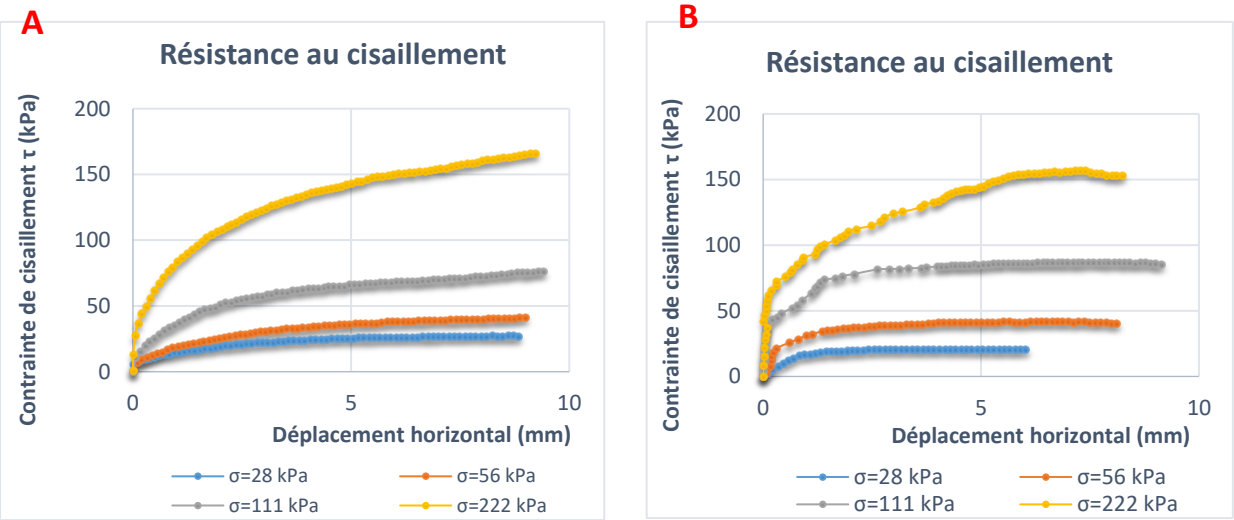


Figure 3-14 : Courbes de résistance au cisaillement ; A : Ouallam ; B : Fillingué.

Sur la Figure 3-15, est reportée la variation des déplacements verticaux en fonction des déplacements horizontaux. Les courbes permettent de déduire que les échantillons de Ouallam sont dans un état lâche puisque leur comportement est contractant du début jusqu'à la fin de l'essai de cisaillement, à l'exception de la courbe correspondant au premier palier de chargement (σ = 28 kPa Figure 3-15-A). Les sols de Ouallam ont donc un comportement dilatant pour de faibles valeurs de contrainte verticale et contractant pour des contraintes normales élevées. Le comportement mécanique des échantillons de Fillingué est similaire à ceux de Ouallam. Ce sont des sols dont le volume augmente pour de faibles niveaux de sollicitation et diminue pour des contraintes élevées. Mais dans le cas de Fillingué, un niveau de contrainte verticale élevée est requis pour que les sols basculent d'un comportement à l'autre.

Pour de faibles niveaux de sollicitation, la contrainte verticale appliquée permet une réorganisation structurale des pores contenus dans la matrice par comblement.

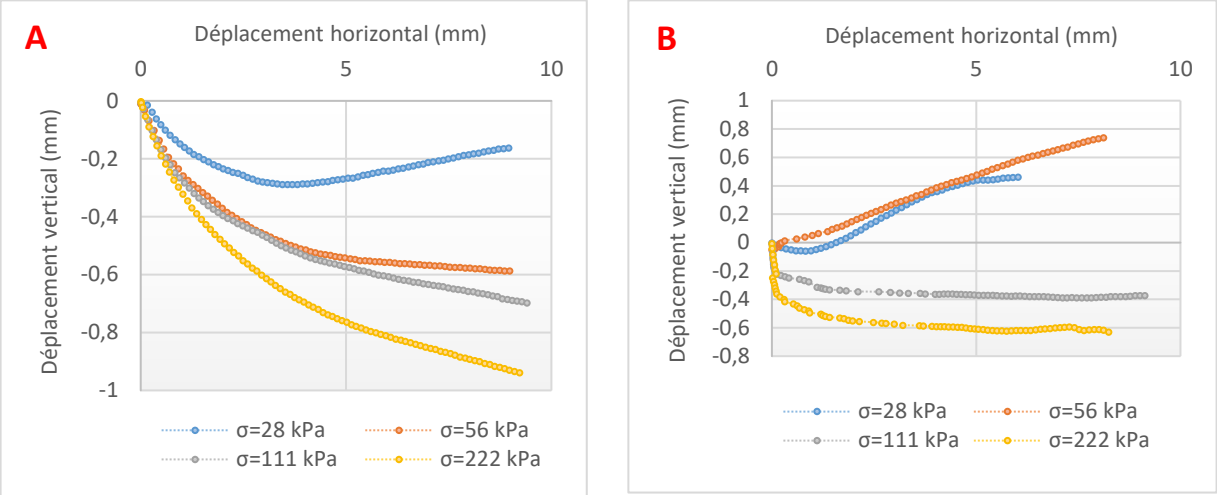


Figure 3-15 : Courbes de déformation volumique en fonction du déplacement tangentiel ; A : Ouallam ; B : Fillingué.

Lorsqu'une valeur minimale d'indice de vides est atteinte (généralement après un déplacement horizontal d'environ 4 mm pour Ouallam et au plus 2 mm pour Fillingué pour de faibles niveaux de sollicitation), la grande majorité des vides est comblée et la déformation se fait avec augmentation de volume. Pour des niveaux élevés de sollicitation, les vides sont immédiatement comblés (réduction de volume). Néanmoins, même après que les vides se soient comblés la déformation avec réduction de volume se poursuit. Ce fait résulterait de la désagrégation des pisolithes contenues dans l'échantillon de sol testé. Les résultats de contraintes normale et tangentielle ont permis de tracer les courbes intrinsèques de sols, afin de déduire la cohésion et l'angle de frottement interne effectifs (Figure 3-16).

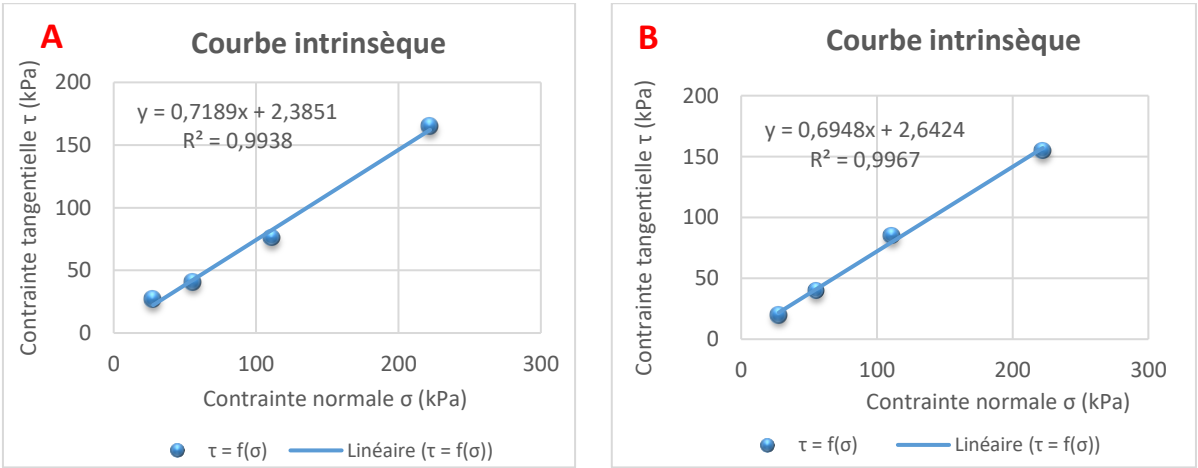


Figure 3-16 : Courbes intrinsèques $\tau = f(\sigma)$ pour les sites de ; A : Ouallam ; B : Fillingué.

Les valeurs de cohésion et d'angle de frottement interne effectifs des échantillons des deux sites sont regroupées dans le Tableau 3-12

Tableau 3-12: Résultats des essais de cisaillement des sites de Ouallam et de Fillingué.

	Ouallam	Fillingué
c' (kPa)	2,3	2,6
φ' (°)	36	35

Ces résultats (Tableau 3-12) permettent de conclure que ces sols, de résistance moyenne au cisaillement sont peu cohésifs (2,3 < c' < 2,5 kPa), et assimilables à des sols granuleux. L'angle de frottement interne est plus faible que celui du lot d'échantillons précédent de résistance élevée au cisaillement (voir Tableau 3-10). Les propriétés mécaniques relativement faibles des échantillons de sol de ces deux sites est potentiellement imputable à leur teneur en fines et leur plasticité élevée (IP=17 pour Ouallam et 26 pour Fillingué). Aussi, lorsqu'on considère le profil latéritique des deux sites, on constate tout d'abord que ces deux formations sont détritiques, elles n'ont donc pas de lien génétique avec les horizons sous-jacents. L'horizon latéritique de Ouallam appartenant au CT2, se trouve intercalé entre deux horizons de sables dont le plus proche de la surface est du CT3 et celui qu'il surmonte du CT1. Cette formation latéritique se trouve donc dans une couche à dominance argilo-sableuse contenant des oolithes ferrugineux épars. Le site de Fillingué présente quasiment la même configuration mais avec une teneur argileuse plus élevée. Leur résistance faible au cisaillement est donc en cohérence avec leur structure pédologique et le type de faciès cimenté par les oxydes de fer.

3.4.3.3 Les sols latéritiques de faible résistance au cisaillement (site de Dosso)

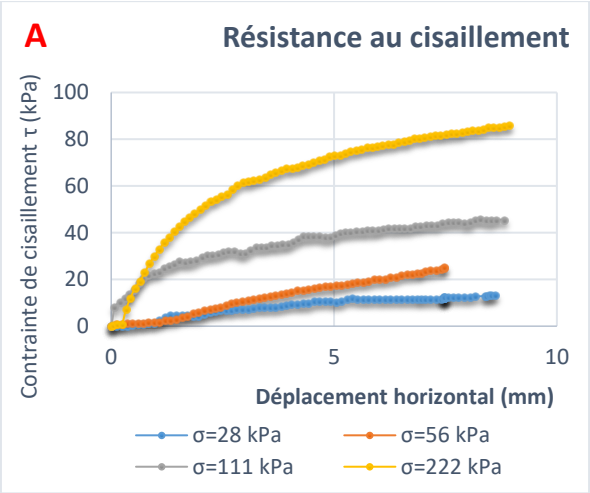
Sur la Figure 3-17 sont représentées en Figure 3-17-A les courbes de résistance au cisaillement pour différents paliers de contrainte normale, la courbe de déformation volumique (évolution du déplacement verticale en fonction du déplacement horizontal Figure 3-17-B) et la droite intrinsèque (Figure 3-17-C).

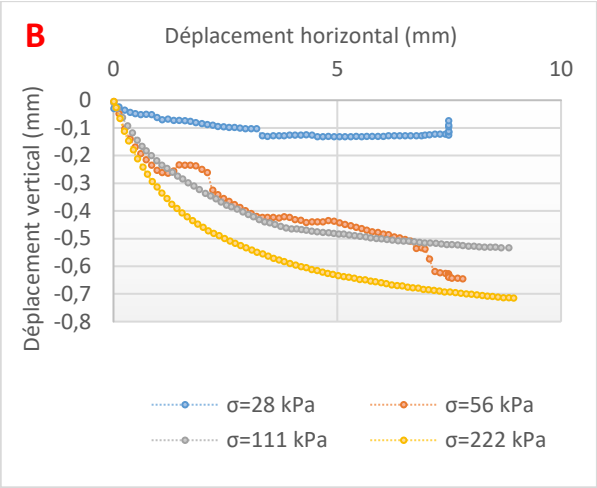
Les caractéristiques des essais de cisaillement de tous les 4 paliers de chargement sont indiquées dans le Tableau 3-13. Les échantillons de sol rompent en général après un déplacement horizontal de l'ordre de 8,70 mm.

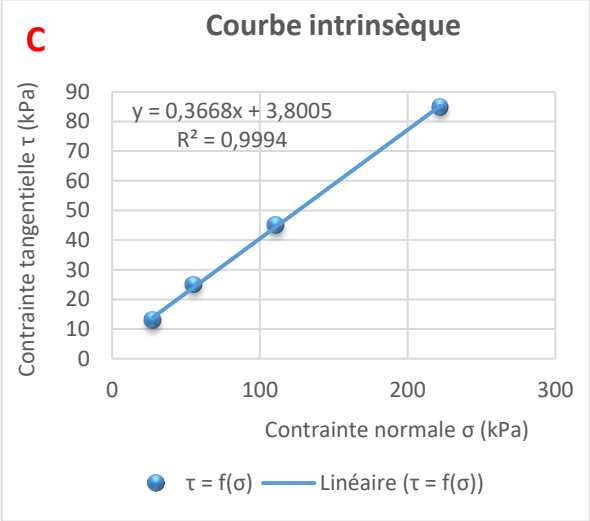
Tableau 3-13: Résultats des essais de cisaillement des échantillons de Dosso.

	Dosso
τ1 (kPa) – σ1 (kPa)	13 – 28
τ2 (kPa) – σ2 (kPa)	25 - 56
τ3 (kPa) – σ3 (kPa)	45 - 111
τ4 (kPa) – σ4 (kPa)	85 - 222
hf [28 kPa] (en mm)	8,612
hf [56 kPa] (en mm)	8,755
hf [111 kPa] (en mm)	8,924
hf [222 kPa] (en mm)	8,937

L'ensemble des courbes de la Figure 3-17 permettent de déterminer les caractéristiques mécaniques résumées dans le tableau de la Figure 3-17-D. Ces résultats montrent des caractéristiques de cisaillement différentes par rapport aux échantillons précédents. La résistance au cisaillement des sols est beaucoup plus faible. Sa valeur au pic est confondue à la résistance tangentielle résiduelle (Figure 3-17-A), il s'agit également d'un sol au comportement élastoplastique de type ductile. Les courbes de déformation volumique (Figure 3-17-B) indiquent un comportement contractant du début jusqu'à la fin de l'essai de cisaillement pour tous les paliers de contrainte normale.







D

	Dosso
C' (kPa)	3,8
φ' (°)	20

Figure 3-17 : Caractéristiques de cisaillement des échantillons de Dosso.

Les artéfacts observés sur les courbes de déformation volumique (pour les contraintes normales de 28 et de 56 kPa Figure 3-18-B) seraient la conséquence d'une perturbation induite par les pisolithes ou petits blocs rocheux qui rendent la surface de cisaillement irrégulière. Les capteurs de mesure étant très sensibles, une faible vibration du support des appareils peut créer des à-coups qui viennent perturber les mesures que nous visualisons sur les courbes. Lorsque les perturbations induites sont susceptibles d'altérer l'interprétation des résultats, l'essai est systématiquement repris.

Mais il arrive des cas où malgré la reprise des essais les perturbations y demeurent, dans ce cas nous considérons que ces irrégularités sont dues aux blocs de graviers inclus dans le sol.

Les résistances tangentielles τ déduites sur les différents paliers de chargement et les contraintes normales appliquées ont permis de tracer la droite intrinsèque de la Figure 3-17-C à partir de laquelle sont déduites les valeurs de cohésion et l'angle de frottement interne. Ces résultats, consignés dans le tableau (Figure 3-17-D) indiquent une cohésion et un angle de frottement faibles en comparaison aux valeurs obtenues pour les échantillons des autres sites.

La cohésion, de l'ordre de 3,8 kPa est faible. Cette donnée est conforme à la faible induration de l'horizon B d'accumulation des sesquioxydes à cause d'un défaut d'éléments fins (IP=6,8) permettant d'assurer la cohésion des éléments contenus dans le sol. L'angle de frottement interne (20°) montre que ces échantillons résistent mal au cisaillement validant ainsi leur faible capacité portante.

3.4.4 Recherche de corrélation entre les propriétés mécaniques (c', φ') et la portance (I_{CBR})

Notre analyse s'est ensuite portée sur la recherche d'un lien éventuel entre les propriétés mécaniques et le critère de portance ICBR des sols étudiés.

Il est clair, il faut le préciser, le nombre d'échantillons pris en compte dans l'analyse est assez limité pour assurer une parfaite formalisation des tendances observées.

Mais il semblerait y avoir un lien étroit entre les propriétés mécaniques et la portance des sols. Les propriétés mécaniques sont liées à la portance par une loi polynomiale (coefficient de corrélation > à 0,9) (Figure 3-18).

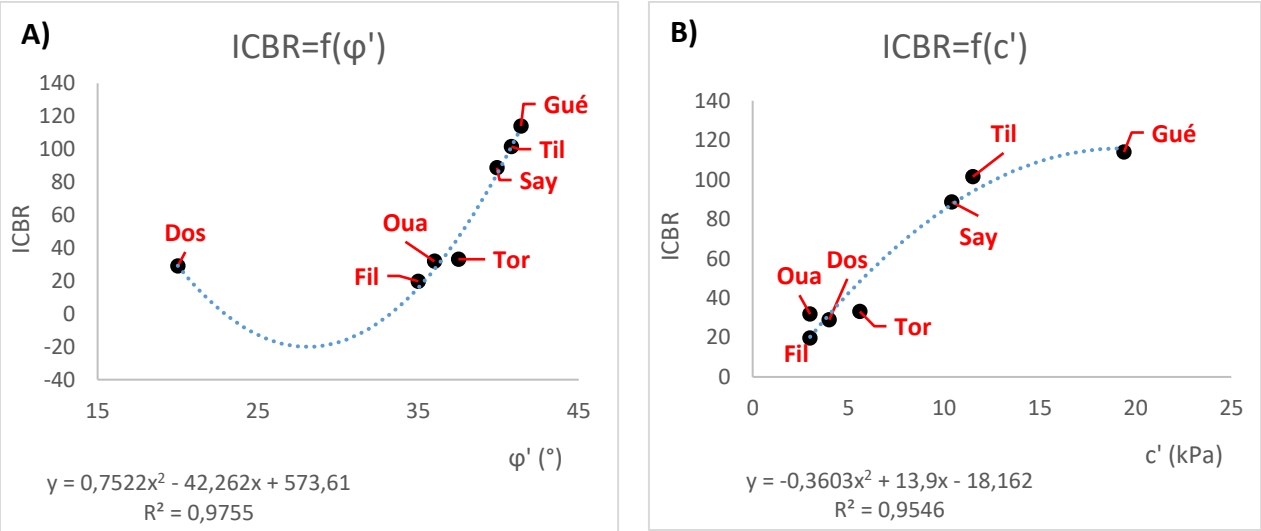


Figure 3-18 : Corrélations entre les propriétés mécaniques (c' et φ') et l'indice portant I_{CBR}. **A)** ICBR *vs.* φ' ; **B)** ICBR *vs.* c'.

Tous les deux paramètres mécaniques (c' et φ') sont liés à la portance par une loi polynomiale avec :

- ICBR *vs.* φ' : ICBR = 0,7522 φ'² - 46,262 φ' + 573,61 (r^2 = 0,97)
- ICBR *vs.* c' : ICBR = -0,3603c'² + 13,9c' – 18,162 (r^2 = 0,95)

L'analyse montre que les sols de bonne portance ont une cohésion et un angle de frottement élevés.

3.4.5 Synthèse et discussion des résultats mécaniques

3.4.5.1 Compressibilité des latérites de la zone d'étude

Les essais œdométriques ont permis de faire une différenciation des échantillons en fonction des amplitudes de tassement. Les échantillons de sol collectés sur les sites de Guéchémé, Tillabéry et Say ont peu tassé pendant l'essai œdométrique. Ces sols sont naturellement compacts avec un faible indice de vides, une faible perméabilité et une portance élevée. Leur coefficient de compressibilité Cc permet de déduire la nature kaolinique de l'argile qu'ils comportent.

Le deuxième groupe concerne les échantillons de Torodi, Ouallam, Fillingué et Dosso. Ils sont plus compressibles que les précédents et leur indice de vides est plus élevé. Ces sols sont moins perméables que ceux du groupe précédent (sites de Torodi, Tillabéry, Say et Guéchémé) et l'argile qu'ils contiennent est essentiellement de la kaolinite. Cette étude permet également de mettre en lumière l'impact des facteurs pédologiques, plus particulièrement le rôle de l'induration des sols dans le conditionnement de leur portance. Les échantillons prélevés dans les horizons cuirassés offrent une meilleure portance. Les échantillons prélevés dans les niveaux à oolithes argilo-sableux (sites de Ouallam et Fillingué) sont de faible portance à cause de leur teneur argileuse en plus forte proportion. Les échantillons moins compressibles présentent également une matrice peu poreuse (faible écart entre les indices de vides initiaux et finaux) ainsi que leur poids volumique humide et sec plus important avant et après rechargement.

3.4.5.2 Résistance au cisaillement

Les essais de cisaillement permettent de distinguer trois comportements mécaniques en fonction de la résistance des sols au cisaillement, la déformation volumique au cours de l'essai de cisaillement et les valeurs des propriétés mécaniques (cohésion et angle de frottement interne).

Les échantillons prélevés sur les sites de Torodi, Tillabéry, Say et Guéchémé ont une résistance élevée au cisaillement avec un comportement dilatant lors du cisaillement. Ce sont des sols denses comportant peu de vides (faible indice de vides). La cohésion c' et l'angle de frottement interne φ' déduits des droites intrinsèques sont plus élevés à l'exception des échantillons de Torodi qui ne sont dilatants que pour des contraintes normales faibles.

Les échantillons de Ouallam et Fillingué sont moyennement résistants au cisaillement et tendanciellement contractants mais seulement pour des niveaux de sollicitation élevés. Ce fait s'explique par l'écrasement des pisolithes contenues dans les échantillons de sol. Les échantillons de Fillingué, tout comme ceux de Torodi sont faiblement dilatants pour des contraintes normales faibles. Cela veut dire que pour de faibles contraintes normales, la fraction de fines gonfle et s'oppose à la contrainte normale appliquée. Ces sols sont plus perméables que ceux du premier groupe et donc moins denses. La cohésion et l'angle de frottement interne effectifs sont également plus faibles que les précédents.

Enfin, seuls les échantillons du site de Dosso présentent un comportement mécanique différent des sites précédents. Ils sont beaucoup moins résistants au cisaillement avec un comportement globalement contractant, mais l'indice de vides est plus faible La cohésion est du même ordre de grandeur que les sols de résistance moyenne mais l'angle de frottement interne est le plus faible.

3.5 Analyse statistique des données

3.5.1 Recherche de corrélations simples entre les propriétés géotechniques

Les caractéristiques géotechniques naturelles des échantillons prélevés ont été étudiées par les méthodes statistiques sans distinction de site. Nous avons dans un premier temps déterminé la moyenne et l'écart type des propriétés géotechniques par site et ensuite sur l'ensemble des données. Comme cela a été dit dans les sections précédentes, le paramètre le mieux apprécié pour discriminer l'aptitude des graveleux latéritiques en couches de chaussée est l'indice CBR. Nous avons alors tenté de mettre en relation l'indice CBR et les autres propriétés géotechniques en cherchant à travers une régression linéaire simple les paramètres les mieux corrélés deux à deux. Nous considérons que deux paramètres sont bien corrélés lorsque le coefficient de corrélation est supérieur à 0,7.

Considérant le nombre de paramètres pris en compte dans la recherche de corrélations, nous estimons qu'une grande partie des propriétés ne sont pas corrélées mises à part les quelques relations linéaires retrouvées pour certains paramètres (Figure 3-19). Ici, notre objectif est déterminer l'impact de la variabilité de chaque paramètre géotechnique sur l'indice portant CBR. Par ailleurs, connaissant la géologie des sites étudiés, la variabilité de certains paramètres peut également être liée à la nature géologique des sites.

Ainsi, nous pouvons procéder à la mise en place d'une approche conceptuelle ou systématique qui permettrait d'identifier les graveleux latéritiques de bonnes caractéristiques mécaniques en prenant en compte la variabilité de la portance des sols en fonction des autres propriétés géotechniques ainsi que les facteurs géologiques et génétiques.

Les nuages de point des différents paramètres et les droites de corrélation sont représentés sur les graphiques de la Figure 3-19. Les caractéristiques C_{2mm} et $C_{0,5mm}$, correspondant respectivement aux pourcentages de passants aux tamis de 2 mm et de 0,5 mm sont bien corrélés (r= 0,80).

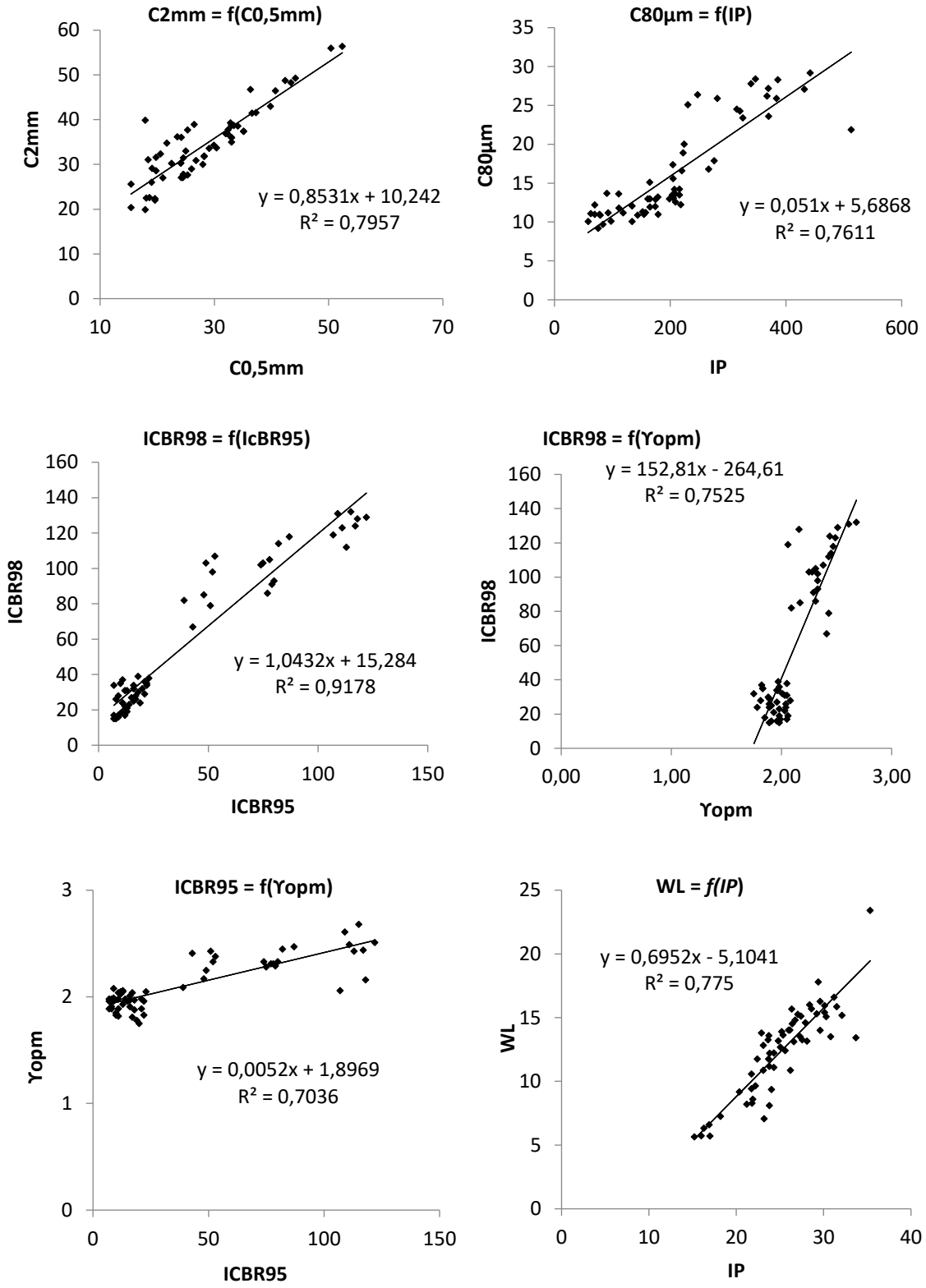


Figure 3-19 : Corrélations simples retrouvées entre les propriétés géotechniques.

La fraction fine C80µm est assez bien corrélée au paramètre IP ainsi que les caractéristiques de compactage. Les éprouvettes de sol soumises au poinçonnement sont confectionnées suite à un compactage à la teneur en eau optimale correspondant au poids volumique sec optimal.

Globalement, on peut considérer que cette première approche de corrélation entre les propriétés géotechniques des échantillons latéritiques étudiés (région sud et ouest), confirme la forte variabilité des caractéristiques géotechniques par rapport à l'indice CBR, ce qui était déjà connu par de nombreux auteurs (Fall, 1994 ; 1997 ; Bohi, 2008).

3.5.2 Analyses en Composantes Principales (ACP) : Interconnexions multiples

La forte dispersion des propriétés géotechniques des graveleux latéritiques de la zone d'étude vis-à-vis de la capacité portante indique que la recherche de corrélation n'a permis de dégager que des tendances. Nous avons donc effectué une Analyse en Composantes Principales (ACP) pour y rechercher de meilleures corrélations et dégager des tendances beaucoup plus évidentes à formaliser.

3.5.2.1 Données générales de l'analyse ACP

La recherche d'interconnexions multiples suppose d'abord qu'il faille éliminer les variables pour lesquelles la corrélation n'est pas suffisamment significative. L'étude précédente de recherche de corrélations linéaires entre les propriétés géotechniques deux à deux a permis d'obtenir les paramètres corrélés et celles qui ne le sont pas à cause de la forte dispersion et le faible coefficient de corrélation. Sur 18 variables à traiter, nous n'avons retenu que 9 dont les relations ne sont pas bien définies. Notre démarche vise ici à dégager des assemblages et à chercher selon les types, des corrélations statistiquement significatives entre l'indice CBR et les autres caractéristiques géotechniques. Les tendances qui seront dégagées à l'issue de l'analyse seront par la suite couplées aux identificateurs pédologiques et géologiques. Les paramètres définis dans cette étude sont : la teneur en eau (W_{nat}), le passant au tamis de 2 mm (C_{2mm}), à 80µm ($C_{80\mu m}$), le coefficient d'uniformité (C_u), le coefficient de courbure (C_c), l'indice CBR à 98% de l'OPM (I_{CBR98}), la teneur en eau à l'OPM (W_{opm}), la limite de plasticité (W_p) et l'indice de plasticité (I_p).

3.5.2.2 Résultats et commentaires de l'ACP

Quatre axes ont été retenus (F1, F2, F3 et F4) ainsi que quatre plans (F1-F2, F1-F3, F1-F4, et F3-F4). Les contributions des axes F1, F2, F3 et F4, respectivement de 40,5%, 14,1%, 13,4% et 9,6% correspondent aux valeurs propres de la matrice de corrélation. Ces axes cumulent environ 80% de la variabilité des individus étudiés ; les plans factoriels retenus sont bien représentatifs de l'analyse factorielle. Les figures (Figure 3-20-A, Figure 3-20-B, Figure **3-20**-C et Figure 3-20-D) donnent la représentation des variables dans les plans factoriels et les figures (Figure 3-21-A, Figure 3-21-B, Figure 3-21-C et Figure 3-21-D) donnent la représentation des individus dans les plans factoriels.

3.5.2.2.1 Sur le plan des variables

Il existe des assemblages distincts suivant les plans retenus.

3.5.2.2.1.1 Dans le plan F1-F2 (Figure 3-20-A)

- les caractéristiques de granulométrie rassemblant les nuages des variables telles que la fraction fine $C_{80\mu m}$, le coefficient d'uniformité C_u et la fraction sableuse C_{2mm}. La teneur en eau à l'Optimum Proctor Modifié W_{opm} entre à moindre égard dans le groupe de granulométrie. Ces variables sont proches du cercle de corrélation et sont concentrées autour de l'axe F2,
- la teneur en eau naturelle (W_{nat}), l'indice CBR (I_{CBR98}) et le coefficient de courbure (C_c) sont proches et constituent un autre assemblage autour de l'axe F2,
- les caractéristiques de limites d'Atterberg (I_P et W_P) forment un assemblage de points suivant l'axe F1.

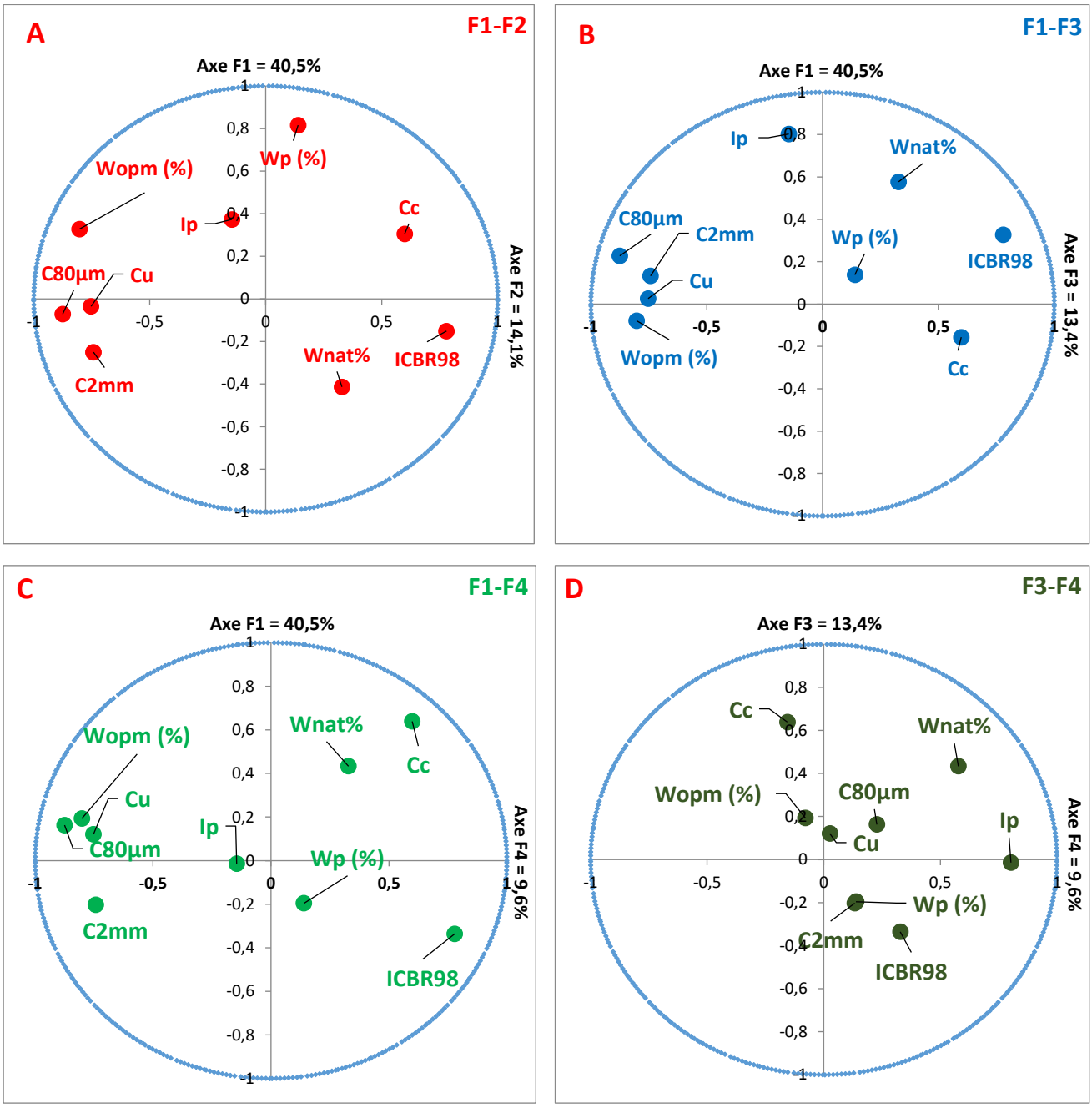


Figure 3-20 : Représentation des variables dans les plans factoriels.

Le but de notre étude est de dégager l'influence de la variabilité de chaque paramètre pris individuellement ou d'un groupe de paramètres sur la capacité portante (I_{CBR98}) des graveleux latéritiques. Nous constatons que dans le plan F1-F2, la variation de l'indice CBR est gouvernée par la fraction et la nature des grains de sol, principalement la teneur en fines et la fraction sableuse. La variabilité du CBR est également expliquée par la teneur en eau à l'OPM. Ces variables sont négativement corrélées avec l'indice CBR puisque leur nuage est diamétralement opposé à l'I_{CBR98} dans le cercle de corrélations (Figure 3-20-A); la même tendance peut être observée dans la matrice des corrélations (Tableau 3-14). La teneur en eau W_{opm} suit la même tendance que les caractéristiques de granulométrie, c'est-à-dire proche du cercle et diamétralement opposée à l'I_{CBR98}. En d'autres termes, ces variables étant négativement corrélées avec l'I_{CBR98} on peut déduire que moins leur teneur est élevée plus le sol est portant. Les sols latéritiques contenant une fraction argileuse et sableuse faibles sont plus portants.

Tableau 3-14: Matrice des corrélations issue de l'analyse ACP.

Variables	Wnat%	C2mm	C80µm	Cu	Cc	ICBR98	Wopm (%)	Wp (%)	Ip
Wnat%	1								
C2mm	-0,108	1							
C80µm	-0,095	0,549	1						
Cu	-0,147	0,475	0,656	1					
Cc	0,171	-0,547	-0,498	-0,367	1				
ICBR98	0,33	-0,478	-0,611	-0,506	0,185	1			
Wopm (%)	-0,322	0,434	0,673	0,481	-0,295	-0,707	1		
Wp (%)	-0,093	-0,173	-0,194	-0,05	0,135	0,081	0,066	1	
Ip	0,08	0,102	0,266	0,039	-0,047	0,068	0,154	0,188	1

La teneur en eau naturelle W_{nat} est autant expliquée par l'axe F1 que par l'axe F2, sa variabilité sur l'I_{CBR98} n'est donc pas totalement établie, mais on peut retenir que celle-ci agit à la fois sur la plasticité et la granulométrie des graveleux latéritiques. Les paramètres de plasticité (I_P et W_P) sont expliqués par l'axe F2 et ne semblent pas intervenir dans la variabilité de l'I_{CBR98}. Leur impact sur celui-ci pourrait être apprécié dans un autre plan factoriel. L'analyse conceptuelle qu'on peut dégager à travers ce plan F1-F2 est la variabilité des caractéristiques granulométriques suivant l'axe F2 et celle des caractéristiques de plasticité suivant l'axe F2. Mais on note que dans ce plan, la variabilité de la portance est largement conditionnée par les caractéristiques granulométriques que par la plasticité.

3.5.2.2.1.2 Dans le plan F1-F3 (Figure 3-20-B)

Le plan F1-F3 fait ressortir grossièrement les mêmes assemblages, notamment :

- L'assemblage de points formé par les propriétés granulométriques (C_u, $C_{80µm}$ et C_{2mm}) ainsi que la teneur en eau $W_{opm.}$: ce nuage est négativement corrélé à l'I_{CBR98}. Moins la proportion de ces variables est élevée plus l'I_{CBR98} est important,
- le nuage formé par l'I_{CBR98} et le coefficient de courbure Cc : le coefficient Cc évolue dans le même sens que l'I_{CBR98}, donc positivement corrélé avec celui-ci, ce qui veut dire que l'augmentation de Cc entraine une amélioration de l'indice CBR98,

- l'assemblage formé par l'indice I_P et $W_{nat,}$ suivant l'axe F1.

Le concept est donc le même que dans le plan F1-F2. La variabilité des critères de granulométrie est expliquée par l'axe F3 et celle des critères de plasticité par l'axe F1. La différence ici est que la teneur en eau naturelle W_{nat} est beaucoup plus influencée par l'axe F1. La variable W_P se situant presque au milieu du cercle, l'impact de sa variabilité n'est pas clairement définie dans ce plan. On peut en définitive retenir que la variabilité de l'I_{CBR98} est également gouvernée par les caractéristiques granulométriques dans le plan F1-F3.

3.5.2.2.1.3 Dans le plan F1-F4 (Figure 3-20-C)

Dans le plan F1-F4, la même configuration des nuages que les plans précédents s'observe. La variation de la portance est principalement contrôlée par le critère de la granulométrie, mais ce plan diffère des autres par l'absence de corrélations des critères de plasticité (W_P et I_P), se situant quasiment au centre du cercle de corrélation. Le nuage regroupant les variables C_c et W_{nat} sont autant expliqués par l'axe F1 que par l'axe F4. Elles sont donc positivement corrélées à l'ICBR98.

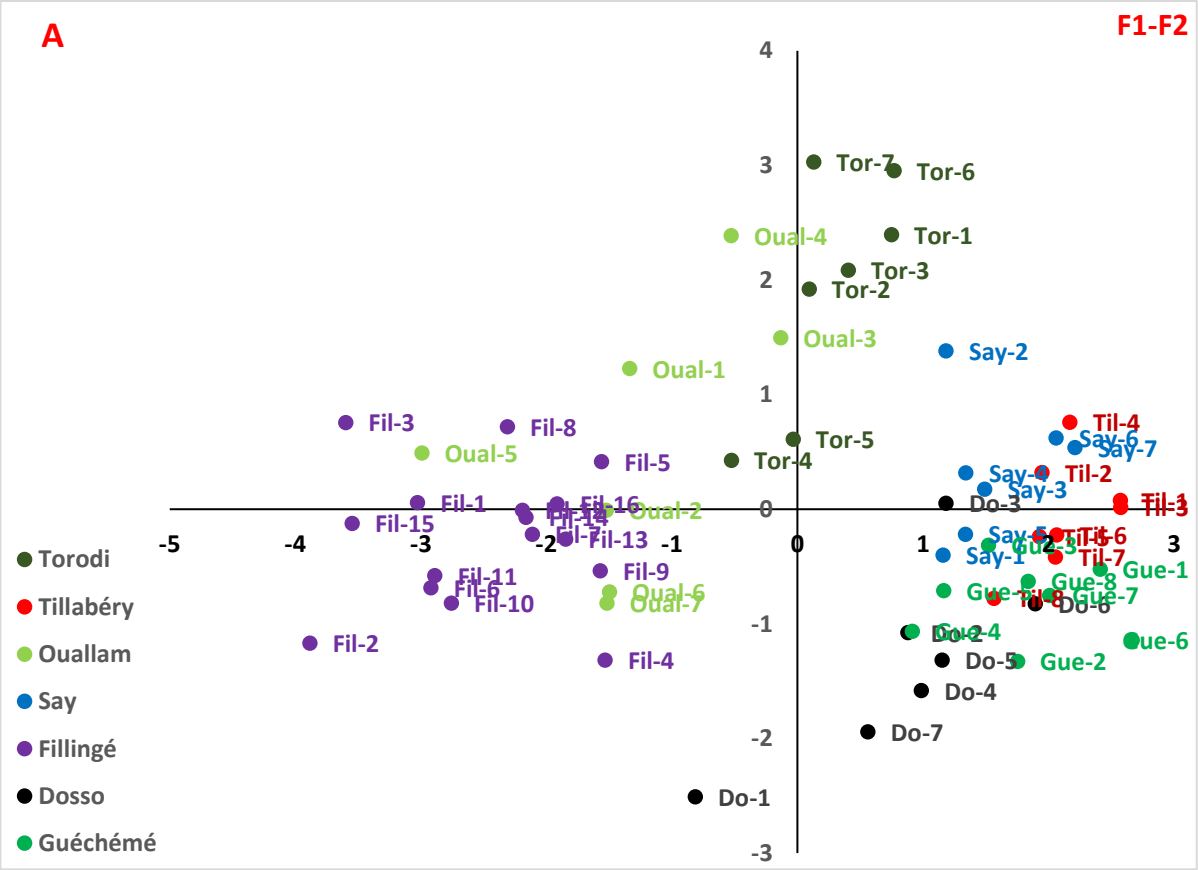
3.5.2.2.1.4 Dans le plan F3-F4 (Figure 3-20-D)

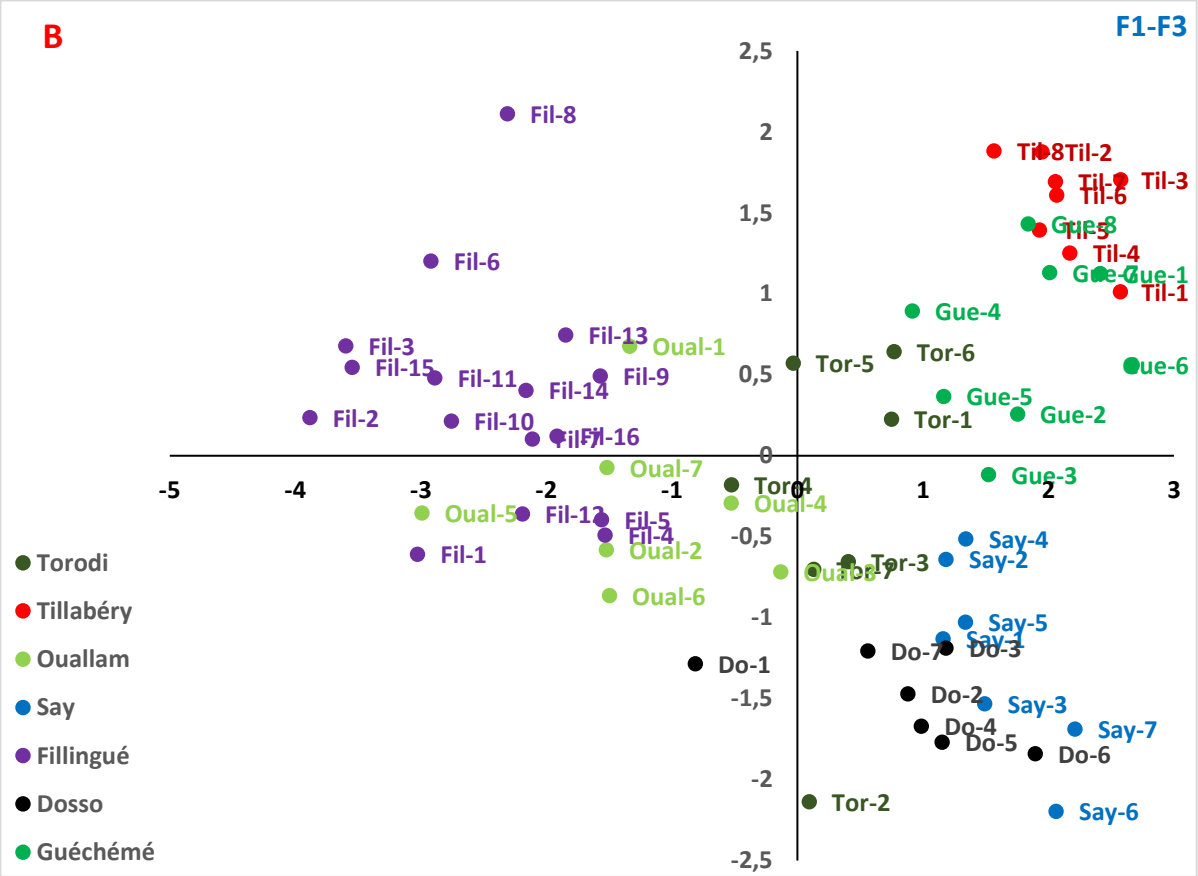
Dans ce plan, on peut noter que le seul assemblage moyennement défini est constitué des variables C_u, C_{2mm}, W_p et W_{opm}. La variabilité des paramètres de ce nuage n'est pas bien définie puisqu'ils sont quasiment regroupés au centre du cercle. En revanche, le critère de plasticité I_P est bien expliqué par l'axe F4 (coefficient de corrélation 0,80 Cf. matrice des corrélations Tableau 3-14). L'indice I_{CBR98} est positivement et faiblement corrélé avec l'I_P dans ce plan. L'augmentation de l'I_P n'améliore donc pas significativement la portance des graveleux latéritiques de la zone d'étude.

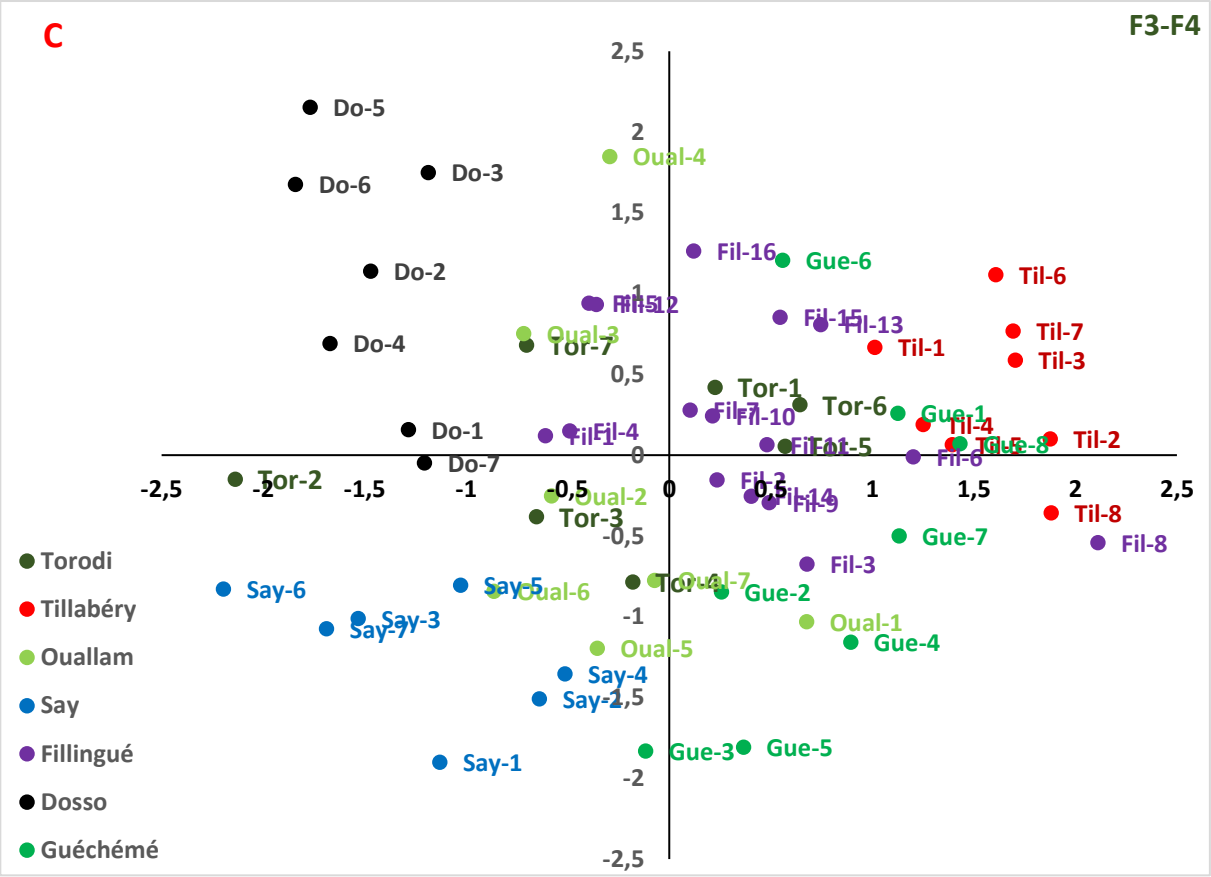
3.5.2.2.2 Sur le plan des individus

3.5.2.2.2.1 Dans le plan F1-F2 (Figure 3-21-A)

Dans ce plan, l'axe F2 semble opposer les sols de bonne portance (Say, Tillabéry et Guéchémé) à ceux de portance faible (principalement Fillingué et Ouallam). Les sites de Torodi et Ouallam et à moindre égard celui de Dosso sont répartis suivant l'axe F1, le nuage de Dosso se trouvant à l'opposé de ceux de Torodi et Ouallam. Il faut noter que l'assemblage de points formé par le site de Ouallam recoupe aussi bien celui de Fillingué que de Dosso. Les assemblages formés par les sites de Fillingué et Ouallam présentent une bonne corrélation avec les critères de granulométrie et celui de la teneur en eau à l'OPM. Ceux de Say, Tillabéry et Guéchémé sont bien corrélés avec le paramètre de portance I_{CBR98}, accessoirement la teneur en eau naturelle et le coefficient de courbure. Les nuages des sites de Torodi et une partie de Ouallam et Dosso sont principalement exprimés par l'axe F1. L'indice de plasticité et la limite de plasticité sont les variables expliquées par cet axe, elles sont par conséquent corrélées avec l'ensemble de ces nuages de points.


A
F1-F2
Torodi
Tillabéry
Ouallam
Say
Fillingé
Dosso
Guéchémé


B
F1-F3
Torodi
Tillabéry
Ouallam
Say
Fillingué
Dosso
Guéchémé



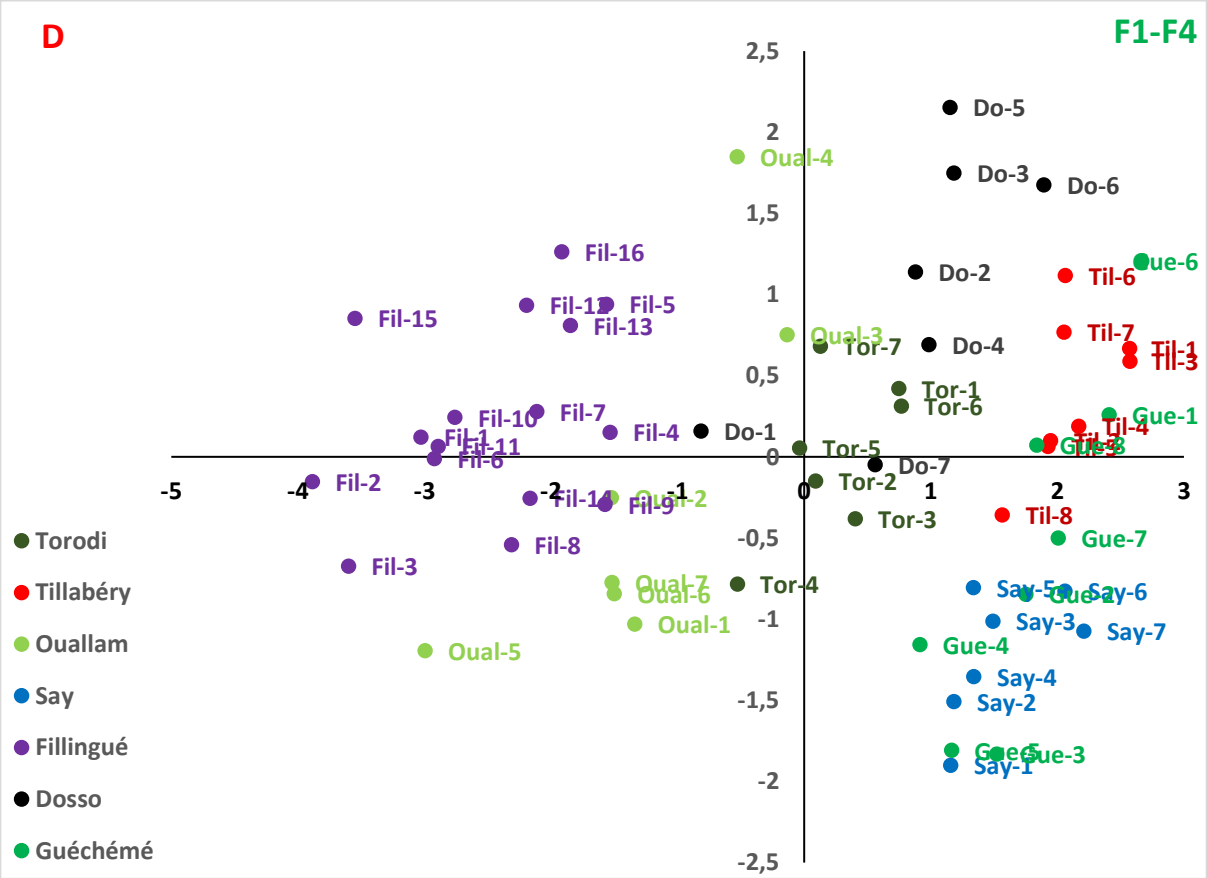


Figure 3-21 : Représentation des individus dans les plans factoriels.

3.5.2.2.2.2 Dans le plan F1-F3 (Figure 3-21-B)

La configuration des nuages dans ce plan est peu différente du plan F1-F2. Dans ce plan les nuages sont plus étalés, principalement par rapport à l'axe F3. Mais ce plan apporte des nuances plus subtiles et complémentaires sur les tendances au niveau de la variabilité des propriétés géotechniques. On constate dans ce plan les mêmes recoupements de nuages. Les assemblages de points de Tillabéry et Guéchémé se sont désolidarisés de celui de Say.

L'ensemble des nuages de Tillabéry et Guéchémé sont corrélés à l'I_{CBR98} et accessoirement à la teneur en eau naturelle. L'assemblage des points du site de Say recoupe celui de Dosso et sont moyennement corrélés avec le coefficient de courbure. Les nuages de Fillingué et Ouallam se recoupent largement et sont corrélés avec les caractéristiques de granulométrie ($C_{80\mu m}$, C_u, C_{2mm}) et la teneur en eau à l'OPM (W_{opm}). Enfin, on observe que le nuage du site de Torodi situé dans la partie centrale est reparti suivant l'axe F3 et semble être moyennement corrélé avec l'indice de plasticité IP.

3.5.2.2.2.3 Dans le plan F1-F4 (Figure 3-21-C)

La disposition des nuages de points dans ce plan est également semblable aux plans précédents, mais beaucoup plus similaire au plan F1-F3. L'information supplémentaire qu'apporte ce plan est la séparation des nuages de Fillingué et de Ouallam. La même tendance peut être constatée sur le plan des variables correspondant, il s'agit de l'individualisation du paramètre C_{2mm} par rapport au groupe de variables C_u, $C_{80\mu m}$ et W_{opm}. L'assemblage de points de Fillingué est donc bien corrélé avec les caractéristiques granulométriques (teneur en fines et coefficient d'uniformité) et la teneur en eau à l'OPM. Le nuage de Ouallam est principalement corrélé avec la fraction sableuse (C_{2mm}). L'assemblage des points du site de Dosso est en adéquation avec la teneur en eau naturelle W_{nat} et le coefficient de courbure C_c. L'ensemble des points des sites de Tillabéry et Guéchémé sont fortement dispersés de part et d'autre de l'axe F4 et sont principalement corrélés à l'indice portant à 98% de l'OPM. Dans le plan des individus, le nuage de Say s'est complètement individualisé du groupe initial (avec Tillabéry et Guéchémé dans les plans précédents). L'I_P ne conditionne donc pas sa variabilité, et aucune variable n'est corrélée avec ce nuage. L'ensemble des points constituant le nuage de Say est négativement corrélé avec la portance. La dislocation de la fraction sableuse des autres propriétés granulométriques ($C_{80\mu m}$ et C_u) dans le plan des variables (Figure 3-20-C) montre que la portance des sols de Say est gouvernée par la proportion en sable.

3.5.2.2.2.4 Dans le plan F3-F4 (Figure 3-21-D)

Ce plan cumule à peine 30% de la variabilité de l'ensemble des variables. Mais il a été retenu à cause d'une information toute particulière concernant le critère de plasticité. Le plan des variables correspondant (Figure 3-20-D) fait ressortir une meilleure explication de la variabilité de l'indice de plasticité I_P (coefficient de corrélation r = 0,80 par rapport à l'axe F3). Ce coefficient I_P est bien corrélé avec les nuages de Tillabéry, Guéchémé et moyennement avec celui de Fillingué.

Toujours dans le plan des individus, on peut déduire que pour des valeurs élevées de l'I_P, la portance des sols ne s'améliore pas (I_{CBR98} faiblement mais positivement corrélé avec l'I_P). Cette tendance peut être constatée avec le décalage des nuages de Tillabéry et de Guéchémé suivant l'axe F3, les sols latéritiques de Guéchémé étant plus portants que ceux de Tillabéry. On remarquera aussi que le nuage de points formé par les individus du site de Torodi s'est beaucoup rapproché de celui de Tillabéry. L'indice de plasticité I_P, permet donc de regrouper le comportement de ces deux sites par affinité géologique. Le nuage formé par les individus du site de Dosso s'est désolidarisé des autres sols et ne semble pas être influencé par une quelconque variable.

3.5.2.3 Synthèse et discussion des résultats de l'Analyse ACP

Les informations apportées par l'ACP sont très limitées. Le but principal de cette analyse est de faire ressortir l'impact de la variabilité des paramètres géotechniques sur la portance des sols.

3.5.2.3.1 Plan des variables (**Figure** 3-20)

Dans le plan F1-F2, l'analyse conceptuelle qu'on peut déduire est la variabilité de l'indice CBR par rapport aux caractéristiques de granulométrie suivant l'axe F2. L'indice CBR98 étant négativement corrélé avec la granulométrie, celui-ci s'améliore lorsque les fractions fines et sableuses, le coefficient d'uniformité et la teneur en eau à l'OPM diminuent.

L'axe F1 explique les caractéristiques de plasticité mais sans impact direct sur la variabilité de la portance.

Dans le plan F1-F3, la configuration de la variabilité et la disposition des nuages est assez similaire qu'au plan F1-F2 mais avec une nuance à moindre égard concernant le rapprochement de la teneur en eau naturelle à l'I_{CBR98}. La variable W_{nat} est positivement corrélée à l'I_{CBR98}. La disposition des nuages dans le plan F1-F4 est également similaire aux plans précédents, mais les critères de plasticité ne sont pas exprimés dans ce plan.

Enfin dans le plan F3-F4, la variabilité de l'I_P est bien exprimée. Cependant, l'augmentation de celui-ci n'apporte pas une grande amélioration de la portance.

En incluant les facteurs géologiques et pédologiques des sites ainsi que les données environnementales dans l'analyse ACP, on constatera que les nuages sont regroupés en fonction du degré d'induration et des éléments compositionnels de l'horizon d'accumulation des sesquioxydes. En effet, on peut déduire de cette analyse que les propriétés qui distinguent les sols les uns des autres vis-à-vis du critère de portance sont tendanciellement granulométriques. La teneur en fines ($C_{80\mu m}$) et la proportion des classes granulaires (C_u) contenues dans le sol sont les principaux éléments qui influencent la portance des sols. On pourra constater que les sols contenant une teneur moyenne en fines (<12%) sont plus portants que ceux qui en contiennent plus.

Ainsi les sols latéritiques dont les horizons d'accumulation des oxydes de fer se sont développés dans des formations à dominance argilo-sableuse (argiles du CT2) et sables et silts du CT3 (Fillingué et Ouallam) présentent une faible portance à cause leur fraction fine élevée. La faible portance des sols de Dosso est plutôt expliquée par la faible induration et leur carence en éléments fins car leur variabilité est conditionnée par le critère de plasticité. Les sols de Torodi suivent également la même tendance.

3.5.2.3.2 Plan des individus (**Figure** 3-21)

Dans le plan F1-F2, on peut visualiser suivant l'axe F2 une séparation franche entre les individus aux bonnes caractéristiques portantes (Say du CT1, Tillabéry du socle du Liptako Gourma et Guéchémé du CT3), de ceux de faible portance (Fillingué du CT2, Ouallam du CT3). Les sols de Torodi et une partie du nuage du site de Ouallam sont expliqués par l'axe F1.

Les plans F1-F3 et F1-F4 dégagent approximativement la même configuration des nuages de points que dans le plan F1-F2, mais ils sont un peu plus étalés et ne permettent donc pas une description aisée dans le seul plan F1-F2. Le plan F3-F4 fait ressortir de manière claire la variabilité de l'I_P, celui-ci étant corrélé aux nuages de points des sites de Ouallam et Torodi. L'augmentation de l'I_P n'apporte donc pas une amélioration significative de la portance car l'I_{CBR98} varie autant avec l'axe F3 qu'avec l'axe F4. Le nuage de Say qui était emmêlé avec ceux de Tillabéry et Guéchémé dans les plans F1-F2 et F1-F3 s'est complètement désolidarisé dans le plan F1-F4 (Figure 3-21-C), sa variabilité n'est donc pas conditionnée par l'I_P.

En résumé on peut retenir que :

- ✓ le groupe de bonne portance est corrélé avec les propriétés granulométriques et la teneur en eau à l'OPM,
- ✓ celui de portance faible est mieux expliqué avec la variabilité des critères de plasticité,
- ✓ et les groupes de Torodi et Ouallam (de portance moyenne) sont à la fois corrélés avec la granulométrie et les caractéristiques de plasticité (I_P).

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les travaux ont été menés dans le but de déterminer dans un premier temps les propriétés géotechniques et mécaniques des graveleux latéritiques prélevés sur le terrain. Les essais géotechniques ont pour but principal l'estimation des paramètres permettant une meilleure compréhension de l'aptitude des sols en construction routière. En outre, les résultats qui en découlent permettent de positionner ces sols dans une classe donnée selon un système de classification choisi. Ces essais fournissent des informations sur la granulométrie, la plasticité et la capacité portante des sols latéritiques. Le choix des gisements est fait par affinité géologique afin d'établir éventuellement les relations existant entre les propriétés géotechniques et les facteurs géologiques. Les essais mécaniques sont effectués pour caractériser le comportement mécanique des sols. Les propriétés géotechniques des sols déduites des essais ont été interprétées en référence aux valeurs seuils recommandées dans le guide pratique de dimensionnement des chaussées à assise latéritique en Afrique tropicale. Ce document, établi par le CEBTP (1984) est actuellement utilisé comme guide de dimensionnement des chaussées dans de nombreux pays d'Afrique.

Les échantillons soumis aux essais ont été prélevés sur 7 sept gisements latéritiques. Sur chaque profil latéritique, l'échantillonnage est effectué dans l'horizon B correspondant à celui d'accumulation des sesquioxydes. Les propriétés évaluées à partir des essais géotechniques et mécaniques indiquent qu'il s'agit de sols majoritairement granulaires avec un diamètre maximal (D_{max}) très variable d'un site à l'autre. Les valeurs de D_{max} sont dispersées d'un échantillon à l'autre du même massif latéritique. En général ces sols contiennent une fraction fine variant de 7 à 12% et un indice de plasticité IP compris entre 10 et 20. Les valeurs élevées du coefficient d'uniformité C_u montrent que les sols contiennent des particules de tailles variables mais le coefficient de courbure C_c indique que les sols sont mal gradués. Les propriétés géotechniques ($C_{80\mu m}$, IP) utilisées pour déterminer la classe des sols latéritiques suivant les systèmes de classification HRB et GTR permettent d'obtenir les classes A-2-6 selon HRB et B6 selon le GTR. Les classes de sols obtenues par les deux systèmes de classification, montrent que les échantillons latéritiques contiennent une forte fraction graveleuse mélangée à des teneurs variables de fractions sableuse, fine et argileuse. La variabilité de ces fractions a un impact non négligeable sur leur portance. Ainsi, de notre étude, il en ressort que les sols contenant des fractions fine et argileuse faibles sont plus portants mais à condition que la fraction sableuse varie dans des proportions moyennes. Les sols contenant les fractions fines et argileuses élevées sont de faible portance. Les valeurs de portance varient dans un large intervalle [20 – 125] d'un site à un autre.

L'ensemble des résultats géotechniques et mécaniques permet de distinguer deux principales classes de sols vis-à-vis de leur aptitude en couche de chaussée :

- Les sols de *bonne portance* (sites latéritiques de Guéchémé, Tillabéry et Say) : l'étude des fuseaux granulométrique a indiqué que les enveloppes granulométriques s'inscrivent presqu'entièrement dans le fuseau type. Leur teneur en fines est comprise entre 10 et 12% et ils comportent des éléments de diamètre maximal relativement moyen, de l'ordre de 33 mm. La plasticité IP est moyenne, soit 12,5 pour les sites de Guéchémé et Say et plus élevée pour le site de Tillabéry, 15,7. Le coefficient de compressibilité obtenu pour les 3 sites permet de déduire la nature kaolinique de l'argile qui caractérise principalement leur matrice fine. Ces sols, moins compressibles et peu gonflants présentent un indice de vides faible et une perméabilité moyennement faible. Lors du cisaillement leur comportement est généralement dilatant (matériaux denses) dû à l'angle de frottement élevé (40°) et une cohésion tout de même appréciable (10 kPa). L'analyse ACP indique que la variabilité de la portance des sols est principalement liée aux caractéristiques granulométriques telles que la teneur en fines, la fraction sableuse et le coefficient d'uniformité. Leur diminution ainsi que celle de la teneur en eau à l'OPM entrainent l'amélioration de la portance. L'ACP indique également que l'impact de la variabilité de l'indice de plasticité sur la portance n'est pas significatif. La tendance est la faible augmentation de l'indice CBR lorsque la plasticité augmente, donc l'I_P est positivement corrélé à l'I_{CBR98}.

- Les sols de *portance faible* (Torodi, Ouallam, Fillingué et Dosso) : leurs caractéristiques semblent s'opposer aux sols précédemment décrits. Leur faible portance se justifie par une teneur en fines élevée ainsi que la fraction sableuse. La dimension importante de D_{max} > 49 mm et la fraction fine élevée font que leur enveloppe granulométrique déborde largement du fuseau granulométrique type du CEBTP. Leur indice de plasticité est légèrement plus élevé, soit une valeur moyenne de 13,2. L'argile contenue dans ces sols est la même, c'est-à-dire la kaolinite. Ces sols, plus compressibles que ceux de portance élevée exhibent une faible résistance au cisaillement et un comportement généralement dilatant pour de faibles contraintes verticales normales et contractant (comportement lâche) pour les sollicitations élevées. Le coefficient de gonflement permet de déduire leur caractère expansif. Ils sont peu perméables et ont un indice de vides moyen à élevé. L'angle de frottement interne est plus faible (35° en moyenne) et une cohésion plus faible (2,5 kPa en moyenne). L'analyse en composantes principales montre que ces sols corrélés avec les caractéristiques granulométriques. La fraction des fines et la plasticité élevées pour certaines zones semblent justifier leur faible portance.

Cependant, il faut noter qu'une classe de portance intermédiaire ayant des propriétés communes aux deux classes précédemment décrites pourrait être envisageable si l'on veut affiner notre analyse. Il s'agit des sols latéritiques de Torodi et Dosso possédant des propriétés géotechniques fort différentes de l'ensemble. Les prélevés sur ces sites présentent aussi des différences assez importantes selon le paramètre géotechnique ou mécanique considéré.

Ces sols, de portance moyenne de 31, présentent une plasticité différente. L'IP des échantillons de Torodi est quasiment le double de celui des sols de Dosso, respectivement 13 et 6,8. Ces sols bien que de portance équivalente sont rangés dans des classes différentes. Selon le GTR, la classe obtenue est B6 pour Torodi et B4 pour Dosso, correspondant respectivement aux sable argileux à peu argileux et graves argileuses. Selon la classification HRB les classes sont également différentes, dont la classe A-2-6 pour Torodi et A-2-4 pour Dosso.

On constate donc à travers cette analyse la limite des normes étrangères souvent appliquées à tort pour caractériser les graveleux latéritiques en vue de leur utilisation en construction routière. Cela se justifie par le fait que certaines classes de sol aux performances similaires présentent des caractéristiques géotechniques et mécaniques forts éloignées l'une de l'autre. Du point de vue pédologique, les sols de Torodi sont résiduels et ceux de Dosso détritiques. Les sols de Torodi constituent donc des produits d'altération de roche granitique ayant subi une dégradation graduelle. Ces sols sont donc plus enrichis en éléments fins, car en relation avec l'horizon kaolinique sous-jacent. Les sols de Dosso se sont mis en place après l'altération de roches dont ils n'ont pas de lien génétique. L'altération est donc différente car le produit fini latéritique est conditionné par les facteurs pédologiques tels que la nature des formations traversées lors du transport et les conditions locales de la zone de dépôt.

Le manque d'éléments fins dans les sols de Dosso s'explique donc par l'absence de fractions fines dans les diverses formations traversées et celle se situant dans la zone de sédimentation.

En résumé, cette étude a permis de dégager des tendances sur la variabilité des propriétés géotechniques des graveleux latéritiques. Par contre, les investigations de caractérisation réalisées s'avèrent insuffisantes pour parvenir à des conclusions claires, justement à cause de la nature conflictuelle de certaines propriétés. Le but de notre démarche vise à déterminer une éventuelle corrélation entre la variation des paramètres mécaniques et les facteurs géologiques dans un premier temps et accessoirement d'autres facteurs qui paraissent pertinents. En considérant les différentes formations géologiques sur lesquelles les profils latéritiques étudiés se sont développés, il ne semble pas y a voir de lien direct entre ces derniers et les caractéristiques mécaniques et géotechniques.

En définitive, nous pouvons dire qu'en référence aux conclusions auxquelles sont parvenues de nombreuses études (Lyon Associates, 1971 ; Gidigasu, 1972 ; 1976 ; Mahalinga-Iyer & Williams, 1997 ; Attoh-Okine, 2004 ; Millogo, et al., 2008 ;), les perfomances des sols latéritiques sont en étroite relation avec leur composition chimique et minéralogique ainsi que l'aspect de leur microstructure et la proportion des composés chimiques

Au cours de cette étude de caractérisation, nous avons relevé des remarques assez inhabituelles qui méritent d'être soulignées. On peut constater à titre d'exemple que le site de Guéchémé de portance élevée (125) et celui de Ouallam et Dosso de portance plus faible (30) sont tous situés sur le Continental Terminal 3, constitué principalement de grès ferrugineux et de sable moyen.

Aussi nous avons obtenu des portances comparables pour deux formations géologiques totalement différentes (les sites de Say – Continental Terminal 1 et Tillabéry – granites birimiens du Liptako-Gourma).

Une façon plus pertinente de caractériser ces sols serait de coupler l'interprétation des propriétés mécaniques et géotechniques à la composition minéralogique. L'étude de la structure macroscopique et microscopique des échantillons qui fera l'objet du quatrième chapitre permettra de valider certaines tendances relevées à l'issu de la présente étude géotechnique et mécanique.

CHAPITRE IV

CARACTERISATION MINERALOGIQUE

4 CHAPITRE IV : CARACTERISATION MINERALOGIQUE

4.1 INTRODUCTION

Les investigations menées sur la microstructure constituent des informations nécessaires pour connaître les éléments minéraux et leur disposition au sein des sols latéritiques. Ces données permettent aussi de vérifier l'impact de la microstructure sur les propriétés mécaniques aussi bien qualitativement que quantitativement. Les analyses minéralogiques ne révèlent pas systématiquement l'origine, la nature ou même la composition minéralogique des sols latéritiques. Par exemple, deux échantillons latéritiques physiquement identiques n'ont pas forcément la même composition chimique et deux échantillons de composition chimique similaire peuvent avoir des propriétés géotechniques différentes (Maignien, 1958 ; 1962, Asghar et al., 2015).

La composition minéralogique est considérée comme un facteur important pour la caractérisation physique des graveleux latéritiques. Maignien (1966) a divisé les constituants minéralogiques en éléments majeurs, essentiels pour le phénomène de latéritisation, et les éléments mineurs qui n'affectent pas le processus de latéritisation. Les éléments majeurs sont principalement les oxydes et hydroxydes d'aluminium et de fer, combinés avec des minéraux argileux, et dans une moindre mesure le manganèse, le titane et la silice. Les éléments mineurs dans la plupart des cas sont soit résiduels ou clastiques. Les oxydes de fer peuvent être retrouvés sous plusieurs formes. Les minéraux les plus fréquents sont la goethite ou la limonite et l'hématite. La magnétite et l'ilménite sont également des variétés d'oxyde de fer retrouvées dans certains sols latéritiques.

Dans le chapitre précédent les essais géotechniques et mécaniques ont été effectués pour caractériser le comportement physico-mécanique des graveleux latéritiques prélevés sur chaque site de la zone d'étude. Ces données ont par la suite été interprétées dans le but de dégager une éventuelle relation entre d'une part l'indice portant CBR et d'autre part, les paramètres tels que la granulométrie, la plasticité, la compressibilité, les caractéristiques de cisaillement, …etc.

Les tendances qui en sont déduites sont ensuite confrontées aux facteurs géologiques et pédogénétiques afin de connaître l'influence de la morphologie et de la roche mère sur les propriétés géotechniques des sols étudiés vis-à-vis de leur aptitude en construction routière. Il faut noter qu'une faible liaison a été relevée entre les caractéristiques géotechniques et les facteurs géologiques et génétiques. Somme toute, nous avons pu dégager des tendances mais pas de manière évidente sur la variabilité des propriétés géotechniques.

Pour compléter cette corrélation, une étude minéralogique basée sur diverses techniques a été réalisée sur les mêmes échantillons. Il s'agit d'une étude établie sur la base de plusieurs approches et sur des échelles aussi bien macroscopique que microscopique. Cette étude suppose dans un premier temps la caractérisation texturale des échantillons latéritiques des différentes zones d'étude retenues.

L'étude pétrographique des lames minces donne la disposition grossière des éléments texturaux ainsi qu'un aperçu sur les types des principaux minéraux caractérisant ces sols. Il s'agit donc d'une analyse macrostructurale permettant l'accès aux informations telles que le mode d'attaque des oxydes de fer et leur disposition au sein de la matrice. Cependant, le recours à des méthodes qualitatives telles que les analyses ATD et ATG et la spectroscopie Raman permettent de discriminer les phases minérales de manière précise comme par exemple la différenciation des variétés d'oxydes de fer goethite-hématite. La diffractométrie des rayons X permet quant à elle de dresser le bilan des différents minéraux cristallisés contenus dans les sols ainsi que leur semi-quantification par une méthode appropriée. Les observations au MEB et la spectrométrie à la sonde EDS, largement utilisées dans nos travaux donnent accès à une description beaucoup plus détaillée de la microstructure des échantillons analysés ainsi que le mode d'agencement des différentes phases minérales retrouvées.

Enfin, la caractérisation microstructurale est complétée par les analyses chimiques de dosage des éléments mineurs et majeurs. Les composés chimiques (principalement les oxydes) ainsi déterminés permettent d'estimer le degré de latéritisation des gisements étudiés.

4.2 Étude pétrographique des échantillons

L'étude pétrographique constitue une première étape de la caractérisation minéralogique des sols latéritiques de la zone d'étude. Elle permet de recueillir des informations sur la texture des sols latéritiques et de déterminer une première approche de leur composition minéralogique. Les informations recueillies permettront d'affiner et d'orienter les investigations à mener par des méthodes complémentaires. Dans le cadre de notre étude, une série de sept lames minces polies imprégnées et non recouvertes ont été réalisées. Les lames ont été observées à l'aide d'un microscope optique Leica DM750 P muni d'un polariseur et d'un analyseur. Ce microscope est aussi doté d'une caméra permettant de photographier la lame observée. Les différentes images relevées à la caméra sur les échantillons de chaque site sont regroupées dans les Figure 4-1 à Figure 4-6.

L'analyse texturale est complétée par une description de la macroporosité ainsi qu'une appréciation approximative des dimensions des éléments minéraux identifiés et les vides contenus dans la matrice. La description de leur éventuelle connexion représente également une information supplémentaire permettant de recueillir des données spécifiques sur les facteurs génétiques tels que le mode de drainage, l'attaque des oxydes de fer et d'aluminium, l'identification des minéraux originels de la roche mère. Dans le cadre de cette étude, les images recueillies au microscope optique permettent de distinguer trois textures différentes.

4.2.1 Texture à attaques ferrugineuses isolées

Les éléments minéraux retrouvés dans cette texture sont principalement ; les oxydes de fer et/ou d'aluminium, les oxydes de titane (identifié au MEB), la kaolinite et le quartz. Sur la Figure 4-1, les zones apparaissant en gris-beige sur l'image correspondent à la résine amorphe utilisée pour la fabrication des lames. Celle-ci apparaît dans les zones de décollement, généralement des grains de quartz.

L'attaque des oxydes de fer est préférentiellement orientée vers les agrégats de grains de quartz. Ces zones d'attaque des oxydes de fer sont dispersées et isolées à travers toute la matrice. La matrice est principalement argileuse, il s'agit de la kaolinite apparaissant en jaune-orangé sur les lames de Torodi, Ouallam et Fillingué et en marron sur celle de Dosso (Figure 4-1-D). Les zones cimentées par les oxydes de fer sont marquées par la couleur marron foncé, enrobant les grains de quartz (Figure 4-1). L'aspect textural, faisant ressortir clairement les éléments texturaux ainsi que leur disposition dans la matrice est schématisé en Figure 4-2.

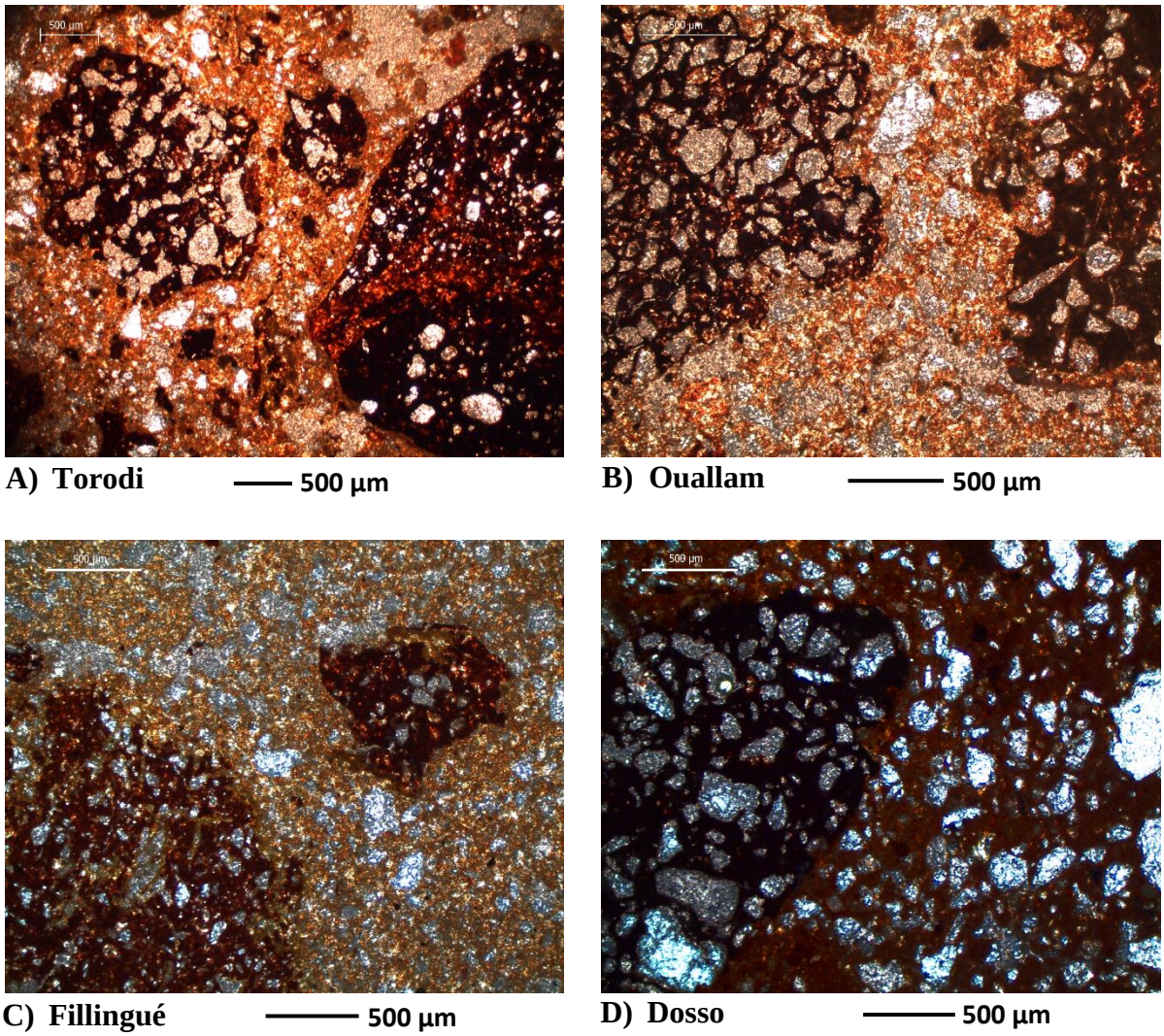


Figure 4-1 : Observation en lumière naturelle polarisée analysée (LNPA ; grossissement x4) des lames minces des échantillons prélevés sur les sites de Torodi, Ouallam, Fillingué et Dosso. La résine amorphe apparaît en gris-beige. Les différents minéraux apparaissent en teintes ocre, blanche, orange et jaune-orangée.

Sur la Figure 4-2 on peut constater que la texture de ces échantillons est caractérisée par des zones de concentration isolées d'oxydes de fer généralement dans un agrégat de grains de quartz. L'ensemble baigne dans une matrice principalement kaolinique. Des grains de quartz et des concrétions pisolithiques se trouvent également ennoyés dans la matrice kaolinique mais avec une densité relativement faible par rapport aux zones de cimentation.

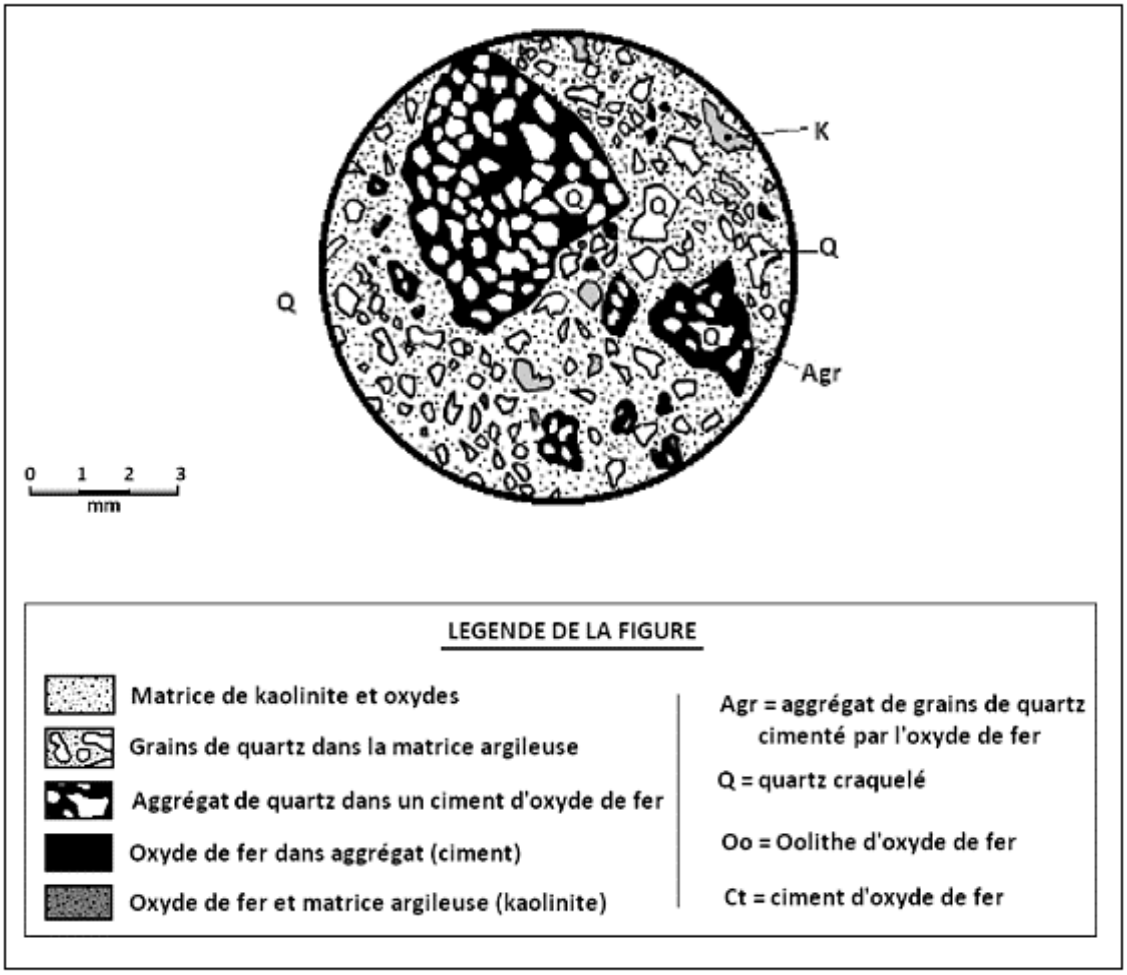


Figure 4-2 : Schéma de la texture à attaques ferrugineuses isolées des échantillons des sites de Torodi, Ouallam, Fillingué et Dosso.

4.2.2 Texture à attaques ferrugineuses diffuses

Cette texture est caractérisée par une attaque diffuse et généralisée des oxydes de fer à travers toute la matrice (Figure 4-3). Les oxydes de fer ne revêtent pas la microstructure de manière préférentielle, ils attaquent tous les éléments matriciels par l'intermédiaire des vides interconnectés et les remplissent en occasionnant la mise en place de ponts ferrugineux reliant l'ensemble des faciès.

On constate néanmoins que les oxydes de fer créent un cortex de cimentation ferrugineuse autour des grains de quartz en les soudant au faciès argileux (Figure 4-4). L'indice de biréfringence du quartz visuellement craquelé sur la lame permet son identification facile en lumière naturelle polarisée analysée.

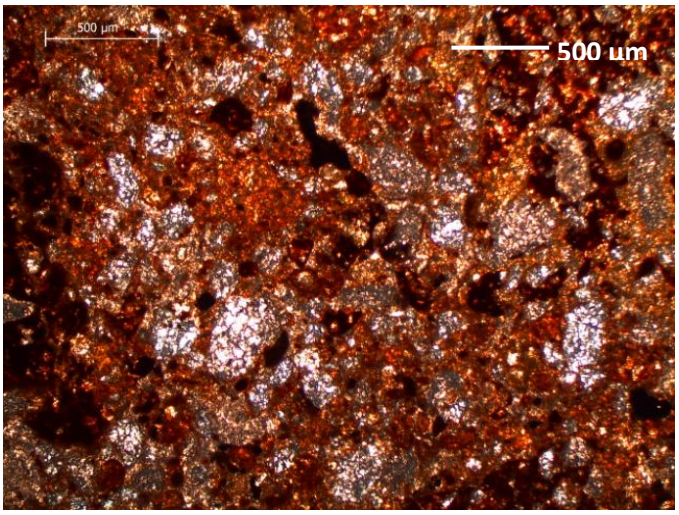


Figure 4-3 : Observation en lumière naturelle polarisée analysée (LNPA ; grossissement x4) d'une lame mince sur l'échantillon de Tillabéry. La résine amorphe apparaît en gris-beige. Les différents minéraux apparaissent en teintes ocre et blanche, orange et jaune-orangée.

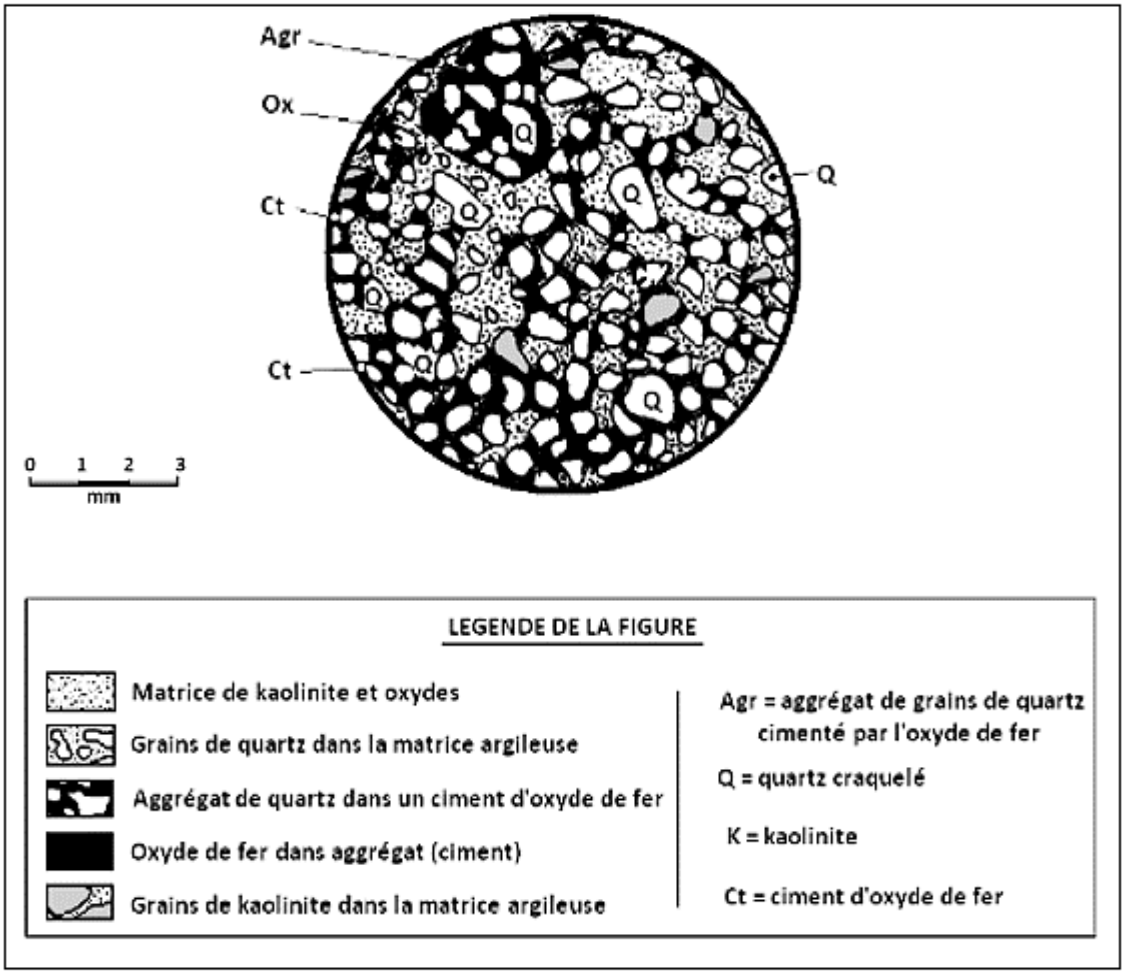
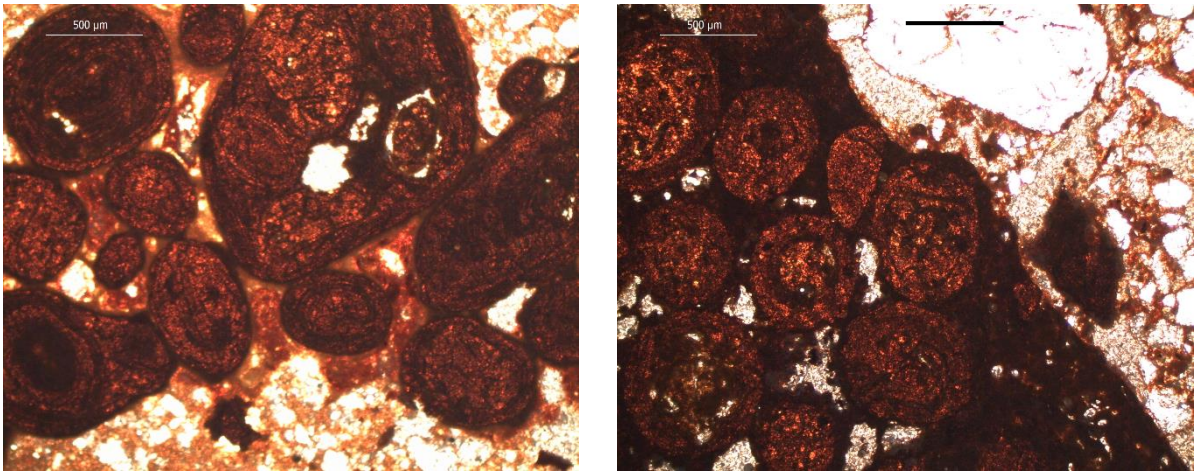


Figure 4-4 : Schéma de la texture à attaques ferrugineuses diffuses de l'échantillon de Tillabéry.

4.2.3 Texture à oolithes

Les échantillons prélevés sur les sites de Say et Guéchémé présentent une texture à oolithes, c'est-à-dire contenant des zones essentiellement composées d'oxydes de fer (Figure 4-5)



A) Say 500 µm **B) Guéchémé** 500 µm

Figure 4-5 : Texture oolithique observée en lumière naturelle polarisée analysée (LNPA ; grossissement x4) de lames minces des échantillons de Say et Guéchémé.

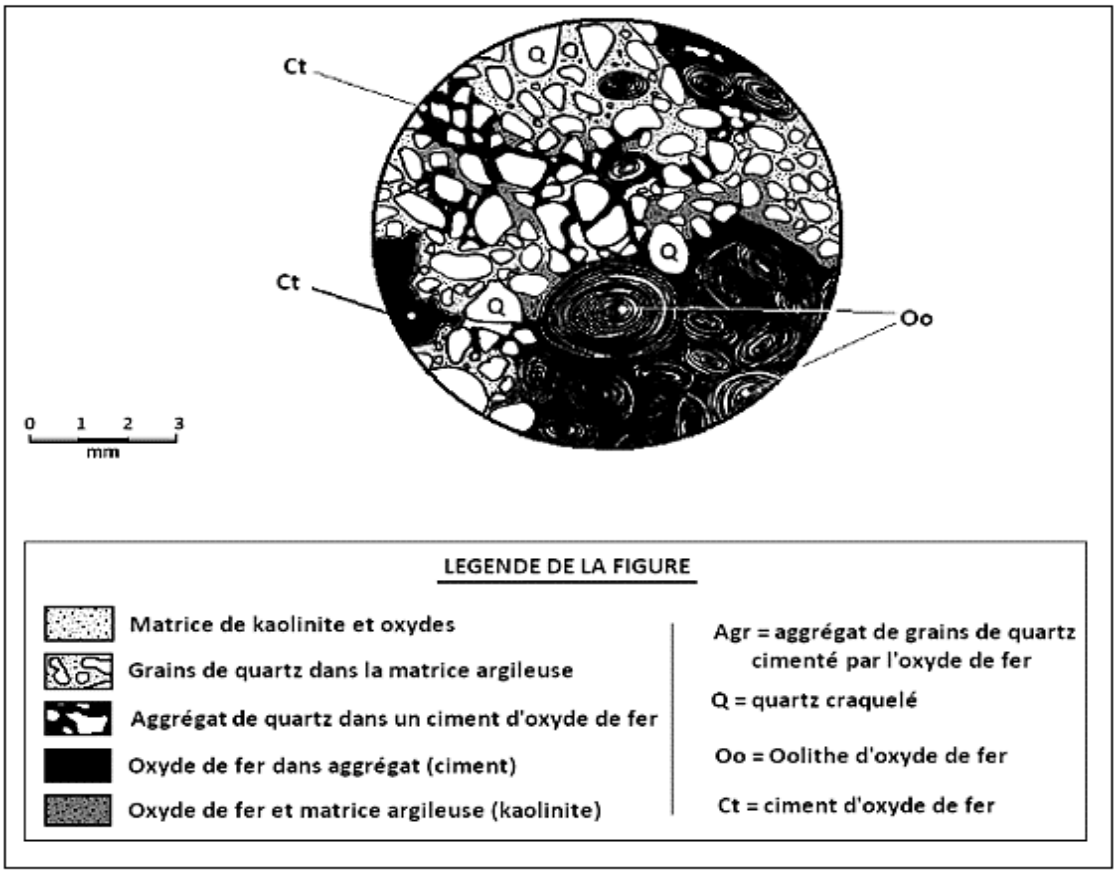


Figure 4-6 : Schéma de la texture oolithique des échantillons de Say et Guéchémé.

Dans ces zones à forte concentration d'oxydes de fer, ces derniers sont disposés sous forme d'oolithes concentriques ovoïdes accolés (de l'ordre de 50µm à 100µm) les uns aux autres et très localisés. Les oxydes de fer sont sous forme hydratée (goethite) ou non hydratée (hématite). Les grains de quartz sont rarement retrouvés dans les zones d'oolithes ferrugineux, mais sont denses dans la matrice kaolinique. On peut constater une pénétration diffuse des oxydes de fer à travers les vides de la matrice formée par les grains de quartz et la kaolinite (Figure 4-6). Les grains de quartz retrouvés dans ces échantillons ont une taille de l'ordre 20 à 30 µm et apparaissent également craquelés.

4.2.4 Synthèse de l'étude pétrographique

L'étude pétrographique réalisée sur l'ensemble des échantillons de la zone d'étude fait ressortir des minéraux tels que le quartz, la kaolinite et les oxydes de fer. Selon la combinaison et la disposition des éléments, trois types de texture peuvent être distingués :

- **La texture à attaque ferrugineuse isolée** : elle est caractérisée par des zones ferritisées denses en silice. Ces zones sont isolées et répandues sporadiquement dans la matrice kaolinique pauvre en oxydes de fer. Les grains de quartz, craquelés se trouvent également ennoyés dans la matrice kaolinique. Les échantillons caractérisés par cette texture ont été prélevés sur les sites de Torodi, Ouallam, Fillingué et Dosso.

- **La texture à attaque ferrugineuse diffuse** : dans cette texture, l'imprégnation par les oxydes de fer se fait à travers la porosité naturelle de la matrice. Les oxydes de fer s'attaquent à tous les faciès se trouvant dans la matrice via la porosité, remplissent les vides et créent des ponts entre les éléments texturaux. La diffusion des oxydes de fer n'est pas préférentielle. La matrice est globalement constituée d'argile kaolinique. Seul l'échantillon de Tillabéry est caractérisé par cette texture.

- **La texture oolithique** : cette texture s'est mise en place à la suite d'une attaque d'oxydes de fer par concrétionnement. Les oxydes de fer s'accumulent dans une grande partie de la matrice et se concentrent en créant une structure en forme de cercles concentriques tangents les uns aux autres sous forme d'oolithes. Dans certaines zones de la matrice, les oxydes de fer pénètrent les pores. La diffusion se fait donc de la zone de concentration oolithique vers le réseau de pores le plus proche. La texture oolithique est observée au sein des échantillons de Say et de Guéchémé.

4.3 Composition minéralogique

4.3.1 Analyse à la diffraction des rayons X (DRX)

Après l'analyse pétrographique des échantillons de graveleux latéritiques au microscope optique, une deuxième approche complémentaire est de dresser un bilan qualitatif des différents minéraux qu'ils contiennent ainsi que la proportion de chaque élément minéral retrouvé.

Selon Holtzapfell (1985), tout corps cristallisé peut être analysé par diffraction des rayons X car ses atomes sont rangés selon des plans cristallins spécifiques.

Les analyses de diffraction des rayons X (DRX) ont été effectuées sur la fraction fine des échantillons (% de passants < 80µm). Le choix de cette classe granulaire est basé sur les études mécaniques et géotechniques dont les propriétés ont été commentées dans le chapitre précédent. Ces études montrent que le comportement des graveleux latéritiques est principalement influencé par les fines de diamètre inférieur à 0,080 mm. En revanche, il faut souligner ici qu'une étude minéralogique sur diverses classes granulaires serait plus pertinente car de nombreux travaux montrent que les pisolithes contenues dans les sols latéritiques contiennent une teneur plus élevée en oxydes de fer. Sachant également que les sols latéritiques sont des produits d'altération graduelle de roches mères, il serait aussi plus représentative d'effectuer des analyses minéralogiques sur les fragments de roche afin d'avoir une idée de la dynamique des oxydes de fer dans le profil latéritique étudié. Cependant, cela nécessiterait un programme expérimental assez complexe et long à mettre en place. C'est la raison pour laquelle nous avons l'étude minéralogique est réalisée sur la fraction fine suivant diverses méthodes qui puissent prendre en compte ces éléments manquants pour ensuite rattacher ces résultats aux propriétés mécaniques et géotechniques ainsi que les facteurs environnementaux. La diffraction des rayons X permet de faire un inventaire des espèces minérales cristallisées d'une matière première. Cette analyse s'applique donc sur un certain volume d'échantillon constituant le mélange d'éléments fins de plusieurs prélèvements effectués dans les sondages réalisés.

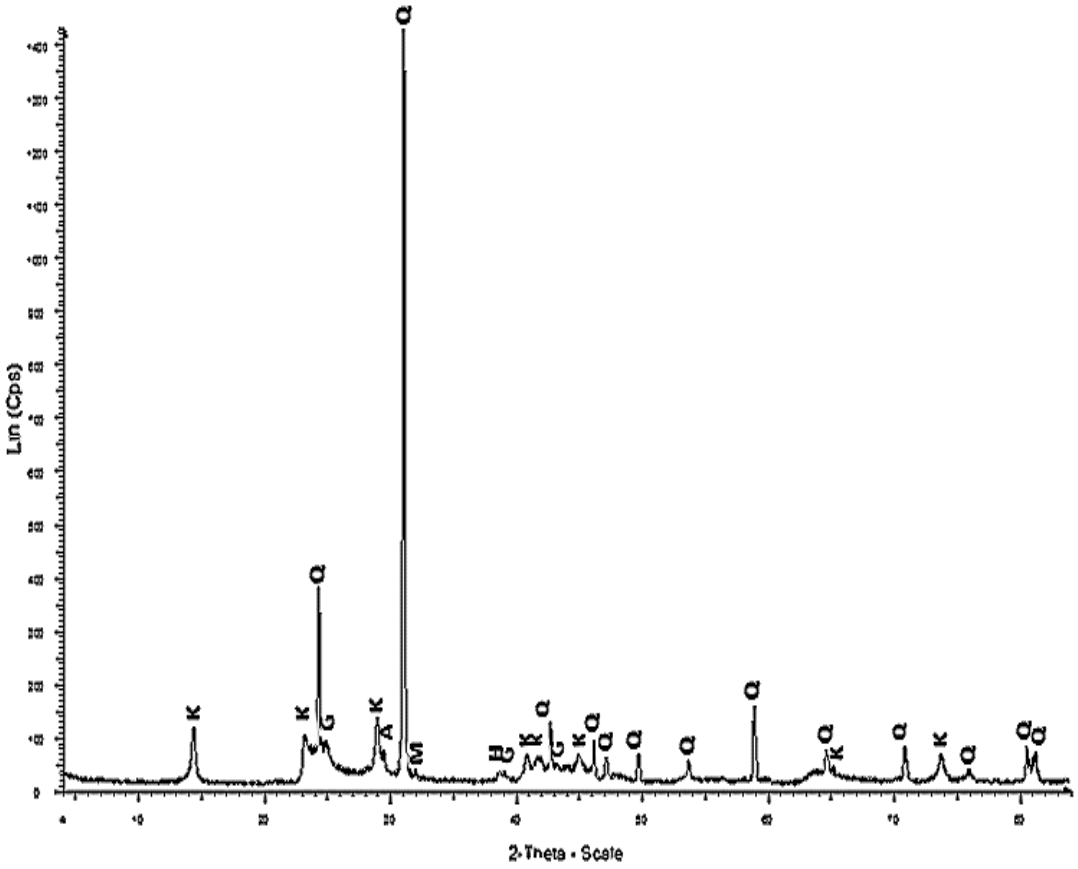
4.3.2 Diffractogrammes des échantillons latéritiques

Les différentes phases minérales déterminées à la DRX sont quantifiées grâce aux pics des éléments chimiques par la méthode de Riedvelt. Cette méthode est une technique d'analyse qualitative et pseudo-quantitative des minéraux retrouvés. Les diffractogrammes des échantillons analysés ainsi que les quantités des minéraux sont fournis aux Figure 4-7 à Figure **4-13**.

Les analyses permettent de détecter les espèces cristallisées telles que le quartz, la kaolinite, les oxydes de fer, d'aluminium et de titane ainsi que des corps tels que le microcline en faible teneur. La somme des éléments quantifiés est parfois inférieure à 100. Le pourcentage manquant est la proportion occupée par les corps amorphes et les éléments présents en faible quantité non détectés.

Sur les diffractogrammes obtenus sont représentés les signaux des composés minéraux détectés correspondant à des pics caractéristiques pour des valeurs de 2Θ spécifiques. Ce sont ces pics qui sont utilisés pour la semi-quantification.

La plupart des principaux minéraux couramment retrouvés dans les matériaux latéritiques ont été détectés et quantifiés. Les minéraux les plus communs aux sols latéritiques retrouvés en grande proportion sont le quartz, la kaolinite et les oxydes de fer.



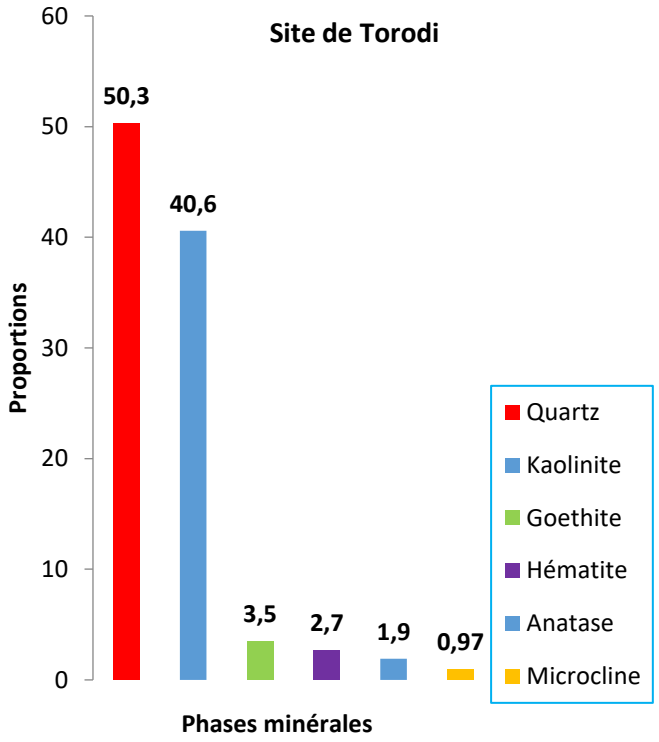


Figure 4-7 : Diffractogramme et quantification Riedvelt de l'échantillon latéritique de Torodi.

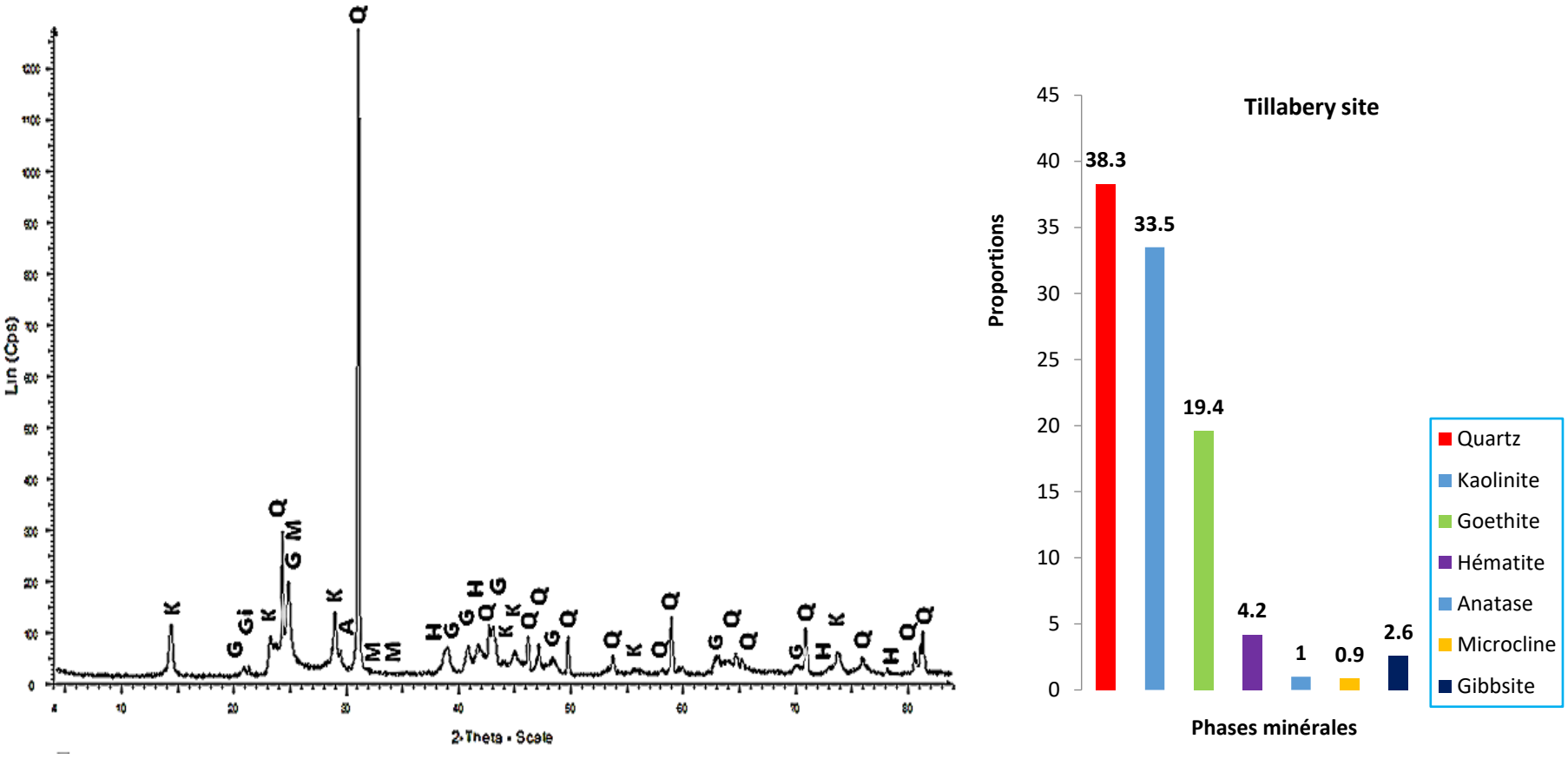


Figure 4-8 : Diffractogramme et quantification Riedvelt de l'échantillon latéritique de Tillabéry.

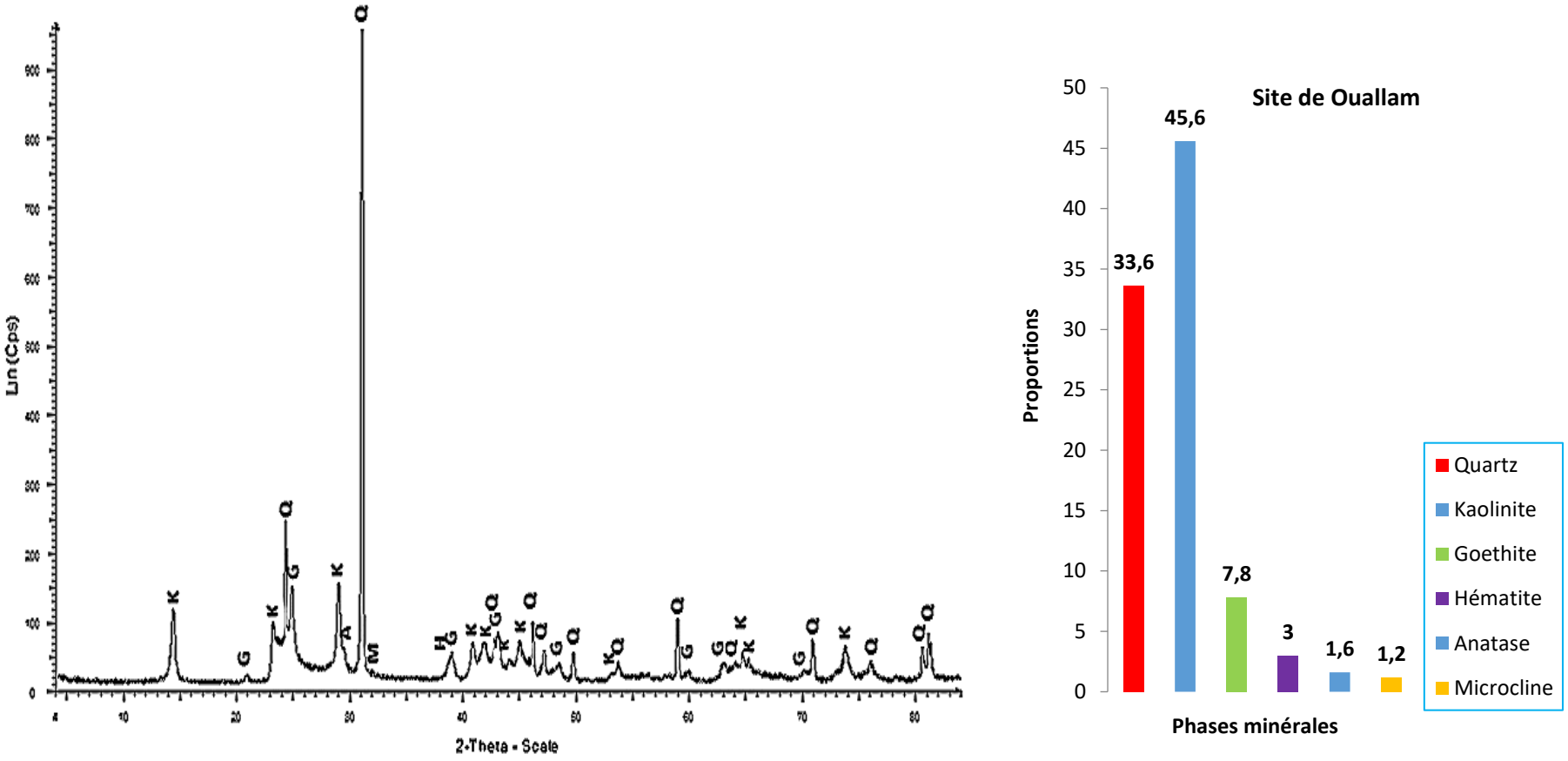


Figure 4-9 : Diffractogramme et quantification Riedvelt de l'échantillon latéritique de Ouallam.

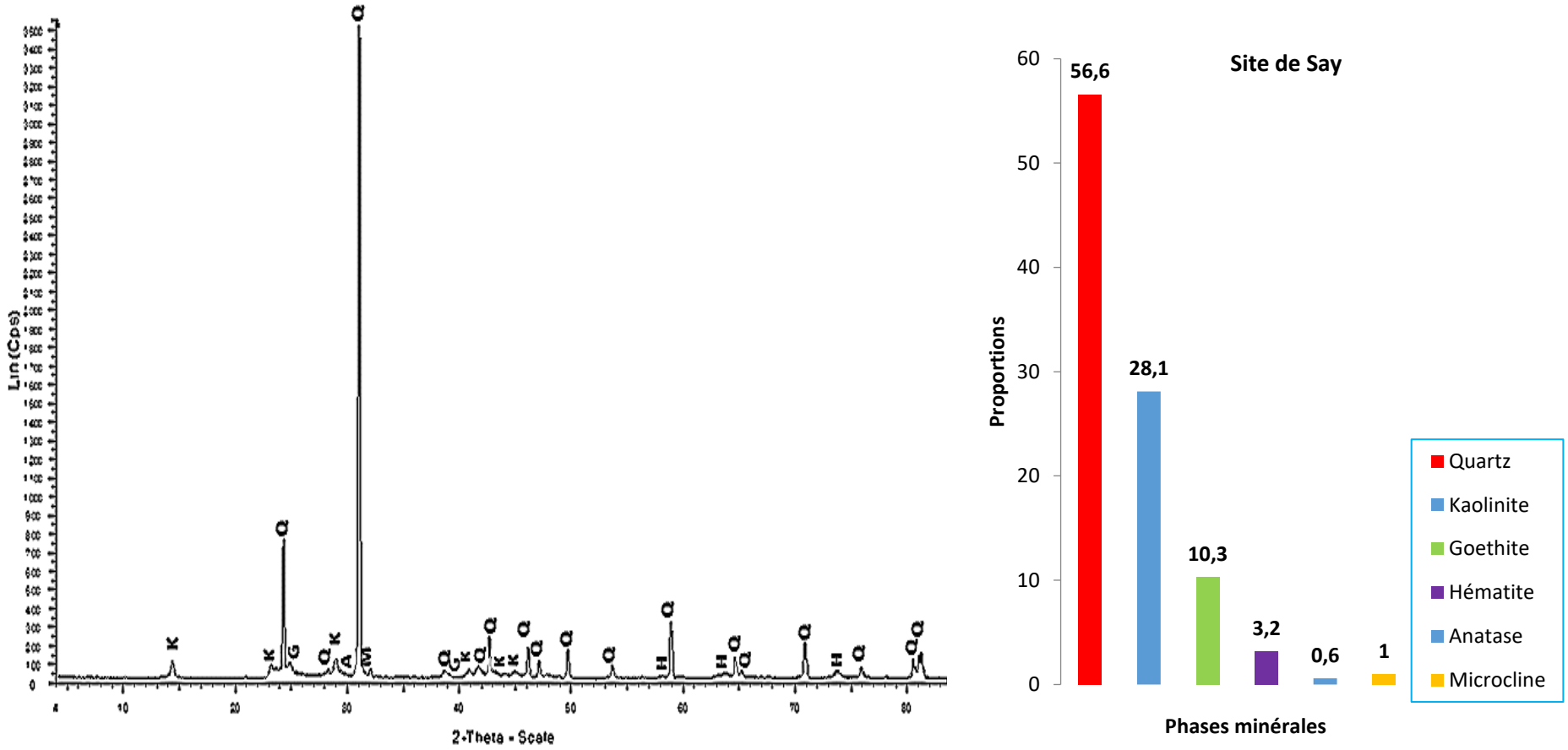


Figure 4-10 : Diffractogramme et quantification Riedvelt de l'échantillon latéritique de Say.

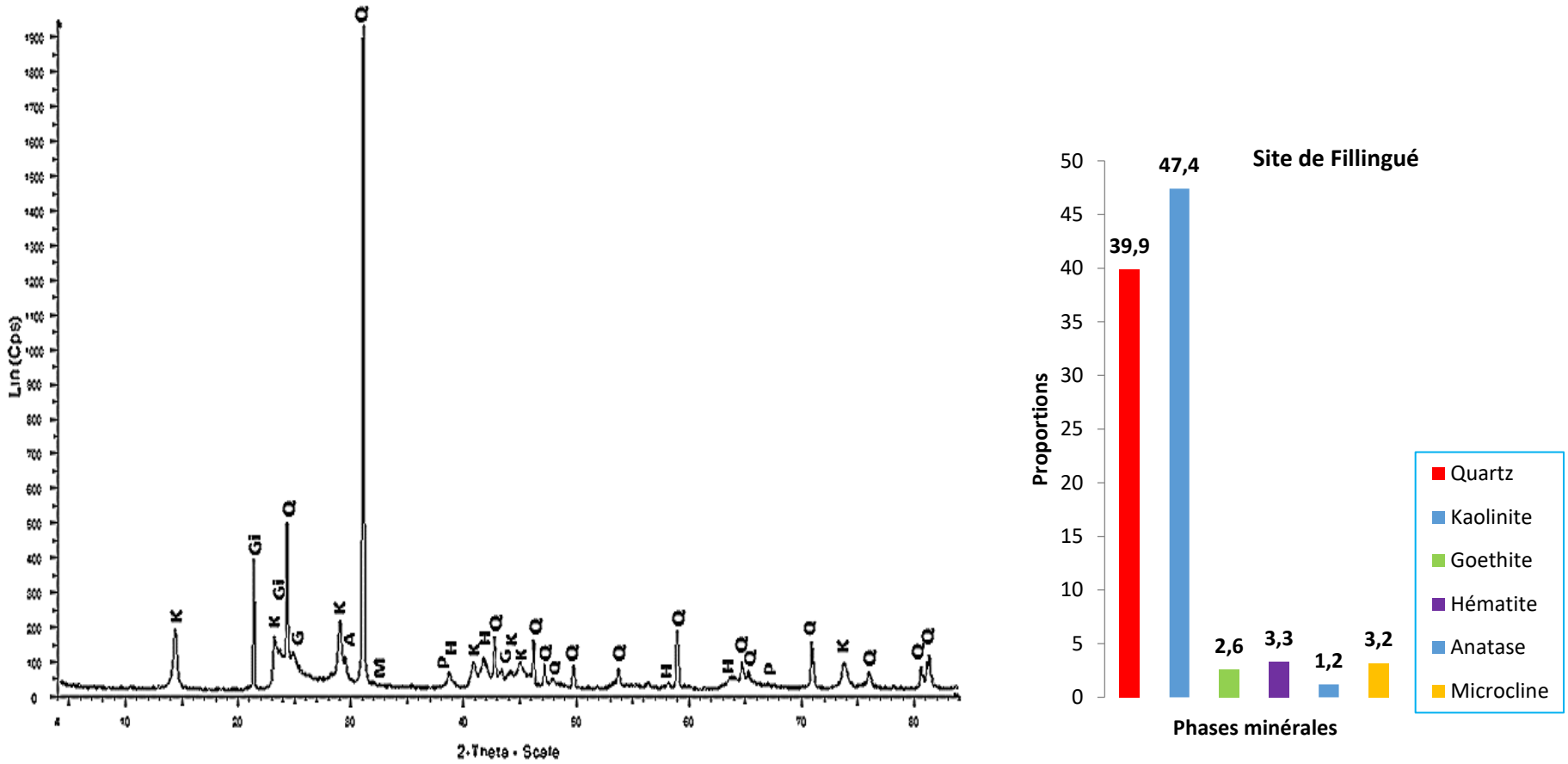


Figure 4-11 : Diffractogramme et quantification Riedvelt de l'échantillon latéritique de Fillingué.

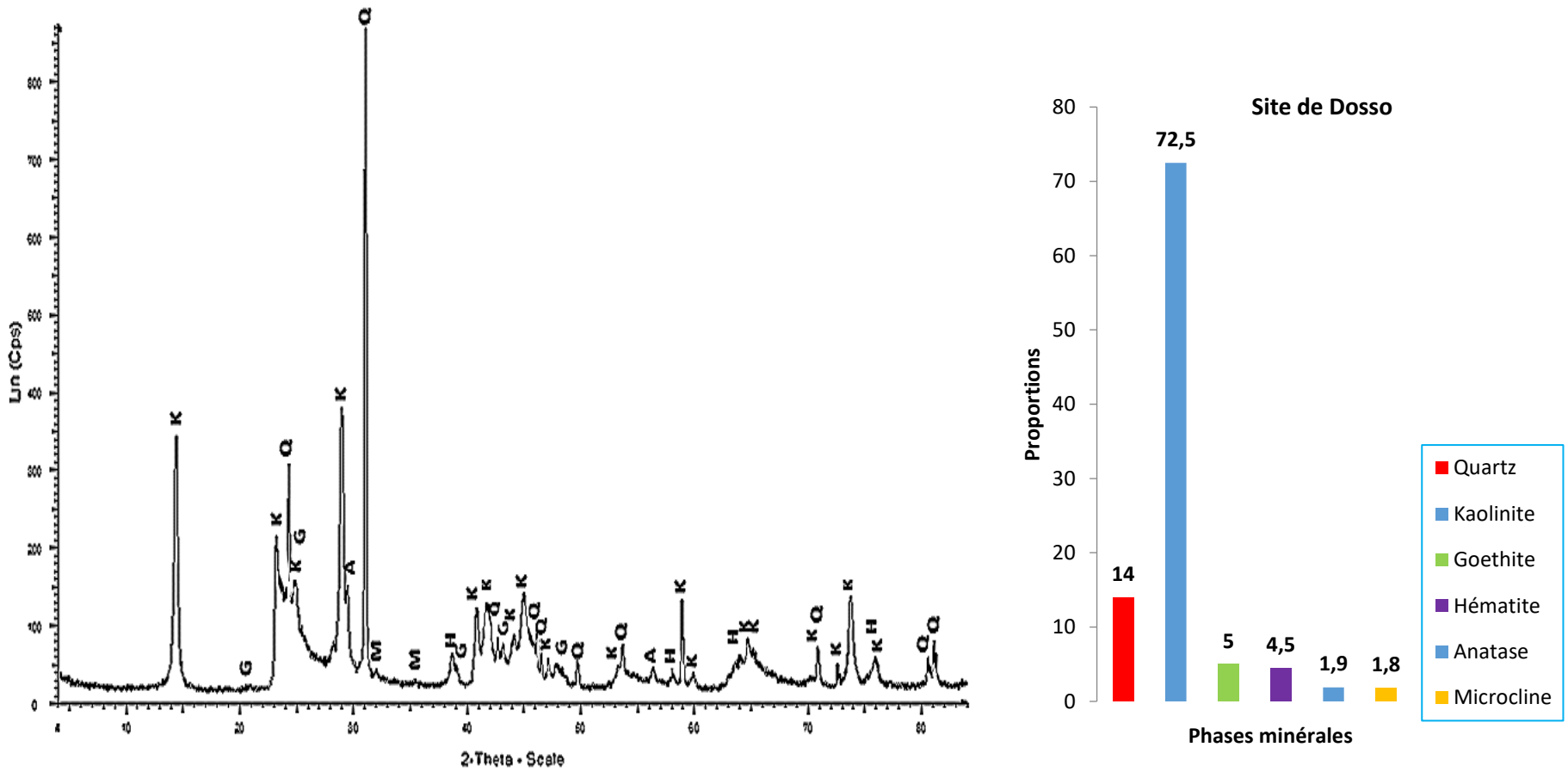


Figure 4-12 : Diffractogramme et quantification Riedvelt de l'échantillon latéritique de Dosso.

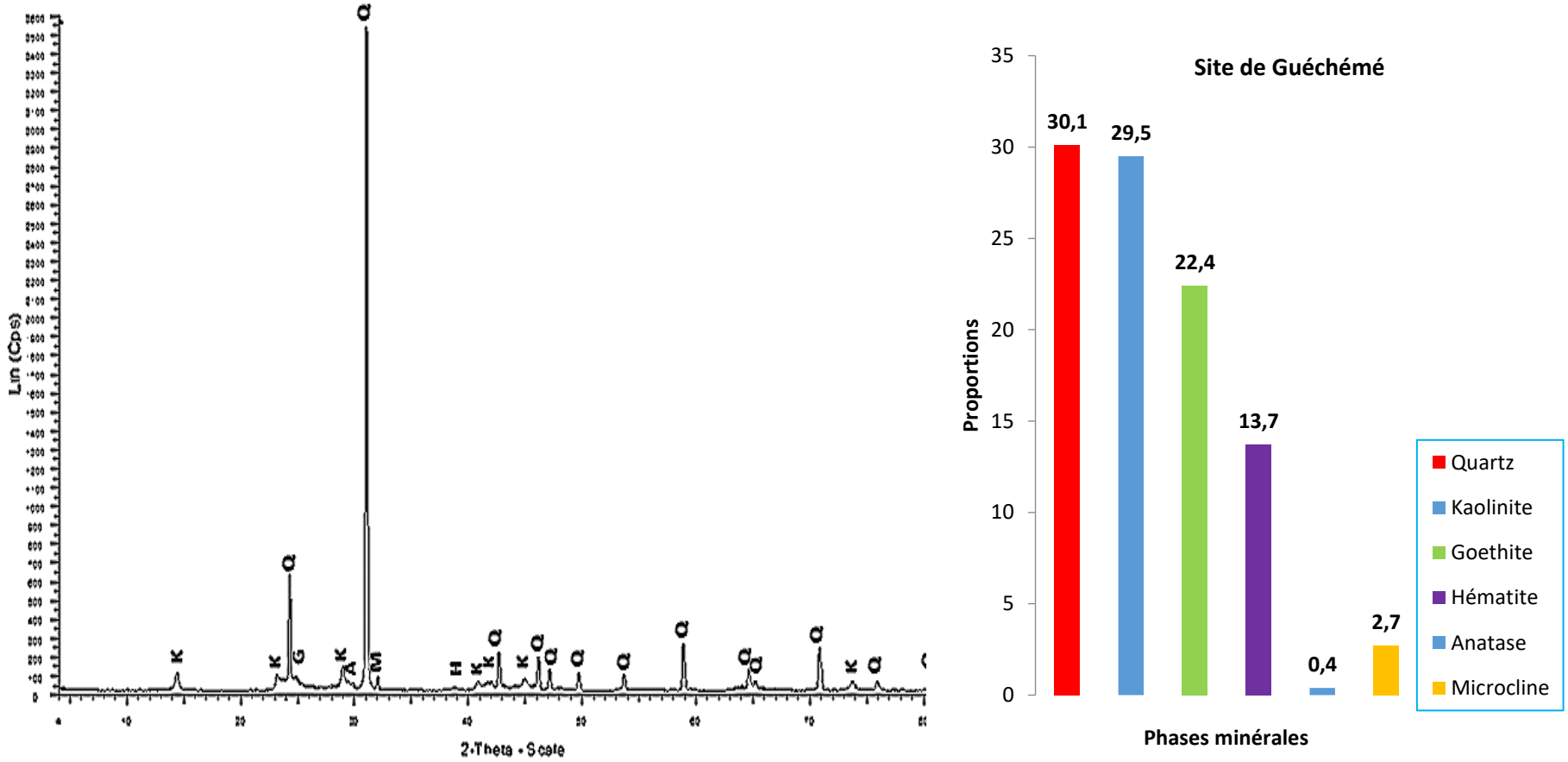


Figure 4-13 : Diffractogramme et quantification Riedvelt de l'échantillon latéritique de Guéchémé.

4.3.3 Interprétation des résultats de DRX

Les analyses DRX effectuées sur les poudres d'échantillon latéritique ont favorisé la mise en évidence des minéraux cristallisés communs à l'ensemble des échantillons. Ce sont le quartz, la kaolinite, la goethite, l'hématite, l'anatase et le microcline. Les oxydes d'aluminium hydratés (la gibbsite $Al(OH)_3$) n'ont été retrouvés que dans les échantillons de Tillabéry. Ces minéraux, bien que communs pour la plupart aux échantillons analysés présentent tout de même des proportions fort différentes d'un échantillon à l'autre. En effet, après identification des phases minérales, elles ont été quantifiées par la méthode de Riedvelt. Cette méthode consiste à simuler un diffractogramme à partir de la base de données de l'ICDD et à ajuster graduellement le modèle de diffractogramme le plus proche : la composition chimique correspondant à la simulation la plus proche du modèle de diffractogramme est ainsi considérée comme la composition chimique de l'échantillon.

Les minéraux retrouvés dans les échantillons sont :

- ✓ *Site de Torodi* (Figure 4-7) : les échantillons de ce site présentent une teneur en silice et kaolinite élevée, respectivement 50,3 et 40,6%. Les teneurs en oxydes de fer (goethite et hématite) y sont faibles soit, 3,5 et 2,7% respectivement. Les oxydes de titane (anatase) et le microcline sont présents en traces (respectivement 1,9 et 0,97%).

- ✓ *Site de Tillabéry* (Figure 4-8) : les teneurs en quartz et en kaolinite sont plus faibles dans cet échantillon, respectivement 38,3% et 33,5%. En revanche, les oxydes de fer y sont en quantité élevée avec une teneur de 19,4% pour la goethite et 4,2% pour l'hématite. Une faible quantité d'oxydes d'aluminium (%gibbsite=2,6%) a également été retrouvée dans cet échantillon. L'anatase et le microcline y sont en traces (soit 1 et 0,9%).

- ✓ *Site de Ouallam* (Figure 4-9) : le minéral dominant dans cet échantillon est le quartz (45,6%) suivi de la kaolinite (33,6%). Les oxydes de fer ont une teneur moyennement élevée, soit au total 10,8% pour les deux formes d'oxydes de fer retrouvés (la goethite et l'hématite). Les oxydes de titane et le microcline y sont faiblement présents (1,6 et 1,2%).

- ✓ *Site de Say* (Figure 4-10) : la quantité de quartz (56,6%) y est très élevée. La teneur en kaolinite (28,1%) retrouvée vaut quasiment la moitié de celle du quartz. Il s'agit donc d'une matrice contenant plus de silice que d'argile. Les oxydes de fer sont en teneur relativement élevée, 10,3% pour la goethite et 3,2% pour l'hématite, soit un total de 13,5%. Les oxydes de titane (anatase) sont peu présents et le microcline est retrouvé en traces diffuses.

- ✓ *Site de Fillingué* (Figure 4-11) : l'échantillon de Fillingué présente une composition minéralogique similaire à celui de Ouallam. Les teneurs en silice et en kaolinite sont dans les mêmes ordres de grandeur, mais la proportion d'oxydes de fer est plus faible, environ deux fois moins que dans l'échantillon de Ouallam. La teneur en microcline (3,2%) est la plus élevée des échantillons et l'anatase en faible quantité (1%).

✓ *Site de Dosso* (Figure 4-12) : les échantillons de ce site contiennent très peu de quartz (14%) et une quantité appréciable de kaolinite (72,5%). Les oxydes de fer (goethite et hématite) de proportion 9,5% est moyenne et les minéraux tels que l'anatase et le microcline sont en faible quantité, voire en traces. Cet échantillon est moins graveleux que les autres.

✓ *Site de Guéchémé* (Figure 4-13) : dans cet échantillon, les quantités de silice (30,1%) et de kaolinite (29,5%) sont moyennes. L'hématite et la goethite, respectivement 22,4 et 13,7% sont en proportions plus grandes comparées aux échantillons des sites précédents. La teneur en microcline est faible (2,7%) et les oxydes de titane sont en trace.

4.3.4 Synthèse des analyses DRX

Les résultats qui découlent de l'analyse DRX permettent de conclure que les minéraux tels que le quartz et la kaolinite sont de loin les plus dominants dans les échantillons analysés. La teneur en quartz varie de 14 à 56% et celle de la kaolinite de 28 à 72% (Tableau 4-1) de la composition chimique totale des échantillons. Notons que la quantité de quartz est particulièrement faible (14%) pour les échantillons de Dosso et très élevée pour ceux de Say (60%). La faible quantité de silice contenue dans les échantillons de Dosso est conforme à la pluviométrie du site (isohyète 650 mm) traduisant un lessivage intense et une altération poussée des formations en place. La grande partie de la silice libérée lors du lessivage a principalement contribué à la synthèse de la kaolinite en grande quantité (72,5%). Cet important lessivage, favorisé par le modelé et le drainage a eu pour conséquence la dégradation continue de l'horizon latéritique rendant impossible toute induration. Par ailleurs, les échantillons de Torodi, Fillingué et Dosso contiennent une faible quantité d'oxydes de fer ; mais en proportion moyenne dans l'échantillon de Ouallam. La teneur en oxydes de fer (goethite et hématite) est élevée dans les échantillons de Tillabéry et Say, respectivement 23,6%, et 13,5% et très élevée dans l'échantillon latéritique de Guéchémé (36,1%).

Tableau 4-1: Teneur des espèces minérales retrouvées et quantifiées à la DRX.

	Quartz	Kaolinite	Goethite	Hématite	Anatase	Microcline	Gibbsite	Total	ICBR98
Torodi	50,3	40,6	3,5	2,7	1,9	0,97		99,97	33
Tillabéry	38,3	33,5	19,4	4,2	1	0,9	2,6	99,9	102
Ouallam	33,6	45,6	7,8	3	1,6	1,2		92,8	32
Say	56,6	28,1	10,3	3,2	0,6	1		99,8	89
Fillingué	39,9	47,4	2,6	3,3	1,2	3,2		97,6	20
Dosso	14	72,5	5	4,5	1,9	1,8		99,7	29
Guéchémé	30,1	29,5	22,4	13,7	0,4	2,7		98,8	125

Les résultats de l'analyse DRX ont ensuite servi à la recherche de corrélations par simple régression linéaire entre l'indice portant CBR et les teneurs des différentes espèces minérales quantifiées par la méthode de Riedvelt. Il s'agit là d'évaluer l'impact de chaque espèce minérale sur la portance. Les courbes de corrélation obtenues sont reportées sur les graphiques de la Figure 4-14.

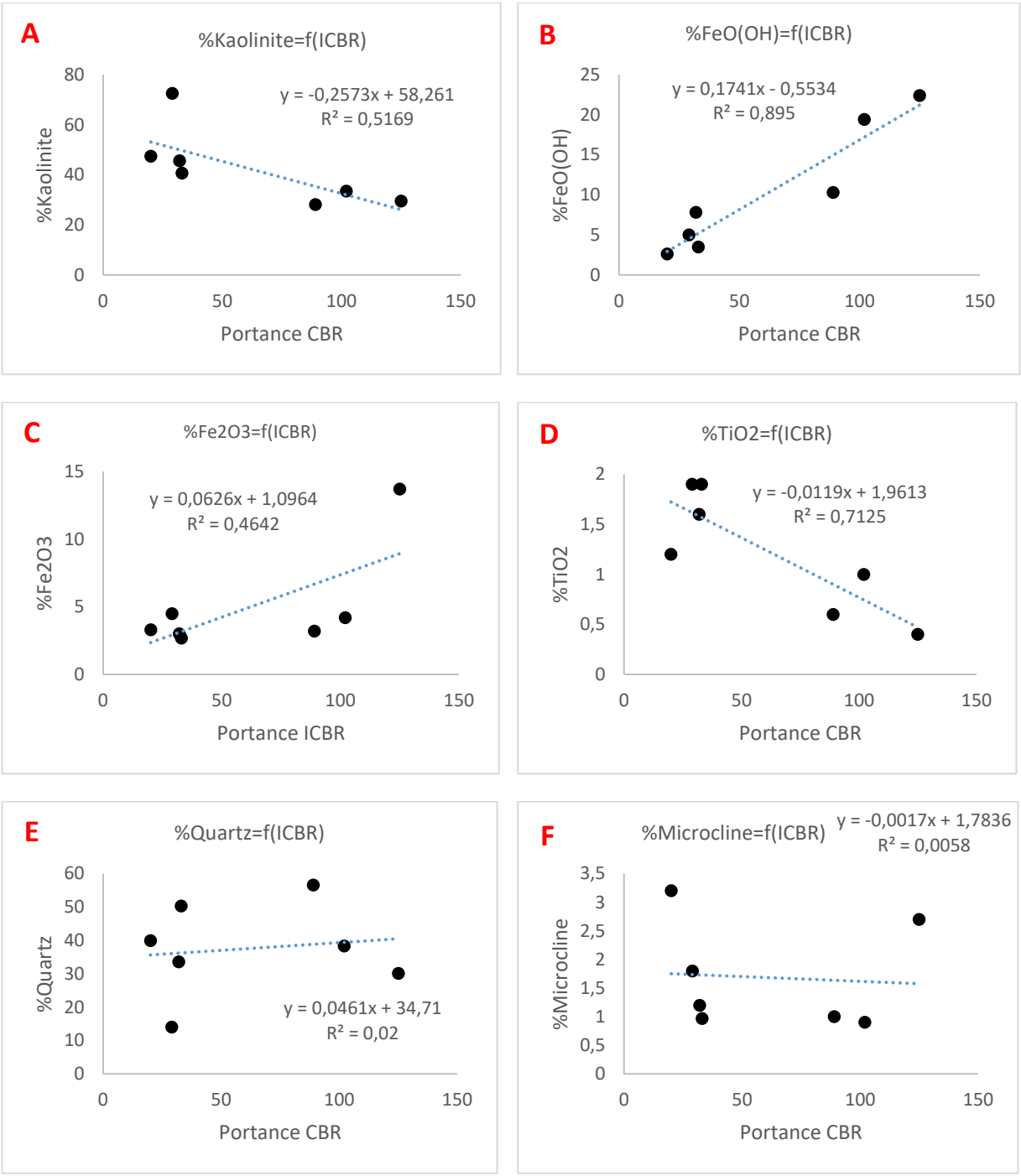


Figure 4-14 : Corrélations entre les minéraux et la portance CBR.

Figure 4-14-A : la corrélation entre la kaolinite (argile contenue dans les sols latéritiques) est moyenne (coefficient de corrélation r = 0,5). Toutefois, malgré la faible valeur du coefficient de corrélation on peut constater que les échantillons contenant une teneur élevée en kaolinite sont peu portants. La pente négative de la droite de corrélation indique que les sols de portance élevée (ICBR > 85) ont une teneur en kaolinite de l'ordre de 20%. Au-delà de 40% de teneur en kaolinite, la portance des sols tourne autour de 40 voire moins. Cette tendance est confirmée par les propriétés mécaniques et géotechniques traitées dans le chapitre 3.

Figure 4-14-B : le coefficient de corrélation (égal à 0,9) montre un lien très étroit entre la portance et la teneur en goethite (FeOOH). La courbe de corrélation montre que les sols de teneur élevée en goethite sont portants. Les sols latéritiques comportant une teneur en goethite (oxydes de fer hydratés) excédant 10% en goethite ont un indice CBR de l'ordre de 90. Pour une teneur en goethite inférieure à 5%, la portance chute (ICBR de l'ordre de 30). La forte présence de goethite au sein des graveleux latéritiques leur confère une portance élevée.

Figure 4-14-C : le lien entre la portance et la teneur en oxydes ferriques (hématite Fe_2O_3) n'est pas bien établi (coefficient de corrélation r = 0,46). La courbe de corrélation, bien que de pente positive montre que la présence d'hématite dans les échantillons n'améliore pas considérablement leur portance. L'hématite, lorsqu'elle est hydratée se transforme en goethite. Les molécules d'eau constituent donc un élément important dans l'amélioration de la portance des sols latéritiques car elles favorisent une induration des horizons latéritiques et donc une bonne compacité.

Figure 4-14-D : le lien entre les oxydes de titane (anatase TiO_2) et la portance est assez bien défini. La pente négative de la droite de corrélation indique que les sols de faible teneur en oxydes de titane ont une bonne portance. En effet, lorsque la teneur en anatase varie entre 1,5 et 2% la portance n'excède guère 25. En dessous d'une teneur de 1%, les sols ont une portance dépassant 80. Cette tendance est tout de même à considérer avec précaution car la faible quantité de cette espèce minérale dans les échantillons n'est pas significative pour impacter considérablement la portance des sols latéritiques.

Figure 4-14-E : la dispersion des points sur le graphique et le faible coefficient de corrélation (r=0,02) montrent que la silice n'a pas une grande influence sur la portance. Toutefois, vu le nombre limité d'échantillons, cette tendance n'est pas formelle et doit être considérée avec beaucoup de précaution.

Figure 4-14-F : la relation quasi nulle entre la présence du microcline dans les échantillons et la portance CBR s'explique par leur présence en traces et aussi le nombre limité d'échantillons.

En conclusion, l'étude de corrélation entre les teneurs des espèces minérales et la portance CBR des sols montrent que les échantillons de bonne portance contiennent une faible teneur en kaolinite (environ 25%), une forte teneur en goethite (supérieure à 10%) et une teneur plus ou moins élevée en oxydes de titane (de l'ordre de 1%). Les échantillons présentant ces teneurs ont un CBR supérieur à 80 validant ainsi leur aptitude en couches de chaussée. L'étude montre également qu'une teneur élevée en hématite améliore faiblement la portance des sols latéritiques. Les espèces minérales telles que le microcline et le quartz ne sont pas directement liées à l'augmentation ou à la diminution de la portance des sols à cause de la forte dispersion des points. Enfin, la faible teneur du microcline ne permet pas de dégager de conclusions claires sur le rôle que joue ce minéral sur la portance des sols latéritiques.

4.4 Analyses ATD / ATG couplées à la spectrométrie de masse

L'analyse ATD couplée à l'ATG représente une méthode complémentaire de description qualitative des différents composés chimiques retrouvés dans les échantillons à l'aide de la microscopie optique et la DRX. Rappelons que 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 (Sigg, 1991). L'analyse thermogravimétrique détermine les pertes de masse que subit l'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 (Jouenne, 1980). L'analyse des échantillons est effectuée sur la fraction fine (% de passants au tamis de 80 µm). 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 masses 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. L'examen des courbes ATD-ATG des sols latéritiques (Figure 4-15 et Figure 4-16) permettent de distinguer quatre principaux accidents thermiques. Les plages de températures correspondant à ces accidents sont fournies dans le Tableau 4-2 et les pertes de masses liées aux transformations chimiques sont consignées dans le Tableau 4-3.

Les accidents thermiques observés sur les courbes suite aux modifications chimiques correspondent aux transformations suivantes :

- ✓ *Départ de l'eau zéolitique* : encore appelée eau de coordination, son départ est marqué par un pic endothermique qui se produit dans la plage de température comprise entre 86 et 146°C (Tableau 4-2). Cette transformation chimique est suivie d'une perte de masse de l'ordre de 0,5 à 2%.
- ✓ *La transformation de la goethite en hématite par déshydroxylation* : est caractérisée par un pic endothermique, difficilement identifiable sur les courbes ATD-ATG entre 200 et 250°C. La transformation s'accompagne d'une perte de masse de 1,8 à 3% de la masse totale de l'échantillon.
- ✓ *La déshydroxylation de la kaolinite* : se manifeste par un grand pic endothermique lié de toute évidence au départ de l'hydroxyde. Ce pic endothermique situé autour de 500°C est suivi d'une importante perte de masse de l'ordre de 7% en moyenne de la masse totale de l'échantillon. Le départ de l'hydroxyde donne naissance à la métakaolinite (Frost & Vassalo, 1996). La transformation de la kaolinite en métakaolinite se traduit par l'équation suivante (Equation 4-1) :

$$Si_2Al_2O_5(OH)_4 \text{ (Kaolinite)} \rightarrow Si_2Al_2O_7 \text{ (Métakaolinite)} + H_2O.$$

Equation 4-1: Transformation de la kaolinite en métakaolinite entre 400 à 500 °C.

Il s'agit donc d'un transfert de proton entre deux hydroxydes (Equation 4-2):

$OH^- \leftrightarrow H^+ + O^-$ et $H^+ + OH^- \rightarrow H2O$ (Maiti & Freund, 1981 ; Frost & Vassalo, 1996).

Equation 4-2: Transfert de protons entre hydroxydes.

Selon Grimshaw (1945), Letellier (1986), la température de déshydroxylation de la kaolinite ordonnée c'est-à-dire sans lacune d'empilement dans le plan cristallin se situe autour de 600°C. La kaolinite retrouvée dans nos échantillons latéritiques a subi une déshydroxylation à une température moyenne inférieure à 500°C. La kaolinite présente donc un défaut d'empilement dans le plan cristallin.

- ✓ *Réorganisation structurale de la métakaolinite* : Les phénomènes exothermiques autour de 913°C en moyenne sont relatifs à la réorganisation structurale de la métakaolinite (Milogo, 2008).

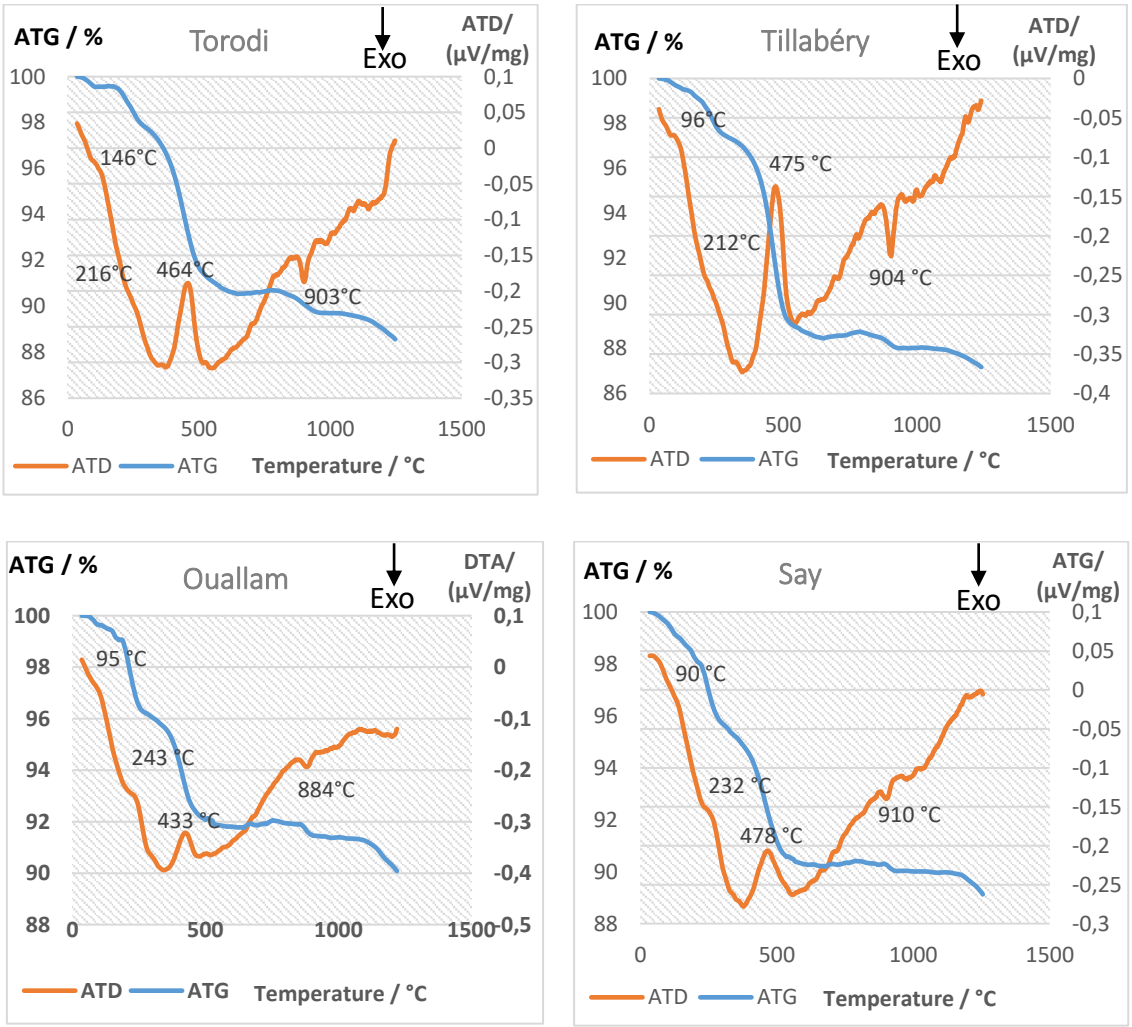


Figure 4-15 : Courbes ATD et ATG des échantillons latéritiques des sites de Torodi, Tillabéry, Ouallam et Say.

Figure 4-16 : Courbes ATD et ATG des échantillons latéritiques des sites de Fillingué, Dosso et Guéchémé.

Tableau 4-2: Températures correspondant aux départs et gains de masse.

Sites	Températures correspondant aux accidents thermiques			
	Départ de l'eau zéolithique	Transformation de la Goethite en hématite	Déshydroxylation de la kaolinite	Réoganisation structurale de la métakaolinite
Torodi	146	216	464	903
Tillabéry	96	212	475	904
Ouallam	95	243	433	884
Say	90	232	478	910
Fillingué	89	203	435	903
Dosso	90	204	431	887
Guéchémé	86	257	499	913

Tableau 4-3: Pertes de masse liées aux transformations chimiques lors de la cuisson.

Sites	Pertes de masses liées aux accidents thermiques				
	Départ de l'eau zéolithique	Transformation de la Goethite en hématite	Déshydroxylation de la kaolinite	Réoganisation structurale de la métakaolinite	Pertes totales
Torodi	-0,41	-1,82	-7,15	-2,05	-11,4
Tillabéry	-0,5	-2,19	-8,67	-1,44	-12,8
Ouallam	-0,89	-3,04	-4,23	-1,71	-9,86
Say	-1,92	-2,82	-4,88	-1,26	-10,87
Fillingué	-0,75	-2,32	-7,97	-2,38	-13,31
Dosso	-0,48	-1,47	-5,33	-0,75	-8,04
Guéchémé	-1,48	-1,69	-9,17	-2,26	-14,61

L'analyse pétrographique a révélé une quantité appréciable de quartz dans les graveleux latéritiques. Celui-ci est détecté à l'analyse ATD-ATG, grâce à l'apparition d'un pic endothermique autour de 580 à 620°C lors de la transformation du quartz de la forme α en β. Après analyse des thermogrammes, nous n'avons pas pu identifier un pic correspondant à cette transformation. Il faut noter que les pics de transformation de la goethite en hématite ne sont pas très visibles sur les courbes ATD-ATG à l'exception des échantillons de Ouallam, Say et Guéchémé.

Pour mieux différencier ces deux variétés d'oxydes de fer à savoir la goethite et l'hématite, nous avons tracé les courbes de spectrométrie de masse de l'hydroxyde (OH) (Figure **4-17**) et de l'eau (H_2O) (Figure 4-18). Sur ces figures, nous constatons que la plupart des pics sont superposés quasiment autour des mêmes températures et l'évolution des courbes de spectrométrie de masse de l'OH et l'H_2O sont assez similaires. Trois principaux pics ont été observés sur ces courbes :

- ✓ Un premier pic autour de 80 à 100°C (Figure 4-17 et Figure 4-18), principalement pour les échantillons de Torodi, Dosso, Tillabéry et Guéchémé. Ce pic correspond au départ de l'eau de coordination ou eau zéolitique.

- ✓ Le deuxième pic observé se situe dans la plage de températures 220 à 300°C (Figure **4-17**), celui-ci correspond à la transformation de la goethite FeO(OH) en hématite Fe_2O_3. Ces pics de température marquent le passage de la forme hydratée des oxydes de fer à la forme d'oxydes ferriques.

- ✓ Le troisième pic de plus grande amplitude, situé entre 400 et 600°C (Figure 4-17 et Figure 4-18), correspond à la déshydroxylation de la kaolinite. Au cours de cette transformation chimique on assiste au départ de l'hydroxyde (OH) et on obtient en fin de réaction de la métakaolinite.

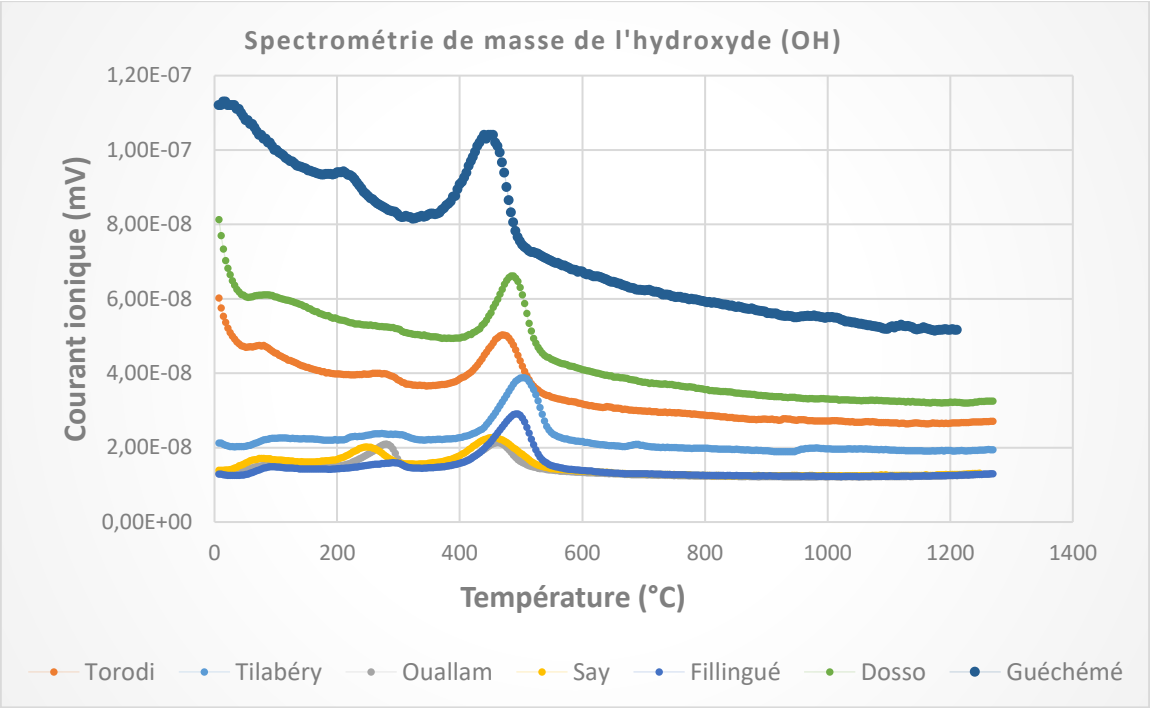


Figure 4-17 : Spectres de masse des hydroxyles (OH) contenus dans les échantillons.

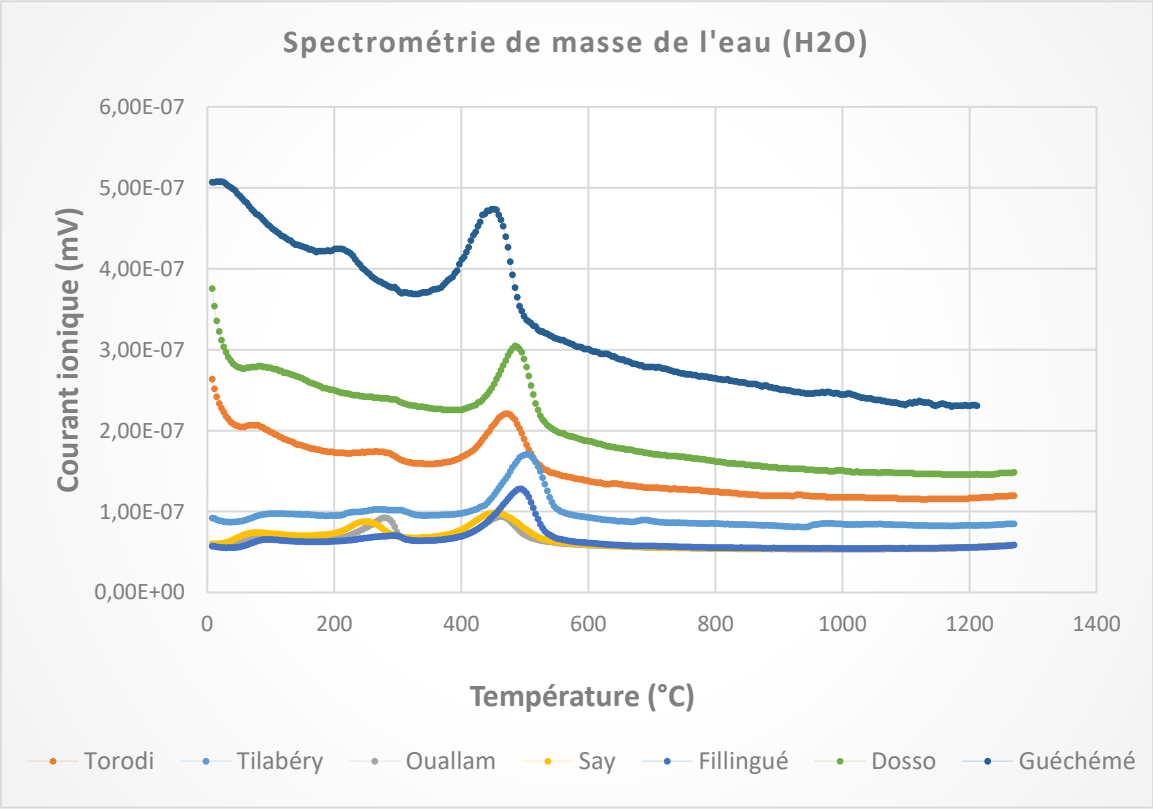


Figure 4-18 : Spectres de masse de l'éau (H_2O) contenue dans les échantillons.

4.5 Microscopie électronique à Balayage et analyse à la sonde EDS des échantillons latéritiques

Les échantillons des zones de l'étude imagées au microscope électronique à balayage ont été analysés au spectromètre à sélection d'énergie (EDS) de deux manières :

1. Acquisition de spectres X-EDS ponctuels et/ou moyennés sur une petite fenêtre de la zone de l'échantillon balayée par le faisceau d'électrons primaire en contraste de phase (électrons rétrodiffusés). Chaque spectre permet d'identifier la totalité des éléments chimiques de la zone scrutée par le faisceau primaire. La quantification faite via la correction de matrice ZAF permet de connaître la concentration (At %) de chacun de ces éléments. Les spectres EDS étant acquis dans un vide primaire, sur un échantillon peu conducteur, la quantification obtenue (faite en outre sans standards de référence) est semi-quantitative. L'interprétation minéralogique des quantifications (At %) ainsi obtenues permet de caractériser la minéralogie des échantillons. Cette approche a été mise en œuvre pour les échantillons issus des sites de Ouallam, Say, Fillingué, Dosso et Guéchémé.

2. Acquisitions de cartographies X à l'EDS, en 2D. Ce mode d'acquisition permet d'obtenir les cartographies 2D élémentaires de l'ensemble des éléments chimiques identifiés sur un spectre EDS moyen sur la zone à cartographier. Chaque cartographie permet d'identifier les zones riches et pauvres en un élément particulier. Dans ce mode d'acquisition, un spectre X-EDS est acquis en chaque pixel de la zone 2D scrutée qui peuvent être *à posteriori* traités par une approche statistique (reconstitution de phase) permettant d'exhiber une cartographie 2D des phases (minérales) composant la zone analysée.

4.5.1 Analyse spectrale à l'EDS

4.5.1.1 Composition minéralogique des échantillons de Ouallam

Le cliché en nuances de gris recueilli sur l'échantillon latéritique de Ouallam (Figure **4-19**) laisse apparaître un matériau principalement graveleux non cohésif comportant des vides au sein de la matrice. Les zones de couleur blanchâtre sont caractérisées par une forte concentration d'éléments lourds tels que le fer, le titane, le vanadium, etc. et les zones grisâtres à gris-foncé traduisent la présence d'éléments moins lourds. Sur ce cliché, quatre zones ont été choisies pour la microanalyse X à la sonde. Le spectre obtenu sur la zone A (Figure 4-19-A) fait ressortir principalement du quartz (83% de la zone analysée) mélangé à un peu de kaolinite et d'oxydes de fer. Le spectre de la zone B (Figure 4-19-B) est principalement constitué d'oxydes de fer (goethite) (68%) et 20 de kaolinite. La zone C (Figure 4-19-C) est dominée en grande partie par la kaolinite (80%) mélangée en faible proportion aux oxydes de fer (goethite). Le tir ponctuel réalisé sur la zone D (Figure 4-19-D) sur un petit grain blanchâtre révèle un mélange de kaolinite et d'oxydes / hydroxydes de fer.

Cet échantillon est donc constitué de mélanges variables d'oxydes de fer et de kaolinite recouvrant en général des grains de quartz. Des pisolithes très riches en goethite ont été retrouvées isolées dans la matrice.

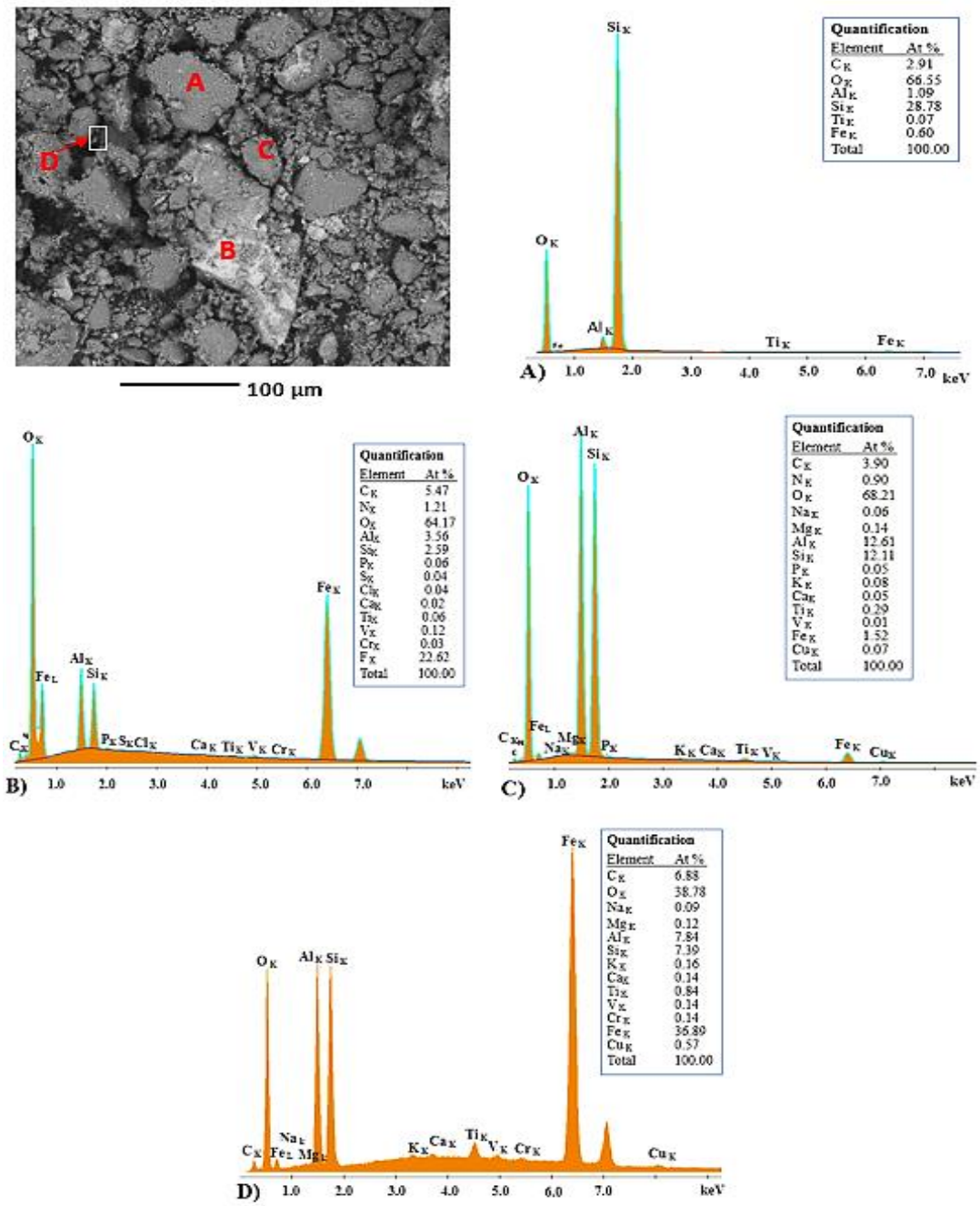


Figure 4-19 : Cliché en électrons rétrodiffusés : échantillon de Ouallam. **A)** Spectre de la zone A: silice dominante, **B)** Spectre de la zone B: oxydes de fer dominants, **C)** Spectre de la zone C: kaolinite dominante, **D)** Spectre de la zone D: oxydes de fer dominant.

4.5.1.2 Composition minéralogique des échantillons de Say

Sur le cliché de l'échantillon de Say (Figure 4-20) on peut constater plusieurs grains de taille 80 µm séparés les uns des autres par des vides. La matrice est très poreuse mais les pores ne semblent pas interconnectés.

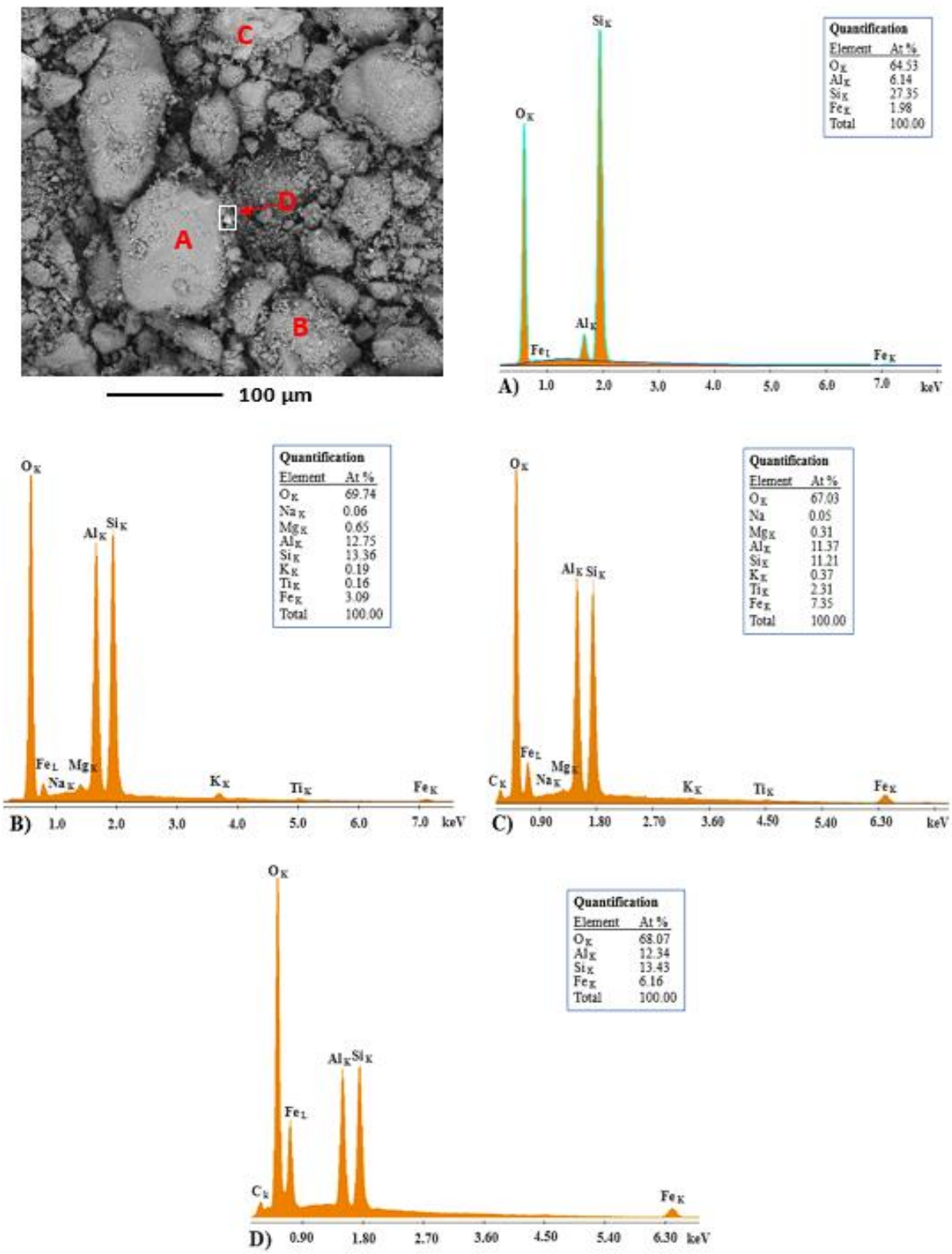


Figure 4-20 : Cliché en électrons rétrodiffusés : échantillon de Say. **A)** Spectre de la zone A: silice dominante, **B)** Spectre de la zone B: kaolinite dominante, **C)** Spectre de la zone C: kaolinite dominante, **D)** Spectre de la zone D: kaolinite dominante / oxydes de fer.

- ✓ Le tir réalisé dans la zone A (Figure 4-20-A) sur un grain indique un mélange de quartz (~ 60%) et de kaolinite (~ 40%).

- ✓ Le mélange est plus riche en kaolinite dans la zone B (Figure 4-20-B), soit au premier ordre 83% de kaolinite combinés à 9.3% de goethite. Il s'agit à priori d'une matrice principalement constituée de kaolinite.

- ✓ La zone C (Figure 4-20-C) est composée d'un mélange assez similaire : 73% de kaolinite et 22% de goethite.

- ✓ La zone D (Figure 4-20-D) présente une proportion de kaolinite (83%) comparable à celle de la zone B mais avec une teneur en goethite plus élevée.

Comme pour les échantillons de Ouallam la composition minéralogique de ceux de Say est constituée d'un mélange d'oxydes de fer et de kaolinite. La proportion de kaolinite est généralement plus élevée que celle des oxydes de fer. Le mélange kaolinite/oxydes de fer recouvre à de nombreux endroits des grains de quartz se retrouvant dans toute la matrice.

4.5.1.3 Composition minéralogique des échantillons de Fillingué

- ✓ L'échantillon de Fillingué (Figure 4-21) est caractérisé par une matrice peu poreuse. Les éléments texturaux constituant ce sol sont liés par un ciment naturel riche en kaolinite et en oxydes d'aluminium (gibbsite).

- ✓ La zone A (Figure 4-21-A) est un mélange dominé par la silice (62%) par rapport à la kaolinite (28%) et contient peu de goethite. Le reste est occupé par les corps amorphes.

- ✓ La zone B (Figure 4-21-B) est constituée d'une matrice très riche en kaolinite (78%) et la goethite (12%).

- ✓ De la gibbsite et/ou boehmite (65%) a été retrouvée dans la Zone C (Figure 4-21-C), complexée avec 5% de débris de quartz et 4% d'oxydes de fer.

- ✓ La zone D (Figure 4-21-D) est composée d'un mélange à kaolinite dominante (43%), de goethite (27%) et d'oxydes de titane.

L'échantillon de Fillingué se distingue ici par sa nature compacte (peu de vides) et la faible présence de grains de quartz. Cette dernière est constituée de kaolinite dominante combinée avec la goethite et de la gibbsite ou boehmite. Dans certaines zones, on retrouve un mélange des trois minéraux avec une teneur plus élevée en kaolinite. La microanalyse confirme une fois encore la forte présence d'agrile dans les échantillons de Fillingué. L'indice de plasticité élevé de 20 et la teneur en fines de 26% sont donc cohérents avec la microanalyse X ainsi que les facteurs pédologiques qui indiquent que l'horizon latéritique est dominé par une forte présence d'argile du CT2 complexée avec les sables et oolithes ferrugineux.

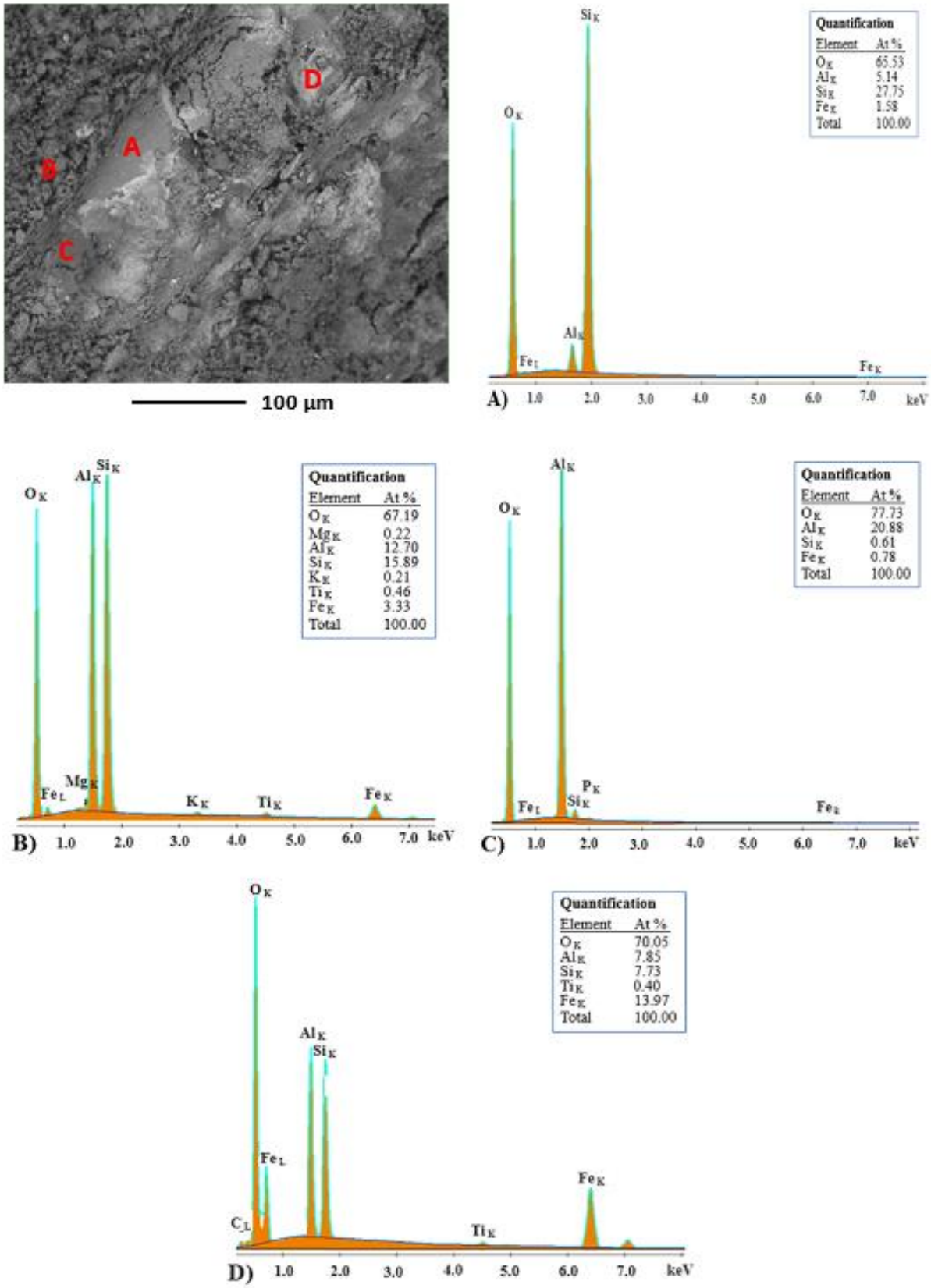


Figure 4-21 : Cliché en électrons rétrodiffusés recueilli : échantillon de Fillingué. **A)** Spectre de la zone A: silice dominante, **B)** Spectre de la zone B: kaolinite dominante, **C)** Spectre de la zone C: Gibbsite dominante, **D)** Spectre de la zone D: Kaolinite / oxydes de fer.

4.5.1.4 Composition minéralogique des échantillons de Dosso

Le cliché de l'échantillon de Dosso (Figure 4-22) montre une matrice plus ou moins compacte comportant des vides et microfissures principalement à la jonction entre des blocs de grains et le faciès de la matrice. Cet échantillon est principalement composé des phases minérales suivantes :

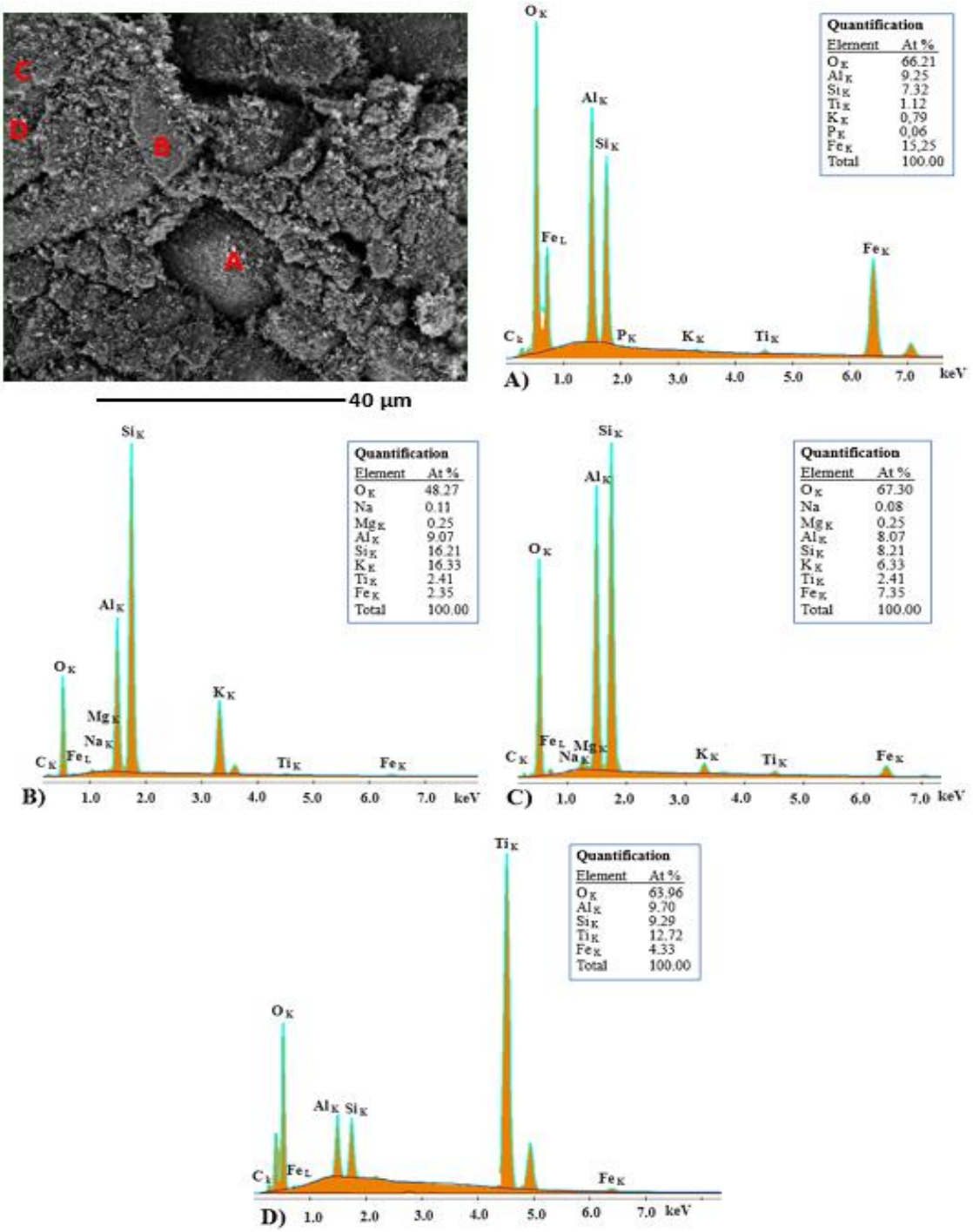


Figure 4-22 : Cliché en électrons rétrodiffusés recueilli : échantillon de Dosso. **A)** Spectre de la zone A: oxydes de fer dominant, **B)** Spectre de la zone B: Illite/kaolinite, **C)** Spectre de la zone C: kaolinite dominante, **D)** Spectre de la zone D: Anatase / kaolinite.

- ✓ Dans la zone A (Figure 4-22-A), on retrouve un mélange d'éléments tels que la kaolinite à 40%, la goethite à 30%. L'anatase et la gibbsite y sont en traces.

- ✓ La zone B (Figure 4-22-B) est plus riche en kaolinite (49%), et accessoirement de la silice (15%). L'anatase et la goethite sont en proportions équivalentes de 5%. Nous avons également retrouvé un minéral supplémentaire dans cette zone ; il s'agit d'une argile type illite retrouvée à environ (15%) dans le mélange.

- ✓ La zone C (Figure 4-22-C) contient principalement de la kaolinite (43,5%), de la goethite (14,7%) et de la silice en traces diffuses. De l'illite a été également retrouvée en quantité non négligeable dans cette partie. Le reste du pourcentage est consommé par les autres oxydes et corps amorphes.

- ✓ Dans la zone D (Figure 4-22-D), la kaolinite et l'anatase sont en plus grandes proportions, respectivement 50,7 et 24,4%. La goethite y représente un pourcentage de 8,6.

L'échantillon de Dosso contient des vides plus ou moins interconnectés. La kaolinite constituant la matrice fine est le minéral dominant contenant peu d'oxydes de fer. La silice est également en faible teneur. L'une des particularités de cet échantillon par rapport aux autres est sa teneur appréciable en illite. Il s'agit en quelque sorte d'une deuxième phase argileuse mélangée à de la kaolinite dans certaines zones. L'anatase retrouvée dans les sols de Dosso se présente sous forme de grain.

4.5.1.5 Composition minéralogique des échantillons de Guéchémé

L'échantillon provenant du site de Guéchémé (Figure 4-23) comporte plusieurs blocs de grains dispersés un peu partout dans le sol. Les grains sont disloqués et séparés par des vides. La matrice, peu compacte, est essentiellement constituée de kaolinite.

- ✓ Le tir effectué sur la zone A (Figure 4-23-A) a permis de mettre en évidence un mélange dominé par la silice (49%), de la kaolinite (34%) et des oxydes de fer (11,3%).

- ✓ La zone B (Figure 4-23-B) contient au premier ordre de la kaolinite (52,4%) et de l'hématite Fe_2O_3 (40,1%). La quantité de silice est faible (6%).

- ✓ La zone C (Figure 4-23-C) est constituée de 40,6% de kaolinite, 45,7% de goethite et 3% de quartz.

Cet échantillon comporte de la kaolinite mélangée en proportions variables selon les endroits à des oxydes de fer et/ou d'aluminium et de l'anatase. Ce mélange constitue la matrice dans laquelle sont dispersés les grains de quartz qui se trouvent recouverts par ce mélange. La forte présence d'oxydes de fer dans les échantillons de Guéchémé, principalement la goethite et accessoirement l'hématite est confirmée par la microanalyse X, validant ainsi les résultats auxquels nous sommes parvenus en microscopie optique et en DRX.

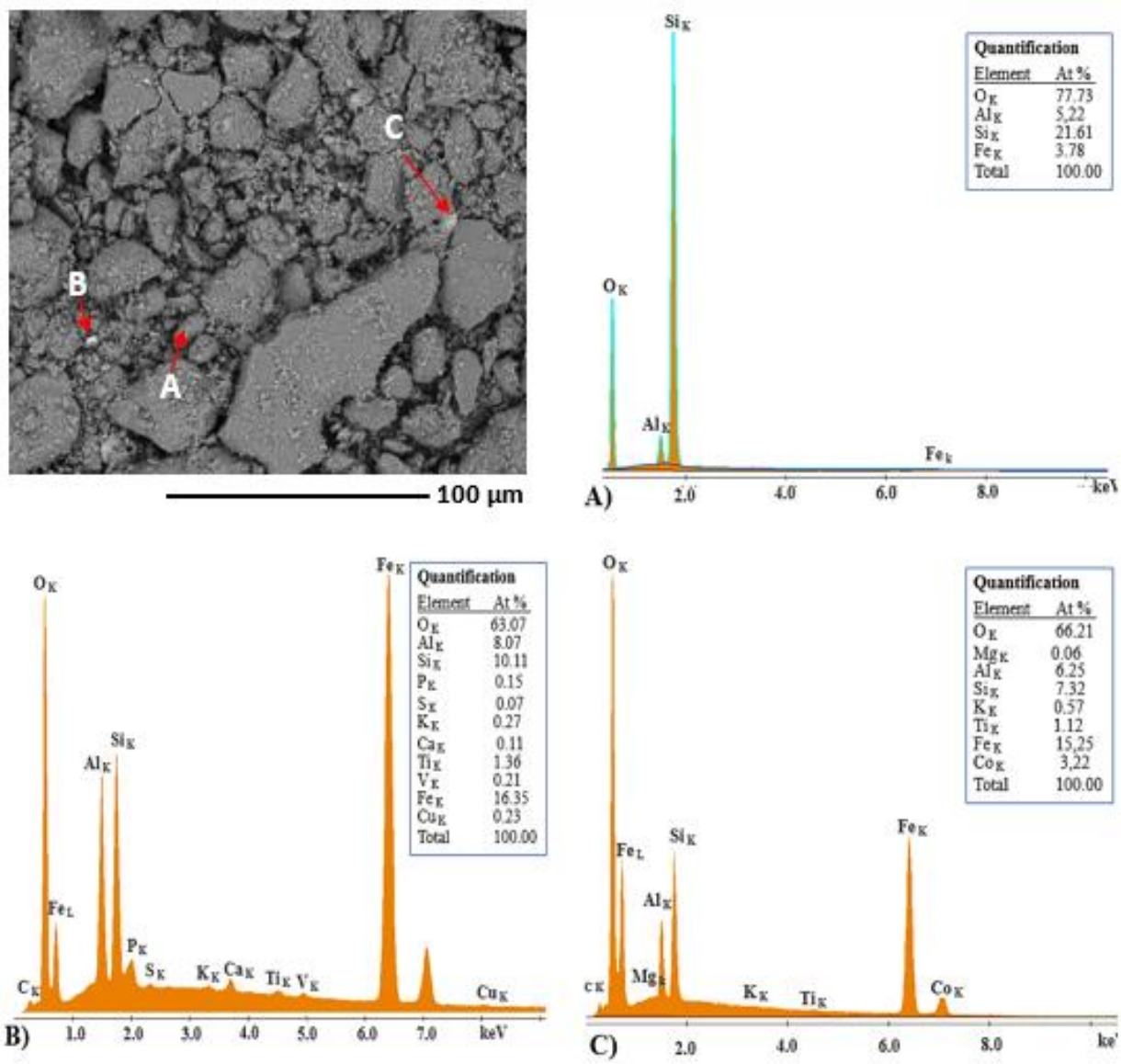


Figure 4-23 : Clichés en électrons rétrodiffusés recueilli : échantillon de Guéchémé. **A)** Spectre de la zone A: silice dominante, **B)** Spectre de la zone B: oxydes de fer dominants / Kaolinite, **C)** Spectre de la zone C: kaolinite / oxydes de fer.

4.5.2 Microanalyse à la sonde EDS par cartographie X-2D des échantillons des sites de Torodi et de Tillabéry

4.5.2.1 Composition minéralogique des échantillons de Torodi : cartographie des phases minérales

La Figure 4-24-A présente un cliché en électrons rétrodiffusés (contraste de phase / numéro atomique) pris au GAD (Gazeous Analytical Detector) d'un échantillon provenant du site de Torodi. L'image montre une structure granulaire avec d'importants vides inter-granulaires. La cartographie X à l'EDS est effectuée sur la surface entière du cliché de la Figure **4-24**-A pour en faire l'analyse chimique.

Après collection des spectres en chaque pixel de l'image on peut *à posteriori* recalculer le spectre (moyen) sur n'importe quelle partie de la zone cartographiée cf. e.g., la petite zone repérée par le rectangle blanc sur les Figure 4-24-B et C.

Comme évoqué plus haut dans le mémoire, l'ensemble des spectres collectés en chaque pixel de l'image peut aussi être analysé *à posteriori* via une approche statistique implémentée dans l'environnement EDAX Genesis. Cet exercice, dit « reconstitution de phases », consiste à exhiber N classes de spectres.

Chaque classe est représentée par un spectre type (au sens d'une moyenne pour fixer les idées) et l'appartenance d'un spectre local mesuré en un pixel à une classe de spectres (appartenance exclusive) se fait au sens d'un critère (statistique) de similarité.

Dans le cas de cet échantillon de Torodi, deux phases principales ont été exhibées (Figure **4-24**-B et Figure 4-25). Le % d'occupation surfacique de chacune de ces phases (identifiées statistiquement) est donné dans la légende de la Figure 4-25.

La reconstitution de phase obtenue est illustrée sur la Figure 4-24-B où chaque phase est représentée par une couleur arbitraire. Sur la Figure 4-24-B, au sein d'une même phase au plus la couleur du pixel est « vive », au plus le spectre local de ce pixel est proche du spectre type de la phase exhibée statistiquement.

Le spectre de phase caractérisant au sens d'une moyenne l'ensemble des pixels rouges de la Figure 4-24-B est donné sur la Figure 4-25-A. Ce spectre est assorti de sa quantification (At %) par la méthode ZAF et de l'interprétation minéralogique que nous en avons faite (cf. plus haut dans le mémoire).

La quantification (At%) du spectre (Figure 4-25-A) de la phase rouge sur la Figure 4-24-B est interprétée comme un mélange de 60 % (% surfacique) de silice SiO_2, 33% de kaolinite ($Si_2Al_2O_5(OH)_4$) et 7% de goethite (FeO(OH)).

La quantification (At %) du spectre (Figure 4-25-B) de la phase en bleu sur la Figure **4-24**-B est interprétée comme un mélange de 80% de kaolinite ($Si_2Al_2O_5(OH)_4$), 12% de goethite, 3,7% de silice et 1,5 % d'anatase (TiO_2).

La superposition des cartographies élémentaires de Si, Fe et Ti sur la Figure 4-24-C montre bien que le spectre de la Figure 4-25-B caractérise la phase bleue de la Figure 4-24-B au sens d'une moyenne et que localement l'abondance relative des différents minéraux composant cette phase bleue peut varier.

Par exemple, la Figure 4-26 montre le spectre EDS associé à la petite fenêtre blanche sur les Figure 4-24-B et C. Ce spectre est interprété comme un mélange de 67,5% de kaolinite, 16 % d'anatase, 13% de goethite, et 2,5% de silice.

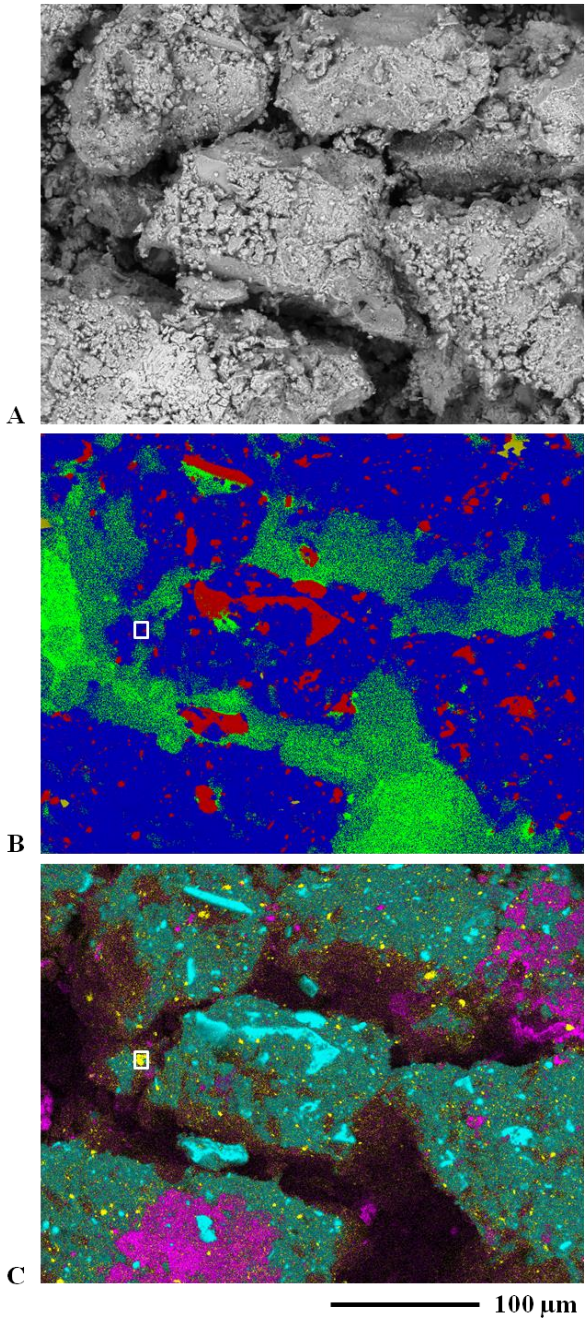


Figure 4-24 : Échantillon provenant du site latéritique de Torodi : A] Cliché formé en mode BSE (électrons rétrodiffusés) dans les conditions de faible pression (50 Pa). En mode BSE, les zones vives expriment les atomes lourds (numéro atomique Z d'éléments atomiques lourds) à cause du relief de la surface irrégulière de cet échantillon, le contraste topographique et par numéro atomique Z sont inclus dans cette image. **B]** Cartographie issue de l'analyse statistique des données spectrales. Les petits spots jaunes sont les zones de scotch carbone utilisé pour fixer l'échantillon, et ne sont donc pas couverts par celui-ci. Surfaces occupées par les phases : 18% pour la phase rouge, 64% pour la phase bleue et 17,5% pour les vides intergranulaires (en vert Figure 4-24-B) **C]** Superposition des cartographies élémentaires, Si en cyan, Fe en violet et Ti en jaune. Les zones en noir ne sont pas détectées par l'EDS (porosité inter-granulaire, pentes ou reliefs non orientés vers le détecteur EDS et/ou constituent des zones inaccessibles au faisceau incident d'électrons (cf. aux zones en vert sur la Figure 4-24-B).

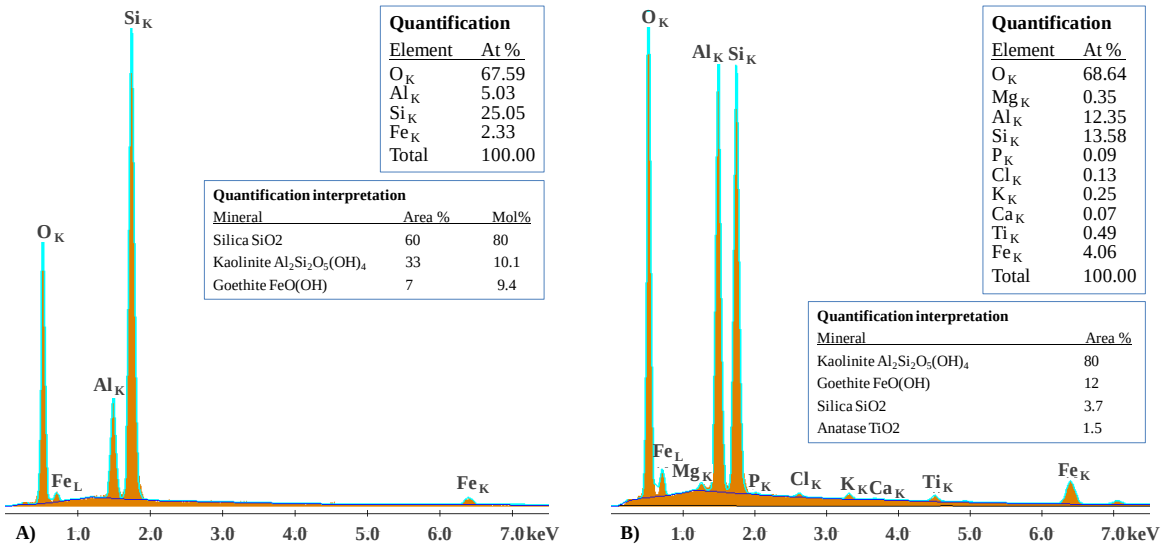


Figure 4-25 : Analyse statistique de la cartographie 2D acquise à partir de la reconstitution de phases sur toute la surface du cliché de la Figure 4-24-A. **A]** Spectre caractérisant les zones en rouge sur la Figure 4-24-B. La quantification en pourcentage atomique (At %) a été obtenue grâce à la matrice de correction ZAF. Cette quantification fait ressortir une combinaison de phases (en % de surface) de 60% de silice (80% mol), 33% de kaolinite (10,1% mol) et 7% de goethite (9,4% mol). **B]** Spectre décrivant les zones bleues sur la Figure 4-24-B. La quantification en pourcentage atomique met également en evidence une combinaison de phases minérales (en % de surface) dominée par la kaolinite (80%), goethite (12%), silice (3,7%) et oxydes de titane (1,5%).

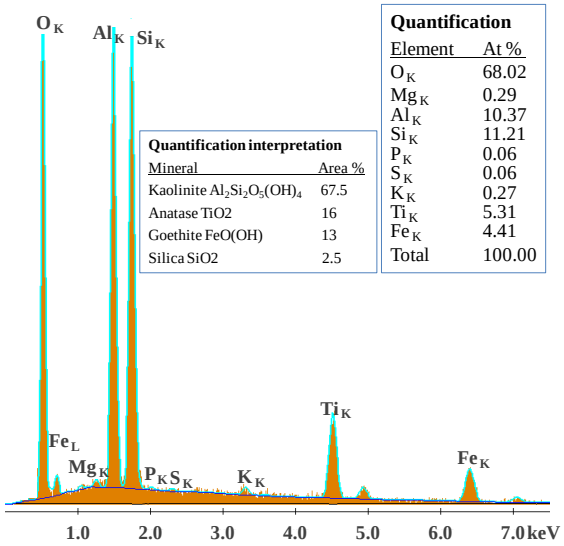


Figure 4-26 : Spectre mesuré sur la zone délimitée par la petite fenêtre blanche sur les Figure **4-24**-B et C, riche en Titane apparaissant sous forme de petits points jaunes sur la Figure **4-24**-C. La quantification en % atomique traduit une combinaison de phases minérales (en % de surface) composées d'anatase (16%), de kaolinite (67,5%), de goethite (13%) et une faible quantité de silice (2,5%).

4.5.2.2 Composition minéralogique des échantillons latéritiques du site de Tillabéry : cartographie des phases minérales

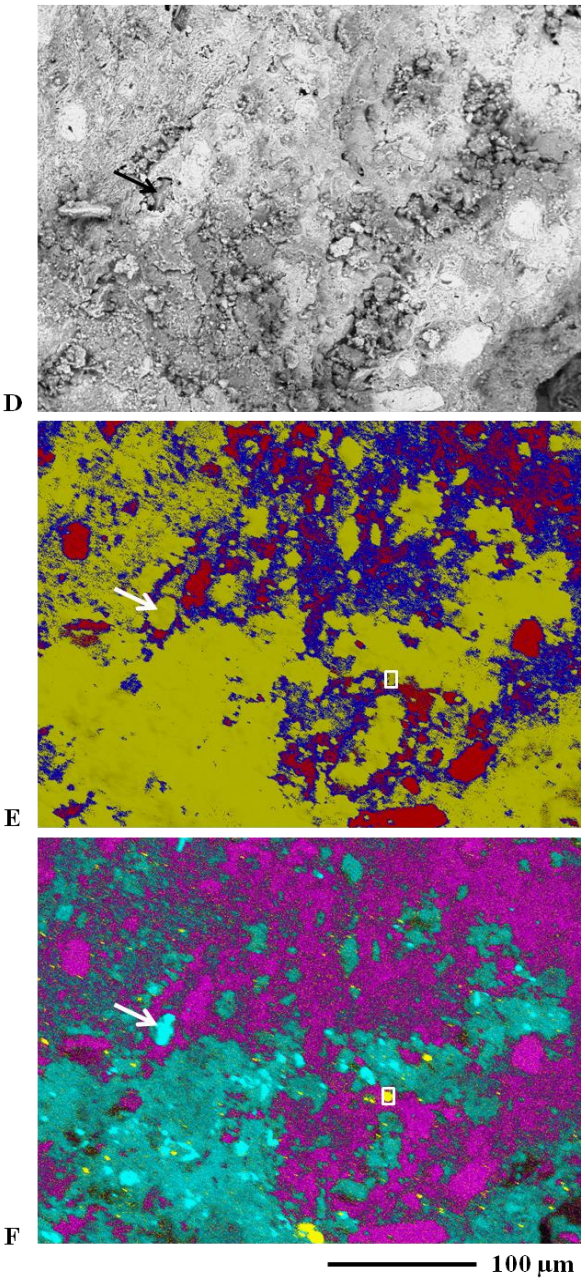


Figure 4-27 : Échantillon provenant du site latéritique de Tillabéry D] Cliché formé en mode BSE (électrons rétrodiffusés) dans les conditions de faible pression. **E]** Cartographie issue de l'analyse statistique des données spectrales. Les spectres EDS caractérisant en moyenne les trois phases sont fournis sur les Figure 4-28 et Figure 4-29 ainsi que leurs quantifications en % atomique et leur interprétation minéralogique. Les zones en jaune couvrent 61 % de la surface et sont dominées par la kaolinite. Les zones en rouge (11% de la surface) sont les plus riches en oxydes de fer et d'aluminium (goethite et gibbsite) et les zones en bleu (28% de la surface) sont des mélanges intermédiaires entre les deux phases précédentes. **F]** La superposition des cartographies élémentaires, Si en cyan, Fe en violet et Ti en jaune permettent de visualiser précisément les zones dominées par chaque élément atomique. Les zones en noir correspondent à celles qui n'ont pas été détectées par l'EDS.

La Figure 4-27-D est l'image recueillie sur les échantillons collectés sur le site de Tillabéry en mode BSE (électrons rétrodiffusés). Cette image est différente de la structure granulaire des échantillons de Torodi (Figure 4-24-A). Toute la surface du cliché visible sur la Figure 4-27-D a été cartographiée en 2D par microanalyse X à l'EDS. Les cartographies 2D obtenues sont matérialisées sur les Figure 4-27-E et F.

Comme pour Torodi, les données de la cartographie par microanalyse X ont été statistiquement analysées. Les trois phases obtenues après la cartographie sont matérialisées sur la Figure 4-27-E. Toutes les trois phases obtenues sont des mélanges en proportions variables d'oxydes de fer (d'aluminium) et de kaolinite. Les zones qui apparaissent en rouge sur la Figure **4-27**-E sont dominées par les oxydes de fer, 47,8% de goethite FEO(OH) combinée avec 10,9% de gibbsite $Al(OH)_3$ et 24,7% de kaolinite. Les surfaces en bleu contiennent moins d'oxydes de fer (28% de goethite et 6,7% de gibbsite) et plus riches en kaolinite (47%). Les zones apparaissant en jaune sur la Figure 4-27-E sont dominées par la kaolinite (65,2%) et une quantité relativement faible d'oxydes de fer (13% de goethite et 1,2% de gibbsite).

Les détails de la composition minéralogique des trois combinaisons de phases détectées à l'EDS sur l'échantillon de Tillabéry sont reportés sur les légendes des Figure 4-28 et Figure **4-29**.

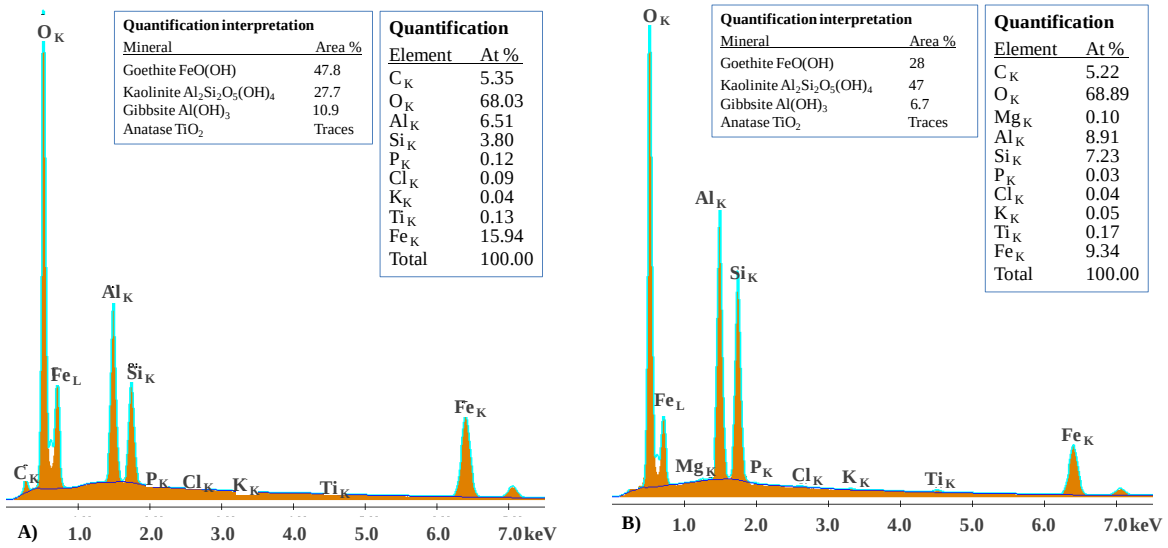


Figure 4-28 : Analyse statistique de la cartographie 2D acquise à partir de la reconstitution de phases sur toute la surface du cliché de la Figure 4-27-D. **A)** Spectre (statistiquement identifié) caractérisant les zones en rouge sur la Figure 4-27-E. La quantification en pourcentage atomique (At %) traduit une combinaison de phases minérales (% de surface occupée par la phase en rouge) de 47,8% de goethite, 27,7% de kaolinite, 10,9% de gibbsite et des traces d'anatase. **B)** Spectre décrivant les zones bleues sur la Figure 4-27-E. La quantification en pourcentage atomique correspondante fait ressortir un mélange de kaolinite (47%), goethite (28%), gibbsite (6,7%) et de l'anatase en traces.

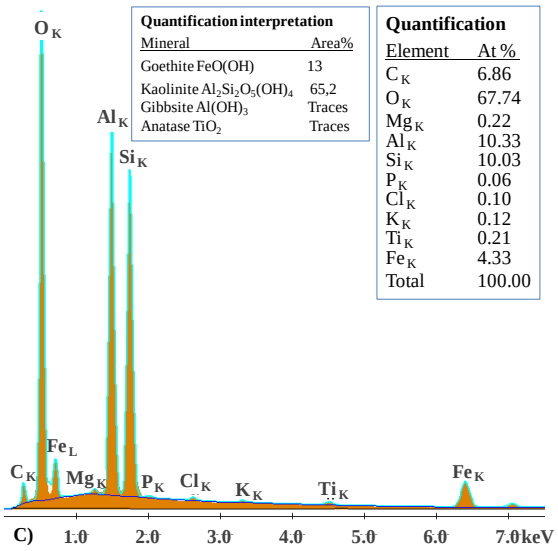


Figure 4-29 : Analyse statistique de la cartographie 2D acquise à partir de la reconstitution de phases sur toute la surface du cliché de la Figure 4-27-D. Spectre (statistiquement identifié) caractérisant les zones en jaune sur la Figure 4-27-E. La quantification en pourcentage atomique (At %) a été interprétée comme une combinaison de phases minérales (% de surface occupée par la phase en jaune sur la Figure 4-27-E de 65,2% de kaolinite, 13% de goethite et des traces de gibbsite et d'anatase.

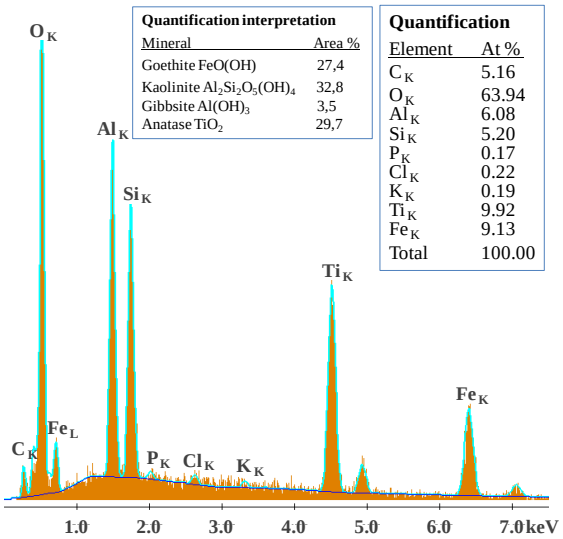


Figure 4-30 : Spectre mesuré sur la zone délimitée par la petite fenêtre blanche sur la Figure **4-27**-F, plus riche en titane apparaissant sous forme de petits points jaunes. La quantification en % atomique traduit une combinaison de phases minérales (en % de surface) composée de 29,7% d'anatase, 27,4% de goethite, 32,8% de kaolinite et 3,5% de gibbsite.

Comme nous l'avons vu pour Torodi, la superposition des cartographies élémentaires (Si, Fe et Ti) sur la Figure 4-27-F, montre que chaque spectre (Figure 4-28 et Figure 4-29) est caractérisé par sa phase correspondante (rouge, bleu et jaune) en termes de moyenne statistique.

Par exemple, la Figure 4-30 montre le spectre EDS mesuré sur la zone riche en Ti correspondant à la petite fenêtre blanche sur les Figure 4-27-E et F qui tombe sur la phase jaune (Figure 4-27-E). Le spectre EDS recueilli sur cette zone est interprété comme un mélange (en % de surface occupée) de 33,8% de kaolinite, 29,7% d'anatase, 27,4% de goethite et 3,5% de gibbsite.

Contrairement à l'échantillon de Torodi (Figure 4-24-B et Figure 4-25), l'analyse chimique de la surface par l'EDS des échantillons provenant de Tillabéry (Figure 4-27-E, Figure 4-28 et Figure 4-29) n'a pas révélé une quantité significative de silice, mis à part les quelques grains de quartz ennoyés dans la matrice comme le montre les petits grains brillants en cyan sur la Figure 4-27-F. La Figure 4-31-A est un gros plan réalisé sur une zone où on observe un grain de quartz (flèche blanche sur les Figure 4-27-E et F) incrusté dans une matrice caractérisée par deux faciès : feuillets de kaolinite (Figure 4-31-B) et de petites « boutlettes » d'oxydes de fer hydratés (goethite) enrobant des feuillets de kaolinite (Figure 4-31-C).

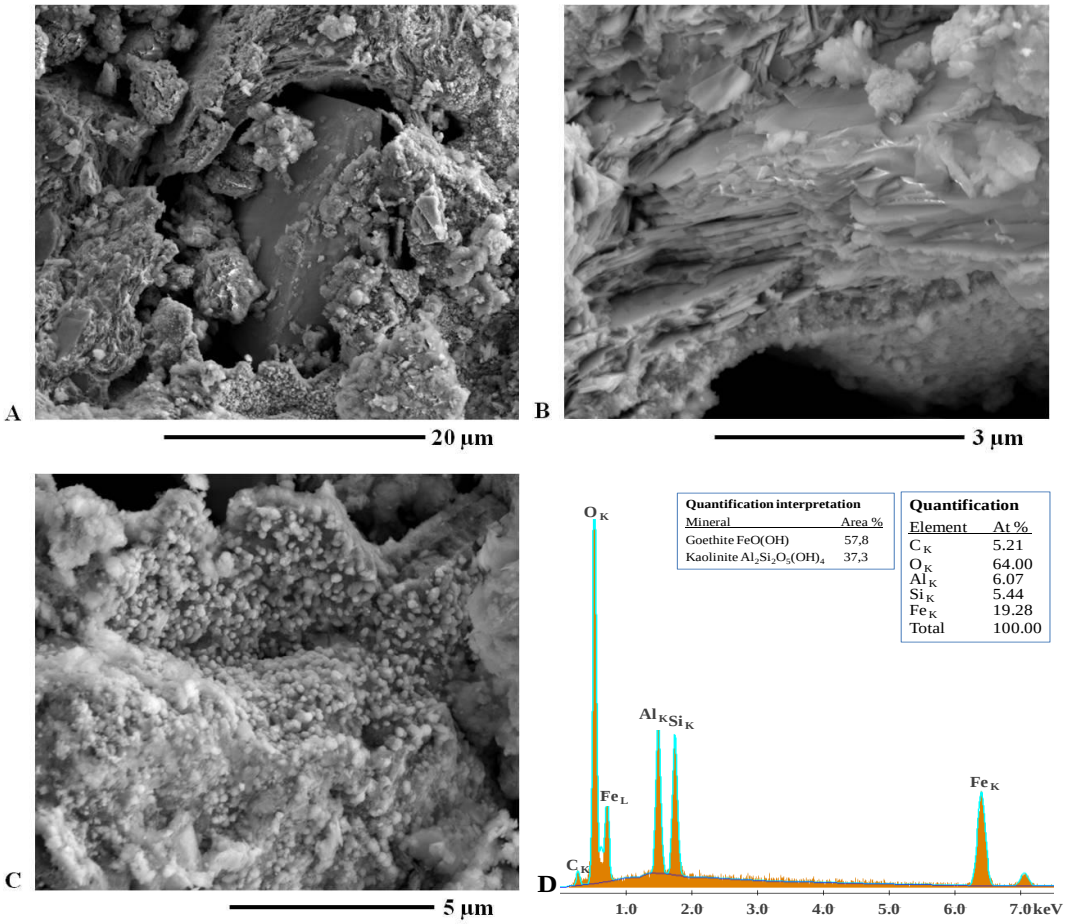


Figure 4-31 : Clichés d'échantillons provenant du site latéritique de Tillabéry. **A)** Cliché formé en mode BSE (électrons rétrodiffusés) dans les conditions de faible pression (50 Pa) sur la zone indiquée par la petite flèche blanche sur les Figure 4-27-E et F. **B)** Zoom sur les feuillets de kaolinite dans la partie supérieure de la Figure 4-31-A. **C)** Zoom sur les petites « boulettes » d'oxydes de fer dans la partie inférieure de la Figure 4-31-A. **D)** Spectre moyen mesuré sur la Figure 4-31-C. La quantification en % atomique typifie essentiellement une combinaison de phases minérales (% d'occupation) dominée par la goethite (57,8%) et de la kaolinite (37,3%).

4.5.2.3 Analyse à l'EDS et spectroscopie Raman de zones supplémentaires repérées en microscopie optique

Les minéraux identifiés en microscopie optique sont la kaolinite, le quartz et les oxydes de fer. La combinaison et l'arrangement de ces minéraux ont fait ressortir trois types de texture : la texture à attaque ferrugineuse isolée, à attaque ferrugineuse diffuse et la texture à oolithes. Dans ce qui précède les analyses à l'EDS ont essentiellement révélé un hydroxyde de fer : la goethite FeO(OH). Ceci peut paraître surprenant dans ces régions où subsiste une alternance de saisons humides et sèches ; on peut a priori s'attendre à trouver aussi de l'hématite (Fe_2O_3). Les proportions des espèces minérales retrouvées par les analyses DRX ont montré que la présence de la goethite en forte proportion améliore la portance des sols. Néanmoins, les analyses DRX réalisées sur des volumes de sol ne donnent accès qu'à une semi quantification des minéraux. Ces analyses ne permettent pas de décrire la disposition des oxydes de fer dans la matrice ainsi que leur éventuelle combinaison avec les autres composés minéralogiques. La description des interactions entre les minéraux n'est possible qu'au MEB. Cependant, les analyses au MEB favorisent une bonne description de la microstructure des sols ainsi que la combinaison entre les phases minérales retrouvées mais ne permettent pas de distinguer les types d'oxydes de fer. D'où l'utilisation de la spectroscopie Raman qui permet une distinction précise des oxydes de fer. Lié aux conditions *Lovac* (vide primaire) adoptées pour l'analyse X-EDS, on peut se demander si la teneur apparente en oxygène (O) n'est pas surestimée et si on peut confondre l'hématite avec la goethite.

Des zones contenant des oxydes de fer ont ainsi été repérées sous un microscope optique et ont été retrouvées au MEB. Dans le MEB, ces zones ont été analysées à l'EDS alors que sous le microscope optique, ces mêmes zones ont été scrutées en spectroscopie Raman.

Les investigations ont été portées sur trois échantillons collectés sur les sites de Torodi, Tillabéry et Say. Le choix des échantillons est réalisé de manière à ce que toutes les textures observées au microscope optique puissent être étudiées dans le but de déterminer la nature exacte des minéraux ainsi que leur teneur. L'échantillon de Torodi, tout comme ceux de Ouallam, Fillingué et Dosso sont caractérisés par la même texture (texture à attaque ferrugineuse isolée). La texture à attaque ferrugineuse diffuse est seulement rencontrée dans les échantillons du site de Tillabéry. Et enfin la texture à oolithes caractérisant les échantillons de Say et Guéchémé, mais celui de Say laissant clairement apparaître le motif oolithique avec des cercles ovoïdes concentriques d'oxydes de fer a été retenu pour l'étude.

4.5.2.4 Échantillons de Torodi : textures à attaque ferrugineuse isolée

À la Figure 4-32-K, nous retrouvons l'image prise au microscope optique de l'échantillon de Torodi de texture à attaque ferrugineuse isolée. Cette vue a été identifiée au MEB (Figure **4-32**-L) pour microanalyse X à l'EDS. Des spectres ont été recueillis sur quatre zones.

Sur la Figure 4-32-L, le zoom de la zone C (Figure 4-32-M) montre un assemblage de plusieurs blocs kaolinite/silice liés par un ciment d'oxydes de fer (hématite).

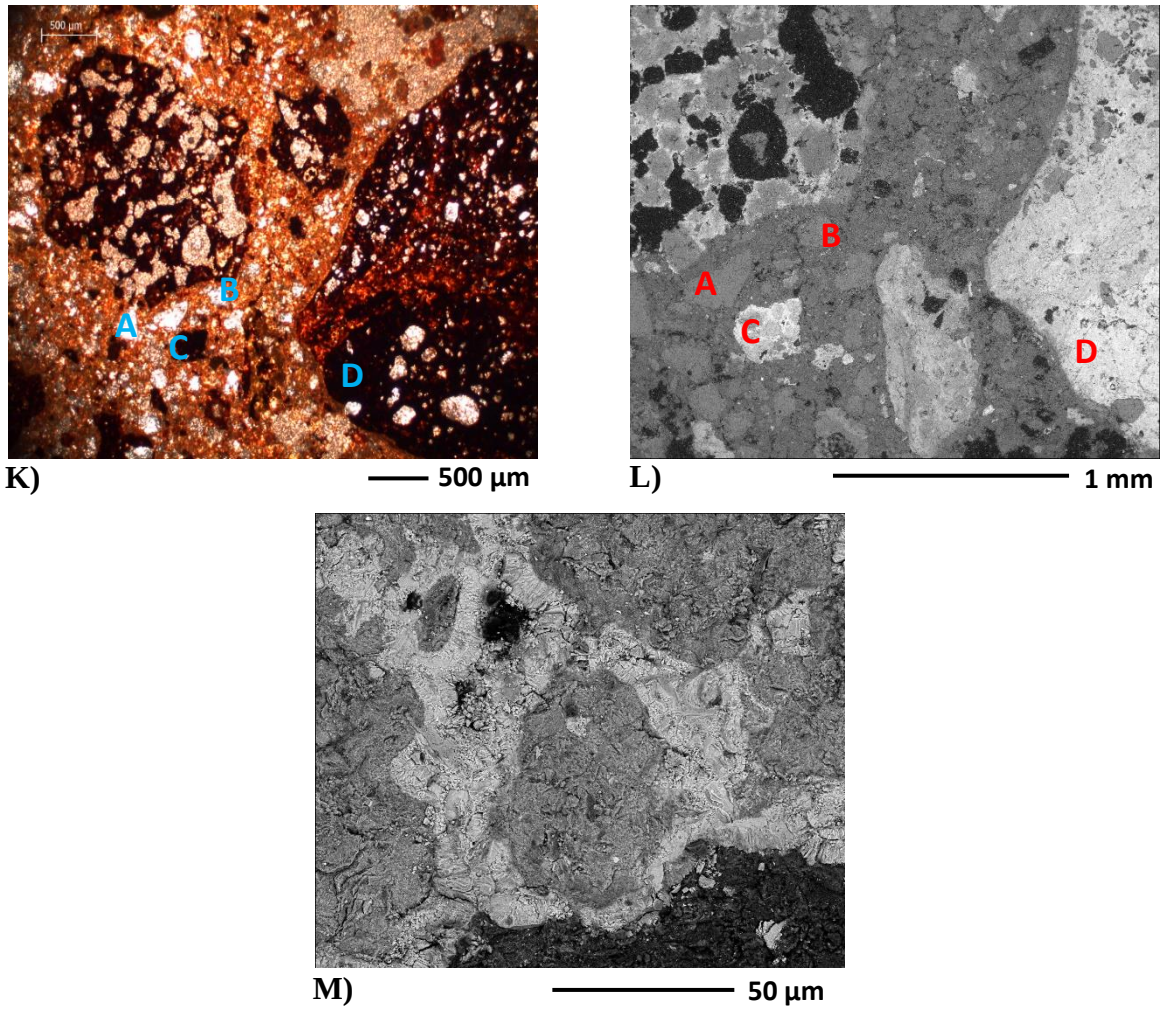


Figure 4-32 : Échantillon prélevé sur le site de Torodi. **K)** Image de lame mince photographiée au microscope optique. **L)** Image de lame mince identifiée au MEB. **M)** Zoom sur la zone C de l'image L.

La zone A (Figure 4-32-L et Figure 4-33-A) montre une zone essentiellement constituée de silice (73,5%) et de la kaolinite (18,5%) avec des traces d'oxydes de Fe.

La zone B (Figure 4-32-L et Figure 4-33-B) est riche en kaolinite (82,3%) combinée à de la silice (13,3%) et une faible proportion d'oxydes de Fe.

Les zones C et D (Figure 4-32-L et Figure 4-33-C et D) de composition minéralogique similaire font ressortir de la kaolinite (24%), du quartz (4,5%) et une forte proportion d'oxydes de fer. L'interprétation de la quantification (At%) (Méthode ZAF) ne permet toutefois pas de préciser s'il s'agit d'hématite ou de goethite lié ici à la teneur apparente en O qui reste qualitative.

Sur la Figure 4-34 sont reportés les spectres Raman recueillis sur les zones A, C et D de la Figure 4-32-L. Les pics retrouvés sur ces spectres correspondent parfaitement aux pics caractéristiques de l'hématite en zones C et D et du quartz en zone A (Cf. aux valeurs des pics Tableau 4-4). Les zones C et D sont donc constituées d'hématite (oxydes ferriques) en plus grande quantité mélangée avec la kaolinite et la silice.

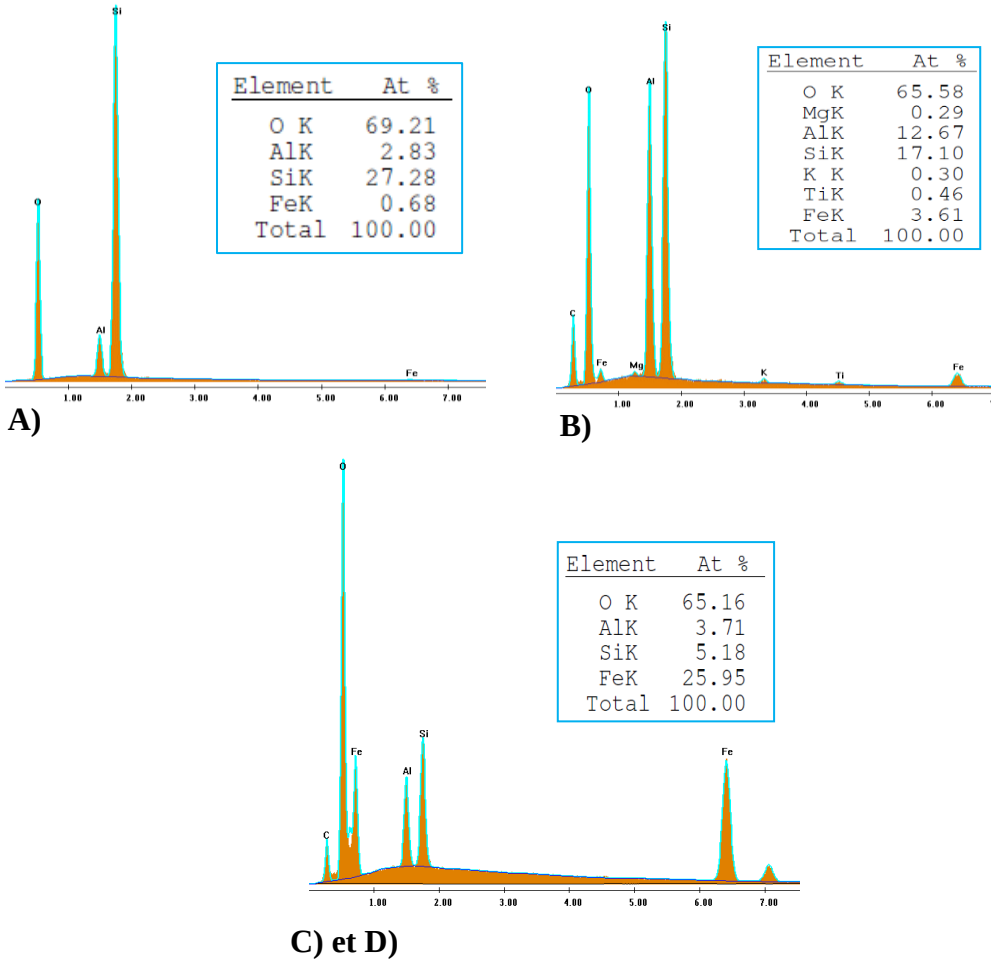


Figure 4-33 : Échantillon de Torodi. **A)** Spectre de la zone A dominée par la silice **B)** Spectre de la zone B dominée par la kaolinite. **C) et D)** Spectres des zones C et D dominées par un mélange hématite / kaolinite / silice.

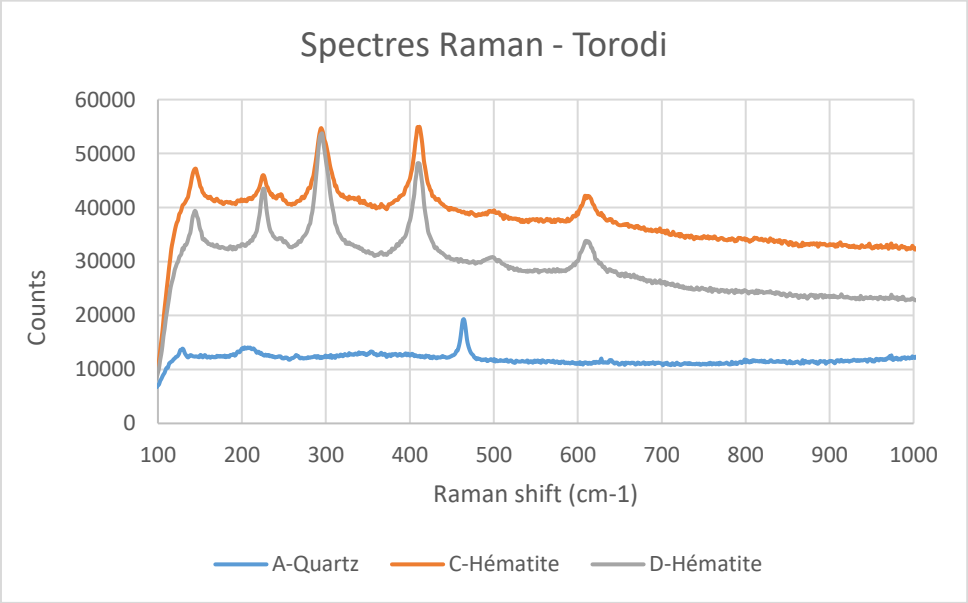


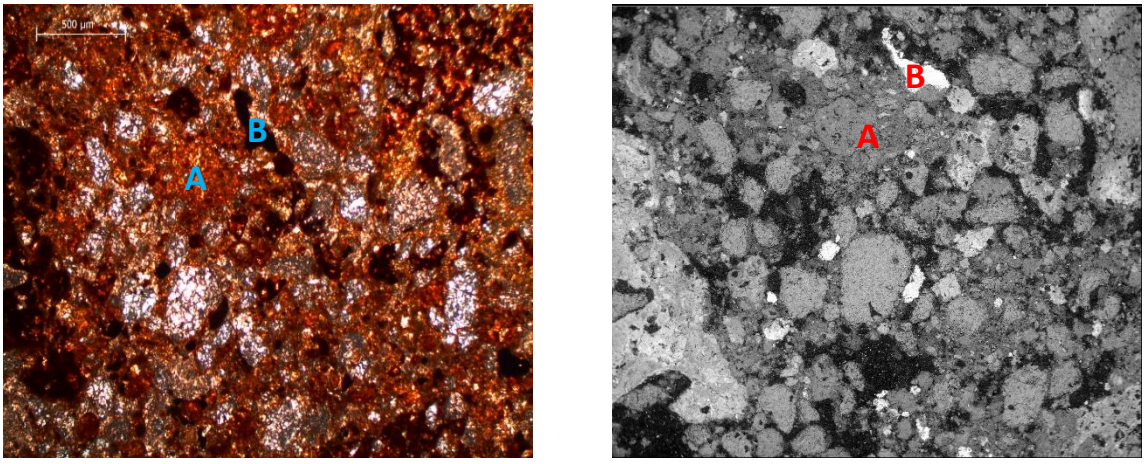
Figure 4-34 : Spectres Raman du quartz et de l'hématite de l'échantillon de Torodi (Figure **4-32**-L – Zones A, C et D).

Tableau 4-4: Pics Raman de référence de quelques minéraux couramment retrouvés dans les sols latéritiques.

Minéral	Formule	Pics Raman (cm-1)											
Anatase	TiO_2	143	197	395	517	638							
Goethite	FeO(OH)	245	299	348	388	417	478	549					
Hématite	Fe2O3	226	245	292	410	497	611						
Kaolinite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	144	270	336	638		3620	3684					
microcline	$KAlSi_3O_8$	111	155	177	269	283	406	474	512	745	1133		
Quartz	SiO_2	128	206	264	354	390	450	464	697	796	808	1069	1162

4.5.2.5 Échantillon de Tillabéry : texture à attaque ferrugineuse diffuse

L'échantillon de Tillabéry possède une texture à attaque ferrugineuse diffuse. Sur l'image obtenue au microscope optique (Figure 4-35-K), on voit que les oxydes de fer n'ont pas de zones d'accumulation préférentielles. Ils sont disposés de manière diffuse dans toute la matrice, principalement dans les vides. Après localisation de cette image au MEB (Figure 4-35-L), deux zones ont été retenues pour la microanalyse X. La zone A (Figure 4-35-L et Figure 4-36-A) est caractérisée par un fort taux de kaolinite (93%) combinée à de la silice (6,3%) et des traces d'oxydes de Fer dont la nature minéralogique n'est pas identifiable. Dans la zone B (Figure **4-35**-L et Figure 4-36-B), le taux de kaolinite est relativement faible (27,5%), mélangé avec une importante quantité d'hématite (64,4%) et 6% de silice. Sur la Figure 4-35-L, le spectre Raman (Figure 4-37) recueilli sur la zone A fait ressortir globalement les pics caractéristiques de l'hématite. Mais ces pics sont moins prononcés à cause de la forte présence de la kaolinite dont quelques pics de celle-ci ont été repérés sur le spectre Raman. Les oxydes de fer retrouvés dans cette zone sont des oxydes ferriques, c'est-à-dire de l'hématite. Sur le spectre Raman (Figure 4-37), on retrouve également de l'hématite comme oxydes de fer. Le spectre Raman de la zone B semble contenir de l'hématite pure à cause de sa teneur élevée par rapport à la kaolinite.



K) 500 µm L) 1 mm

Figure 4-35 : Échantillon de Tillabéry. **K)** Image de lame mince photographiée au microscope optique. **L)** Image de lame mince identifiée au MEB.

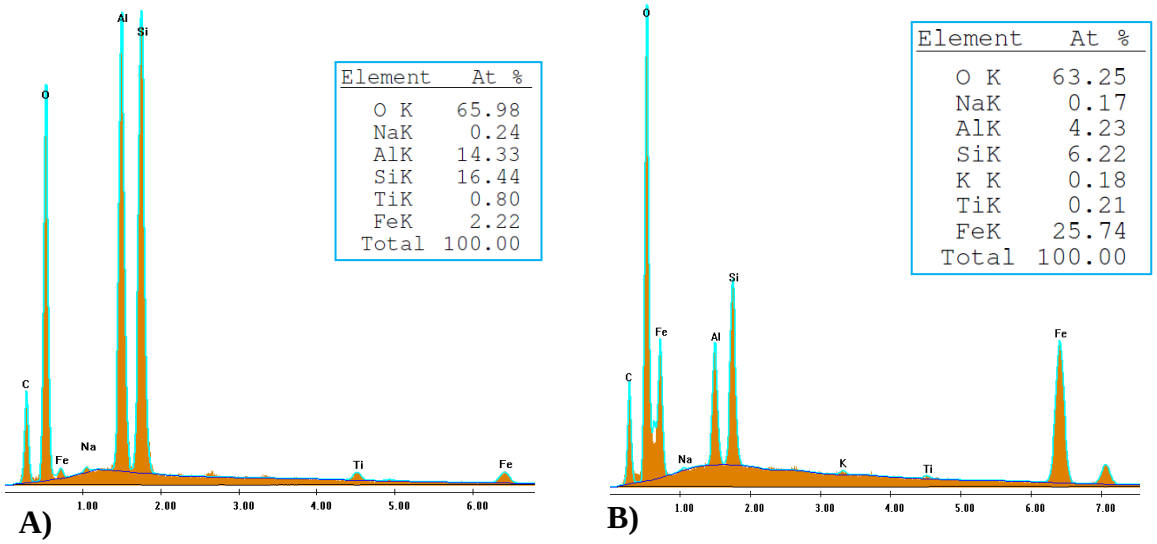


Figure 4-36 : Échantillon provenant du site latéritique de Tillabéry. **A)** Spectre de la zone A contenant majoritairement de la kaolinite. **B)** Spectre de la zone B caractérisée par un mélange d'oxydes de fer dominants et de kaolinite.

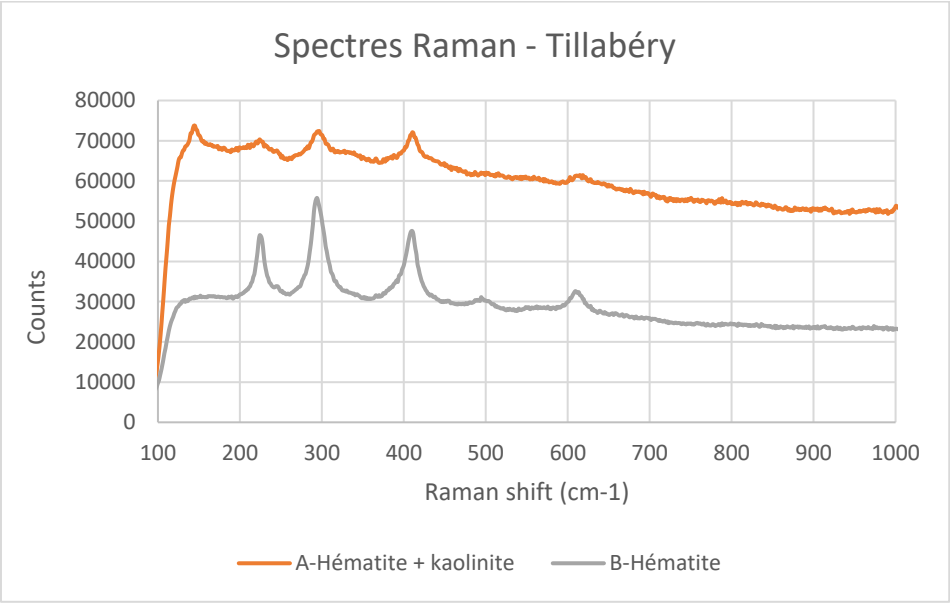


Figure 4-37 : Spectres Raman de l'hématite de l'échantillon prélevé sur le site de Tillabéry (Figure 4-35-L – Zone A et B).

4.5.2.6 Échantillon de Say

Les échantillons de Say, tout comme ceux de Guéchémé, présentent une texture à oolithes. L'échantillon prélevé sur le site de Say a été retenu pour l'étude au MEB, en microscopie optique et en spectrométrie Raman afin de déterminer la nature et la teneur des différents minéraux ainsi que leur mode d'arrangement. La structure oolithique est clairement illustrée par les motifs de cercles ovoïdes sur les images recueillies au microscope optique (Figure 4-38-K) et au MEB (Figure 4-38-L) sur les mêmes zones.

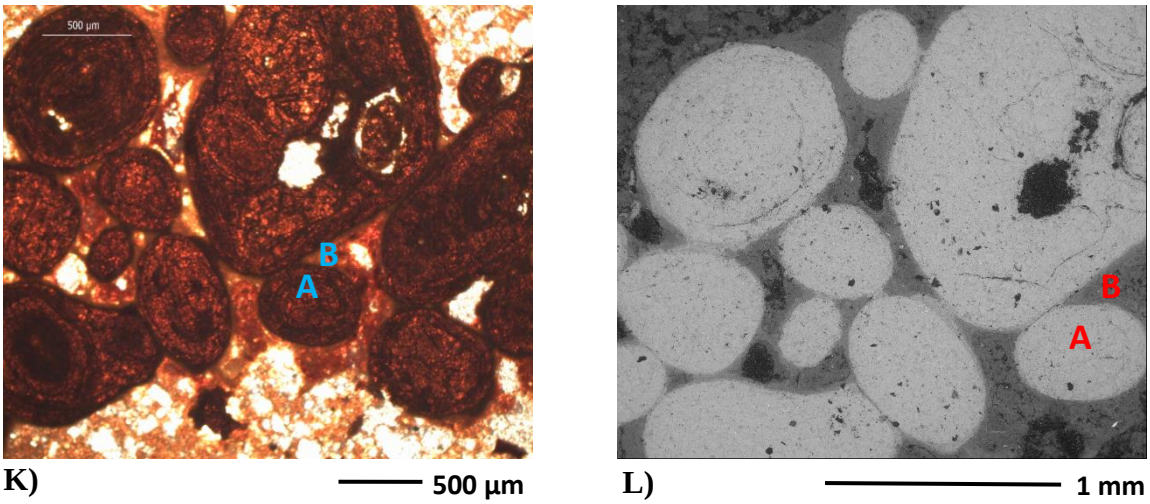


Figure 4-38 : Échantillon de Say. **K)** Image de lame mince photographiée au microscope optique. **L)** Image de lame mince identifiée au MEB.

Sur ces images on observe des zones de concentration d'oxydes de fer sous forme de cercles concentriques tangents au sein d'une matrice kaolinique. Le tir réalisé au MEB sur la zone A (Figure 4-38-L) permet de recueillir un spectre (Figure 4-39-A) ayant permis la quantification des phases minérales contenues dans la zone.

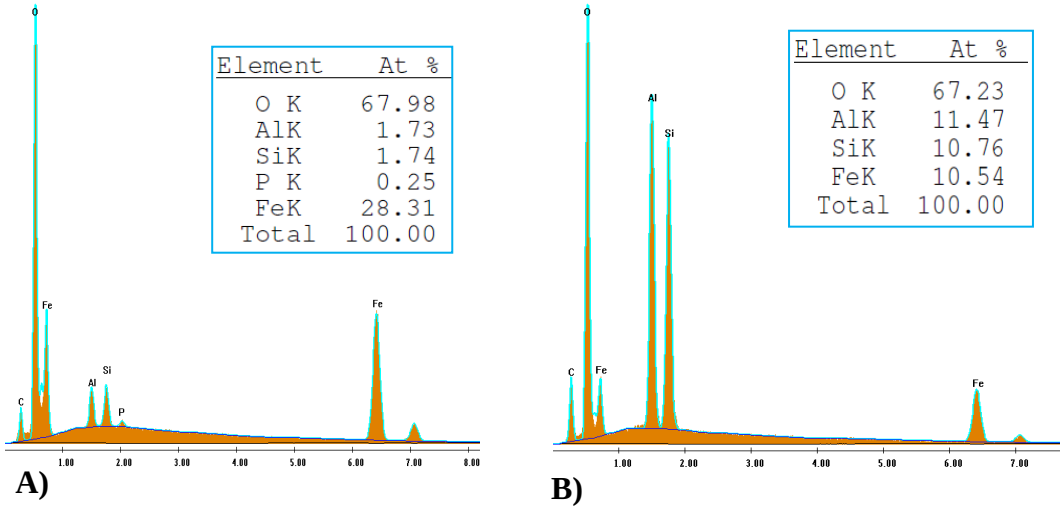


Figure 4-39 : Échantillon de Say. **A)** Spectre de la zone A caractérisé par un mélange goethite dominante / kaolinite. **B)** Spectre de la zone B comportant un mélange goethite / kaolinite dominante.

La zone A est dominée par la goethite (85%) et la kaolinite (11,3%). Cette estimation est validée par le spectre Raman recueilli sur la zone (Figure 4-40). La zone B (Figure 4-38-L) comporte d'après le spectre de la Figure 4-39-B, 72,2% de kaolinite, la nature des oxydes de fer restants n'étant pas identifiable (goethite ou hématite ?). La nature des oxydes de fer (goethite) est également confirmée par la spectrométrie Raman (Figure 4-40). La goethite est combinée à une forte teneur en kaolinite, faisant légèrement écrêter les pics de la goethite correspondant au spectre B par rapport à ceux d'un spectre de goethite pure.

L'échantillon à texture oolithique est donc constitué de zones de concentration d'oolithes ferrugineuses (goethite) dispersées dans une matrice à priori kaolinique. Les cercles d'oolithes sont tangents et reliés sous forme de ponts par un ciment constitué d'un mélange kaolinite / goethite à kaolinite dominante.

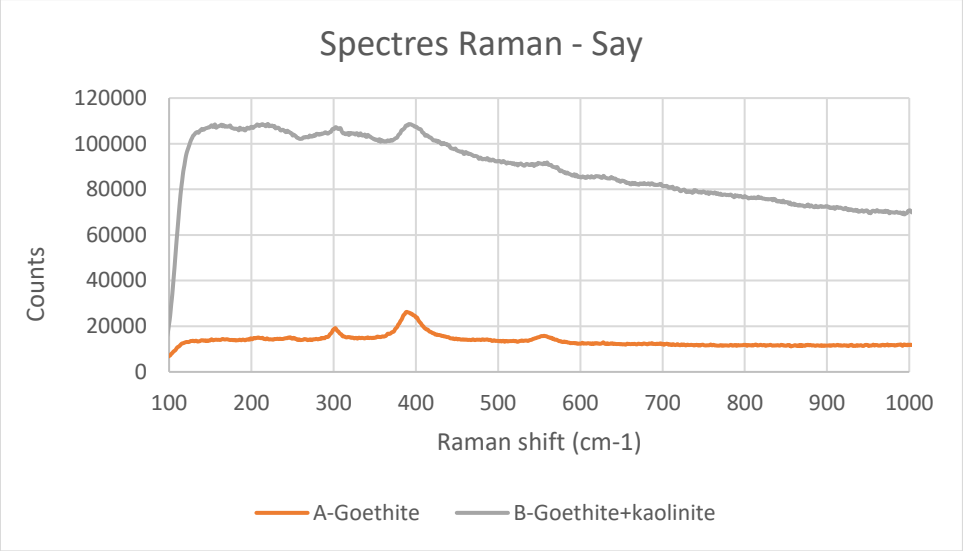


Figure 4-40 : Spectres Raman de la goethite de l'échantillon de Say dans les zones A et B de la Figure 4-38-L.

4.6 Analyses chimiques

Le rapport pondéral S/R permet de donner une approximation du degré de latéritisation d'un gisement latéritique. Plus ce rapport est élevé, moins le profil est latéritisé. La composition chimique (éléments majeurs et mineurs) des échantillons de chaque site ainsi que le rapport S/R sont fournis dans le Tableau 4-5.

Tableau 4-5: Composition chimique: éléments majeurs et mineurs des sols latéritiques.

		Torodi	Tillabéry	Oullam	Say	Fillingué	Dosso	Guéchémé
Sc	**ppm**	16,4	18,04	17,78	14,58	16,22	13,46	16,01
SiO_2	**%**	52,63	38,13	56,46	44,4	53,7	63,38	37,12
Al_2O_3	**%**	20,24	13,34	15,91	18,19	19,65	17,41	13,4
Fe_2O_3	**%**	14,36	36,45	17,44	15,84	14,9	10,08	41,01
MnO	**%**	0,08	0,08	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01
MgO	**%**	0,17	0,06	0,11	0,06	0,1	0,04	0,02
CaO	**%**	0,08	0,04	0,12	< L.D.	< L.D.	0,04	< L.D.
Na2O	**%**	0,03	0,01	0,05	0,02	0,02	0,01	0,01
K2O	**%**	0,27	0,09	0,14	0,11	0,14	0,04	0,03
TiO2	**%**	1,27	0,54	1,05	1,17	1,13	1,23	0,9
P2O5	**%**	0,12	0,33	0,11	0,07	0,08	0,06	0,11
PF	**%**	10,02	12,23	8,92	9,32	9,81	7,94	8,78
Total	**%**	99,25	100,3	100,35	99,21	99,53	100,25	99,4
S/R	**-**	3,04	1,77	3,55	2,67	3,13	4,52	1,6

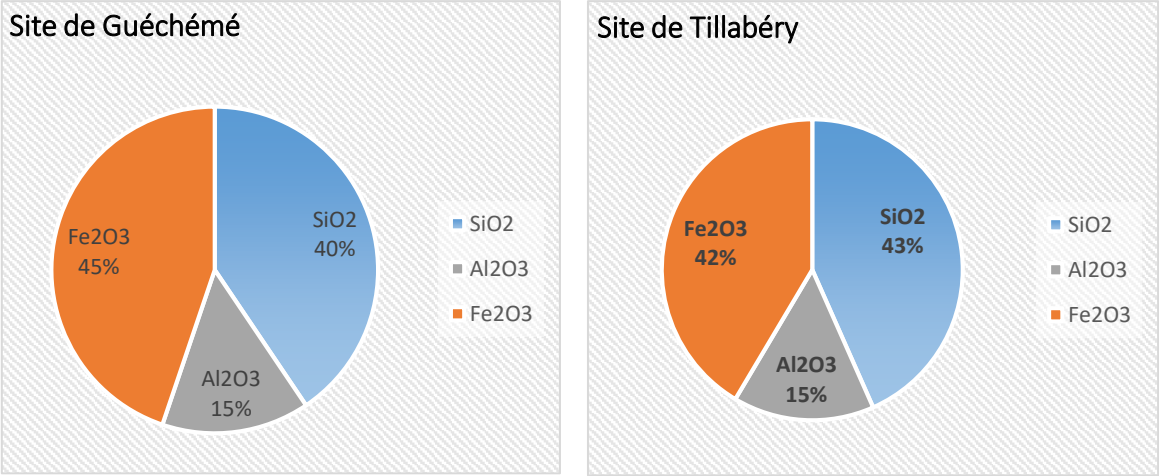


Figure 4-41 : Teneurs de silice et de sesquioxydes des échantillons de Tillabéry et Guéchémé.

Le degré de latéritisation des gisements latéritiques est estimé à l'aide des valeurs de la silice et des sesquioxydes. Les quantités de silice et de sesquioxydes contenues dans les échantillons de sol latéritique varient d'un site à l'autre.

Les échantillons de Tillabéry et Guéchémé ont présenté des quantités en silice et en sesquioxydes du même ordre (Figure 4-41). On y constate une teneur élevée en sesquioxydes de l'ordre de 60%. Les valeurs de ratios S/R obtenues sont 1,77 pour Tillabéry et 1,60 pour Guéchémé (Figure 4-44). Ces valeurs sont inférieures à 2. Il s'agit donc de sols latéritiques caractérisés par un degré de latéritisation poussé.

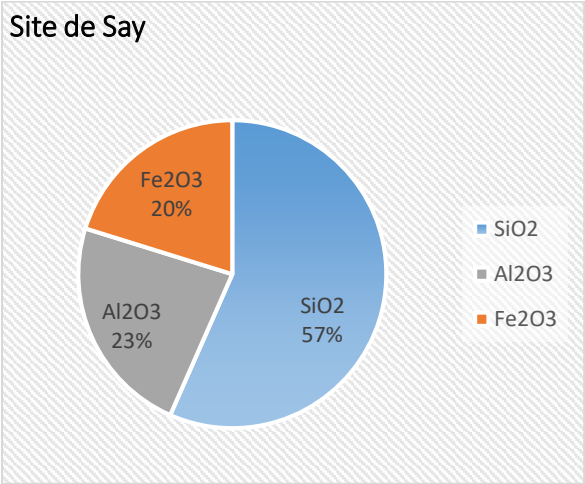


Figure 4-42 : Teneurs de silice et de sesquioxydes de l'échantillon de Say.

L'échantillon de Say (Figure 4-42) présente un taux de silice plus élevé (57%) que les échantillons précédents et la teneur en sesquioxydes est faible (43%). Le rapport S/R de 2,67 (Figure 4-44) est au-dessus de la valeur de 2. Les graveleux latéritiques de cette zone sont donc moins latéritisés que ceux de Tillabéry et Guéchémé.

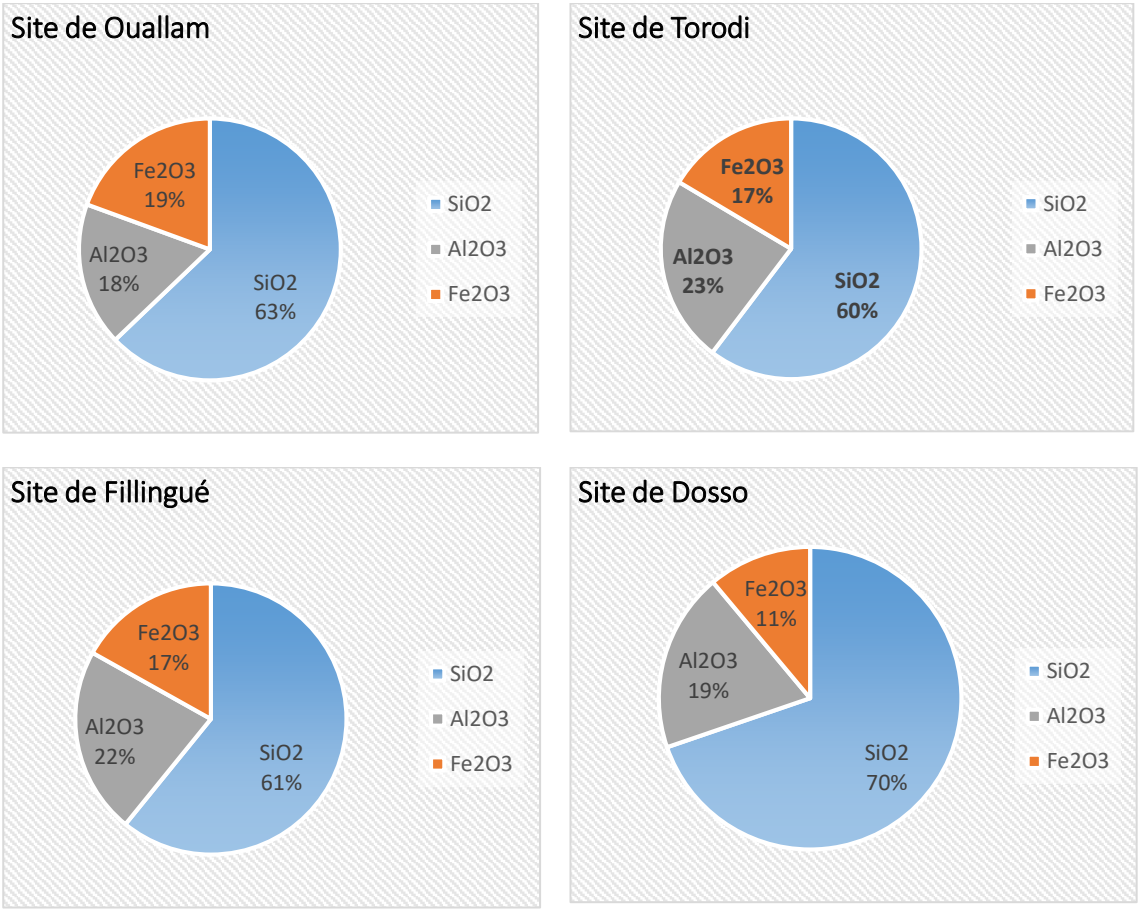


Figure 4-43 : Teneurs de silice et de sesquioxydes des échantillons de Ouallam, Torodi, Fillingué et Dosso.

Les graveleux latéritiques des zones de Torodi, Ouallam, Fillingué et Dosso (Figure **4-43**), sont les plus riches en silice. Les rapports S/R obtenus pour ces échantillons sont respectivement 3,04 ; 3,55 ; 3,13 et 4,52 (Figure 4-44). Le gisement latéritique de Dosso est le moins latéritisé à cause sa forte teneur en silice (70%) et la faible teneur en sesquioxydes, 11% pour les oxydes de fer et 19% pour les oxydes d'aluminium. Les autres échantillons, bien que de faibles teneurs en silice par rapport à celui de Dosso sont également peu latéritisés.

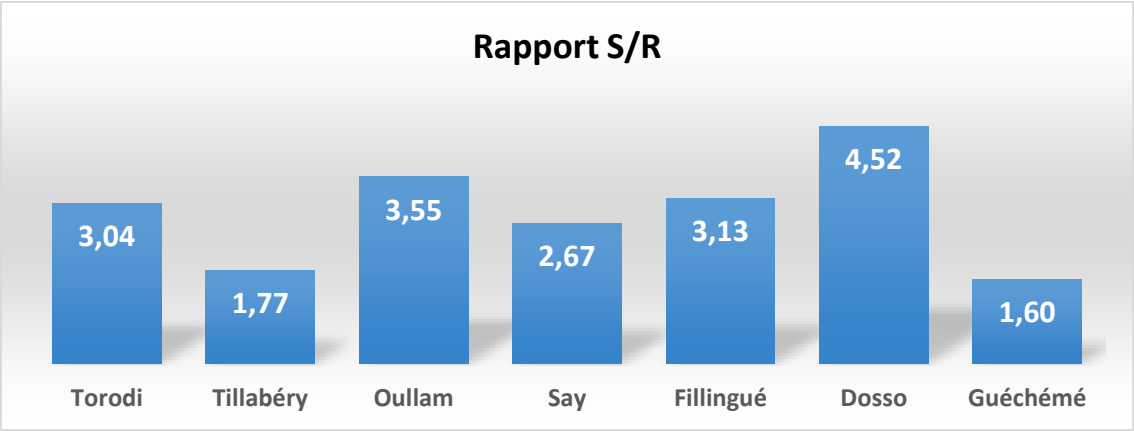


Figure 4-44 : Rapports S/R des échantillons de sols latéritiques.

4.7 Conclusion

La caractérisation minéralogique des échantillons latéritiques est réalisée à travers diverses méthodes complémentaires pour favoriser une description qualitative et quantitative précises des différentes phases minérales contenues dans ces sols. On rappelle que les échantillons prélevés sur les sept sites de la zone d'étude proviennent des gisements aux contextes géologiques différents. Les gisements latéritiques des sites de Torodi et Tillabéry sont développés sur les formations du Liptako Gourma dont les granites pour le site de Tillabéry et les roches métamorphiques (schistes et micashistes) pour Torodi. Ces échantillons ont fait ressortir des textures différentes comparativement au mode d'attaque des oxydes de fer. L'échantillon de Torodi est caractérisé par une texture à attaques ferrugineuses isolées alors que l'attaque des oxydes de fer est diffuse pour les sols de Tillabéry. Les emprunts latéritiques des sites de Ouallam et Dosso développés sur le Continental Terminal 3 et Fillingué sur le Continental Terminal 2 présentent un aspect textural similaire. L'attaque des oxydes de fer se fait de façon isolée dans ces échantillons. Les échantillons de Say (Continental Terminal 1) et ceux de Guéchémé (Continental Terminal 3) ont présenté la même texture oolithique malgré la différence notable de leurs formations géologiques.

Les minéraux communs à ces différentes textures sont : le quartz, la kaolinite et les oxydes de fer. L'analyse DRX effectuée sur les échantillons en dehors de ces trois phases minérales retrouvées a révélé deux à trois phases minérales supplémentaires principalement la gibbsite, l'anatase et le microcline. La quantification des minéraux obtenus à la DRX permet d'avoir une idée précise sur la teneur de chaque minéral. La teneur des minéraux identifiés varie d'un site à l'autre. On remarque que les échantillons de teneurs élevées en quartz et kaolinite sont moins portants que ceux qui en contiennent moins même si aucun lien n'a été retrouvé entre la teneur en silice et la portance CBR. Cependant, il a été constaté que les échantillons présentant une teneur appréciable en oxydes de fer, principalement la goethite, ont une bonne portance justifiant leur utilisation en construction routière. La bonne portance des sols est également conditionnée par la texture et le mode d'attaque des oxydes de fer. Les échantillons de Say et Guéchémé, à texture oolithique ont une bonne portance justifiant les qualités routières minimales requises. Après comparaison des portances il en ressort que les échantillons de Guéchémé sont plus portants que ceux de Say. Ces deux sites bien que caractérisés par la même texture ont une différence de portance, aussi faible soit-elle. Cette différence de portance est justifiée par les proportions de phases minérales. Pour ces deux sites, les échantillons latéritiques comportent des teneurs en kaolinite sensiblement égales mais la teneur en quartz est deux fois plus importante pour l'échantillon de Say. On note également que la teneur en oxydes de fer (goethite + hématite) est plus élevée pour les échantillons de Guéchémé.

Les échantillons de Tillabéry de texture à attaques ferrugineuses diffuses contiennent une quantité non négligeable d'oxydes de fer. Les sols prélevés sur ce site ont également une portance élevée. Bien que leur texture diffère des échantillons de Say et de Guéchémé, la valeur de portance obtenue pour ces sols est du même ordre de grandeur.

Les échantillons de Torodi, Ouallam, Fillingué et Dosso présentant une texture à attaques ferrugineuses isolées sont les moins portants. La teneur en oxydes de fer est faible dans ces sols avec un rapport S/R très élevé.

Les analyses en microscopie X, au MEB et au Raman ont favorisé la différenciation de la goethite et l'hématite dans les zones où le calcul stœchiométrique n'a permis de distinguer ces deux formes d'oxydes de fer. Le couplage des analyses au MEB et au Raman offre une assez nette distinction des deux variétés d'oxydes de fer. Parmi les textures obtenues au microscope optique, la texture oolithique comportant les cercles ovoïdes tangents contiennent une forte concentration d'oxydes de fer hydratés (goethite). Le couplage des technique MEB / Raman a également permis la caractérisation de la nature des oxydes de fer présents dans les textures à attaques diffuses et isolées. La plupart des faciès de la matrice sont cimentés par de l'hématite.

Les résultats qui découlent des essais chimiques permettent de catégoriser les différents gisements de la zone d'étude en fonction de leur degré de latéritisation en référence au rapport de la silice non lessivée et les sesquioxydes (oxydes d'aluminium et de fer). Les valeurs de ce ratio obtenues pour les sites de Guéchémé (texture à oolithes) et Tillabéry (texture à attaque diffuse) permettent de les classer parmi les gisements fortement latéritisés. Selon la valeur obtenue pour le site de Say (texture oolithique), le gisement latéritique est moyennement latéritisé. Les valeurs élevées du ratio S/R déterminées pour les autres sites permettent de les classer dans la catégorie des sols peu latéritisés.

En résumé, la diversité des techniques complémentaires utilisées permet une meilleure approche de description de la minéralogie des échantillons de sol latéritique et nous comprenons que la bonne portance d'un sol latéritique est liée à plusieurs facteurs. Les caractéristiques mécaniques et géotechniques des graveleux latéritiques sont conditionnées par la composition minéralogique et la texture, mais aussi le degré de latéritisation. La teneur et la disposition des oxydes de fer au sein de la matrice influencent fortement les paramètres géomécaniques. Il faut tout de même noter que les sols contenant de la goethite oolithique offrent une meilleure performance mécanique que les sols imprégnés diffusément ou isolement par les oxydes de fer en l'occurrence l'hématite. Aussi, il faut souligner que les graveleux latéritiques de ratio S/R faible c'est-à-dire fortement latéritisés ont de bonnes caractéristiques géotechniques et ceux pour lesquels ce ratio est élevé sont moins latéritisés et donc moins portants.

CHAPITRE V

AMELIORATION DES PROPRIETES DES LATERITES

5 CHAPITRE V : AMELIORATION DES PROPRIETES DES LATERITES

5.1 Introduction

Tous les emprunts latéritiques ne disposent pas de matériaux satisfaisants en construction routière, comme les latérites riches en argile et les graveleux latéritiques peu ferruginisés. Il devient donc avantageux de mettre en place des techniques de traitement ou de valorisation des matériaux de faibles caractéristiques physiques et mécaniques présents sur site par des techniques économiques appropriées et innovantes.

Les techniques de traitement expérimentées dans le cadre de nos travaux concernent l'amélioration des performances mécaniques des graveleux latéritiques de la zone d'étude par l'ajout de nodules latéritiques, de chaux et de liant hydraulique (ciment). La démarche consistera à sélectionner les échantillons latéritiques de faibles performances géotechniques pour y mener ces expériences. L'interprétation des résultats géotechniques (Cf. Chapitre 3) a montré que les sols présentant de faibles caractéristiques géotechniques sont issus des sites latéritiques de Ouallam, Fillingué et Dosso. Les échantillons du site de Torodi sont moyennement portants. Les sols latéritiques de bonne portance, directement utilisables en couche de chaussée sont ceux de Say, Tillabéry et Guéchémé.

Notre étude d'amélioration et de stabilisation est portée sur les échantillons de faible portance. La technique d'amélioration aux nodules latéritiques (litho-stabilisation) a été expérimentée sur les échantillons de Dosso, l'amélioration à la chaux sur les échantillons de Fillingué et la stabilisation au ciment sur les échantillons de Ouallam.

Rappelons que les techniques d'amélioration à la chaux et aux liants hydrauliques sont assez triviales et ont été largement étudiées dans de nombreux pays. L'utilisation de la chaux et du ciment constituent donc des techniques d'amélioration privilégiées dans les projets de construction routière. Cependant, ces techniques, bien qu'efficaces restent coûteuses pour les pays en voie de développement comme le Niger. C'est pourquoi, dans ce travail, nous présentons tout d'abord les résultats d'amélioration de portance des sols latéritiques par ajout de nodules latéritiques, avant d'expliquer comment ces derniers améliorent la portance du matériau.

En effet, les nodules latéritiques sont des petits blocs profondément ferruginisés et très abondants à proximité de la plupart des emprunts latéritiques que nous avons pu étudier. L'ajout de ces nodules aux graveleux latéritiques suivant une quantité optimale déterminée contribue à la rigidification des couches d'assise et permet d'améliorer substantiellement leur portance. Les résultats géotechniques, chimiques et minéralogiques avant et après mélange des produits aux graveleux latéritiques sont discutés. Les données géotechniques concernent la granulométrie, la plasticité et la portance. L'évaluation de ces paramètres avant et après amélioration permet de connaître et d'apprécier qualitativement l'impact de l'ajout sur les caractéristiques mécaniques.

Les analyses chimiques et minéralogiques permettent de comprendre l'effet du traitement sur la microstructure. Ces expériences permettent tout de même, d'identifier les éventuels produits néoformés à la suite du mélange et voir les interactions qui s'opèrent entre les produits néoformés et les éléments originels.

Il faut noter que l'ajout de la chaux ou de ciment aux graveleux latéritiques permet non seulement d'améliorer leur portance, mais modifie aussi les propriétés géotechniques telles que la granulométrie, les limites d'Atterberg, les caractéristiques de compactage. Concernant la microstructure des sols après traitement, d'importantes différences ont été observées entre les échantillons traités et non traités. Dans le cas des sols traités, le produit rajouté a permis la synthèse de nouveaux composés chimiques responsables de la cohésion et du renforcement des particules de sol. La microstructure des échantillons traités est interprétée et commentée sur la base d'approches chimiques et minéralogiques.

5.2 Généralités sur l'amélioration et la stabilisation des matériaux latéritiques naturels

L'amélioration des performances de portance des sols utilisés en couches de chaussée par ajout d'un produit a une longue histoire datant d'environ 5000 ans (Akoto & Singh, 1981). De nombreuses routes ont été stabilisées ou améliorées à la chaux dans l'ancienne Mésopotamie, en Egypte, en Grèce et à Rome (Bell, 1996). Aux Etats-Unis, la stabilisation des routes à la chaux a été utilisée pour la première fois en 1920 (Akoto & Singh, 1981). En Afrique, des études d'amélioration des couches de chaussées à la chaux et au liant hydraulique ont été réalisées en Afrique du Sud, Algérie, Angola, Gambie, Ghana, Kenya, Mozambique, Nigeria, Tanzanie, Zambie et Zimbabwe (Autret, 1983).

Au XVIIIe 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 introduit 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 définit leurs règles de fabrication. En 1824, l'Anglais Aspdin prit un brevet pour la fabrication d'un ciment de Portland, mais celui-là comportait encore beaucoup de points non élucidés. C'est seulement en 1845 que l'Anglais Johnson indiqua de façon précise les règles de fabrication de ce produit. À la fin du XIXe siècle, en France, Le Chatelier étudia la composition chimique des divers constituants des ciments ; son travail fut perfectionné et achevé par l'Américain Bogue au XXe siècle.

Quant au ciment, il 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. Le ciment est très utilisé comme additif aux argiles et latérites en vue d'élaborer des matériaux aux bonnes tenues mécaniques (Messou, 1980 ; Autret, 1983; Walker, 1995 ; P'Kla, 2002).

La littérature révèle beaucoup de travaux sur l'influence de la chaux et du ciment sur les propriétés géotechniques et mécaniques des latérites (Autret, 1983 ; Bagarre, 1990 ; Messou, 1980 ; Attoh-Okine, 1990 ; 1995 ; Osula, 1991 ; 1996,). Mais, il faut préciser que peu de travaux ont été menés dans le but de déterminer une corrélation entre les propriétés mécaniques et géotechniques des graveleux latéritiques et la microstructure des mélanges obtenus.

Actuellement la stabilisation des sols par l'ajout de chaux ou de liant hydraulique en vue d'améliorer les propriétés mécaniques des sols latéritiques, surtout en construction routière est répandue partout à travers le monde. Elle est utilisée pour améliorer la portance des couches de base et de fondation des chaussées et pour la construction de voies ferrées et pistes d'atterrissage. Cependant, malgré l'importante utilisation de la chaux ou du liant hydraulique, pour l'amélioration des couches de chaussées, très peu de travaux scientifiques ont été effectués sur les sols du Niger.

Les caractéristiques mécaniques des graveleux latéritiques peuvent également être améliorées par litho-stabilisation en y ajoutant des blocs de roche, particulièrement les nodules latéritiques issus du démantèlement de roches gréseuses. Ces blocs de nodules améliorent la portance des sols latéritiques par un apport considérable en oxydes de fer. La technique de litho-stabilisation a été exceptionnellement utilisée sur quelques petits tronçons routiers au Niger. En revanche, cette technique n'a pas fait l'objet d'une recherche scientifique approfondie surtout concernant la modification induite au sein de la microstructure après ajout de ce produit naturel.

5.3 Procédures expérimentales

Les échantillons latéritiques de la zone d'étude ont présenté des proriétés mécaniques et géotechniques très variables selon la zone de prélèvement. Par exemple, les essais géotechniques et mécaniques réalisés sur les échantillons latéritiques naturels de Ouallam, Fillingué et Dosso montrent qu'ils présentent de faibles propriétés entraînant leur exclusion en utilisation routière. Les expériences d'amélioration ont donc été réalisées sur les sols provenant de ces sites Dans ce chapitre, nous exposerons les différentes expériences menées en vue d'améliorer les performances mécaniques de ces sols par l'ajout de produit industriel ou naturel. Trois méthodes d'amélioration ou de stabilisation ont été expérimentées dans le cadre de nos travaux.

- ✓ *Sols de Dosso traités par l'ajout de 10% et 15% de nodules latéritiques* (Figure 5-1) : l'impact de l'amélioration est estimé sur les propriétés géotechniques. Il faut tout d'abord préciser que l'ajout des nodules aux sols latéritique est expérimenté pour évaluer son effet sur la portance. Pour les traitements de 10 et 15% le CBR naturel égal à 22 passe respectivement à 48 et 61 (Figure 5-1). L'ajout des nodules permet de diminuer l'indice de plasticité et la teneur en eau à l'OPM. Après l'ajout des nodules, le mélange s'est densifié favorisant l'augmentation de γ_{opm} naturel de 18,1 à respectivement 20,5 et 23,5 kN/m^3 pour l'ajout de 10 et 15% de nodules (Figure 5-1). On constate enfin une augmentation de la teneur en fines ($C_{80\mu m}$) générée par la désagrégation des nodules libérant la kaolinite se trouvant à cœur.

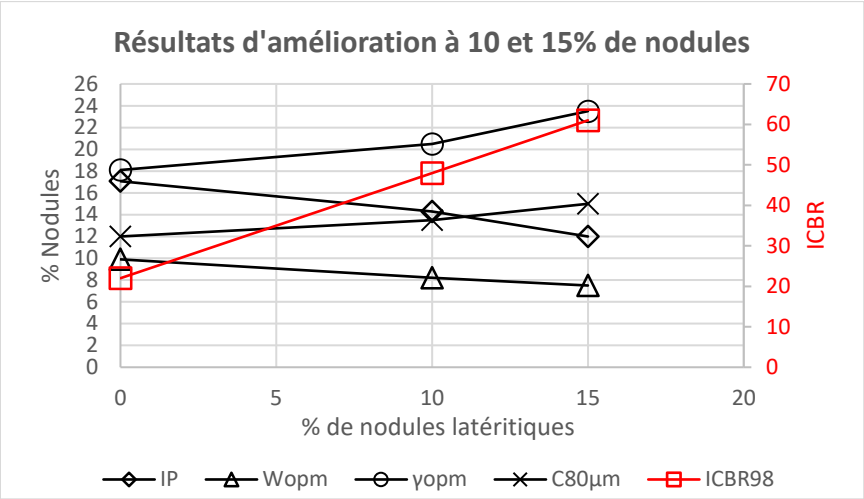


Figure 5-1: Résultats des propriétés géotechniques avant et après ajout de 10 et 15% de nodules aux échantillons latéritiques de Dosso.

- ✓ *Sols de Fillingué traités par l'ajout de 2, 4 et 6% de chaux* (Figure 5-2) : l'ajout de la chaux aux échantillons de Fillingué naturellement peu portants a occasionné une nette amélioration de leur portance. La portance est respectivement de 22, 92, 132 et 186 à 0%, 2%, 4% et 6% de chaux. Le traitement a eu un impact sur les propriétés géotechniques. Ainsi, on constante que les échantillons naturels de plasticité élevée (IP=16,94) chute graduellement en fonction de la teneur en chaux dont la valeur à 6% est égale à 6,8. La tendance est également à la baisse pour γ_{opm} qui chute de 19,8 avant traitement à 18,3 à 6% de chaux. L'augmentation $C_{80\mu m}$ de 11 avant traitement à 23,6 après l'ajout de 6% de chaux a occasionné l'augmentation de la teneur en eau W_{opm} qui varie de 9% avant l'ajout à 10,1% après l'ajout de 6% de chaux. Il faut noter que le poids volumique des graveleux latéritiques de Fillingué diminue progressivement pour des teneurs en chaux élevées. L'évolution des propriétés géotechniques à 6% de chaux est similaire celle des sols améliorés à de 2% et 4%.

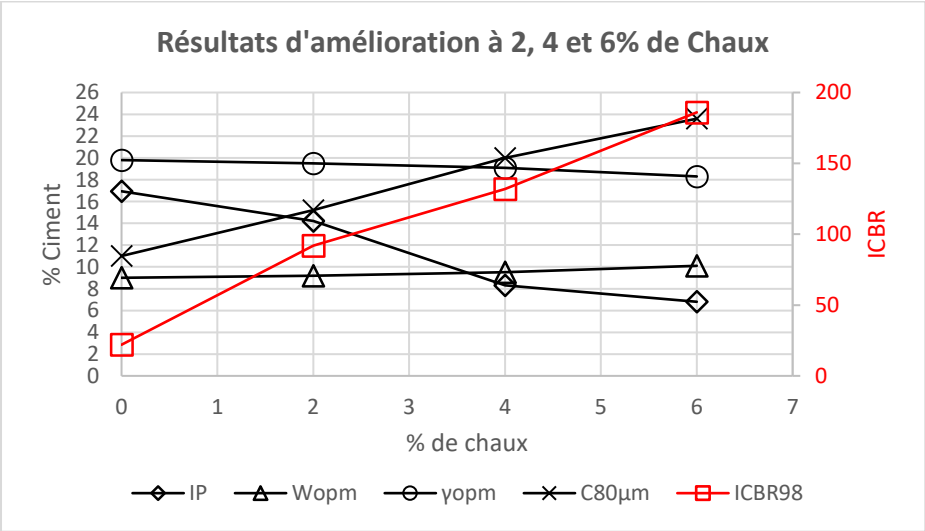


Figure 5-2: Résultats des propriétés géotechniques avant et après ajout de 2, 4 et 6% de chaux aux échantillons latéritiques de Fillingué.

- ✓ *Sols de Ouallam traités par l'ajout de 3, 5 et 7% de ciment* (Figure 5-3) : les diagrammes de la Figure 5-3 montrent que l'ajout de ciment aux matériaux latéritiques de Ouallam permet d'améliorer considérablement leurs caractéristiques mécaniques. Pour des teneurs en ciment de 3, 5 et 7% les valeurs de CBR sont respectivement 280, 393 et 497 alors que le CBR naturel est de 32. L'évolution des propriétés géotechniques est assez similaire aux sols traités à la chaux. L'indice de plasticité diminue progressivement en fonction de la quantité de ciment rajoutée. Cette valeur passe de 16,25 avant traitement à 10,13 après l'ajout de 7% de ciment. Contrairement à l'IP, la teneur en fines augmente pour des valeurs élevées de ciment, passant de 13 avant traitement à 23,7 après l'ajout de 7%. L'augmentation des fines ($C_{80\mu m}$) provoque également celle de la teneur en eau à l'OPM qui évolue de 10,6 pour les matériaux naturels à 11,8 pour les matériaux traités à 7% de ciment.

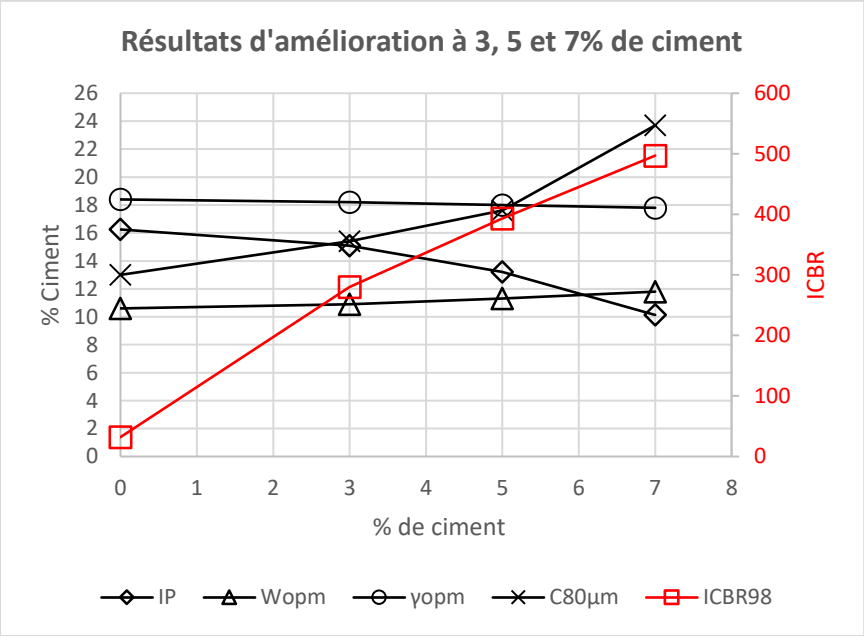


Figure 5-3: Résultats des propriétés géotechniques avant et après ajout de 3, 5 et 7% de ciment aux échantillons latéritiques de Ouallam.

Après traitement des échantillons, les analyses minéralogiques ont été effectuées aussi bien sur les échantillons latéritiques naturels que sur ceux ayant subi les différents traitements. Dans l'exposé qui va suivre seuls les résultats géotechniques, mécaniques et microstructuraux des échantillons de Dosso traités à 15% de nodules, ceux de Fillingué traités à 4% de chaux et ceux de Ouallam traités à 7% de ciment seront présentés. L'interprétation est présentée à titre illustratif pour faire ressortir les modifications induites par ces traitements aussi bien sur les paramètres géotechniques que les sur les caractéristiques minéralogiques. Aussi, le choix des échantillons dont les résultats seront discutés dans la suite de l'exposé est purement basé sur la meilleure qualité d'interprétation qu'offrent ces expériences et cela dans un souci de faire une analyse synthétique et concise.

5.3.1 Technique de traitement aux nodules latéritiques

On rappelle que les échantillons latéritiques du site de Dosso ont été traités par l'ajout de nodules latéritiques. Ces nodules sont des blocs de grès très riches en oxydes de fer et dans de proportions moindres, de la kaolinite. Les échantillons, après prélèvement sont d'abord séchés à l'air ambiant et sont par la suite mélangés avec 15% de tamisât à 5 mm de nodules concassés en masse totale de l'échantillon à compacter. Les essais Proctor modifié et l'essai de poinçonnement réalisés conformément aux spécifications usuelles permettent ensuite d'évaluer la portance du mélange après compactage. Cette méthode d'amélioration entre dans les techniques de stabilisation communément appelées « litho-stabilisation ». Les nodules latéritiques (Figure 5-4-A) sont les produits d'altération de roches gréseuses, métamorphiques et souvent granitiques, de tailles très variables, fortement érodés et oxydés. Ils se présentent sous forme de cailloux contenant de fortes teneurs en oxydes de fer et/ou kaolinite. On peut les retrouver en pente de plateaux latéritiques sous forme d'éboulis (Figure 5-4-B), au sein d'un profil latéritique sous forme de « *stone-line* » en gros blocs (Figure 5-4-C) ou au sommet d'une colline latéritique (Figure 5-4-D).

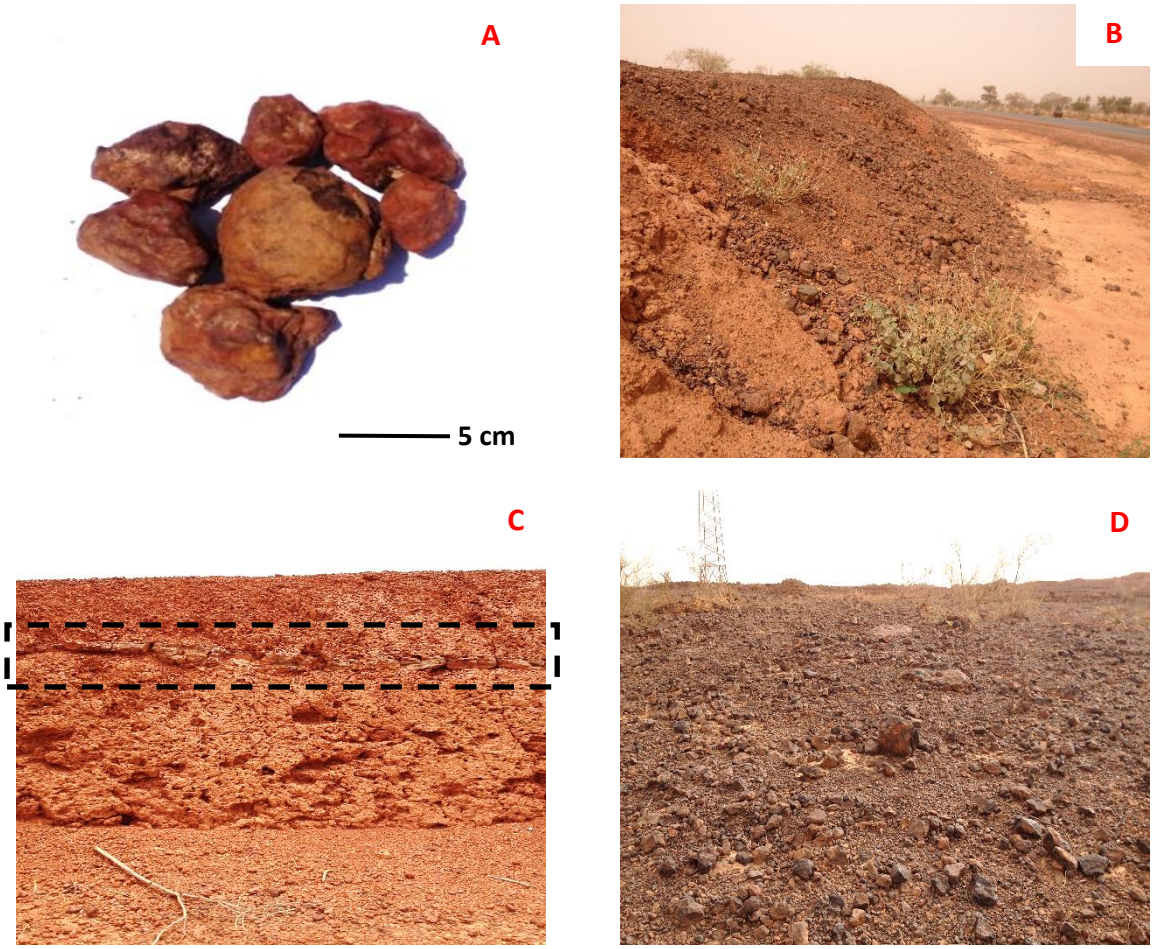


Figure 5-4: A) Nodules latéritiques de la region de Ouallam; **B)** Nodules latéritiques en zone de pente (region de Say); **C)** Nodules latéritiques en *stone-line* au sein d'un profil latéritique (Fillingué) **D)** Nodules latéritiques au sommet d'un plateau latéritique (Région de Tillabéry).

Il s'agit donc de produits naturels qu'on retrouve en très grande quantité dans les gisements latéritiques. Ces nodules proviennent en grande quantité du démantèlement de dalles gréseuses très ferritisées (Figure 5-5). La dalle gréseuse constitue dans certaines zones une sorte d'armature qui recouvre partiellement les cuirasses latéritiques. Ces cuirasses apparaissent en surface généralement après l'érosion partielle ou complète de celle-ci principalement par le ruissellement souterrain des eaux de pluie après infiltration à travers les fissures de la roche. Lorsque les agents d'érosion (ruissellement, vent, température) sont de forte intensité, la dynamique d'altération de la dalle est plus prononcée, celle-ci se morcèle en produisant des nodules latéritiques de tailles variant en fonction de l'intensité des agents d'érosion.

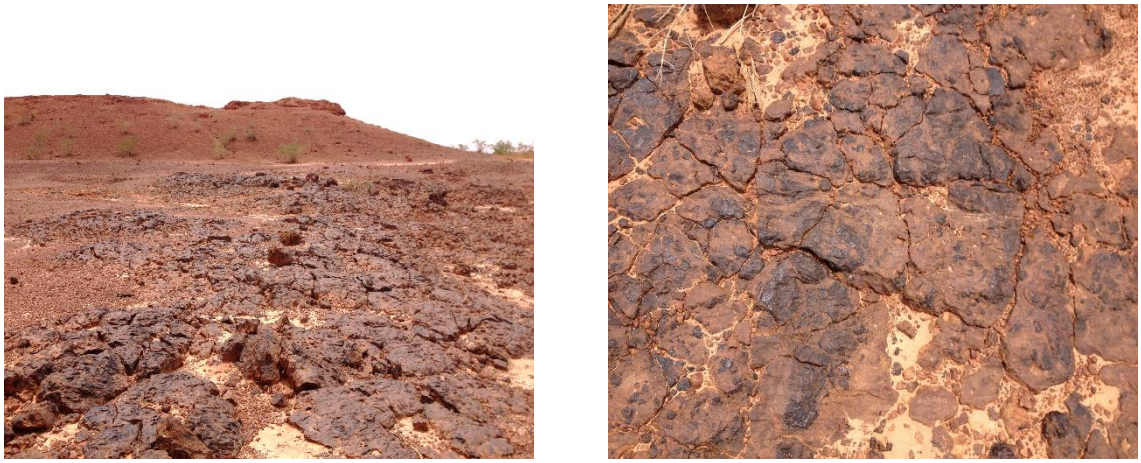


Figure 5-5: Dalle gréseuse partiellement démantelée (region de Ouallam).

Les observations au MEB et la microanalyse X à la sonde EDS (Figure 5-6) d'un nodule présentant une cassure fraîche ont permis d'estimer leur composition minéralogique.

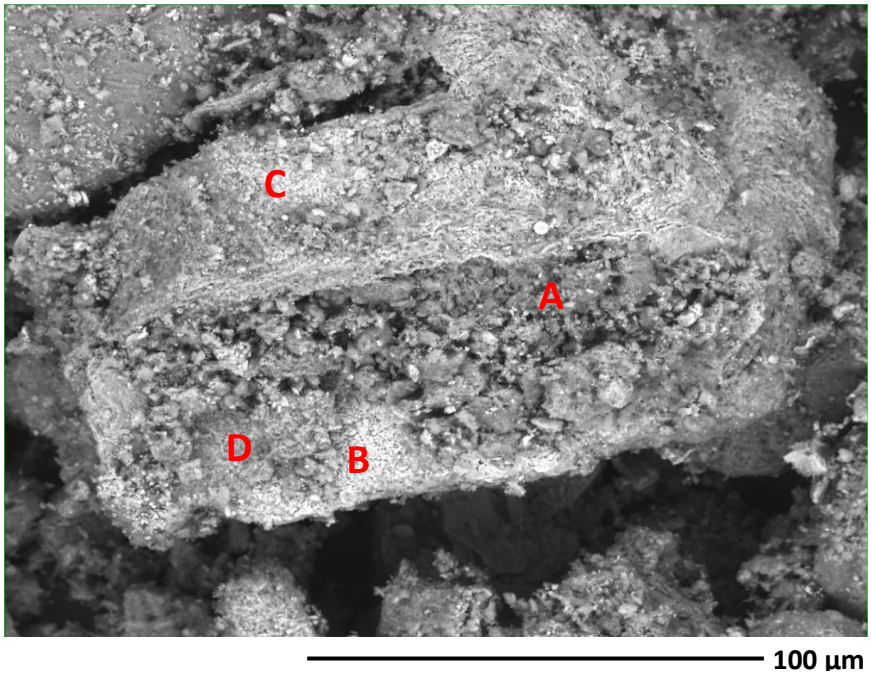


Figure 5-6: Cliché MEB d'une fracture fraîche d'un grain de nodule.

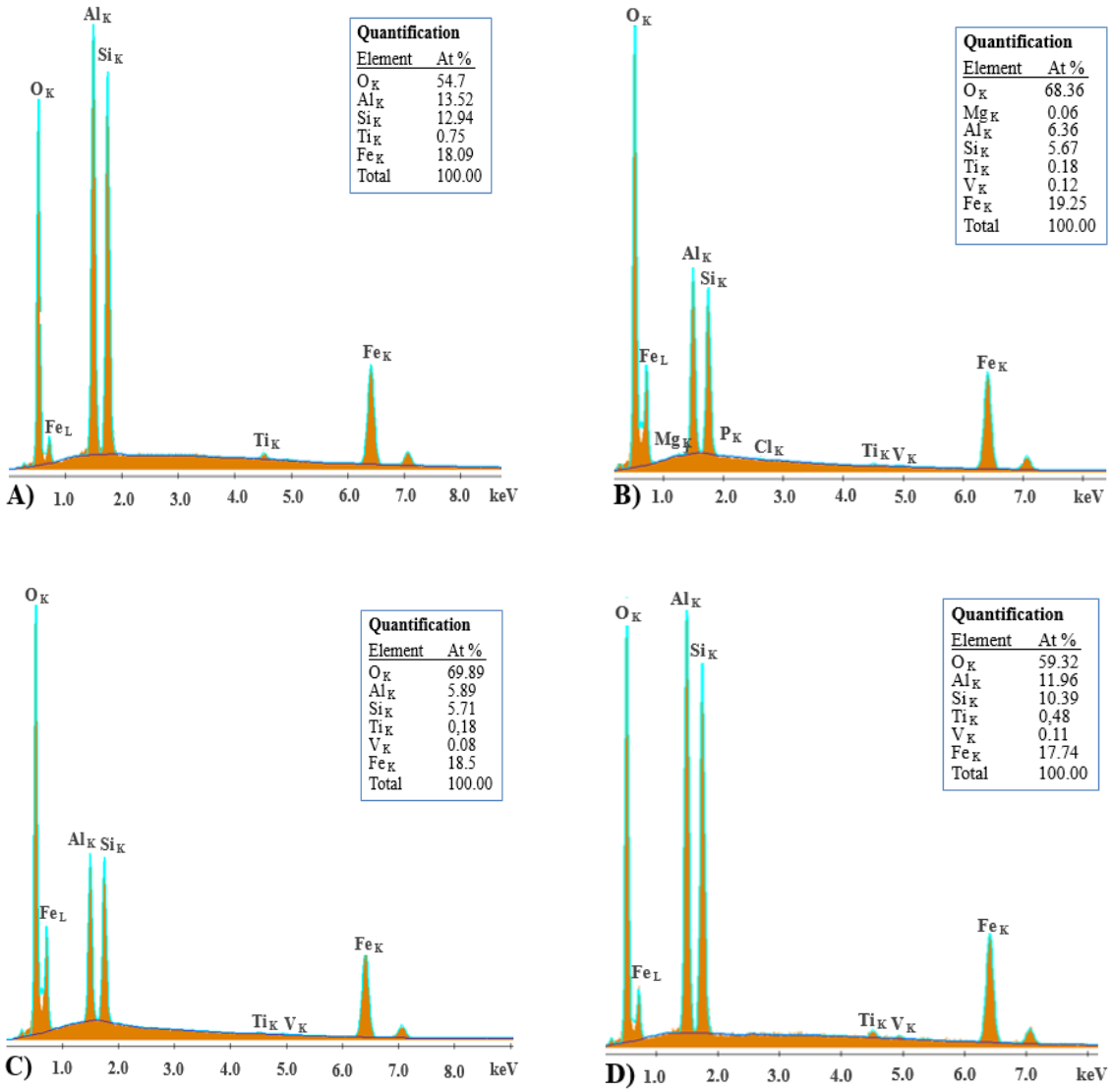


Figure 5-7: Spectres EDS recueillis sur les zones A, B, C et D (sur le cliché de la Figure 5-6).

La quantification des phases minérales à l'aide des spectres (Figure 5-7) collectés sur les zones A, B, C et D indiquées sur le cliché MEB (à cœur et sur la surface du nodule) est fournie dans le Tableau 5-1.

Tableau 5-1: Quantités des phases minérales retrouvées au sein du nodule latéritique.

Spectre A	Kaolinite dominante - Oxydes de Fe de nature non identifiée (hématite *vs.* goethite ?)
Spectre B	58 % de goethite et 39 % de kaolinite
Spectre B	56 % de goethite et 38 % de kaolinite
Spectre D	Kaolinite dominante - Oxydes de Fe de nature non identifiée (hématite *vs.* goethite ?)

Selon les quantités des différents minéraux, on constate une similitude notable entre les spectres deux à deux. Ainsi les spectres A et D sont largement dominés par la kaolinite, la nature des oxydes de fer présents n'étant pas identifiable (hématite ou goethite) lié à une teneur apparente en O sous-estimée dans la quantification ZAF. Les spectres B et C sont dominés par la goethite (cf. Tableau 5-1).

En résumé, les nodules latéritiques comportent donc de très grandes quantités d'oxydes de fer pisolithiques ou oolithiques en surface et un mélange kaolinite/oxydes de fer à cœur avec des zones à dominance kaolinique ou à dominance d'oxydes de fer.

5.3.2 Amélioration à la chaux

Les matériaux latéritiques prélevés à Fillingué également de faible portance ont été améliorés par l'ajout de 4% de chaux vive. Après compactage des échantillons améliorés à la aux valeurs optimales Proctor, les éprouvettes destinées à la détermination de l'indice CBR sont d'abord conservées en cure de 3 jours avant l'imbibition de 96h dans l'eau. Après imbibition, les éprouvettes sont poinçonnées pour évaluer leur capacité portante.

La chaux vive utilisée pour l'amélioration de ces sols est une chaux commerciale fabriquée à Saint-Astier (France) selon la norme EN 459-1. Ce produit est composé majoritairement de chaux vive CaO, de portlandite $Ca(OH)_2$ et de carbonate de magnésium hydraté. L'analyse chimique de la chaux utilisée montre qu'elle est constituée de 64,5% de CaO et de 35,5% de $Ca(OH)_2$ ainsi que de résidus insolubles. Les éprouvettes de sols après compactage sont hermétiquement fermées pendant la cure afin d'éviter toute contamination par l'humidité de l'air. Elles sont ensuite conservées dans une salle à température maintenue constante.

5.3.3 Amélioration au ciment

Les échantillons de Ouallam, ont été stabilisés par l'ajout de 7% de ciment en masse de l'échantillon à traiter. La masse correspondant à ce pourcentage est ôtée du matériau naturel à traiter. Les échantillons de Ouallam sont également séchés à l'air libre avant la réalisation de l'essai Proctor et CBR. Après compactage des sols aux caractéristiques optimales, les éprouvettes sont préalablement passées en cure de 7 jours et imbibées dans l'eau pendant 4 jours avant le poinçonnement.

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 réactions et de processus d'hydratation et qui après durcissement conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau (Vialisse-Terrisse, 2000 ; Westshondo, 2012). Dans le cadre de nos travaux, nous avons utilisé le ciment Portland référencé CPA 45 en provenance de Togo, de classe vraie 42,5 MPa. La composition de son clinker est : 67% de CaO, 22% de SiO_2, 5% de Al_2O_3, 3% de Fe_2O_3 et 3% d'autres composés. Il est constitué de 4 phases majoritaires qui sont l'alite ($3Ca0.SiO_2$ ou C_3S), la bélite ($2Ca0.SiO_2$ ou C_2S), la célite ($3Ca0.Al_2O_3$ ou C_3A) et du ferroaluminate de calcium ($4Ca0.Al_2O_3.Fe_2O_3$ ou C_4AF).

5.3.4 Méthodologie expérimentale de caractérisation

Une analyse granulométrique est réalisée sur les matériaux avant et après mélange afin d'observer et analyser les éventuelles modifications induites par le traitement sur la taille des particules constituant ce sol. Les limites d'Atterberg quant à elles permettent de déterminer la modification de la consistance et les critères de plasticité tandis que les essais Proctor et CBR permettent d'évaluer l'amélioration apportée par le traitement ainsi que leur aptitude en construction routière après traitement.

Les échantillons prélevés dans chaque mélange après démoulage sont broyés et tamisés au tamis de 80µm. L'analyse par diffractométrie des rayons X réalisée sur le sol a permis de dresser un bilan des différentes phases minérales existantes ainsi que les nouveaux composés formés à la fin de la réaction entre les composés chimiques du produit et ceux contenus dans le matériau initial à traiter. Chaque phase minérale retrouvée est quantifiée toujours par la méthode de quantification Riedvelt.

Enfin, les observations au MEB et la microanalyse X à l'EDS ont favorisé une description plus détaillée de la matrice après mélange ainsi que la combinaison et l'arrangement des phases existantes et nouvellement créées après le mélange.

5.4 Résultats des techniques d'amélioration des graveleux latéritiques

5.4.1 Technique d'amélioration par ajout de nodules latéritiques

L'étude concerne l'évaluation géotechnique et mécanique des graveleux latéritiques du site de Dosso améliorés par l'ajout de 15% de nodules concassés.

L'amélioration des paramètres géotechniques est discutée à la lumière d'observations chimiques et minéralogiques à l'aide d'un Microscope Électronique à Balayage Environnemental (MEB-E) couplé à un spectromètre à rayons X à dispersion d'énergie.

Le bilan des différentes phases minérales contenues dans l'échantillon est obtenu grâce à l'analyse DRX. Les analyses chimiques par dosage des éléments majeurs et mineurs permettent d'estimer approximativement le degré de latéritisation des sols avant et après l'ajout des nodules latéritiques.

5.4.1.1 Caractérisation géotechnique des sols de Dosso avant et après ajout de 15% de nodules

Dans le cadre de cette étude, 5 échantillons de sol latéritique ont été prélevés dans la zone d'étude suivant un maillage défini et les prélèvements répartis de manière à couvrir la zone d'étude. Les résultats des essais géotechniques réalisés en laboratoire sur les cinq échantillons avant l'ajout des nodules sont fournis dans le Tableau 5-2.

Tableau 5-2: Résultats des essais géotechniques des sols latéritiques naturels de Dosso.

		Granulométrie				Limites d'Atterberg				Essais Proctor		Essais CBR	
N° Sond.	Wnat (%)	D_{max} (mm)	C_{2mm} (%)	$C_{0,5mm}$ (%)	$C_{80µm}$ (%)	LL	LP	IP	IC	γ_{opm} (kN/m³)	W_{opm} (%)	I_{CBR} 98%	I_{CBR} 95%
S1	4,62	43,1	27,4	37,2	15,25	21,36	12,03	9,3	1,8	17,5	15,1	29	21
S2	4,76	66,8	48,83	54,8	13,49	26,2	11,28	14,92	1,44	18,2	14,6	23	18
S3	**4,6**	**65,2**	**25,53**	**31,4**	**11,79**	**32,6**	**15,53**	**17,07**	**1,99**	**18,1**	**14,75**	**22**	**14**
S4	4,25	56	10,04	17,4	13,36	24,76	14,83	9,93	2,01	17,8	14,65	26	16
S5	5,26	67	51,04	53,5	11,12	31,74	11,91	16,21	1,63	18,0	14,8	22	15
Max	5,26	67	51,04	54,8	15,25	32,6	15,53	17,07	2,01	18,2	15,1	29	21
Min	4,25	43,1	10,04	17,4	11,12	21,36	11,28	9,3	1,44	17,5	14,6	22	14
Moy	4,698	59,62	32,568	38,86	13,002	27,33	13,12	13,49	1,774	17,9	14,78	24,4	16,8
E.T.	0,25	8,06	13,89	12,23	1,24	3,87	1,65	3,10	0,19	0,02	0,14	2,48	2,16

Globalement, l'échantillonnage des sols latéritiques est fait de telle sorte que le produit latéritique obtenu soit un mélange dans lequel les blocs dépassant un D_{max} (diamètre maximum) en référence des critères standards sont écartés (CEBTP, 1984 ; Mahalinga-Iyer, 1997). À partir de là, une analyse granulométrique par voie sèche des échantillons de latérite non traités a permis de tracer leurs courbes granulométriques qui s'inscrivent dans un fuseau étroit pour ce qui est des éléments grossiers et évasé pours les éléments fins (Figure 5-8). Toutes les courbes suivent la même tendance avec un palier qui marque une discontinuité granulométrique le plus souvent entre 0,8 et 3 mm.

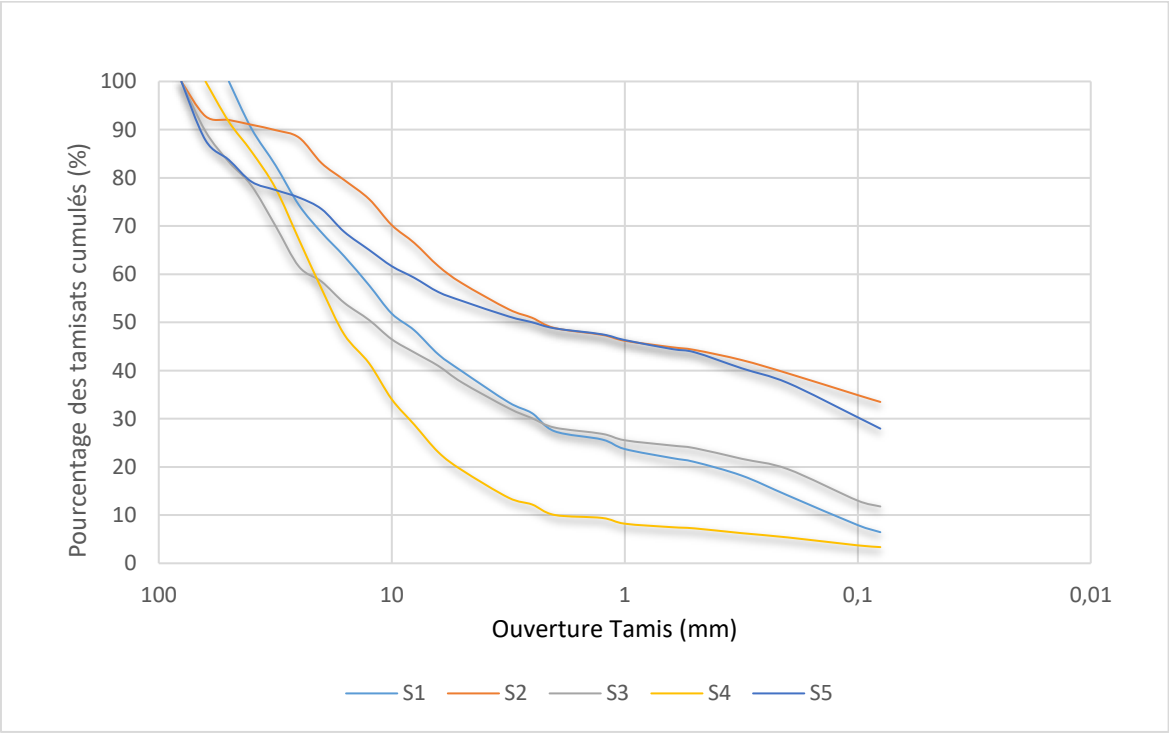


Figure 5-8: Courbes granulométriques des 5 échantillons latéritiques non traités de la région de Dosso.

Les limites d'Atterberg (Tableau 5-2) indiquent que l'indice de plasticité varie approximativement dans l'intervalle proche d'un sol latéritique. Les valeurs de l'IP sont comprises entre 9,30 et 17,07. Ces valeurs correspondent douteusement aux sols latéritiques définis par le CEBTP tout comme celles des limites de liquidité et de plasticité, respectivement entre 21,36 et 31,74 ; et entre 11,28 et 15,53.

Les essais Proctor indiquent que les valeurs optimales (γ_{dopm} et W_{opm}) ainsi que la portance des échantillons du site de Dosso sont caractéristiques d'un échantillon de faible performance mécanique. Les valeurs de la teneur en eau optimale (W_{opm}) varient dans un intervalle de 14,60 et 15,10 % ; ce qui montre leur forte capacité d'absorption d'eau car les valeurs usuelles varient de 5 à 12%. Les poids volumiques secs optimaux (γ_{dopm}) sont compris entre 17,5 et 18,2 kN/m^3 (Tableau 5-2).

En effet, de l'expérience acquise sur les latérites en général (Lyon Associates, 1971 ; Bagarre, 1990), il apparaît que les sols latéritiques de poids volumique sec optimal inférieur à 20 kN/m^3, ne sont pas recommandés en construction routière. Toutefois, on peut constater que les sols latéritiques non traités ont un poids volumique faible, de même que les indices CBR à 98% et 95% de l'OPM.

L'ensemble des résultats visibles dans le Tableau 5-2 pour les cinq sols échantillonnés montre que les caractéristiques géotechniques de l'échantillon de sol prélevé dans le sondage S3 sont les plus faibles avec un I_{CBR} à 98% de l'OPM = 22 et I_{CBR} à 95% de l'OPM = 14. Ces valeurs ont été déterminées après 96 heures d'imbibition d'éprouvettes compactées à l'OPM à l'aide des références Proctor modifié γ_{dopm} = 18,1 t/m^3 et W_{opm} = 14,75%. La valeur du poids volumique sec à l'OPM est relativement faible pour son utilisation en construction routière, ainsi que les valeurs de l'indice ICBR.

Cet échantillon présente une plasticité plus élevée que les autres échantillons (IP=17). En se référant aux critères usuels recommandés par le CEBTP, on constate que la plupart des paramètres mesurés sont bien en dessous des valeurs exigées pour l'utilisation en routier. Cela veut dire que l'utilisation de l'échantillon de sol latéritique non traité (S3, Tableau 5-2) n'est pas recommandée même en couche de fondation.

5.4.1.2 Résultats des essais géotechniques de l'échantillon S3 amélioré aux nodules

En référence aux fuseaux granulométriques définis par le CEBTP, une comparaison de fuseaux a d'abord été établie avant et après traitement pour les couches de fondation et de base (Figure 5-9). Les enveloppes granulométriques des matériaux naturels s'inscrivent mal dans le fuseau type recommandé en couche de base et en couche de fondation.

En revanche, on peut noter que le fuseau granulométrique de l'échantillon après traitement à 15% de nodules latéritiques est utilisable en couche de fondation, car il s'inscrit presque entièrement dans celui défini par le CEBTP, mais cela n'est pas le cas pour la couche de base.

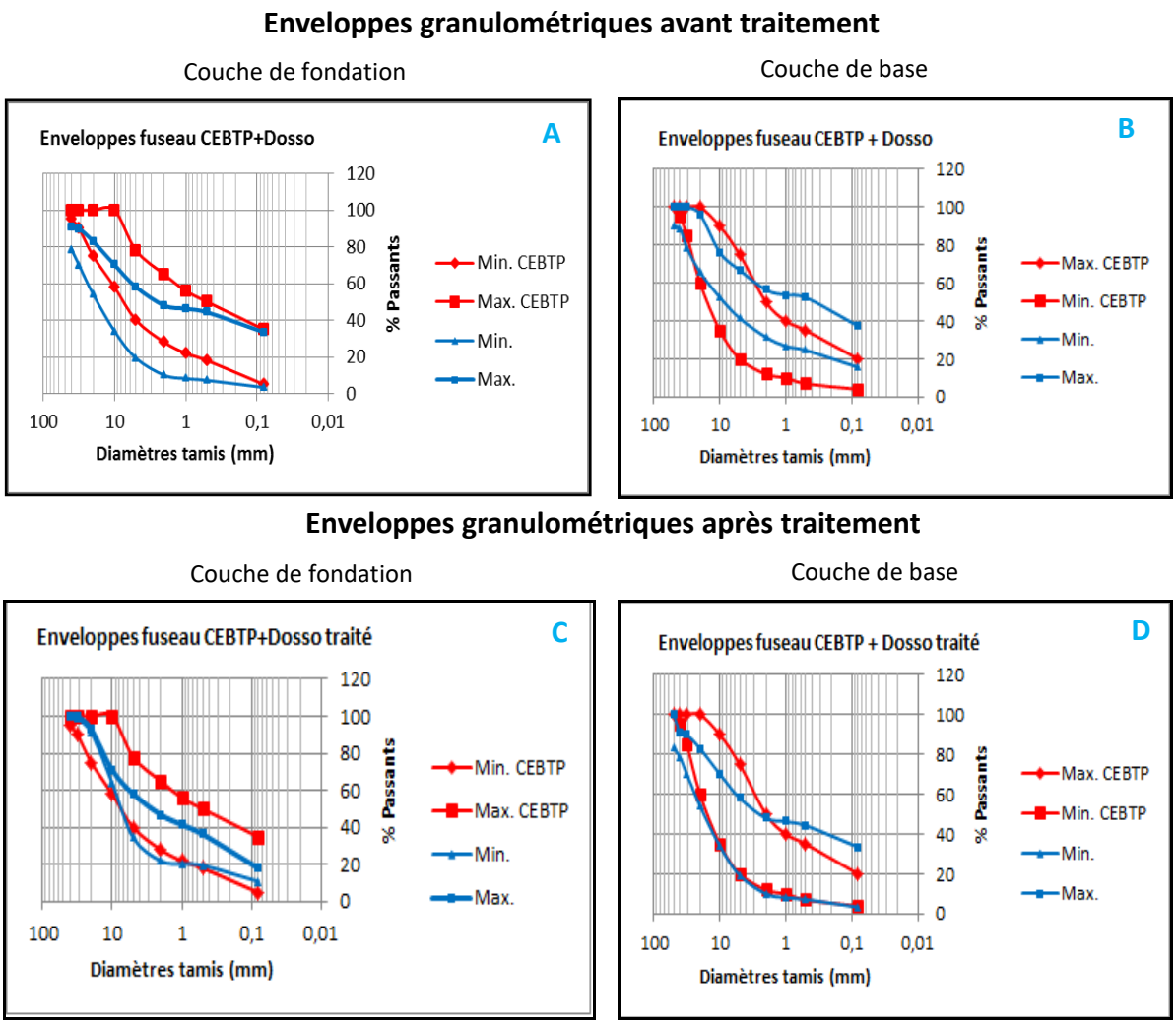


Figure 5-9: Courbes granulométriques des échantillons latéritiques de la région de Dosso avant et après traitement : comparaison de fuseaux granulométriques.

Le sol latéritique S3 présentant les plus faibles caractéristiques géotechniques a été traité à 15% de nodules latéritiques concassés de classe granulaire 0/5 mm. Dans le but d'établir une comparaison entre l'échantillon non traité et celui traité, les mêmes essais géotechniques ont été réalisés sur ce mélange à nodules. Les résultats des essais géotechniques de l'échantillon S3 amélioré sont fournis dans le Tableau 5-3. La comparaison entre l'échantillon traité et non traité (Tableau 5-3) indique que le sol latéritique S3 traité aux nodules présente une nette amélioration. Pour cet échantillon, le gonflement linéaire de plus de 1% (Tableau 5-2) après 96h d'imbibition, ainsi que le coefficient élevé de Skempton de (1,3), permettent de déduire la nature argileuse de sa fraction fine, il s'agit d'une illite (Mahalinga-Iyer, 1991).

La présence de l'illite a également été identifiée aux analyses MEB sur les échantillons naturels de Dosso. Pour cette raison, la fraction argileuse de l'échantillon non traité (S3, Tableau 5-2) justifie bien la faible portance de ces sols, puisque cette argile est légèrement plus plastique que la kaolinite qu'on retrouve habituellement dans ces sols.

Après l'ajout des nodules, le poids volumique optimal passe de 18,1 à 20,5 kN/m^3, l'indice de plasticité IP chute de 17,07 à 12, et les indices CBR à 95 et 98% de l'OPM passent respectivement de 14 à 43 et de 22 à 61 (Tableau 5-3). La portance obtenue sur le mélange compacté permet de valider son aptitude en couche de fondation (valeur de 43, largement supérieure au critère standard de 30), mais pas en couche de base (valeur de 61 au lieu de 80 minimum).

Tableau 5-3: Comparaison entre les critères standards du CEBTP (couche de base et couche de fondation) et les valeurs mesurées sur l'échantillon S3 non traité (colonne « S3 non traité ») et traité à 15% de nodules (colonne « S3 traité »).

	Valeurs recommandées par le CEBTP		Valeurs mesurées sur l'échantillon S3	
	Couche de Base	Couche de fondation	S3 non traité	S3 Traité
Caractéristiques de granulométriques - % de Passants aux tamis de:				
40 mm	**85 - 100**	**80 - 100**	78	81
20 mm	70 - 100	65 - 100	58	75
10 mm	50 - 95	50 - 100	46	63
5 mm	40 - 90	35 - 100	38	57
2 mm	30 - 80	25 - 80	28	53
0,5mm	15 - 45	15 - 55	24	35
0,080 mm	5 - 20	5 - 35	12	15
Caractéristiques de plasticité				
Limite de liquidité (%)	max 35	max 50	32,6	27
Indice de plasticité	max 25	max 15	17,07	12
Proctor & CBR après 4 jours d'immersion				
γdopm (kN/m^3)	min 2,00	min 1,90	18,1	23,5
I_{CBR} à 98% opm	min 80	-	22	61
I_{CBR} à 95% opm	-	min 30	14	43
Gonflement linéaire (%)	0,3	1	1,14	0,7

5.4.1.3 Validation des critères d'amélioration à partir des essais mécaniques

Les essais mécaniques à l'œdomètre et à la boîte de cisaillement réalisés sur l'échantillon S3 permettent d'évaluer la compressibilité et les caractéristiques mécaniques telles que la cohésion c' et l'angle de frottement interne φ' à long terme.

Précédemment, nous avons montré que le traitement des sols latéritiques avec 15% de nodules latéritiques permet de les rendre utilisables en construction routière, potentiellement en couche de fondation (Tableau 5-3). De même, par ce traitement, on constate une amélioration de la portance avec l'I_{CBR} à 95% de l'OPM qui augmente de 14 à 43 et de 22 à 61 pour l'I_{CBR} à 98% de l'OPM.

La comparaison du comportement mécanique des échantillons avant et après ajout des nodules met en évidence l'amélioration apportée par les nodules après compactage du mélange. Les résultats des essais de cisaillement avant et après l'ajout des nodules sont regroupés dans le Tableau 5-4 et ceux des essais de compressibilité dans le Tableau 5-5.

Les essais de cisaillement réalisés sur l'échantillon S3 avant traitement ont permis de déterminer les caractéristiques mécaniques proches d'un matériau argilo-sableux à dominance sableuse (Fall, 1995), (c'= 4 kPa et φ'= 20°), nettement améliorés après traitement (c'= 22,5 kPa et φ'= 37°) (Tableau 5-4 & Figure 5-10).

Tableau 5-4: Résultats des essais à la boîte de cisaillement.

Ech.	Tests	σ' (kPa)	τ' (kPa)	C' (kPa)	φ' (°)
S3 non traité	Test 1	28	13	4	20
	Test 2	56	25		
	Test 3	111	45		
	Test 4	222	85		
S3+10% nodules	Test 1	28	45	22,5	36,8
	Test 2	56	65		
	Test 3	111	102		
	Test 4	222	190		

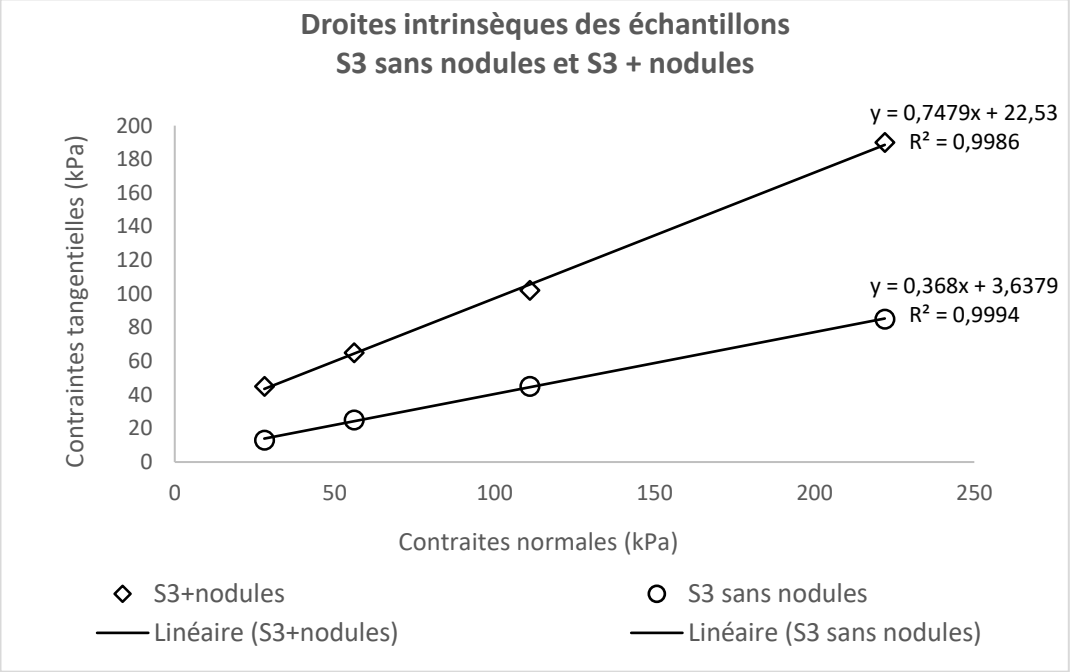


Figure 5-10: Droites intrinsèques de l'échantillon S3 avant et après ajout de nodules.

Les résultats des essais mécaniques sur les latérites traitées sont différents. On constate une amélioration de la cohésion c'= 22,5 kPa et l'angle de frottement interne qui passe à 30° équivalant à un matériau sableux. L'augmentation de l'angle de frottement interne se justifie par l'angulosité des grains issus des nodules après concassage et la cohésion par l'apport de la kaolinite se trouvant à cœur des nodules, qui joue le rôle de ciment (McFarlane, 1991).

Les courbes de déformation volumique de l'échantillon S3 pendant l'essai de cisaillement, correspondant au quatrième pallier de chargement (σ=222 kPa), ont été tracées (Figure 5-11). Elles montrent des différences majeures entre le sol latéritique traité et non traité.

Dans le cas des latérites non traitées le sol se contracte (comportement lâche) du début jusqu'à la fin de l'essai de cisaillement (réarrangement des grains non serrés), alors que dans le cas des échantillons traités le sol se contracte immédiatement en début de cisaillement (jusqu'à un déplacement horizontal de 2 mm) et se dilate ensuite jusqu'à la fin de l'essai de cisaillement (comportement dense avec augmentation de volume). Ce comportement dilatant (sol dense) du sol latéritique traité est dû au fait que les grains anguleux de nodules sont pris dans une matrice argileuse qui comblent les vides, il n'y a plus de réarrangement possible des grains. À partir de ce moment, le sol adopte un comportement dilatant (Baldovin, 1969 ; Mahalinga-Iyer & Williams, 1994).

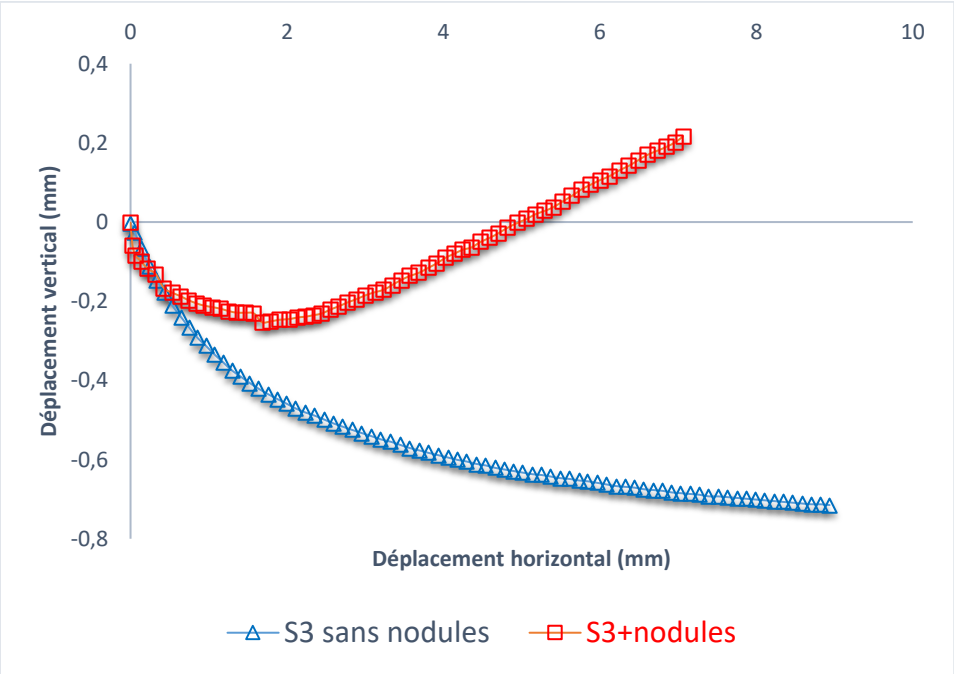


Figure 5-11: Courbes de déformation volumique de l'échantillon S3 avant et après traitement aux nodules.

Au final, l'apport en argile (kaolinite) (MacFarlane, 1991) par les nodules et en grains aux angles vifs par broyage, donne au sol latéritique traité une cohésion améliorée avec un comportement de sol dense et dilatant. L'angularité des grains et par conséquent leur imbrication réduit les espaces vides au sein de la matrice initiale et favorise un comportement dense. Ces modifications apportées par le traitement aux nodules confèrent au sol traité une dilatance prédominante (Mahalinga-Iyer, 1994 ; Elarabi, et al., 2013).

Par ailleurs, l'essai œdométrique permet de souligner les modifications notables entre le sol latéritique S3 traité et non traité. Après comparaison des deux échantillons à l'essai œdométrique, on note une diminution de l'indice des vides e_0 après traitement et une augmentation du coefficient de perméabilité de $4{,}38.10^{-9}$ m/s à $8{,}11.10^{-9}$ m/s (Tableau 5-5).

Ces valeurs confirment que le sol traité est plus dense, moins compressible et dilatant, justifiant ainsi la diminution du coefficient de compressibilité Cc qui passe de 0,208 à 0,128 (Tableau 5-5). Le module œdométrique E'œd plus élevé pour les latérites non traitées est faible pour celles traitées aux nodules. Ce fait s'explique par l'apport de nodules brisés qui augmentent la rigidité du sol compte tenu de la quantité de nodules broyés riches en fer (hématite et goethite). L'ajout de nodule densifie et rigidifie le sol traité. Cette se confirme également l'accroissement des poids volumiques sec et humide après traitement (Tableau 5-5).

Tableau 5-5: Résultats des essais de compressibilité à l'œdomètre.

	σ' (kPa)	Cc	Cs	E'moy (MPa)	K_0 moy x10^{-7} (m/s)	e_0	γh (kN/m³)	γd (KN/m³)
S3 non traité	45	0,208	0,066	220	4,38	0,78	17,8	15,1
S3 + 15% nodules	40	0,128	0,005	101	8,11	0,67	18,8	16,1

5.4.2 Composition chimique et minéralogique des nodules latéritiques et de l'échantillon S3 avant et après ajout de nodules

5.4.2.1 Composition chimique

Les valeurs des éléments majeurs tels que la silice et les sesquioxydes sont représentées sur la Figure 5-12.

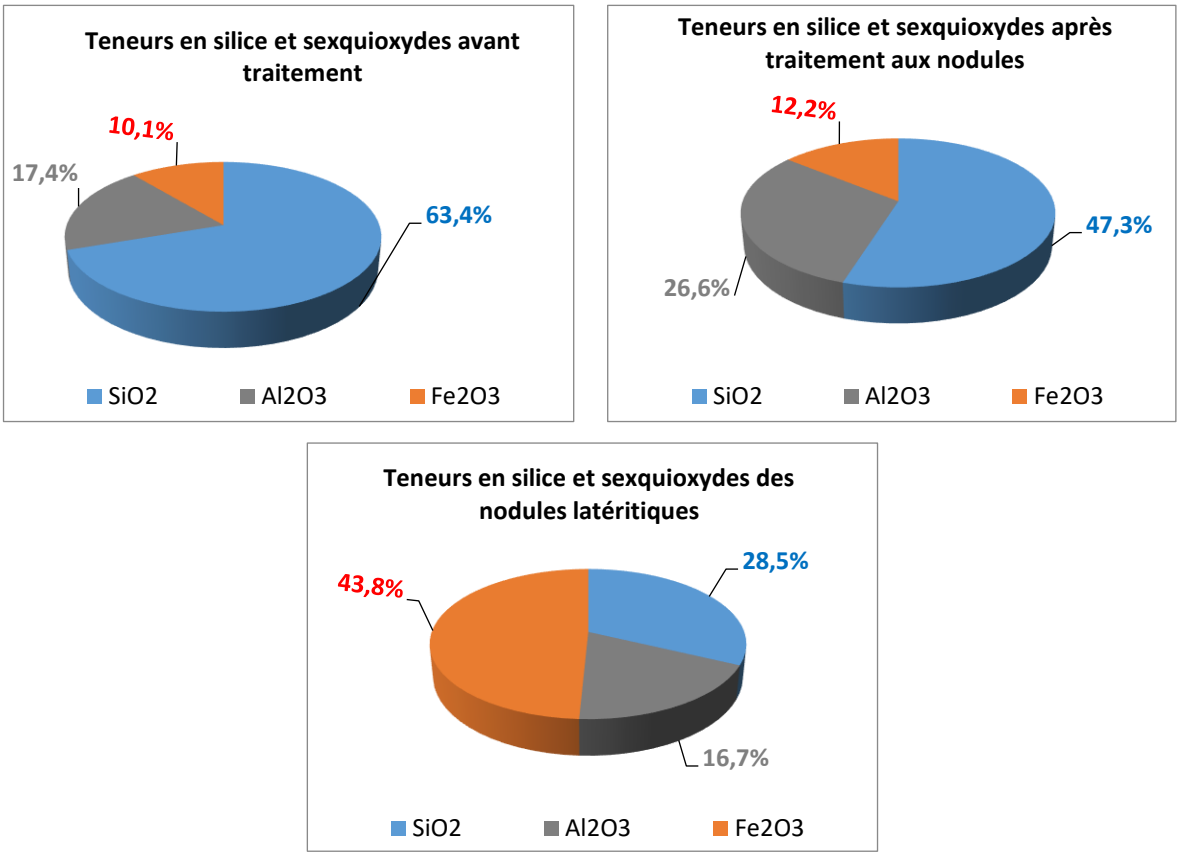


Figure 5-12: Teneurs des éléments chimiques majeurs : silices et sesquioxydes permettant d'évaluer le ratio S/R.

Les rapports S/R des échantillons (Figure 5-13) ont été évalués grâce aux valeurs de sesquioxydes et de silice. Ce rapport a été estimé aussi bien sur les latérites naturelles que celles traitées à 15% de nodules ainsi que sur les nodules latéritiques.

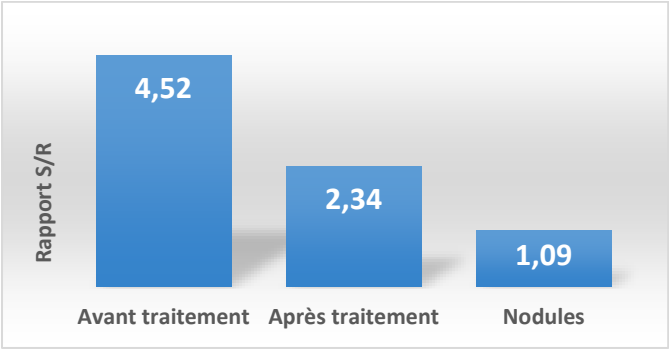


Figure 5-13: Résultats du ratio S/R des latérites non traitées, traitées et des nodules latéritiques.

Les latérites avant traitement ont révélé un rapport S/R élevé (Figure 5-13). Elles sont donc très riches en silice et pauvres en sesquioxydes (Fe_2O_3 et Al_2O_3); on peut considérer que le gisement est en cours de latéritisation. Après ajout de 15% de nodules latéritiques, on enregistre une diminution significative du rapport S/R. Ce rapport S/R égal à 4,52 avant traitement chute à 2,34 après l'ajout des nodules. Rappelons que plus ce rapport est faible, plus le site est latéritisé. La diminution du rapport S/R est liée à l'augmentation de la teneur en oxydes de fer, occasionnée par l'ajout de nodules latéritiques au matériau initial.

5.4.2.2 Composition minéralogique

5.4.2.2.1 Minéralogie de l'échantillon S3 avant ajout de nodules

Les minéraux contenus au sein des latérites de Dosso avant et après traitement aux nodules ont été identifiés par microanalyse X à l'aide d'un spectromètre à rayons X à dispersion d'énergie.

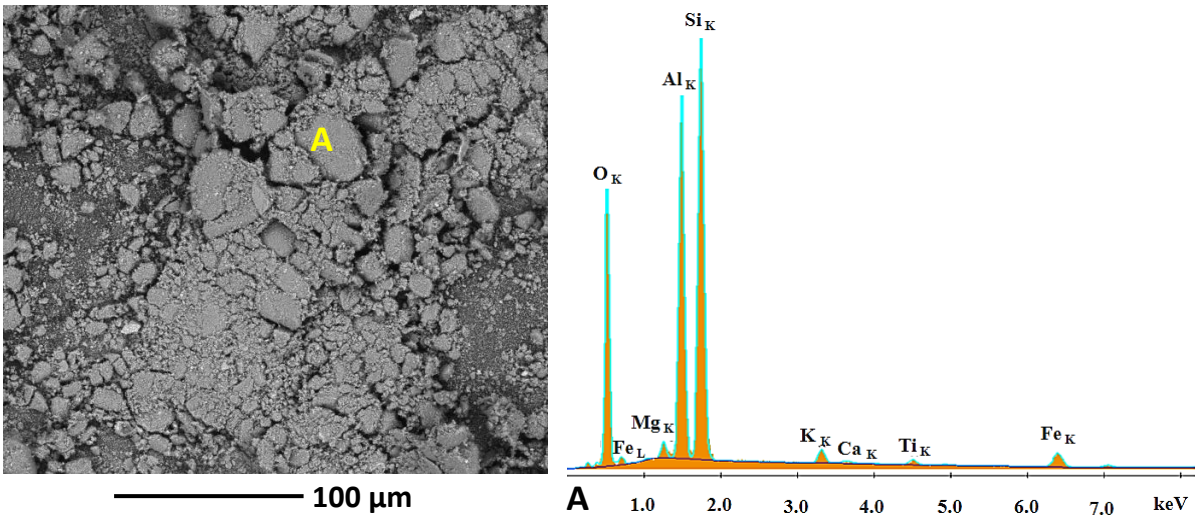


Figure 5-14: A gauche la vue au MEB de l'échantillon S3 avant traitement. À droite le spectre EDS mesuré sur le grain identifié par la lettre A sur l'image.

Le spectre EDS de la Figure 5-14, mesuré localement sur le grain identifié sur le cliché en électrons rétrodiffusés (Figure 5-14-A), sous-tend un grain essentiellement fait d'argile (kaolinite) et de silice.

Le grain contient aussi un peu d'illite et d'oxydes de fer. On note également la présence en traces de vanadium et de titane. Nous y avons retrouvé très peu d'oxydes de fer.

La matrice fine dans laquelle sont incrustés les grains de quartz est essentiellement composée de kaolinite faiblement ferritisée.

5.4.2.2.2 Minéralogie de l'échantillon S3 après ajout de 15% de nodules

Après le mélange aux nodules, la teneur relative d'oxydes de fer (Fe_2O_3) et/ou d'oxydes ferreux (FeO) est devenue plus importante comme le montre le spectre EDS mesuré localement sur la Figure 5-15 (zone identifiée par la lettre A sur l'image).

L'observation au MEB (Figure 5-15) montre que les zones riches en fer présentent une structure filamentaire complexe. Le mélange et l'hydratation pendant l'essai Proctor, a dû favoriser la formation de cette nouvelle structure filamentaire imbriquée que l'on observe mieux en fort grossissement sur le cliché de la Figure 5-16.

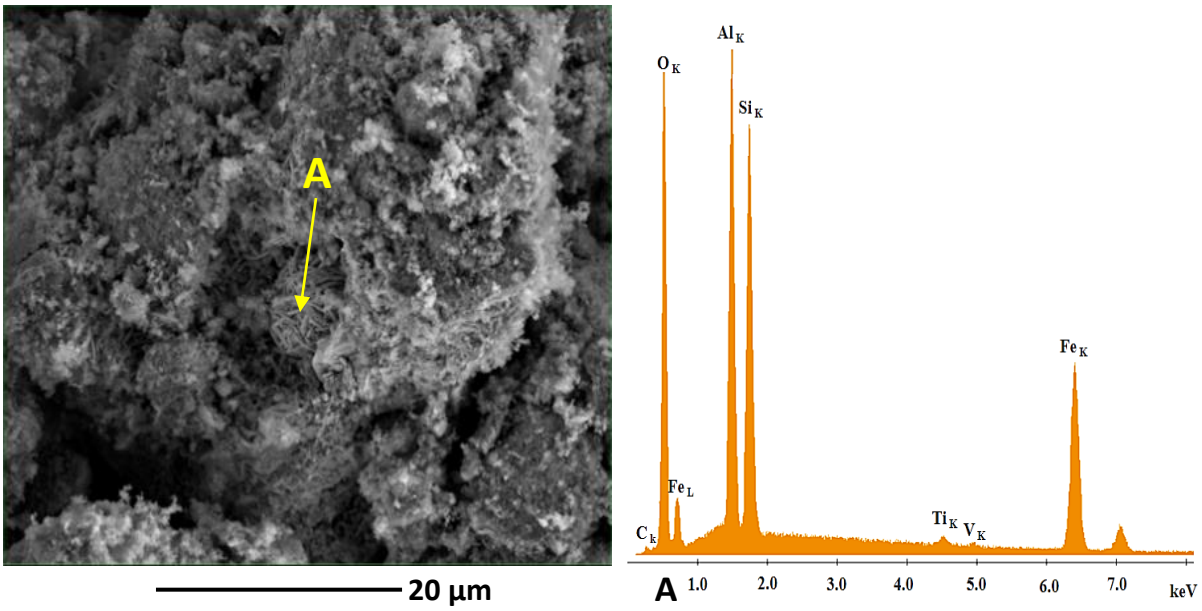


Figure 5-15: A gauche vue au MEB de l'échantillon S3 après traitement aux nodules. À droite le spectre EDS mesuré localement sur la zone identifiée par la flèche jaune.

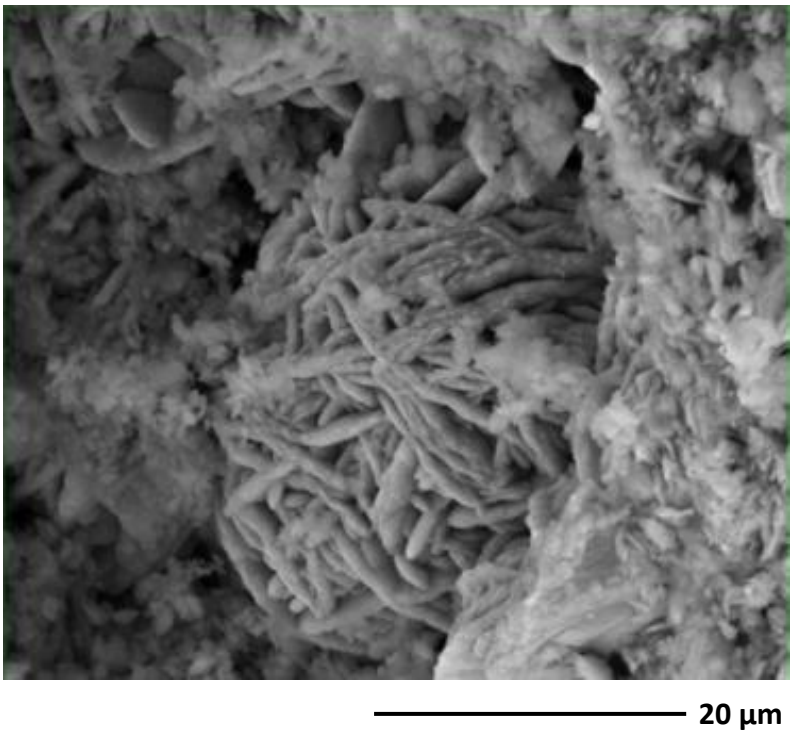


Figure 5-16: Zoom de la zone riche en fer indiquée par la flèche jaune (structure filamentaire) ennoyée dans une matrice d'argile (kaolinite) et de silice, identifiée par la lettre A sur l'image de la Figure 5-15.

Les oxydes de fer retrouvés ont une structure différente au sein des nodules (Figure 5-17). Ils sont soit en forme de "grains de riz" (Figure 5-17-A), soit en « boulettes » (Figure 5-17-B), disséminés dans toute la matrice. Les oxydes de fer sont imbriqués dans l'échantillon de sol latéritique.

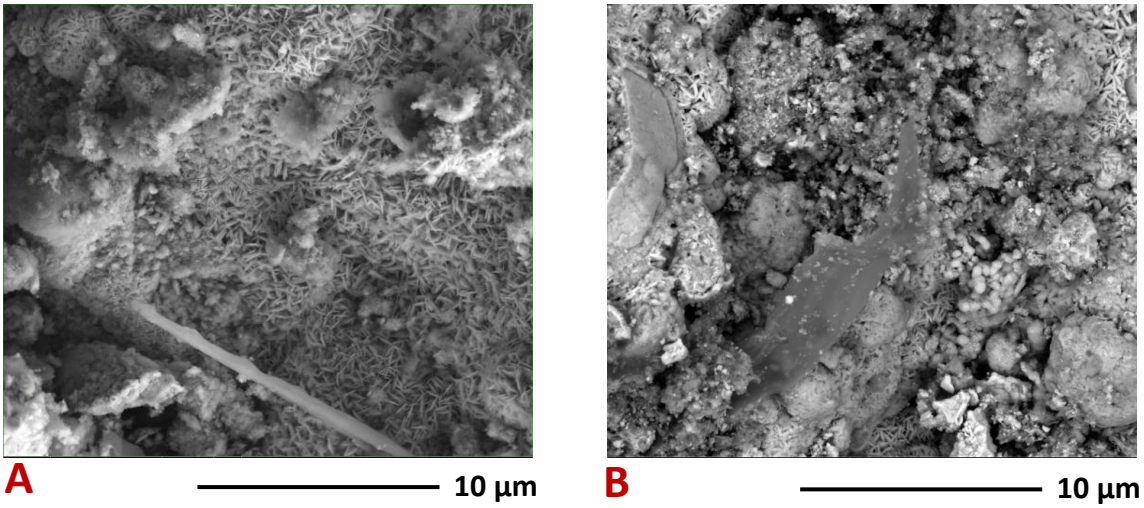


Figure 5-17: Zoom sur des zones riches en fer après mélange de l'échantillon S3 aux nodules latéritiques. **A)** Oxydes de fer en « grains de riz » ; **B)** Oxydes de fer en « boulettes».

5.5 Techniques d'amélioration à la chaux et au liant hydraulique

5.5.1 Résultats des essais géotechniques

5.5.1.1 Granulométrie

Les échantillons latéritiques de Ouallam et de Fillingué sont également de faible portance. Pour améliorer leurs caractéristiques mécaniques, une certaine quantité de produit suivant un pourcentage défini a été introduite. Les courbes granulométriques avant et après traitement (Figure 5-18) permettent d'appréhender l'effet du traitement sur la granulométrie des graveleux latéritiques naturels. Pour les échantillons de Fillingué (Figure 5-18-A) traités à 4% de chaux vive, on remarque une augmentation de la fraction fine sur toutes les classes granulaires avec réduction de la taille des éléments grossiers due au compactage. Il a été constaté une modification de la granulométrie des échantillons provenant de Ouallam (Figure 5-18-B) après ajout de 7% en masse de ciment. Les particules de sol de diamètre 2 à 5 mm (i.e. le squelette) n'ont pas été affectées par le traitement. Mais la taille des grains grossiers est réduite justement à cause de l'opération de compactage. L'ajout de chaux ou de ciment à un matériau latéritique a pour conséquence principale l'agglomération des particules, contribuant à une augmentation de leurs fractions fines (Moh, 1965 ; Osula, 1991; 1996). Le phénomène d'agglomération s'explique par les réactions d'échange cationique entre les particules argileuses (ici la kaolinite) et les ions Ca^{2+} issus de la réaction entre la chaux vive CaO et les molécules d'eau H_2O. L'agglomération des particules est également en partie occasionnée par les réactions pouzzolaniques.

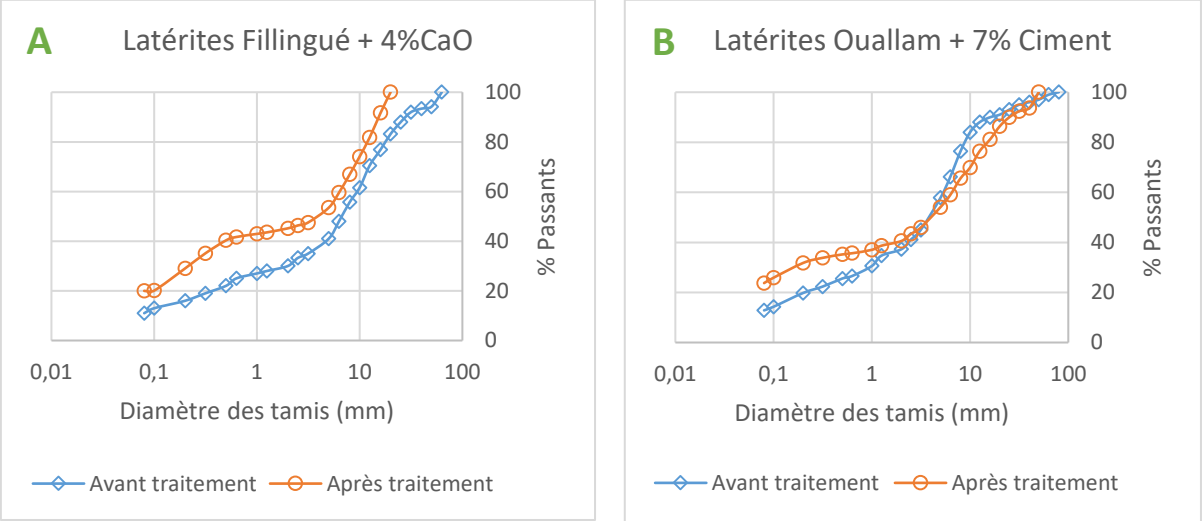


Figure 5-18: Courbes granulométriques des échantillons latéritiques **A)** Fillingué avant et après amélioration à 4% de chaux et **B)** Ouallam avant et après stabilisation à 7% de ciment.

5.5.1.1.1 Limites d'Atterberg

Les résultats des essais de limites d'Atterberg recueillis sur les échantillons latéritiques de Fillingué avant et après traitement à 4% de chaux (Tableau 5-6) et ceux de Ouallam avant et après traitement à 7% de ciment (Tableau 5-7) font ressortir d'importantes différences. Pour les échantillons de Fillingué traité à 4% de chaux (Tableau 5-6), les paramètres (LL, IP et IC) sont plus faibles après l'ajout de la chaux. L'indice de plasticité est réduit de moitié et l'indice de consistance considérablement réduit en chutant de 1,57 avant traitement à 1,08 après l'ajout de la chaux. Le mélange entraine une réduction de la limite de liquidité LL, de 30,1 à 23,6 et une faible augmentation de la limite de plasticité LP. Ce paramètre varie de 13,16 à 14,8.

Tableau 5-6: Résultats des limites d'Atterberg des échantillons de Fillingué avant et après ajout de 4% de chaux.

	LL	LP	IP	IC
Sol latéritique non traité	30,1	13,16	16,94	1,57
Sol latéritique traité à 4% de Cao	23,6	14,8	8,3	1,08

Pour les échantillons de Ouallam stabilisés à 7% de ciment, la tendance est la même concernant les modifications des caractéristiques de plasticité, à l'exception de la limite de plasticité (Tableau 5-7). Celle-ci décroît après l'ajout du ciment. La consistance des sols baisse en passant de 2,63 à 1,96, la limite de liquidité de 34,6 à 23,6 et l'indice de plasticité chute de 16,25 à 10,13. Nous déduisons que l'ajout du ciment ou de la chaux a un effet très sensible sur la consistance des graveleux latéritiques. Les valeurs des propriétés telles que la limite de liquidité, l'indice de plasticité et l'indice de consistance chutent après ajout du produit. En revanche la limite de plasticité croît dans le cas de la chaux et décroît dans le cas du ciment.

Tableau 5-7: Résultats des limites d'Atterberg des échantillons de Ouallam avant et après ajout de 7% de ciment.

	LL	LP	IP	IC
Sol latéritique non traité	34,6	18,35	16,25	2,63
Sol latéritique traité à 7% de ciment	23,6	13,47	10,13	1,96

En résumé, on peut retenir que l'effet de la chaux est immédiat et très sensible sur les caractéristiques de plasticité des graveleux latéritiques. La baisse de ces paramètres se justifie en partie par les échanges cationiques qui se produisent entre la surface des feuillets d'argile et les ions Ca^{2+} libérés après l'hydratation. Cet échange est à la base de la floculation-agglomération des particules d'argile, accompagné d'une réduction de la plasticité de la fraction argileuse (Osula, 1996). La tendance à la diminution de la limite de liquidité LL et à l'augmentation de la limite de plasticité LP et conséquemment la réduction de l'indice de plasticité IP est corroborée par les mêmes conclusions auxquelles sont parvenues de nombreuses études (Diamond et al., 1965 ; Akoto & Singh, 1981 ; Attoh-Okine, 1990 ; 1995 ; Osula, 1991 ; 1996 ; Bell, 1996 ; Khattab, 2002). Néanmoins, il faut préciser que les études de Diamond et al. (1965) ont abouti à une conclusion partiellement différente puisque la limite de liquidité et la limite de plasticité augmentent dans leur cas après l'ajout de la chaux sur des argiles riches en calcium.

Les travaux de Khattab (2002) sur l'influence de la chaux sur les limites d'Atterberg dans le cas des argiles ont montré une augmentation de la limite de plasticité jusqu'à 4% de chaux. Au-delà de cette quantité, l'ajout de la chaux n'a aucune influence. Par contre la limite de liquidité croit jusqu'à 2% de chaux et décroit avec l'ajout de chaux. Des études (Bell, 1994 ; 1996) ont montré que pour la kaolinite, l'indice de plasticité diminue à partir de 2% de chaux. La limite de liquidité augmente jusqu'à 2% de chaux. L'ajout de chaux ou de liant hydraulique a donc pour effet la réduction de la plasticité des graveleux latéritiques, principalement la fraction argileuse. Mais l'effet de la chaux est plus important que celui du ciment puisqu'après l'ajout de 4% de chaux, l'indice de plasticité est réduit de moitié. Pour les graveleux stabilisés au ciment, la tendance est la même mais moins importante que la chaux.

5.5.1.2 Portance

Les résultats des essais Proctor et CBR effectués sur les échantillons de Fillingué et Ouallam avant traitement et respectivement après ajout de 4% de chaux et 7% de ciment sont regroupés dans les Tableau 5-8 et Tableau 5-9. Ces essais ont permis de déterminer dans un premier temps les références Proctor optimales (poids volumique sec et teneur en eau à l'OPM) ainsi que les indices CBR à 95 et 98% de l'OPM sur les échantillons avant et après traitement. Les résultats consignés dans le Tableau 5-8, sont ceux obtenus avant et après amélioration des échantillons latéritiques de Fillingué. L'ajout de chaux ou de ciment à ces sols a eu pour effet la diminution du poids volumique sec et l'augmentation de la teneur en eau (Tableau 5-8 et Tableau 5-9). Les graveleux latéritiques naturels du site de Fillingué sont naturellement peu portants. La portance s'est fortement accrue après l'ajout de la chaux en passant de 22 à 132 à 98% de l'OPM et de 12 à 105 à 95% de l'OPM.

Tableau 5-8: Résultats des essais Proctor et CBR des échantillons de Fillingué avant et après ajout de 4% de chaux.

	γ_{OPM} (kN/m^3)	WOPM (%)	CBR98	CBR95
Sol latéritique non traité	19,8	9	22	12
Sol latéritique traité à 4% Cao	19,1	9,5	132	105

Les résultats d'essais Proctor et CBR des graveleux latéritiques de Ouallam avant et après stabilisation à 7% de ciment sont consignés dans le Tableau 5-9. Les modifications apportées par l'ajout de ciment à ces sols sont analogues à celles de la chaux mais avec des valeurs beaucoup plus élevées pour le liant hydraulique. Le poids volumique sec à l'OPM chute de 18,4 à 17,8 kN/m^3 et la teneur en eau à l'OPM augmente de 10,6% avant traitement à 11,8% après. L'indice CBR passe de 28 à 390 à 98% de l'OPM et de 13 à 282 à 95% de l'OPM.

Tableau 5-9: Résultats des essais Proctor et CBR des échantillons de Ouallam avant et après ajout de 7% de ciment.

	γ_{OPM} (kN/m^3)	WOPM (%)	CBR98	CBR95
Sol latéritique non traité	18,4	10,6	28	13
Sol latéritique traité à 7% de ciment	17,8	11,8	390	282

L'ajout de chaux et du ciment ont donc favorisé une forte amélioration de la portance des graveleux latéritiques des sites de Fillingué et de Ouallam. Ces produits additionnés aux sols latéritiques leur ont conféré une meilleure portance validant ainsi leur aptitude en construction routière. L'ajout de la chaux ou de ciment à un graveleux latéritique a également pour effet la réduction du poids volumique sec et l'augmentation de la teneur en eau à l'OPM. Ces conclusions sont conformes à celles auxquelles sont parvenues de nombreuses études (Diamond, 1965 ; Akoto & Singh, 1981 ; Messou, 1980 ; Attoh-Okine, 1990 ; 1995 ; Osula, 1991 ; 1996 ; Bell, 1996 ; Khattab, 2002), mais la portance est considérablement améliorée avec le ciment qu'avec la chaux.

5.5.2 Analyse minéralogique et chimique des échantillons avant et après ajout du produit de traitement

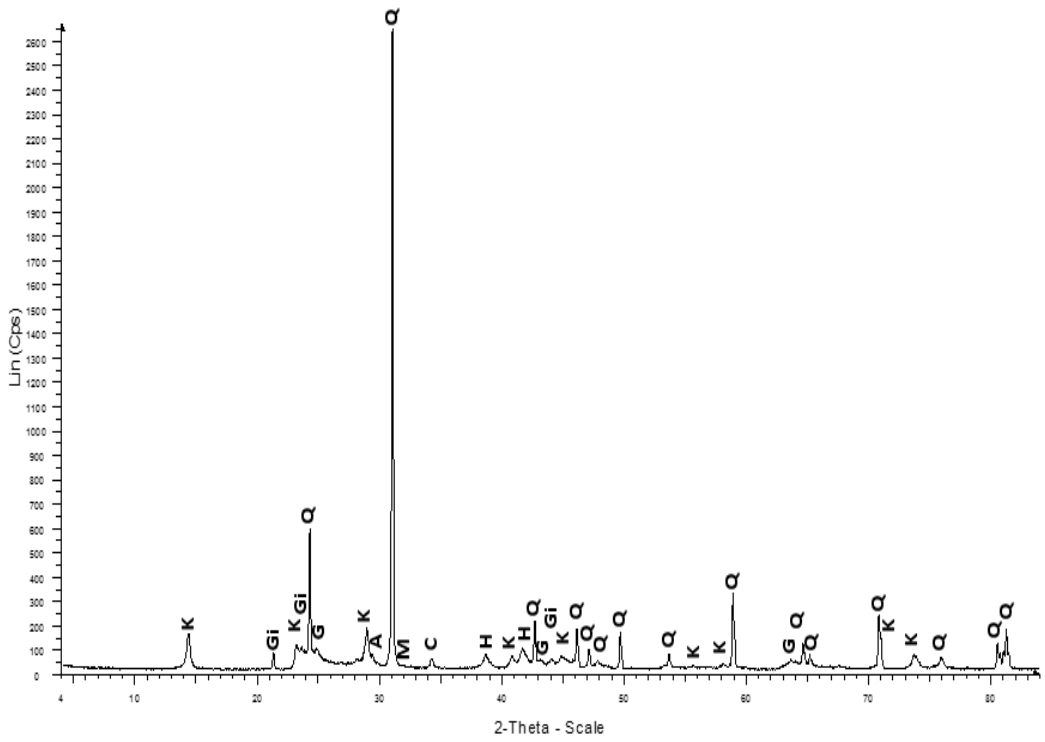
5.5.2.1 Détermination de la composition minéralogique à la DRX

5.5.2.1.1 Échantillons de Fillingué améliorés avec 4% de chaux

Les minéraux détectés en grande quantité à la DRX après traitement à 4% de chaux des sols latéritiques sont le quartz en plus grande quantité (33,6%) et la kaolinite (27,8%) (Figure **5-19**). L'hématite, la goethite et la gibbsite ont été retrouvées dans les proportions respectives de 5,6 ; 4 et 3,1% et donc en faibles quantités. L'anatase et le microcline y sont en traces. La comparaison établie entre les compositions minéralogiques des échantillons de Fillingué avant et après amélioration à 4% de chaux fait ressortir des proportions relativement faibles de silice et de kaolinite contenues dans les échantillons après traitement. Le taux de silice chute de 38,4 à 33,6 et celui de la kaolinite de 45,6 à 27,8. Le même constat peut être fait pour les d'oxydes de fer (hématite et goethite), mais avec des quantités plus élevées pour le cas de la chaux. L'ajout de la chaux a également favorisé la synthèse de la calcite $CaCO_3$ non retrouvée dans les graveleux naturels. L'anatase et le microcline, bien que faiblement présents dans le sol avant traitement sont encore plus faibles après, ils y sont en traces.

5.5.2.1.2 Échantillons de Ouallam stabilisés avec 7% de ciment

Dans le cas des graveleux latéritiques de Ouallam stabilisés avec 7% de ciment, la DRX révèle en plus fortes proportions la silice à 36,3% et la kaolinite à 25% (Figure 5-20). Les quantités d'oxydes de fer sont plus élevées que les échantillons de Ouallam non améliorés au ciment. Les quantités d'hématite et de goethite son respectivement de 15,1 et 11%. La calcite synthétisée après l'ajout du ciment est légèrement plus élevée, soit 11,7%. La gibbsite, l'anatase et le microcline ont été retrouvés en traces. Après comparaison des compositions minéralogiques de ces sols avant et après stabilisation, il ressort la même tendance que pour les sols de Fillingué améliorés à la chaux. Les quantités de silice et de kaolinite sont plus faibles après amélioration. Mais la quantité d'oxydes de fer est devenue plus importante. L'hématite passe de 3 à 15,1% et la goethite de 7,8 à 11%.



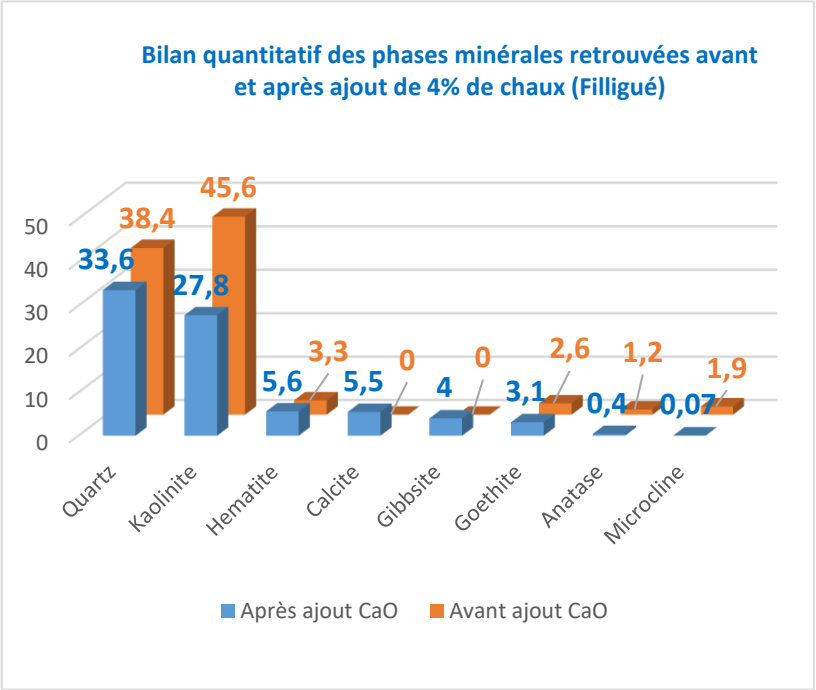
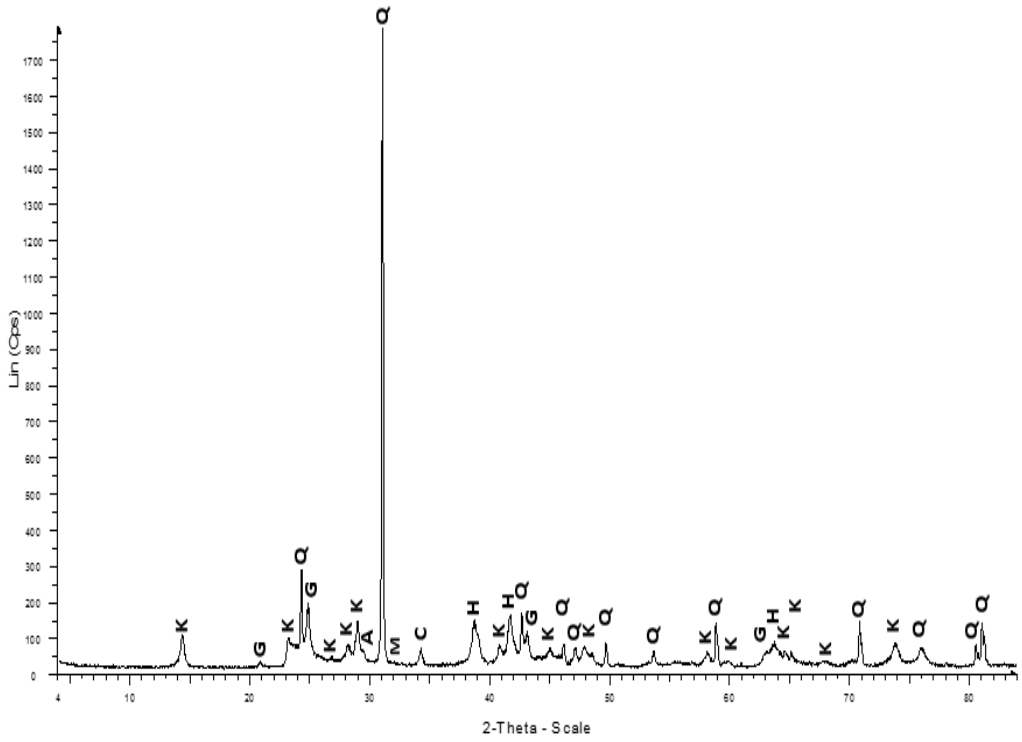


Figure 5-19: Diffractogramme et quantification Riedvelt de l'échantillon latéritique de Fillingué avant et après ajout de 4% de chaux.



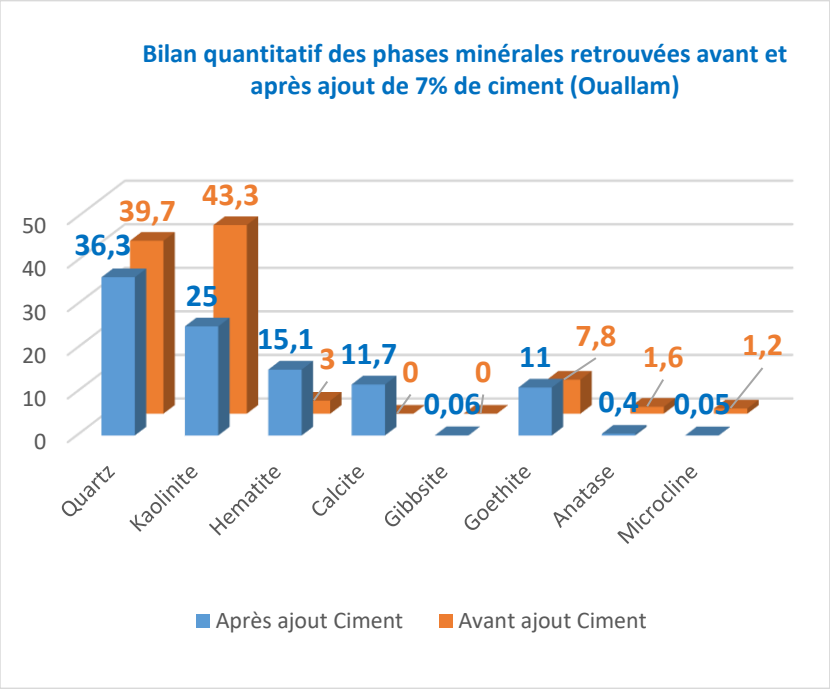


Figure 5-20: Diffractogramme et quantification Riedvelt de l'échantillon latéritique de Ouallam avant et après ajout de 7% de ciment.

5.5.2.2 Microanalyse X des graveleux latéritiques améliorés ou stabilisés

5.5.2.2.1 Analyse minéralogique des graveleux latéritiques de Fillingué améliorés à 4% de chaux

L'observation au MEB et la microanalyse X à l'EDS font ressortir une modification minéralogique importante au sein de la microstructure des graveleux latéritiques de Fillingué après mélange à la chaux. L'ajout de 4% de chaux a occasionné la synthèse de nombreux composés chimiques ayant principalement contribué à la cohésion apportée au sein de la microstructure après mélange. L'image générée au MEB en mode « électrons rétrodiffusés » (Figure 5-21) laisse apparaître une pellicule de couleur gris-argentée recouvrant et liant un ensemble de blocs constitués de quartz en mélange avec de la kaolinite et des oxydes de fer. Les cassures apparaissant sur l'image entre les blocs assemblés par la couche pelliculaire superficielle ne sont pas naturelles, elles ont été générées par la préparation de l'échantillon avant l'analyse au MEB.

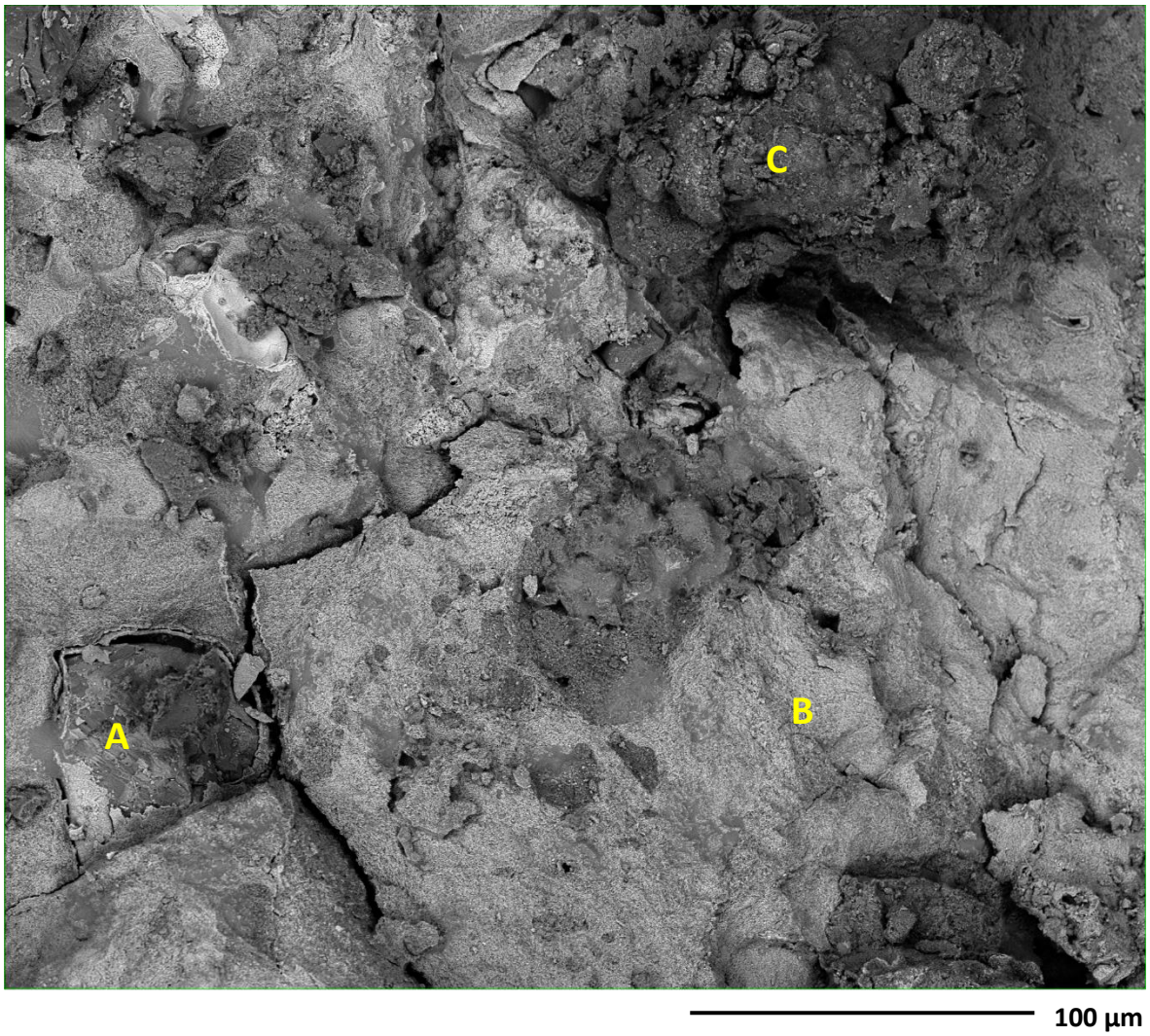


Figure 5-21: Image MEB recueillie sur une zone de l'échantillon latéritique de Fillingué amélioré par l'ajout de 4% de chaux.

Les spectres collectés sur les zones A, B et C du cliché sont regroupés sur la Figure 5-22. La quantification ZAF du spectre recueilli sur le bloc indiqué en zone A (Figure 5-22-A) permet l'interprétation minéralogique suivante : 74% de quartz combiné à 14% de kaolinite et un peu d'oxydes de Fe dont la nature (hématite ou goethite) n'est pas précisée lié à la teneur (At %) en O surestimée. Sur la zone B (Figure 5-22-B), la combinaison des minéraux est beaucoup plus complexe. Il s'agirait d'un mélange composé principalement de calcite $CaCO_3$ en mélange avec des silicates de calcium hydratés CSH, des aluminates de calcium hydratés CAH et probablement de l'ettringite difficilement détectable à l'EDS. En DRX, seule la calcite a pu être détectée. Les minéraux tels que la calcite, les CSH et les CAH synthétisés à la suite du mélange avec la chaux sont mélangés à de faibles proportions de kaolinite, d'oxydes de fer et de silice en traces. Cependant l'interprétation minéralogique de ce spectre est invérifiable, il s'agit bien là d'une hypothèse étayée par les données de la littérature. La zone C (Figure 5-22-C) sur l'image de la Figure 5-21 est dominée par la kaolinite (64,5%) et par la goethite (35%).

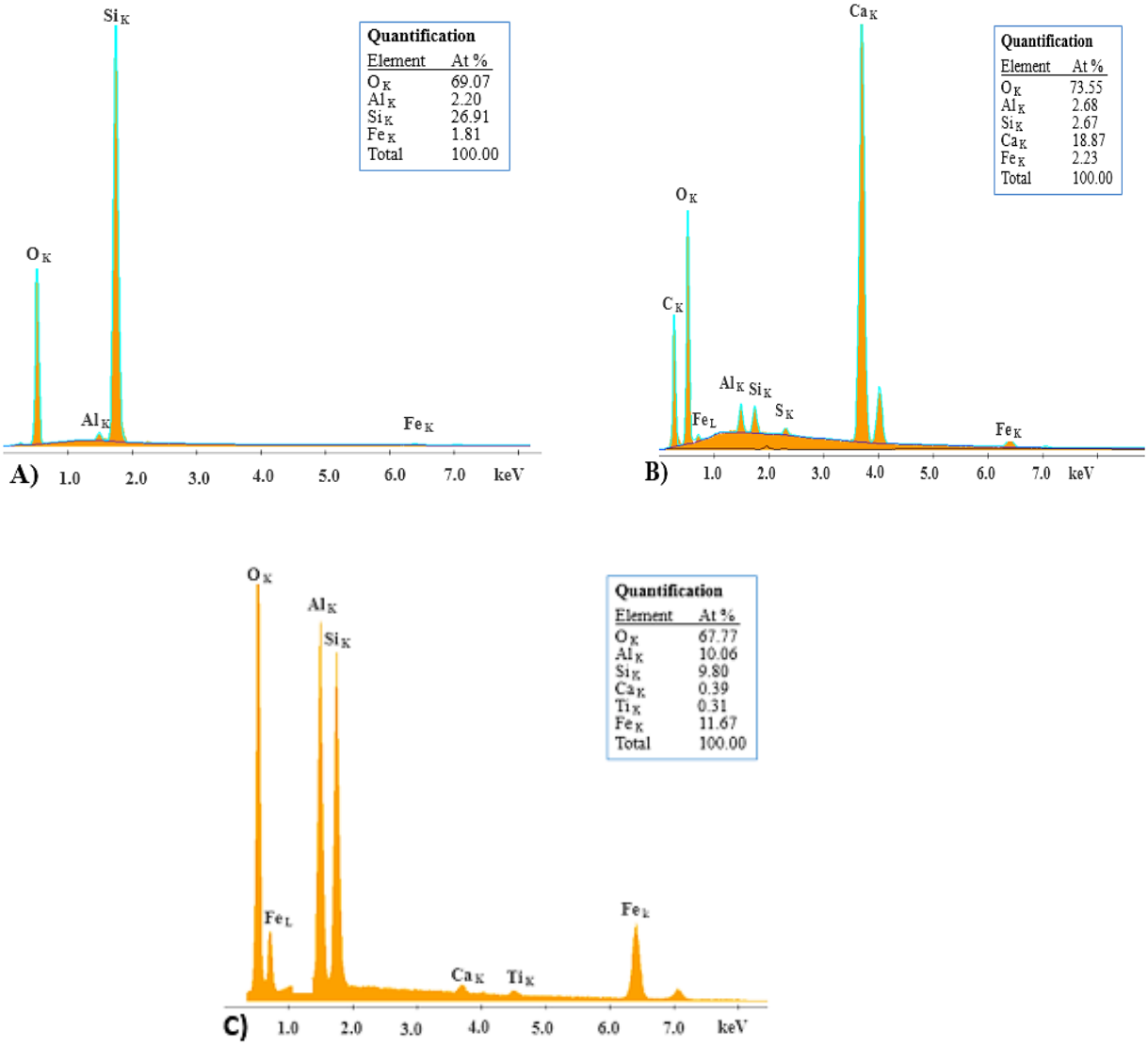


Figure 5-22: Spectres EDS + quantification ZAF des zones A, B et C indiquées sur le cliché MEB de la Figure 5-21.

La microstructure des échantillons latéritiques de Fillingué améliorés par ajout de 4% de chaux est principalement constituée d'un assemblage de plusieurs grains de quartz mélangés à la kaolinite et dans une moindre mesure les oxydes de fer (hématite et goethite) le tout recouvert et enrobé d'une couche pelliculaire de couleur gris-argenté.

Sur la Figure 5-23 correspondant au grossissement de la zone A on peut apprécier l'épaisseur de cette pellicule qui fait environ 1µm. La pellicule est majoritairement constituée de nouveaux composés synthétisés après l'ajout de la chaux. Ces minéraux sont la calcite, les CSH, CAH, l'ettringite…etc.

Parmi ces minéraux, seule la calcite a pu être détectée à la DRX et au MEB. Cela s'explique par la complexité de la structure minéralogique de ces composés et éventuellement leur cristallinité partielle lors de la prise de la chaux.

Figure 5-23: Cliché MEB correspondant au grossissement de la zone A sur le cliché de la Figure 5-21. Grains de quartz recouvert d'une fine pellicule composée de calcite, CSH, CAH, Ettringite…

5.5.2.2.2 Analyse minéralogique des graveleux latéritiques de Ouallam stabilisés à 7% de ciment

La microstructure des échantillons latéritiques de Ouallam améliorés à 7% de ciment est différente de celle correspondant aux sols latéritiques avant traitement. Le cliché recueilli en mode BSE (*Back Scattered Electrons* pour électrons rétrodiffusés) fait ressortir une cohésion générale de plusieurs faciès (Figure 5-24). Ce mélange est dominé de grains de quartz mélangés en proportions variables avec de la kaolinite et les oxydes de fer. Des spectres EDS (Figure **5-25**) ont été collectés et quantifiés par la méthode ZAF. La zone A (Figure 5-25-A) est constituée d'oxydes de fer (dont la nature n'est pas identifiée liée notamment à une teneur apparente en O trop faible). Ces oxydes de fer sont combinés à 31% de kaolinite. Le spectre de la zone B (Figure 5-25-B) est très largement dominé par la gibbsite $Al(OH)_3$. Le spectre de la zone C (Figure 5-25-C) est très largement dominé par le quartz. Le spectre de la zone D (Figure **5-25**-D) est dominé par la kaolinite (69%) et le quartz (28%) avec des traces d'oxydes de fer dont la nature n'est pas identifiée. Le spectre de la zone E (Figure 5-25-E) reflète de toute évidence un mélange complexe dont l'interprétation minéralogique aurait nécessité d'autres acquisitions afin d'identifier les différentes composantes du mélange. On dira tout au plus que la forte teneur en Ca suggère la présence de CSH / CAH et/ou de calcite. Il est également clair que ce spectre reflète la présence d'argiles cf. e.g. kaolinite mais aussi de l'illite.

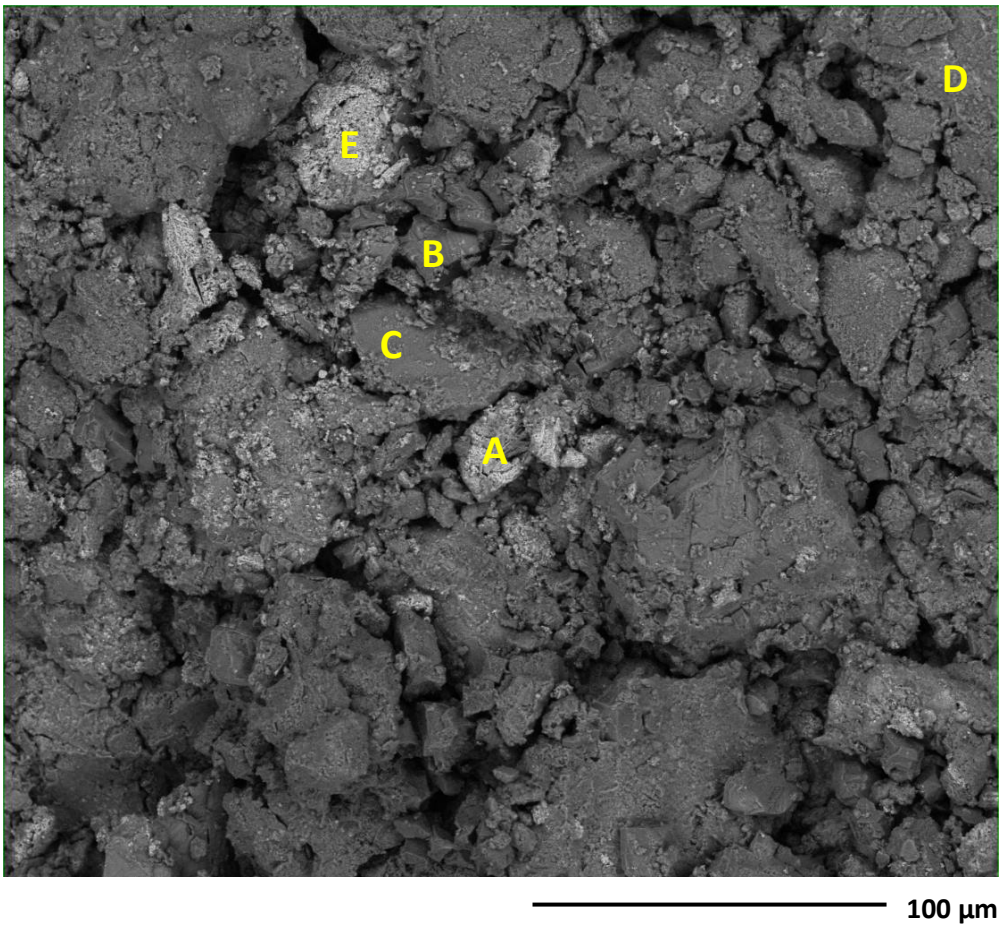


Figure 5-24: Image MEB recueillie sur une zone de l'échantillon latéritique de Ouallam amélioré à 7% de ciment.

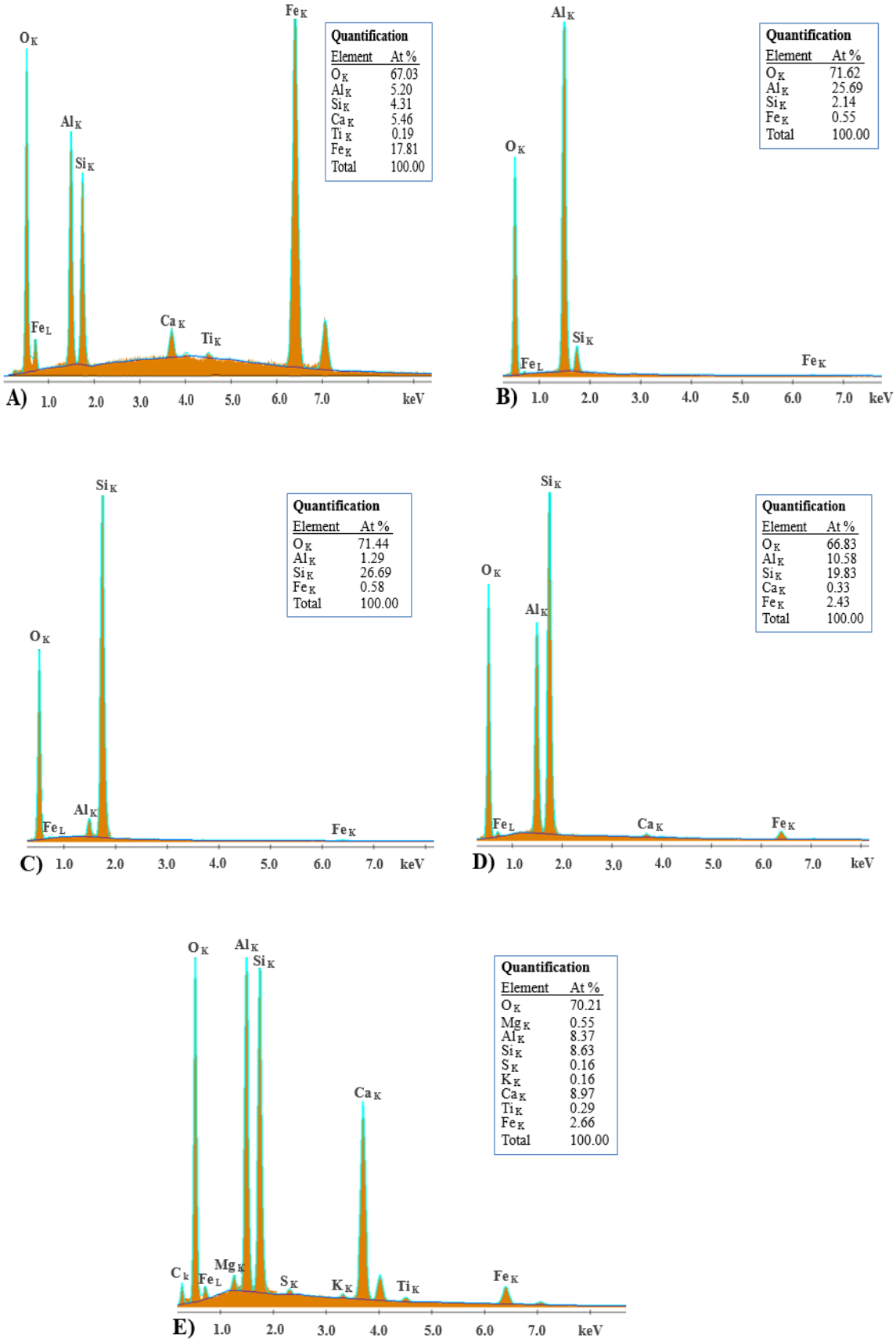


Figure 5-25: Spectres EDS + quantification ZAF des zones A, B, C, D et E indiquées sur le cliché MEB de la Figure 5-24.

5.6 Conclusion

Les expériences menées sur l'amélioration des sols latéritiques de faibles caractéristiques géotechniques ne permettant pas leur utilisation directe en construction routière montre une nette amélioration de leur portance.

Les sols de Dosso ont été améliorés par ajout de 15% de nodules concassés, ceux de Fillingué avec 4% de chaux et les sols de Ouallam par l'ajout de 7% de ciment.

À partir des résultats obtenus après l'amélioration des graveleux latéritiques de Dosso, nous pouvons conclure que les nodules latéritiques de forte teneur en oxydes de fer (hématite et goethite) et en kaolinite à cœur jouent un rôle stabilisant sur la fraction fine de la matrice existante (à priori illitique) et jouent un rôle structurant lors du compactage. Les nodules broyés densifient le mélange (diminution des vides) et augmentent la portance du sol latéritique par un apport en kaolinite contenue à cœur des nodules. Il a été également constaté que le gonflement linéaire du matériau non traité est bien supérieur à celui du matériau traité à 15% de nodules. Le traitement diminue donc le gonflement potentiel du matériau naturel, de teneur argileuse naturellement élevée. L'amélioration des paramètres mécaniques (angle de frottement interne et la cohésion) se justifie par le caractère anguleux des nodules concassés (classe granulaire 0/5 mm) et l'apport de fines contenues au sein des nodules. Les observations comparatives effectuées au Microscope Électronique à Balayage (MEB) sur les échantillons naturels et traités indiquent que la matrice des échantillons naturels non traités est pauvre en oxydes de fer. En effet, les échantillons améliorés aux nodules font ressortir une nouvelle structure filamentaire d'oxydes de fer permettant de confèrer au sol une meilleure performance mécanique. L'amélioration des caractéristiques de portance est appréciable après l'ajout de nodules à ces sols faiblement portants. Aussi, en se référant aux résultats du rapport S/R des échantillons naturels et ceux traités aux nodules, les faibles caractéristiques du matériau naturel peuvent être justifiées par leur teneur élevée en argile et le faible degré de latéritisation du profil latéritique (Attoh-Okine, 1995).

Le traitement des sols latéritiques au ciment et à la chaux ont quasiment fait ressortir des similitudes au niveau des différentes réactions chimiques qui se produisent lors de la prise.

L'ajout de chaux permet une forte amélioration des propriétés géotechniques des graveleux latéritiques de Fillingué. En effet, il a été constaté une augmentation significative de la portance après traitement. Ce traitement a sensiblement impacté les propriétés géotechniques des sols. Les sols traités sont moins plastiques (diminution de l'IP), moins denses avec une teneur en eau à l'OPM plus élevée. Le traitement a eu également pour effet une légère augmentation de la fraction fine et une réduction des éléments grossiers. Après observation au MEB des sols traités à la chaux, on observe la formation d'une fine pellicule recouvrant, enrobant et reliant les différents éléments contenus dans la matrice initiale des sols. La DRX a montré une réduction de la proportion de la silice et de la kaolinite après traitement. Cette tendance est cohérente avec l'effet solubilisant des ions Ca^{2+} libérés après l'hydratation de la chaux vive.

La stabilisation de sols latéritiques de Ouallam avec 7% en masse de ciment a occasionné une amélioration encore plus appréciable. La portance des sols est largement améliorée accompagnée d'une diminution de l'IP, une légère augmentation de la fraction fine ainsi qu'une réduction de la fraction graveleuse. Les quantités de silice et de kaolinite après traitement au ciment sont également plus faibles que les quantités initialement retrouvées dans les sols avant l'ajout du ciment. Cependant, les observations au MEB des matériaux traités au ciment, ne font pas ressortir la couche pelliculaire de surface comme cela a été constaté dans le cas des sols traités à la chaux. Néanmoins, on remarque que la matrice est moins poreuse que celle de l'échantillon initial avec des combinaisons silice/kaolinite mélangées à des oxydes de fer et les produits néoformés après l'ajout de ciment dans des proportions variables

Différentes réactions physiques se produisent pendant la prise du ciment. Il y a d'abord la formation d'une pâte de particules solides. À cet effet, les espaces inter-particules sont interconnectés et remplis d'eau capillaire. Un revêtement d'ettringite empêchant la prise-éclair se développe à la surface des grains de ciment. La réaction du ciment continue et après quelques heures, on assiste à la formation de cristaux fibreux qui sont des silicates de calcium hydratés (CSH). Ces composés lient et contribuent beaucoup à l'amélioration des propriétés mécaniques des mélanges.

CHAPITRE VI

SYNTHESE GENERALE

6 CHAPITRE VI : SYNTHÈSE GÉNÉRALE

6.1 Introduction

Les caractéristiques de portance des sols latéritiques sont influencées par plusieurs facteurs, principalement les facteurs environnementaux (roche mère, nature pédologique, la forme du modelé, la pluviométrie, la densité, le cuirassement ou l'induration…), la composition minéralogique, les propriétés mécaniques et géotechniques. Dans cette section, nous proposons une catégorisation des classes de portance des graveleux latéritiques en fonction des différents facteurs. Au total 3 classes de portances sont considérées (0-30 ; 30-80 et 80-150). Le choix des classes est basé sur les résultats des essais géotechniques (cf. chapitre 3).

Enfin, il sera présenté une synthèse générale sur l'amélioration des sols latéritiques avec les divers produits à savoir les nodules latéritiques, la chaux et le ciment.

6.2 Classes de portance en fonction des données minéralogiques

Les analyses minéralogiques dont les résultats ont été largement commentés dans le chapitre 4 montrent approximativement que les performances des sols latéritiques sont conditionnées par la teneur des espèces minérales et leur disposition au sein de la matrice. Les données prises en compte dans cette analyse concernent la morphologie, la minéralogie, le ratio S/R et la microstructure (Tableau 6-1).

Tableau 6-1: Caractéristiques minéralogiques en fonction des classes de portance.

Classe de Portance	Texture			Minéralogie				S/R	Microstucture
	Ferrugineuse diffuse	Ferrugineuse isolée	A oolithe	%Kaolinite	%Quartz*	%Goethite	%Hématite		
0 - 30		x		> 40%	-	< 5%	< 3%	> 4,5	Poreuse
30 - 80	x			20 - 40%	-	5 à 10%	3 à 7%	1,7 à 4,5	Moy. Poreuse
80 - 150			x	< 20%	< 30%	> 10%	> 7%	< 1,7	Compacte

- D'après les données du tableau, on constate que les sols de classe de portance faible (0 – 30) présentent une texture à attaques ferrugineuses isolées et contiennent un taux élevé de kaolinite (> 40%), une faible teneur en goethite 5% et en hématite 3%. La microstructure est poreuse et les gisements latéritiques sont faiblement latéritisés, soit S/R > 4,7.
- Les sols de portance moyenne (30 -80) présentant une texture à attaques ferrugineuses diffuses contiennent des espèces minérales dans les proportions suivantes : kaolinite (20 à 40%), goethite (5 à 10%), hématite (3 à 7%). Les gisements latéritiques sont dans un état d'altération moyenne (1,7 < S/R < 4,5) et la matrice moyennement poreuse. Pour ces deux classes, la teneur en quartz n'est pas un élément discriminant car les proportions obtenues pour ce minéral sont trop dispersées d'un échantillon à l'autre.

- Les sols de classe de portance élevée (80 – 150) présentent une texture oolithique. Ils contiennent une teneur plus faible en kaolinite de l'ordre de 20%, une teneur en quartz inférieure à 30% et des teneurs en oxydes de fer plus élevées respectivement 10 et 7% pour la goethite et l'hématite. La microstructure est compacte (forte induration) et le degré de latéritisation faible (S/R < 1,7).

6.3 Classes de portance en fonction des facteurs environnementaux

Les facteurs influençant la genèse des profils latéritique des sites d'étude permettent de distinguer les sols latéritiques en fonction des différentes classes de portance retenues. Il s'agit en l'occurrence du type de roche mère, des caractéristiques pédologiques, de la forme du modelé, du mode de drainage et de la pluviométrie (Tableau 6-2).

Tableau 6-2: Facteurs environnementaux et génétiques en fonction des classes de portance.

Classe de Portance	Roche mère	Nature pédologique	Modelé	Drainage	Pluviométrie
0 - 30	-*	Détritique	Plat	Mauvais	< 300 mm/an
30 - 80	Schiste/Granite	Résiduel/Détritique	Subhorizontal	Moyen	300 - 450 mm
80 - 150	Granite/Gneiss	Résiduel/Détritique	Subhorizontal	Important	> 450 mm

- Les sols de faibles portance CBR (classe 0 – 30) sont en général détritique c'est-à-dire des sols transportés et déposés à l'aplomb d'une roche dont ils n'ont aucun lien génétique. Le drainage est mauvais à cause de la faible pluviométrie (< 300 mm/an) et du modelé plat.
- Les sols de classe de portance moyenne (30 – 80) sont soit détritiques ou résiduels. Lorsqu'ils sont résiduels, ils constituent le produit d'altération de roches granitiques, de schistes ou de grès. Le drainage moyen est favorisé par le modelé subhorizontal et la pluviométrie relativement élevée (300 à 450 mm/an).
- Les sols de la classe (80 – 150) sont les plus portants. La forte pluviométrie (> 450 mm/an) et le modelé pentu favorisent une altération poussée de la roche mère qui est soit granitique ou gneissique. Ces sols sont le plus souvent résiduels et possèdent un lien génétique avec la roche mère sous-jacente. Ils peuvent tout de même être détritiques et présenter de meilleures performances mécaniques.

6.4 Classe de portance en fonction des propriétés géotechniques

Les graveleux latéritiques pour la plupart sont très affectés par les propriétés géotechniques. Ces propriétés dont les plus importantes sont la granulométrie, la plasticité et la capacité portante permettent de distinguer les classes de portance en fonction de valeurs seuils définies dans le Tableau 6-3.

- **Tableau 6-3:** Propriétés géotechniques en fonction des classes de portance.

Classe de Portance	$C_{2\mu m}$ (fraction argileuse) (%)	$C_{80\mu m}$ (fraction fine) (%)	C_{2mm} Fraction sableuse (%)	Dmax (mm)	IP	Ic	γ_{OPM} (kN/m^3)	W_{opm} (%)	Classification géotechnique	
									HRB	GTR
0 - 30	> 8	> 15	> 40	> 45	> 15	> 1,80	< 20	> 12	A-2-4 (0)	B4
30 - 80	4 à 8	12 à 15	30 à 40	30 à 45	12 à 15	1,20 à 1,80	20 à 23	9 à 12	-	-
80 - 150	< 4	< 12	< 30	< 35	10 à 12	1,00 à 1,20	> 23	< 9	A-2-6 (0)	B6

- Les graveleux latéritiques de faible portance (0 – 30) présentent une fraction argileuse et fine élevées, respectivement supérieures à 8 et 15%. La fraction sableuse, en général supérieure à 40% est également élevée. Ils contiennent des éléments grossiers (D_{max} > 45 mm) source d'hétérogénéité au sein des remblais, induisant un problème local de portance qui se manifeste par des « nids de poule ». Lorsque ces désordres évoluent et si des précautions ne sont pas prises à temps ils finissent par se généraliser et causer des préjudices irréversibles ainsi qu'une détérioration précoce de la chaussée. Lorsqu'ils sont compactés en couche de chaussée, le poids volumique sec n'excède guère 20 kN/m^3 et une teneur en eau à l'OPM dépassant 12% à cause des fractions fines et argileuses élevées. La plasticité (IP > 15) et l'indice de consistance (Ic > 1,80) s'avèrent également élevés. L'ensemble de caractéristiques de classification permettent de les ranger sous des A-2-4 et B4 respectivement via les classifications HRB et GTR.

- Les sols de classe (30 – 80) sont moyennement portants. La fraction argileuse moyenne (4% – 8%) et la teneur en fines évoluant entre 12 et 15 font qu'ils sont moins plastiques que les sols de la classe précédente. Aussi, le diamètre D_{max} (30 et 45) plus faible permet une compacité moyennement élevée (20 à 23 kN/m^3) et une teneur à l'OPM également faible. Leur plasticité varie entre 9 et 12 et l'indice de consistance entre 1,20 et 1,80. Ces sols ne possèdent pas de classe précise tant leurs propriétés varient beaucoup. Ils sont soit classés A-2-4 ou A-2-6 selon HRB, et B4 ou B6 suivant le GTR.

- Les sols de bonne capacité portante (classe 80 – 150) présentent des teneurs plus faibles en fractions argileuse, fine et sableuse respectivement (< 4%), (< 12%) et (< 30%) avec un diamètre maximal ne dépassant pas 35 mm. Leur meilleure compacité (γ_{opm} > 23 kN/m^3) est attribuée à leur faible plasticité (10 < IP < 12) et les proportions faibles de fines plafonnant la teneur en eau OPM à 9%. Ils sont en général de classe A-2-6 suivant HRB et B6 suivant le GTR.

6.5 Classes de portance en fonction des propriétés mécaniques

Il a été constaté que le comportement des sols latéritiques est profondément influencé par les propriétés de cisaillement et de compressibilité. On peut donc distinguer les différentes classes de portance en fonction de ces critères (Tableau 6-4).

Tableau 6-4: Propriétés mécaniques en fonction des classes de portance.

Classe de Portance	Propriétés de compressibilité				Propriétés de cisaillement		Comportement au cisaillement
	e_0	K (m/s)	Cc	Cg	c' (kPa)	ϕ' (°)	
0 - 30	> 0,7	< 7.10^{-8}	> 0,2	> 5.10^{-3}	< 5	< 20	Contractant
30 - 80	0,5 - 0,7	3.10^{-7} à 4.10^{-7}	0,13 à 0,2	$1,5.10^{-3}$ à 5.10^{-3}	5 à 10	35 à 40	Contractant/dilatant
80 - 150	< 0,5	> 3.10^{-7}	< 0,13	< $1,5.10^{-3}$	> 10	> 40	Dilatant

- ✓ La classe de portance (0 – 30) regroupe les sols ayant un indice de vide supérieur à 0,7. La perméabilité (< 7.10^{-8} m/s) est faible, ainsi que les coefficients de compressibilité et de gonflement, respectivement supérieurs à 0,2 et 0,005. Ils sont moins résistants (c' < 5 kPa et φ' < 20°) et ont un comportement contractant au cisaillement.

- ✓ La classe médiane (30 – 80) regroupe les sols de caractéristiques mécaniques moyennes. L'indice des vides initial est compris entre 0,5 et 0,7 ; la perméabilité entre 3.10^{-7} et 4.10^{-7} m/s ; le coefficient de compressibilité entre 0,13 à 0,2 et le coefficient de gonflement entre 0,0015 et 0,005. L'angle de frottement effectif (5 à 10°) et la cohésion effective (35 à 40 kPa) font que ces sols adoptent un comportement dilatant pour de faibles sollicitations et contractant pour de niveaux élevés de contrainte.

- ✓ La classe de portance élevée (80 – 150) est constituée de sols ayant un faible indice de vide (e_0 < 0,5), une perméabilité moyenne (K > 3.10^{-7} m/s), un coefficient de compressibilité Cc < 0,13 et un coefficient de gonflement Cg < 0,0015. Ils sont plus résistants au cisaillement (c' > 10 kPa et φ' > 40°). Ils sont dilatants pendant le cisaillement.

6.6 Autres facteurs influençant les performances des sols latéritiques

Les graveleux latéritiques sont utilisés en technique routière pour la réalisation de routes en terre et de chaussées revêtues. Selon leur qualité ils servent en couche de forme, en couche de fondation ou en couche de base pour les chaussées revêtues et en couche de roulement pour les routes en terre. Les graveleux latéritiques utilisés en construction routière se trouvent dans la nature à des épaisseurs variant entre 0,20 m et 1,00 m selon la région. Les conditions de mise en place sont complexes et requièrent une étude fine et pluridisciplinaire.

Aussi, la nappe latéritique peut avoir une surface variable pouvant dépasser plusieurs hectares, plate ou dénivelée selon la topographie des lieux et, dans cette nappe, l'épaisseur de matériau récupérable peut également être variable (de 20 à 50 cm par exemple dans un même gisement). Enfin, cette nappe peut être discontinue et entrecoupée de zones appelées « négatives », c'est-à-dire ne disposant pas de graveleux latéritiques aux qualités routières.

Lorsque l'on étudie un graveleux latéritique en laboratoire, la plupart du temps le gisement d'où ce matériau est extrait n'est pas encore en exploitation et l'étude est réalisée sur des prélèvements d'échantillons. Les performances mécaniques qui en sont déduites représentent plus ou moins celles du matériau qui sera mis en œuvre selon la qualité de la prospection qui aura été faite pour reconnaître le gisement et selon la facilité plus ou moins grande que l'on rencontrera dans son exploitation. Cela est pratiquement vrai pour tout matériau de viabilité mais le problème se pose avec une acuité particulière pour les graveleux latéritiques pour trois principales raisons :

- Un gisement est un ensemble compliqué et très hétérogène dont la reconnaissance et l'exploitation ne sont pas forcément simples ;
- Il n'existe pratiquement jamais de contrôle pendant l'exploitation d'un gîte ; le matériau au mieux est contrôlé une fois gerbé et lors de la mise en œuvre ;
- Il n'existe pas d'étude de reconnaissance normalisée et le flou artistique de certains termes de référence rencontrés dans les appels d'offres d'études laisse une grande liberté aux prospecteurs.

Notre but est donc d'attirer l'attention sur les très grandes différences qui peuvent exister entre les performances estimées et les performances vraies des graveleux latéritiques et, de ce fait, sur la très grande précaution qu'il faille prendre dans le dimensionnement des couches de chaussée réalisé à partir d'études de laboratoire.

La prospection des gisements latéritique est trop variable d'une zone à l'autre, en fonction de la topographie, du type de végétation et du climat. Il existe parfois des critères simples qui sont de bons indicateurs. Par exemple selon Autret (1983), dans les zones vallonnées forestières, on recherche les indices de graveleux à mi-pente. En zones de savane (comme le Niger), il est préférable de rechercher les ruptures de pente, et les blocs de carapace disloquée sont un bon repère. Parfois cela est beaucoup moins évident ; par exemple sur certains gisements au Niger, des emprunts de gros sable latéritique peuvent être cachés sous plus de 2 m de sable dont les seuls indices de surface sont la nature de la végétation, ce qui n'est pas toujours simple à repérer.

Ont également une grande importance l'hétérogénéité des épaisseurs d'un sondage à l'autre et l'hétérogénéité au sein d'un même sondage. Un sondage révélant un mauvais graveleux parmi un matériau de bonne qualité perturbera les résultats moyens du matériau gerbé. Il faut donc prendre en compte la répartition entre puits « négatifs » et « positifs » (pouvant rendre le gîte inexploitable). Les questions auxquelles il faudrait répondre sont nombreuses et pertinentes. Par exemple, pour un emprunt de graveleux latéritiques utilisable en couche de base d'épaisseur moyenne 20 cm, celle-ci étant retroussée au bulldozer, quelles sont les chances dans ces conditions pour que le matériau gerbé ressemble au profil tracé par les essais de laboratoire sur quelques échantillons soigneusement prélevés ?

En contexte de savane, l'exploitation de graveleux consiste à décaper une dizaine de centimètres de graveleux végétal d'assez bonne qualité ayant le seul défaut d'accueillir des herbes en saison humide, puis à retrousser 50 cm de graveleux pour couche de base reposant sur plus de 20 cm de graveleux de fondation.

Ici aussi se pose le problème de représentativité car si des sondages négatifs sont inclus dans la zone à gerber le même problème de représentativité d'essais en laboratoire se pose.

La question est donc de savoir comment mettre en place une prospection représentative en zonant les parties d'un emprunt comportant les matériaux aux qualités routières convenables ?

La façon dont un gisement a été prospecté et les facilités ou difficultés qu'il présente à l'exploitation sont donc les facteurs extrêmement importants dans l'estimation des propriétés mécaniques que présentera le matériau une fois en place dans la chaussée. Lors des études de laboratoire, il faudra donc être très vigilant sur la représentativité de l'échantillon et parfois analyser l'influence des variations de la teneur en fines ou de la plasticité par exemple sur les caractéristiques mécaniques de manière à ne pas les surestimer.

6.7 Synthèse des résultats d'amélioration des sols latéritiques à la chaux et au ciment

Il faut noter que la microstructure est différente selon que l'échantillon de sol latéritique ait été traité à la chaux ou au liant hydraulique. Dans le cas des graveleux latéritiques améliorés à la chaux, on assiste à la synthèse d'une fine pellicule épaisse d'environ 1µm constituée en grande proportion de calcite, de silicates et d'aluminates hydratés couvrant et reliant les mélanges de silice et de kaolinite en proportions variables. Cette structure pelliculaire n'a pas été observée dans le cas des graveleux latéritiques de Ouallam améliorés au ciment. La matrice est devenue néanmoins plus dense, présentant des grains de quartz reliés par la gibbsite presque pure et dans certaines zones les grains de quartz sont reliés par des mélanges en proportions variables de kaolinite et d'oxydes de fer soit à kaolinite dominante, ou plutôt à oxydes de fer dominants.

L'ajout de chaux ou de ciment aux graveleux latéritiques a déclenché quatre principales réactions. Juste après le mélange et en présence d'eau, il se produit un échange cationique, principalement entre les ions Ca^{2+} libérés par la chaux lors de son hydratation et les ions métalliques liés à la surface des particules argileuses. Après l'échange, se produisent simultanément la floculation et l'agglomération des nouveaux composés mis en place. À la fin de l'échange, les particules argileuses sont entourées par une double couche diffuse qui peut être modifiée par l'échange ionique du calcium (Milogo et al., 2008). L'échange modifie la charge électrique autour des particules argileuses qui s'attirent et se regroupent en aboutissant au processus de floculation (Bell, 1996). Ensuite viennent la réaction pouzzolanique et la réaction de carbonatation. Au cours de la réaction pouzzolanique, la chaux, l'eau, la silice et l'alumine réagissent pour donner de nombreuses variétés de minéraux servant à la cimentation des particules de sol latéritique principalement la fraction fine. Lors de la dissolution de la chaux, la libération des ions Ca^{2+} provoque l'augmentation du pH du sol. Cette augmentation du pH a pour conséquence la dissolution de la silice provenant du quartz, des minéraux alumino-silicatés et de l'argile (Thompson, 1966). La dissolution de la silice et de la kaolinite fournissent les éléments nécessaires à la synthèse de silicates de calcium, d'aluminates de calcium hydratés et éventuellement le gel d'ettringite.

Eades (1962), ayant travaillé sur les réactions sol-chaux est parvenu à la conclusion selon laquelle, la forte valeur de pH est à l'origine de la dissolution de la silice des minéraux argileux. La dissolution de la silice et de la kaolinite est confirmée par les analyses DRX réalisées sur les échantillons avant et après traitement.

En effet, après les mélanges à la chaux et au ciment il a été constaté une diminution des quantités de silice et d'argile. Les molécules de chaux sont absorbées par les argiles et réagissent avec les surfaces des feuillets pour faire précipiter les produits de la réaction (Diamond et al., 1964 ; Stocker ; 1972). Les travaux menés sur l'adsorption de la chaux par la kaolinite (Diamond & Kinter, 1966) et les études optiques des réactions argile-chaux-eau (Ormsby & Bolz ; 1966) indiquent que les réactions chimiques en surface sont possibles et les nouveaux composés chimiques peuvent se former directement à la surface des feuillets de l'argile. Les principales réactions après l'ajout de chaux ou de ciment sont les suivantes :

- Dissolution de la chaux vive : après l'ajout de 4% de chaux aux échantillons latéritiques de Fillingué et l'ajout de 7% de ciment aux graveleux latéritiques de Ouallam, les réactions chimiques sont assez similaires. Lorsqu'on rajoute de l'eau dans le mélange sol-chaux ou sol-ciment, la première réaction qui se produit est la dissolution de la chaux par l'eau, et le produit de la réaction donne de la portlandite ou chaux éteinte (Equation 6-1).

$$CaO + H_20 \longrightarrow Ca(OH)_2$$

Equation 6-1: Equation traduisant la dissolution de la chaux par l'eau et la formation de l'hydroxyde de calcium (la portlandite).

- Les molécules d'eau contenues dans le mélange, occasionnent par la suite l'hydrolyse de la chaux éteinte en produisant les ions Ca^{2+} et OH^- (Equation 6-2)

$$Ca(OH)_2 \longrightarrow Ca^{2+} + 2OH^-$$

Equation 6-2: Equation d'hydrolyse de la portlandite.

- Une partie de la portlandite non hydrolysée réagit avec le dioxyde de carbone de l'air ou éventuellement le CO_2 piégé au sein de la matrice pour former de la calcite $CaCO_3$ et de l'eau (Equation 6-3).

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O$$

Equation 6-3: Formation de la calcite à la suite de la reaction de la portlandite et du dioxyde de carbone.

- Rappelons que la présence des ions Ca^{2+} dans la solution aqueuse fait augmenter le pH. L'augmentation du pH entraîne la dissolution partielle de la silice contenue dans le quartz et celle contenue dans la kaolinite. La silice libérée par les argiles et le quartz se combinent aux ions Ca^{2+} issus de l'hydrolyse du calcium en ions (Ca^{2+} et OH^-) pour former les silicates de calcium hydratés (CSH) (Equation 6-4) ou avec l'alumine provenant des argiles ou de la gibbsite pour produire les aluminates de calcium hydratés CAH (Equation 6-5).

$$Ca^{2+} + 2OH^{-} + SiO_2 \longrightarrow \text{CSH (Silicate de Calcium Hydraté)}$$

Equation 6-4: Formation des silicates de calcium hydratés CSH.

$$Ca^{2+} + 2OH^{-} + Al_2O_{3\}} \longrightarrow \text{CAH (Aluminate de Calcium Hydraté)}$$

Equation 6-5: Formation des aluminates de calcium hydratés CAH.

- Il faut noter que la chaux peut également réagir avec la kaolinite pour produire en même temps des silicates de calcium hydratés CSH, des aluminates de calcium hydratés CAH et des alumino-silicates de calcium hydratés CASH (Moh, 1965) (Equation 6-6).

$$\text{Kaolinite + chaux} \longrightarrow \text{CSH + CAH + CASH}$$

Equation 6-6: Produits de la reaction kaolinite-chaux: CSH, CAH et CASH.

Une très grande variété d'hydrates peut être obtenue en fonction des conditions des réactions chimiques, c'est-à-dire en fonction de la nature de l'argile contenue dans les sols traités, de la nature de la chaux, du temps de cure et de la température des réactions.

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 pour les sols à argile smectitique, la minéralogie de l'argile, le degré d'altération, la présence des sulfates et carbonates, le fer extractible et le rapport silice/sesquioxydes.

6.8 Conclusion

Il est très important de préciser que les valeurs figurant dans les tableaux ci-dessus et les divers commentaires qui en sont faits constituent des ordres de grandeurs basés sur un échantillonnage de 60 individus au total. Ce nombre assez réduit d'échantillons ne permet donc pas de dégager des conclusions formellement décisives. Un échantillonnage plus conséquent avec une telle démarche permettrait sans doute de parvenir à une meilleure appréciation des propriétés étudiées. Toutefois, la multiplicité des techniques utilisées permet de réduire certains doutes et d'étayer des hypothèses fort plausibles que nous nous sommes assignées au début des travaux.

Concernant l'amélioration des propriétés géotechniques des graveleux latéritiques, il faut noter que lorsqu'on rajoute du ciment ou de la chaux suivant un pourcentage défini aux graveleux latéritiques en présence d'eau, on assiste aux mêmes réactions chimiques. La portlandite ($Ca(OH)_2$ produit lors de l'hydratation du ciment réagit avec le dioxyde de carbone contenu dans l'air et les minéraux argileux pour donner respectivement de la calcite $CaCO_3$ et du silicate de calcium ou aluminate de calcium hydraté. L'échange cationique et la floculation-agglomération s'observent aussi dans les mélanges argile – ciment. La réaction pouzzolanique impliquant les minéraux argileux n'est donc pas prépondérante compte tenu de la disponibilité de la chaux éteinte ($Ca(OH)_2$).

En définitive, on peut retenir que l'ajout de nodules latéritiques, de chaux et du ciment permettent d'améliorer significativement les propriétés géotechniques et mécaniques des sols latéritiques. Par contre, l'amélioration par les nodules revêt un caractère économique plus pertinent à cause de sa large disponibilité sur les gisements latéritiques. L'expérimentation de l'amélioration des sols latéritiques avec ce produit naturel mérite donc d'être approfondie.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GÉNÉRALE

La construction ou l'amélioration d'un réseau routier est à juste titre considéré comme un des moyens efficaces de promouvoir le développement économique d'un pays. L'infrastructure en général, l'infrastructure des transports en particulier sont incontestablement un des éléments moteurs du développement. Conjuguer ces deux actions représente une tâche essentielle des responsables des pays en voie de développement. État d'un réseau routier et développement économique d'un pays sont donc liés l'un à l'autre ; en fait d'abord, puisque le premier est une des conditions du second mais par raison aussi à cause de cette harmonie indispensable entre les différentes actions de développement. Ces considérations expliquent pourquoi la conception et la réalisation de routes dans les pays tropicaux d'Afrique présentent un caractère particulier : on ne construira pas une route seulement sous la pression du trafic, et surtout dans le cadre d'actions intégrées de développement concourant toutes à créer cette demande et à la satisfaire. En outre, et compte tenu de cette interaction continue entre le service offert et l'usage qui en est fait, le degré d'équipement devra être particulièrement adapté aux besoins pour assurer le meilleur rendement aux efforts entrepris.

Si l'adaptation économique aux besoins du développement est une nécessité, l'adaptation des techniques en est une autre, eu égard aux conditions particulières rencontrées : climat, géologie et géotechnique, intensité et nature des trafics, structure et encadrement des services de construction et d'entretien, etc. rejoignant d'ailleurs par-là la nécessité économique. Les ingénieurs ont donc à rechercher comment ils peuvent utiliser au mieux les éléments qu'ils ont à leur disposition, essentiellement les matériaux naturels. Adaptation économique de la route aux besoins particuliers rencontrés, adaptation technique aux conditions locales, tels sont les deux aspects complémentaires qui dominent la construction des routes en Afrique. Construire une route est une chose souvent facile, mais la concevoir, la réaliser avec les matériaux adaptés et la conserver avec le souci d'un optimum économique et social demande des connaissances plus poussées et plus spécialisées. Pour réussir un tel pari, les graveleux latéritiques doivent être étudiés en prenant en compte tous les facteurs de leur mise en place ainsi que les méthodologies de caractérisation et d'identification requises.

Ce travail de recherche constitue une contribution à la caractérisation et à la valorisation des matériaux latéritiques utilisés en construction routière au Niger.

Après avoir réuni les facteurs environnementaux et climatiques qui interfèrent notablement avec la genèse des sols latéritiques, nos réflexions et investigations ont été particulièrement portées sur l'évaluation des propriétés géotechniques et mécaniques, minéralogiques et chimiques des graveleux latéritiques sur une zone d'étude délimitée dans la partie sud-ouest du Niger. Cette zone comporte sept gisements latéritiques qui s'inscrivent dans des contextes géologiques variables afin d'évaluer et d'établir les frontières de variabilité des paramètres considérés vis-à-vis des performances des sols latéritiques en construction routière.

- **Synthèse bibliographique**

Les données de la littérature montrent que les graveleux latéritiques sont des complexes dynamiques formés à partir d'une roche mère par l'action des facteurs du milieu. Il est admis que l'utilisation des spécifications propres aux sols de climat tempéré ne permet pas d'obtenir à une meilleure caractérisation des sols latéritiques. Ces sols se distinguent des autres par leur teneur particulièrement élevée en sesquioxydes et leur faible proportion en silice. Les principaux minéraux qu'on retrouve dans ces sols sont les oxydes de fer (goethite et hématite), les oxydes d'aluminium (gibbsite et boehmite), la kaolinite, le quartz et dans de faibles proportions les oxydes de titane (anatase). Les sols latéritiques sont les produits d'une altération graduelle de la roche mère. À la fin du processus de latéritisation, on assiste à la mise en place de profils latéritiques constitués d'une superposition de plusieurs horizons dont les plus communs sont les horizons A, B, C et D. Ces horizons font ressortir en quelque sorte la dynamique de l'altération. L'horizon D est celui de la roche saine et l'horizon B celui d'accumulation des oxydes de fer et des alumines. L'horizon C constitue la zone de lessivage et l'horizon A représente les couches de surface ou couches de couverture.

De nombreuses études montrent que les méthodes de prétraitement et les procédures d'essai doivent être standardisées à cause des fortes dispersions constatées suivant les méthodes de prétraitement et d'essai. Dans le cas des sols latéritiques, le séchage à l'air ambiant est fortement recommandé comparé au séchage à l'étuve.

Il a été démontré que les caractéristiques mécaniques et géotechniques des graveleux latéritiques sont variables en fonction des conditions locales. Leur caractérisation doit donc être basée sur une étude rigoureuse qui ne puisse ignorer aucun facteur pertinent. Les diverses tentatives de mise en place de spécifications permettant la caractérisation des sols latéritiques à une échelle régionale se sont butées à de sérieuses difficultés. Cela est justifié par les facteurs propres à leur milieu de formation.

La sélection des sols latéritiques doit donc être basée sur une démarche efficiente à travers des approches qui incluent à la fois le mode de prétraitement et les procédures d'essai, les facteurs génétiques et climatiques et la composition chimique et minéralogique.

- **Contexte environnemental et méthodologie générale**

Il est reconnu que la mise en place des profils latéritiques est fortement conditionnée par les facteurs environnementaux tels que le climat, la pluviométrie, le mode de drainage…etc. Aussi, une meilleure caractérisation des matériaux latéritiques dépendra donc de la prise en compte de tous ces facteurs.

La complexité des graveleux latéritiques et la carence de spécifications exigent une caractérisation basée sur une approche pluridisciplinaire. Dans ce sens, les investigations in-situ ont été menées pour relever les facteurs environnementaux et climatiques. Les sites retenus pour l'étude sont quasiment inscrits entre les isohyètes 300 et 600 mm et disposés dans un rayon de 50 à 100 km autour de la capitale du Niger (Niamey).

Les formations géologiques de la zone d'étude sont diverses et variées selon le site d'étude considéré. Les sites sont répartis dans deux régions distinctes. La région de TILLABERY qui comporte les sites de Torodi, Tillabéry (chef-lieu de la région), Ouallam, Say et Fillingué. Les sites de Dosso (chef-lieu de la région) et Guéchémé sont inscrits dans la région de DOSSO. Le site de Torodi est situé dans les terrains volcano-sédimentaires birimiens constitués de granites et métabasaltes et principalement de schistes argileux et le site de Tillabéry est à l'aplomb de roches granitiques. Les graveleux latéritiques de ces sites sont donc des sols résiduels puisqu'on les retrouve à l'aplomb des roches ayant abouti à leur mise en place. Les sites de Ouallam, Dosso et Guéchémé se trouvent dans le Continental Terminal 3 (CT3) constitués de grès argileux, siliceux, plus ou moins argileux et peu cimentés par les oxydes de fer. Il s'agit donc de sols détritiques, c'est-à-dire que le matériel d'altération provenant des roches mères s'est déposé sur ces sites après altération et transport. Le site de Say se trouve dans le Continental Terminal 1 (CT1) représenté par la série sidérolithique de l'Adar Doutchi constitué de grès ferrugineux oolithiques, de sables clastiques et d'argiles ferrugineuses. Et enfin le site de Fillingué qui se trouve dans le Continental Terminal 2 (CT2) constitué de séries sableuses et argileuses peu ferruginisées. Les sols de Say et Fillingué sont également des sols détritiques.

Le caractère commun de ces sites, bien que de formations géologiques différentes est la structure tabulaire à entablement ferrugineux. La végétation y est peu présente et la pluviométrie peu marquée au point où leur influence n'est pas notable sur le déterminisme des sols par les roches.

La caractérisation des graveleux latéritiques est établie par le biais d'essais géotechniques et mécaniques d'une part et les analyses chimiques et minéralogiques d'autre part. La caractérisation géotechnique a permis d'évaluer les propriétés géotechniques telles que la granulométrie, la portance et la plasticité des sols, tandis que les essais mécaniques permettent de déterminer les caractéristiques mécaniques des échantillons et leur réaction aux efforts de cisaillement.

Les analyses chimiques et minéralogiques sont effectuées pour dresser le bilan des minéraux que contiennent ces sols ainsi que leurs teneurs. Elles permettent également de déterminer la combinaison et la disposition des différentes phases minérales retrouvées. La présence ou non de certaines phases minérales est validée par les analyses complémentaires telles que l'ATG et l'ATD couplées à la spectrométrie de masse. Les facteurs jouant un rôle prépondérant dans la variabilité des propriétés géotechniques et mécaniques des graveleux latéritiques sont donc expliqués et commentés à l'aide de la combinaison des différentes techniques utilisées.

- **Caractérisation géotechnique et mécanique**

Les propriétés des graveleux latéritiques nécessaires à leur caractérisation sont évaluées à travers les essais géotechniques et mécaniques. Ces essais sont effectués en référence aux spécifications consignées dans le document du CEBTP (1984) actuellement utilisé comme guide de dimensionnement et de terrassement des chaussées dans les pays d'Afrique tropicale.

Les essais géotechniques ont dans un premier temps favorisé la compréhension sur la distribution granulométrique des échantillons de sol latéritique, leur plasticité ainsi que leur capacité portante lorsqu'ils sont compactés à l'OPM. Tous les échantillons ont été prélevés dans l'horizon B d'accumulation des sesquioxydes. Le comportement mécanique des sols est appréhendé à l'aide des essais mécaniques (essais de cisaillement et essais œdométriques).

Concernant les essais géotechniques, l'analyse granulométrique montre que la plupart des échantillons de sol latéritique contiennent une forte proportion d'éléments grossiers, une faible proportion d'éléments fins, une granulométrie uniforme mais mal graduée. Les classifications HRB et GTR indiquent respectivement que ces sols sont de classes A-2-6 et B6 c'est-à-dire des matériaux granulaires contenant des fractions variables de sable et d'argile. Ces essais indiquent globalement que la portance des sols varie en fonction du diamètre maximal D_{max}, de la fraction sableuse et de la fraction argileuse. Plus précisément les sols latéritiques de D_{max} n'excédant pas 55 mm, de fraction fine de l'ordre de 12%, de fraction argileuse comprise entre 5 et 8% et de fraction sableuse moyenne sont les plus portants.

L'étude des fuseaux granulométriques indique que même si le guide de dimensionnement établi par le CEBTP (1984) n'est pas totalement adapté aux sols latéritiques , il recommande des classes granulaires permettant de faire une sélection des sols de bonne portance, car l'étude indique que les sols dont les enveloppes granulaires sont moyennement inscrites dans les fuseaux types recommandés sont plus portants, contrairement à ceux qui y sont mal inscrits. Pour les sols de bonne portance, la teneur en fines ne dépasse pas 12% et la valeur de l'indice de plasticité se situe autour de 12 à 15%.

Les caractéristiques de compactage telles que le poids volumique sec et la teneur en eau à l'OPM doivent respectivement être de l'ordre de 23 kN/m^3 et 9%, sachant que l'indice CBR recommandé pour ces sols à 98% de l'OPM pour une utilisation en couche de base est de 80.

L'ACP effectuée dans le cadre de notre étude consistant à analyser l'impact de la variabilité de l'indice portant vis-à-vis des autres critères géotechniques n'a pas permis de parvenir à une corrélation nette, mais seulement des tendances ont été établies. L'étude ACP a permis de faire ressortir l'impact des paramètres granulométriques tels que la quantité de fines, la fraction sableuse, le coefficient d'uniformité et la teneur en eau à l'OPM.

Moins ces paramètres sont faibles plus les sols sont portants jusqu'à un certain seuil. L'ACP indique un faible impact de la variabilité de l'IP sur l'indice portant. Celui-ci est positivement corrélé à l'ICBR, mais son augmentation, même significative, n'impacte pas sensiblement la portance. Cette constatation semble à priori paradoxale puisque nous savons bien qu'une forte plasticité réduit la portance des sols. Nous concluons donc que l'étude ACP est tellement influencée par la variabilité des caractéristiques granulométriques qu'elle ne laisse apparaître l'impact de la variabilité de la plasticité sur l'indice portant. Une autre hypothèse envisageable serait l'impact de la procédure d'essai sur les résultats des caractéristiques de plasticité.

Les sols de faible portance (ICBR ≤ 30) contiennent une proportion élevée de fines, un D_{max} élevé et leur enveloppe granulométrique déborde largement du fuseau granulométrique recommandé par le CEBTP. De plus, ces sols sont plus compressibles, plus poreux, dilatants et présentent une faible résistance au cisaillement. Le poids volumique sec à l'OPM de ces sols, de l'ordre de 18 kN/m^3 et la forte teneur en eau, soit environ 13%, sont les principaux facteurs qui expliquent leur faible portance.

Les essais mécaniques (essai de cisaillement à la boite de Casagrande et les essais de compressibilité à l'œdomètre) permettent de distinguer les sols de bonne portance et ceux de portance faible à travers leur résistance au cisaillement et les paramètres géomécaniques. Ainsi, les sols de portance élevée possèdent un angle de frottement interne de l'ordre de 40°, une cohésion de 10 kPa, un comportement dilatant pendant le cisaillement, un faible indice de vide de l'ordre de 0,6 et un coefficient de compressibilité faible.

Les sols de faible portance ont un angle de frottement et une cohésion plus faibles, respectivement de l'ordre de 35° et 2,5 kPa avec un comportement contractant, un indice de vide élevé, une faible perméabilité et une forte compressibilité.

- **Caractérisation chimique et minéralogique**

Les sols latéritiques sont des matériaux dont les performances géotechniques et mécaniques sont particulièrement tributaires de la composition chimique et minéralogique ainsi que de l'aspect microstructural et la disposition des phases minérales au sein de la microstructure. Dans cette étude, plusieurs techniques ont été expérimentées pour caractériser qualitativement et quantitativement la minéralogie des échantillons.

L'étude pétrographique établie par l'observation des lames minces a permis de mettre en évidence trois types de microstructure relatifs au mode d'attaque des oxydes de fer qui représentent les composés chimiques jouant un rôle primordial dans le cuirassement et l'induration des sols latéritiques et aussi les performances géotechniques.

Trois textures ont été déterminées à savoir : la texture à attaque ferrugineuse isolée, la texture à attaque ferrugineuse diffuse et la texture à oolithes. Les éléments chimiques tels que les oxydes de fer, la kaolinite et le quartz sont présents dans toutes les textures mais leur disposition diffère d'une texture à l'autre. Les différentes phases minérales contenues dans ces sols ont été évaluées par les analyses DRX aussi bien qualitativement que quantitativement.

Les échantillons provenant de l'ensemble des sites ont en grandes proportions les minéraux tels que le quartz, la kaolinite et les oxydes de fer. Les minéraux retrouvés en proportion relativement faible sont les oxydes de titane (anatase), la gibbsite et le microcline. Ces minéraux sont quantifiés et leurs teneurs varient dans de larges proportions d'un site à l'autre. Les analyses DRX révèlent que les échantillons latéritiques de proportion appréciable en oxydes de fer sont plus portants que ceux qui en contiennent moins.

De même, la recherche de corrélation entre paramètres physiques (portance) et composition minéralogique montre que la portance des échantillons de sol latéritique dépend beaucoup de la teneur en fer, plus particulièrement, la teneur en goethite. La forme non hydratée des oxydes de fer (hématite) joue un rôle secondaire dans la capacité portante des matériaux latéritiques car la corrélation n'est pas assez nette entre le critère de portance et la teneur en hématite. L'étude indique également que les échantillons de teneur élevée en oxydes de titane (anatase) sont plus portants. En effet, la présence de titane (métal lourd), lorsqu'elle est significative, participe notablement à une forte densification des sols latéritiques. Aussi, les échantillons de teneur élevée en kaolinite sont peu portants. Cette tendance est confirmée par la faible portance des échantillons de Dosso, Ouallam et Fillingué qui contiennent une teneur appréciable en kaolinite. Les échantillons de Say, de teneur élevée en oxydes de fer et de structure oolithique ne sont pas aussi portants que ceux de Tillabéry et de Guéchémé. Cela s'explique par leur D_{max} élevé et la quantité appréciable de quartz.

Parmi les échantillons soumis aux analyses minéralogiques, certains contiennent des variétés d'oxydes de fer non clairement discriminées. Les analyses MEB et microalyses X couplées à la spectrométrie RAMAN sur les échantillons latéritiques et certaines zones identifiées au microscope optique ont permis de différencier la goethite et l'hématite. Ainsi, nous constatons que l'hématite est majoritairement présente dans les échantillons à attaque ferrugineuse isolée alors que les échantillons de texture à attaque ferrugineuse diffuse et ceux à texture oolithique comportant des cercles ovoïdes tangents et concentriques d'oxydes de fer sont principalement constitués de goethite. Il a été constaté par le biais des analyses chimiques que les sols à texture oolithique et à attaque ferrugineuse diffuse présentent un ratio S/R faible, donc fortement latéritisés car la teneur en oxydes de fer est élevée et celle en silice faible. Pour ces échantillons, la silice a été fortement lessivée et évacuée hors du profil latéritique, ce qui accentue l'accumulation des oxydes de fer dans l'horizon B.

- **Amélioration et stabilisation des sols latéritiques**

Les sols latéritiques utilisés en construction routière présentent parfois des propriétés géotechniques largement en dessous des valeurs minimales requises. Ceci invalide leur utilisation en construction routière. Ces catégories de sol ont été retrouvées sur les échantillons latéritiques des sols de Dosso, Fillingué et Ouallam. Les expériences menées sur ces sols dans le but d'améliorer leurs caractéristiques géotechniques ont permis de les rendre utilisables en construction routière, en tout cas au moins en couche de fondation. Les échantillons de Dosso de portance naturellement faible ont été largement améliorés par l'ajout de 15% de nodules concassés. Cette amélioration s'explique par la mise en place d'une structure filamentaire complexe d'oxydes de fer. Les nodules latéritiques de forte teneur en oxydes de fer (hématite et goethite) et en kaolinite à cœur jouent un rôle stabilisant sur la fraction fine de la matrice existante. Les nodules broyés densifient le mélange (diminution des vides) et augmentent la portance du sol latéritique par un apport en kaolinite contenue à l'intérieur des nodules. L'apport en nodules concassés a également permis de réduire le gonflement linéaire du matériau naturel de teneur en argile initialement élevée.

Le traitement des sols latéritiques au ciment et à la chaux ont quasiment fait ressortir des similitudes au niveau des différentes réactions chimiques qui se produisent pendant l'hydratation et la prise. L'ajout de ces produits a permis d'améliorer les sols latéritiques par la synthèse de nouveaux composés chimiques tels que les silicates et aluminates de calcium hydratés, le gel d'ettringite, la calcite, etc. qui ont eu pour rôle de consolider le mélange et relier les particules de sol en stabilisant la fraction argileuse et en améliorant les performances mécaniques.

Dans le cas des sols traité à la chaux, le traitement a occasionné la formation d'une fine pellicule constituée de CSH, CAH, CASH, et de gel d'ettringite. Cette pellicule couvre et relie les différents faciès du sol en leur conférant une bonne cohésion assurant ainsi l'amélioration de leurs caractéristiques mécaniques.

- **Synthèse de la caractérisation géotechnique, mécanique, chimique et minéralogique**

À l'issu de ce travail, les points suivants peuvent être retenus :

- Les facteurs environnementaux tels que la pluviométrie, la végétation, le mode de drainage, etc., n'ont pas permis une discrimination significative des sols latéritiques vis-à-vis du critère de portance. Ceci est attribué à l'échelle de l'échantillonnage (faible distance entre les sites d'étude).

- Les caractéristiques géotechniques et mécaniques des graveleux latéritiques sont fortement conditionnées par la texture et le mode d'attaque des oxydes de fer ainsi que leur disposition au sein de la matrice. Les sols latéritiques de texture à attaques ferrugineuses diffuses et à texture oolithique offrent une meilleure portance que ceux de texture à attaques ferrugineuses isolées. Dans le cas de l'attaque diffuse et la texture à oolithes, les oxydes de fer imprègnent, enrobent et cimentent uniformément l'ensemble des faciès alors qu'ils sont épars et isolés dans le cas des échantillons de texture à attaques ferrugineuses isolées.

- Les sols latéritiques contenant d'importantes quantités de quartz et de kaolinite sont moins portants que ceux qui en contiennent moins.

- Les sols latéritiques ayant un ratio S/R faible (c'est-à-dire le rapport de la silice par les sesquioxydes) ont un indice portant plus élevé.

- Les sols latéritiques contenant de la goethite comme oxydes de fer présentent de meilleures performances mécaniques que ceux qui contiennent l'hématite.

- Les analyses minéralogiques indiquent que les sols contenant d'importantes quantités d'oxydes de fer ont de meilleures caractéristiques de portance.

- Les caractéristiques granulométriques représentent des critères importants dans le conditionnement de la portance des sols latéritiques par rapport aux critères de consistance.

- Les sols de bonne portance possèdent des éléments moins grossiers, une teneur en fines de l'ordre de 12%, un indice de plasticité inférieur à 15, un faible indice de vides, une faible compressibilité, une bonne résistance au cisaillement et un comportement dilatant au cours du cisaillement. La microstructure présente une faible porosité.

PERSPECTIVES

La route, seul mode de transport assurant la diffusion des échanges dans les provinces les plus reculées, constitue partout un facteur essentiel de développement économique et social. L'impact de la route sur l'économie et le mode de vie des populations est de nos jours considérable. Les réclamations des transporteurs et des villages isolés par une coupure occasionnelle sont heureusement là pour en rappeler de temps en temps l'importance. Et il est certain que la ruine plus ou moins prononcée des réseaux, ou même simplement une augmentation sensible des frais de transport résultant de la dégradation des conditions d'entretien s'accompagnerait de profondes régressions économiques auxquelles s'ajouteraient les effets non chiffrables du relâchement des liens administratifs, sociaux et politiques que la route a puissamment contribué à tisser.

Parfois, les routes à peine achevées, leur dégradation est amorcée sous les effets conjugués du trafic et des éléments naturels. Sous les climats tropicaux le processus de dégradation prend souvent une allure extrêmement rapide surtout pour les routes non revêtues. Seule une surveillance régulière permettrait de contenir ce processus de dégradation dans une limite raisonnable.

À l'heure où l'énergie devient de plus en plus onéreuse, les laboratoires des travaux publics des pays de l'Afrique doivent faire preuve d'imagination et concevoir l'utilisation des matériaux locaux dans les meilleures conditions afin de minimiser le coût de construction des chaussées tout en restant dans les limites de sécurité acceptable.

L'utilisation des matériaux locaux suppose donc que les ressources disponibles soient connues, aussi faut-il insister à la fois sur l'importance des inventaires à réaliser au moins de part et d'autre des axes de développement du pays et sur la nécessité des études régionales sur le terrain.

Face à tous ces défis, une caractérisation aussi bien géotechnique, mécanique, chimique et minéralogique des graveleux latéritiques s'impose. À travers cette étude, nous réalisons la complexité de ces matériaux et la variabilité de leurs caractéristiques mécaniques liée à de nombreux facteurs. La prise en compte des facteurs du milieu s'avère aussi très important. Notre étude, réalisée à l'échelle d'une zone très limitée n'a pas permis de dégager clairement l'impact de la variabilité des facteurs génétiques et du milieu environnemental des gisements latéritiques.

Néanmoins, de nombreuses études montrent que ces facteurs impactent considérablement les propriétés des sols latéritiques. Leur caractérisation sur une échelle plus grande doit par conséquent se faire avec prise en compte de ces facteurs.

Ces travaux peuvent fournir à titre indicatif des éléments de réponse à certaines interrogations vis-à-vis de la variabilité des propriétés mécaniques de ces sols.

Une étude des graveleux latéritiques sur une plus grande échelle (territoire nigérien par exemple) aiderait à parvenir à des résultats plus significatifs incluant à la fois des informations sur l'aspect géotechnique, mécanique, chimique, minéralogique et in-situ. C'est à ce moment que la présente thèse trouvera toute son importance puisqu'elle contient déjà une méthodologie assez représentative et des résultats de grande importance concernant la minéralogie et la chimie des matériaux latéritiques.

Aussi, comme cela a été dit plus haut, l'utilisation des nodules latéritiques pour l'amélioration des propriétés mécaniques des latérites mérite une attention toute particulière. La plupart des techniques d'amélioration des propriétés géotechniques des graveleux latéritiques concernent l'utilisation de la chaux ou du ciment. Cependant, la cherté de l'utilisation de tels procédés doit motiver les experts à la mise en place d'une technique d'amélioration incluant des ressources naturelles afin d'aspirer à une retombée économique substantielle. En outre, l'amélioration des sols latéritiques par l'utilisation de nodules impacterait moins l'environnement que les techniques d'amélioration à la chaux et au ciment.

Au cas où l'amélioration des sols latéritiques nécessiterait de grandes quantités de nodules latéritiques, il serait bien de mettre en place des techniques d'amélioration mixtes nodules-ciment ou nodules-chaux. Ainsi, la quantité de nodules à rajouter serait réduite. L'un dans l'autre, le traitement mixte constituerait un meilleur compromis qui permettrait de minimiser les taux de nodules et / ou de ciment et de chaux, et d'obtenir conséquemment une assise de chaussée aux performances mécaniques intéressantes.

Annexes

Annexes

Annexe 2-1

Analyse DRX

Les longueurs d'onde des rayons X sont comparables aux distances interréticulaires *d* du réseau cristallin, de l'ordre de l'Angström (Broll, 1996). L'analyse cristalline des solides repose sur l'émission d'un rayonnement cohérent (i.e. de même longueur d'onde) dans toutes les directions (diffusion de Rayleigh) lorsqu'un faisceau monochromatique et parallèle de rayons X interagit avec la matière. L'organisation des atomes en réseau cristallin entraîne une interférence de ces ondes cohérentes, d'où le phénomène de diffraction des rayons X associé à l'interférence des ondes diffusées par chaque onde. Les directions dans lesquelles les interférences sont constructives, appelées diffraction, sont régies par une loi empirique appelée la loi de Bragg :

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

Equation A-2-1-1: Équation de la loi de Bragg.

Où :

N : est l'ordre de diffraction (nombre entier),
λ : la longueur d'onde des rayons X,
θ : l'angle d'incidence des rayons X
d : la distance interréticulaire entre deux plans cristallographiques.

La Figure A-2-1-1 justifie géométriquement la loi de Bragg : les interférences sont maximales pour la déviation 2θ (dite pic de diffraction) pour laquelle le chemin supplémentaire $2d\sin\theta$ parcouru par le rayon qui touche le plan inférieur introduit un déphasage multiple de 2π et est donc multiple de λ. La longueur d'onde λ est fixée, θ ou plutôt 2θ, est lu / mesuré.

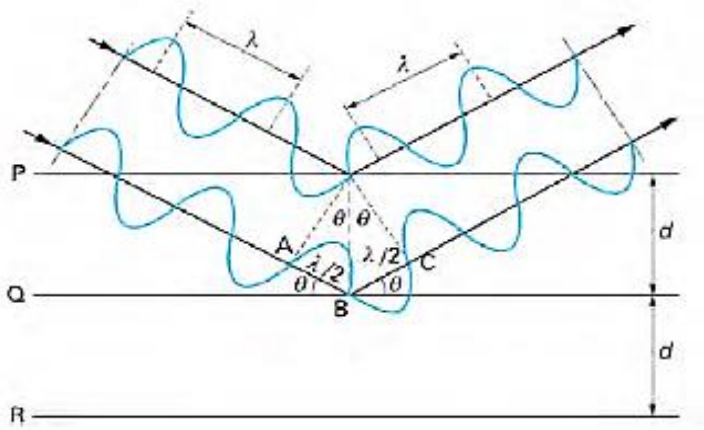


Figure A-2-1-1: Illustration schématique de la loi de Bragg (Equation A-2-1-1) Tiré de Broll (1996).

La Figure A-2-1-2 illustre le principe d'un diffractomètre θ - 2θ. Le faisceau de rayons X issu du tube à rayons X (anticathodes de cuivre) est focalisé par l'échantillon s'il existe des plans interréticulaires d'espacement *d* correspondant à l'angle θ formé par le faisceau incident et l'échantillon (pour un d fixé il n'existe qu'un θ vérifiant la loi de Bragg) (Broll, 1996).

Ce rayonnement diffracté converge en un point situé sur le cercle de focalisation. Un balayage de l'angle de diffraction est obtenu à l'aide d'un goniomètre nommé θ - 2θ où l'échantillon effectue une rotation avec un mouvement uniforme de vitesse angulaire θ, tandis que le détecteur avec sa fente réceptrice placée sur le point de focalisation tourne autour de l'échantillon avec une vitesse 2θ (Broll, 1996).

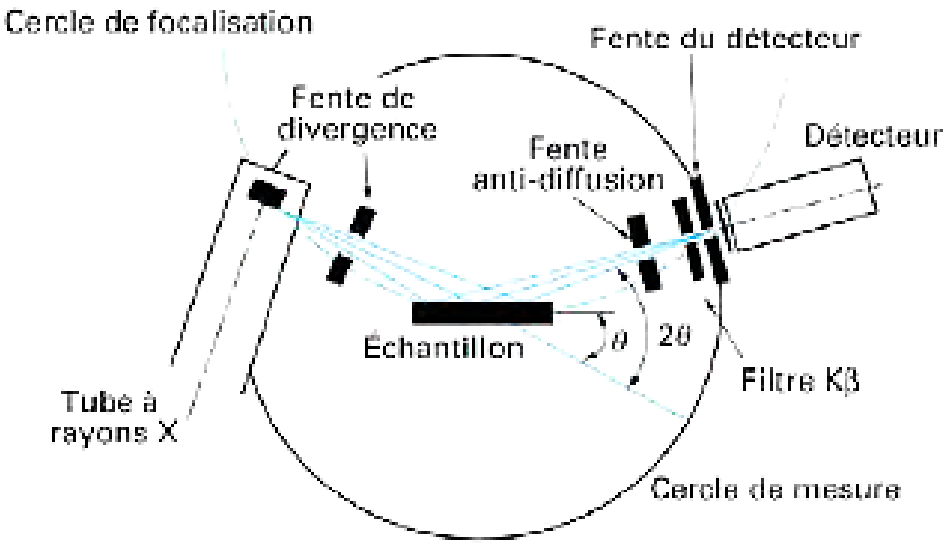


Figure A-2-1-2: Illustration schématique d'un diffractomètre à poudre θ - 2θ. Tiré de Broll (1996).

Annexe 2-2

Microscopie électronique

La microscopie électronique est basée sur les interactions électrons / matière. Utilisés en mode électrons secondaires, le MEB donne accès à la topographie de surface du matériau. Le principe est basé sur la détection des électrons secondaires émis par le matériau sur l'impact d'un fin pinceau (quelques nanomètres de diamètre) d'électrons primaires accélérés par une tension réglable (0,1 à 30kV) et balayant la surface observée. La Figure A-2-2-1 présente schématiquement les principales composantes d'un MEB et son principe de fonctionnement. Le MEB est essentiellement constitué de deux parties : la colonne générant le faisceau d'électrons primaires et la chambre de mesure contenant l'échantillon et les détecteurs.

Dans la colonne, un canon à électrons extrait les électrons d'un matériau conducteur vers le vide où ils sont accélérés par un champ électrique. On distingue deux types de canon selon le principe mis en œuvre : émission thermo-ionique ou émission de champ. Quel que soit le type de cathode (canon), le faisceau d'électrons produit est réduit dans la colonne à l'aide de lentilles électroniques qui le transforment en une sonde très fine balayée sur l'échantillon grâce à des bobines disposées selon deux axes perpendiculaires au faisceau (Robin, 1998).

Dans la chambre, différents types d'interactions électrons / matière peuvent être exploités à l'aide de détecteurs dédiés. Les interactions élastiques ou inélastiques entre les électrons primaires du faisceau incident de l'échantillon (le volume d'interaction varie entre 0,01 et 100 μm^3 selon la densité du matériau et la tension d'accélération) conduisent à l'émission d'électrons d'énergies différentes, de photons X ou de photons visibles qui fournissent des informations complémentaires sur la nature de l'échantillon (Lelabousse, 2012). Par exemple, la détection (par un cristal semi-conducteur) des électrons rétrodiffusés (résultant de chocs élastiques entre les électrons incidents et le noyau des atomes de l'échantillon) dont le rendement d'émission dépend du numéro atomique Z des atomes du matériau, fournit une image en contraste chimique de la surface du matériau. Dans ce travail, nous avons utilisé des images de contraste de phase / chimique mais aussi des images de contraste topographique de surface de l'échantillon formées en détectant les électrons secondaires. Rappelons que les électrons secondaires sont arrachés au matériau par les électrons incidents et par les électrons rétrodiffusés. Lors de l'interaction entre (1) un électron (primaire et / ou rétrodiffusé) et (2) un atome du matériau, le premier cède une partie de son énergie à un électron (peu lié) de la bande de conduction ou à un électron (lié) interne de l'atome, provoquant une ionisation par éjection de ce dernier (Lelabousse, 2012). On appelle électron secondaire cet électron éjecté. Dans le cas de l'éjection d'un électron interne, on a relaxation, i.e. émission d'un photon X. Lié à leur faible énergie (50eV à titre indicatif), les électrons secondaires doivent être émis très près de la surface de l'échantillon pour être détectés. Les électrons secondaires sont sensibles à la topographie de l'échantillon (e.g. le rendement d'émission est fonction de l'angle du faisceau incident / surface analysée). Ils donnent accès à des images de contraste topographique de la surface du matériau de très bon rapport signal/bruit.

La résolution permise avec les électrons secondaires est meilleure que celle envisageable avec les électrons rétrodiffusés (de l'ordre du micromètre, ou du dixième de micromètre pour ces derniers).

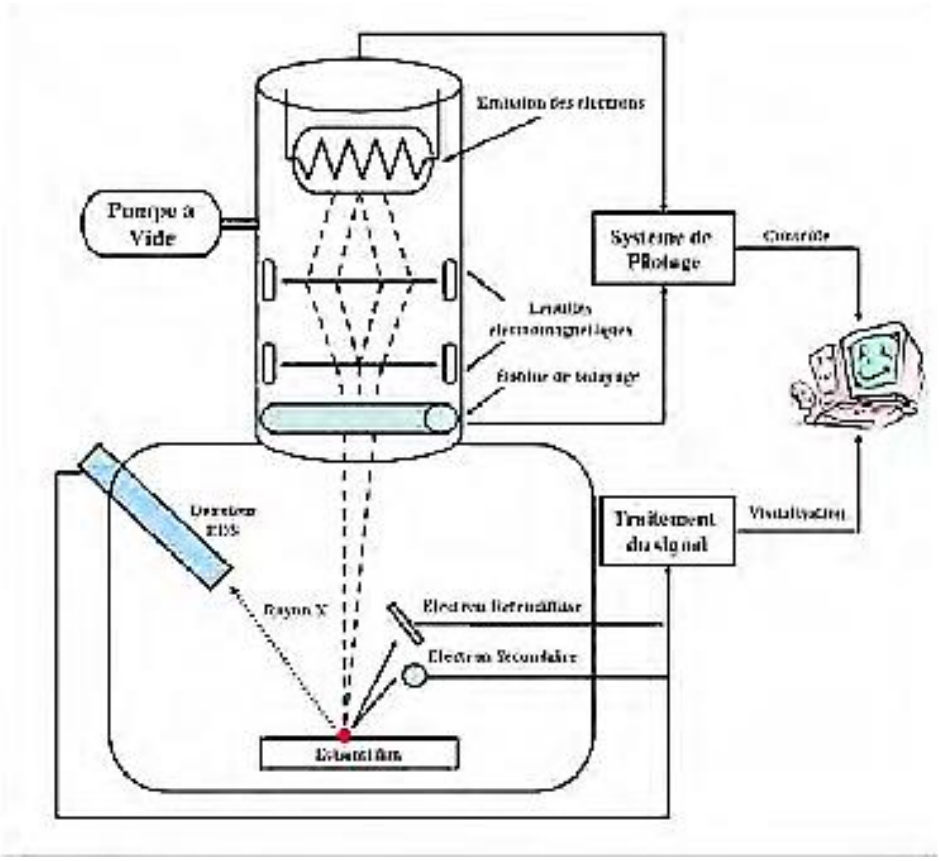


Figure A-2-2-1: Vue en coupe d'un Microscope Électronique à Balayage (MEB) travaillant par réflexion.

Annexe 2-3

Spectrométrie RAMAN

Le principe de la méthode est basé sur l'émission d'un faisceau laser de longueurs d'onde spécifiques sur un échantillon de sol latéritique. L'échantillon est soumis à un rayonnement électromagnétique interagissant avec la matière et donnant une information quantitative sur la nature de cette dynamique vibrationnelle (Barbillat et al., 1999). Une large partie des photons constituant la radiation incidente est réfléchie ou absorbée.

Dans une proportion bien moindre, une partie du faisceau incident est diffusée dans toutes les directions liées à la polarisation des molécules. Le rayonnement diffusé comporte (1) une composante majeure de même fréquence ν_0 que le rayonnement excitateur correspondant à une diffusion élastique (diffusion Rayleigh) et (2) une composante beaucoup plus faible (moins d'un millième des photons diffusés) diffusée de façon inélastique aux fréquences $\nu_0 + \nu_v$ (diffusion anti-Stokes) et $\nu_0 - \nu_v$ (diffusion Stokes).

Où ν_v représente les fréquences de vibration des molécules actives en Raman. C'est cette diffusion inélastique qu'on appelle effet Raman (Barbillat et al., 1999).

Pour observer l'effet Raman, l'échantillon est excité par une lumière monochromatique de fréquence / longueur d'onde connue provenant d'une source laser. Le spectre Raman obtenu, contient diverses informations (Lelabousse, 2012). Chaque raie ou bande peut être ainsi caractérisée par exemple par sa position dans le spectre qu'on peut relier à la fréquence d'un mode de vibration d'une molécule / groupement d'atomes ou par son intensité liée au nombre de molécules diffusantes ainsi qu'au mode de vibration considéré (Barbillat et al., 1999). Il est d'usage d'utiliser non pas la fréquence de vibration des photons diffusés ($\nu_0 + \nu_v$ et $\nu_0 - \nu_v$) mais une grandeur qui lui est proportionnelle, le nombre d'ondes (fréquence normalisée par la vitesse de la lumière $c=3.10^8$ m/s) qu'on exprime classiquement en cm^{-1}. De plus, on préfère utiliser une grandeur caractéristique de la molécule ν.v/c (indépendante du choix de la radiation excitatrice). C'est cette grandeur égale à l'écart entre la raie Raman et la raie Rayleigh qu'on fait apparaître sur les spectres pour les raies Stokes (Lelabousse, 2012).

Annexe 2-4

Microanalyse X

Du point de vue technologique, le spectromètre de rayons X à dispersion de longueur d'onde (WDS) de la microsonde de Castaing a une partie mécanique constituée d'un cristal monochromateur et d'un compteur proportionnel à flux gazeux (Ruste, 2009b). Le rôle du cristal monochromateur est de filtrer le faisceau incident polychromatique de rayons X (résultant de l'interaction entre le faisceau électronique primaire et l'échantillon) pour en extraire un rayonnement caractéristique relatif à un élément donné de l'échantillon. Ce filtrage s'obtient par diffraction des rayons X par une famille de plans cristallographiques du monochromateur. Pour un angle θ (connu) du faisceau de rayons X et une distance interréticulaire d (connue), seuls les rayonnements de longueur d'onde λ vérifiant la loi de Bragg sont diffusés vers le compteur proportionnel gazeux (Ruste, 2009b). La longueur d'onde λ étant caractéristique des transitions électroniques de l'atome ionisé revenant à son état fondamental, on identifie ainsi la nature des atomes composant l'échantillon.

La spectrométrie à rayons X à sélection d'énergie (EDS) utilise quant à elle un détecteur solide (une diode semi conductrice) (Ruste, 2009b). Par rapport au compteur proportionnel à flux gazeux, les différences résident avant tout dans le mécanisme physique de base : création de paires trou-électrons *vs*. ionisations secondaires pour le WDS. La résolution spectrale d'un spectromètre (de l'ordre de 130eV) est toujours bien moins bonne que celle d'un spectromètre WDS (de l'ordre de quelques eV).

La détermination des pourcentages des éléments par microanalyse X est une opération possible mais qui exige des précautions. Il existe plusieurs méthodes pour quantifier les éléments minéraux retrouvés sur un spectre EDS.

Nous décrirons ici la méthode ZAF (« Z » pour le numéro atomique, « A » pour l'absorption et « F » pour la fluorescence X) sans étalons qui a été adoptée comme technique de quantification des éléments atomiques. Cette méthode permet de tenir compte de l'influence du numéro atomique des éléments sur l'efficacité de l'excitation et de la détection (facteur Z), de la probabilité qu'un rayon X soit absorbé avant même d'être détecté (facteur A) et de la contribution des rayons X émis d'un élément suite à l'absorption d'un rayon X émis par un autre élément (fluorescence secondaire, facteur F).

Les résultats déterminés par ce moyen ne peuvent pas être considérés comme sûrs même si dans la plupart des cas la précision est de bonne qualité.

La quantification consiste à établir une relation entre l'intensité du signal X émis par l'élément et sa concentration. Dans un échantillon, les intensités élémentaires sont seulement grossièrement proportionnelles aux concentrations élémentaires, car elles sont significativement affectées par les effets de matrice. Plusieurs procédures de corrections quantitatives ont été élaborées. La méthode «ZAF–particule» est la quantification inverse par les simulations de Monte Carlo.

Les concentrations élémentaires dites apparentes sont déterminées à partir des intensités relativement aux standards, selon la première approximation de Castaing (Ruste, 2009b) :

$$C_i = \frac{I_i}{I_{(i)}} \times C_{(i)} = K_i \times C_{(i)}$$

Equation A-2-4-1: Équation de la loi de Bragg.

Où C_i et $C_{(i)}$ sont les concentrations massiques de l'élément i respectivement dans l'échantillon inconnu et dans le standard.

La surface des pics est proportionnelle (entre autre) à la quantité de l'atome qui produit la raie. La quantification consiste donc à mesurer la surface des pics que l'on a préalablement identifiés sur le spectre, à leur attribuer un coefficient et alors on peut faire le calcul des pourcentages respectifs.

Il y a malheureusement en plus de la quantité beaucoup d'autres paramètres (hormis ceux liés au matériel) qui font varier la surface des pics et notamment: la tension d'accélération. Les raies d'un élément peuvent être plus ou moins absorbées par les autres éléments qui sont dans le volume analysé. Les programmes de calcul quantitatif sont élaborés pour des éléments qui seraient répartis de façon homogène et sont élaborés pour des surfaces planes, polies.

En pratique, pour pouvoir déterminer la surface des pics il faut effectuer la déconvolution du spectre. Cette opération consiste à faire suivre les contours du spectre par une courbe mathématique sur laquelle on pourra effectuer les calculs désirés. En fait il y a deux déconvolutions à faire car il faut déconvoluer le spectre continu qui ne sert pas pour le calcul quantitatif et la déconvolution sur les spectres.

Finalement, il faudra effectuer une correction sur les surfaces mesurées de manière à pouvoir prendre en compte les différentes interactions physiques qui interviennent dans le matériau.

Annexe 3-1

Résultats globaux et données statistiques de l'analyse granulométrique

Torodi

	Réf. Éch.	w%	D_{max} (mm)	C5mm	C2mm	C0,5mm	C80µm	I.f	Cu	Cc
Torodi	Tor-1	6,90	43,40	35,01	27,09	24,47	14,23	0,00	144,00	6,18
	Tor-2	3,90	45,30	44,23	29,14	19,10	13,65	0,00	112,00	5,00
	Tor-3	4,60	38,00	46,83	32,36	20,58	11,22	0,00	100,00	5,00
	Tor-4	7,20	45,20	58,07	46,80	36,32	15,13	0,00	145,00	2,30
	Tor-5	8,10	53,60	52,12	38,95	26,48	13,64	0,00	118,00	3,50
	Tor-6	9,50	43,20	37,87	30,25	22,51	11,33	0,00	157,00	5,00
	Tor-7	5,15	58,30	31,52	22,64	18,66	13,22	0,00	300,00	7,00
	Réf. Éch.	w%	D_{max} (mm)	%5 mm	%2 mm	%0,5 mm	%80µm	I.f	Cu	Cc
	Max	9,5	58,3	58,1	46,8	36,3	15,1	0,0	300,0	7,0
	Min	3,9	38,0	31,5	22,6	18,7	11,2	0,0	100,0	2,3
	Moy	6,5	46,7	43,7	32,5	24,0	13,2	0,0	153,7	4,9
	ET	1,87	6,38	8,83	7,45	5,66	1,34	0,00	62,66	1,45

Tillabéry

	Réf. Éch.	w%	D_{max} (mm)	%5 mm	%2 mm	%0,5 mm	%80µm	I.f	Cu	Cc
Tillabéry	Til-1	10,50	34,80	34,41	22,00	19,62	12,92	0,00	143,00	6,11
	Til-2	10,80	33,20	41,30	28,60	19,80	12,60	0,00	128,00	4,12
	Til-3	11,20	34,80	33,90	22,40	19,60	11,00	0,00	132,00	5,20
	Til-4	9,80	31,40	33,80	22,50	18,10	13,50	0,00	135,00	4,70
	Til-5	9,60	32,30	55,10	31,60	19,80	13,10	0,00	122,00	5,12
	Til-6	10,20	32,00	42,80	31,10	18,40	12,26	0,00	123,00	8,00
	Til-7	11,50	34,80	57,80	34,80	21,70	14,20	0,00	136,00	7,08
	Til-8	10,40	36,10	55,30	36,20	23,50	13,50	0,00	115,00	3,20
	Réf. Éch.	w%	D_{max} (mm)	%5 mm	%2 mm	%0,5 mm	%80µm	I.f	Cu	Cc
	Max	11,5	36,1	57,8	36,2	23,5	14,2	0,0	143,0	8,0
	Min	9,6	31,4	33,8	22,0	18,1	11,0	0,0	115,0	3,2
	Moy	10,5	33,7	44,3	28,7	20,1	12,9	0,0	129,3	5,4
	ET	0,61	1,57	9,67	5,37	1,65	0,91	0,00	8,45	1,46

Ouallam

	Réf. Éch.	w%	D_{max} (mm)	%5 mm	%2 mm	%0,5 mm	%80µm	I.f	Cu	Cc
Ouallam	**Oual-1**	6,13	54,60	44,30	38,70	33,00	16,80	0,00	294,00	0,11
	Oual-2	5,94	53,20	50,00	33,70	30,40	17,40	0,00	308,00	0,59
	Oual-3	4,92	46,70	52,80	31,50	24,60	16,60	0,00	293,00	7,77
	Oual-4	5,30	54,60	46,90	37,80	32,40	17,90	0,00	260,00	12,06
	Oual-5	4,63	42,80	66,80	56,40	52,40	15,60	0,00	289,00	0,15
	Oual-6	4,38	57,30	54,40	39,30	32,80	18,90	0,00	265,00	0,34
	Oual-7	6,84	46,90	63,30	46,50	40,70	20,03	0,00	285,60	0,44
	Réf. Éch.	**w%**	**D_{max} (mm)**	**%5 mm**	**%2 mm**	**%0,5 mm**	**%80µm**	**I.f**	**Cu**	**Cc**
	Max	6,8	57,3	66,8	56,4	52,4	20,0	0,0	308,0	12,1
	Min	4,4	42,8	44,3	31,5	24,6	15,6	0,0	260,0	0,1
	Moy	5,4	50,9	54,1	40,6	35,2	17,6	0,0	284,9	3,1
	ET	0,82	4,97	7,68	7,82	8,28	1,38	0,00	15,65	4,48

Say

	Réf. Éch.	w%	D_{max} (mm)	%5 mm	%2 mm	%0,5 mm	%80µm	I.f	Cu	Cc
Say	**Say-1**	4,01	39,12	42,70	37,40	35,10	10,11	0,00	125,00	2,10
	Say-2	3,53	32,30	35,40	27,70	25,30	10,90	0,00	150,00	3,00
	Say-3	4,67	34,60	34,40	27,80	24,60	11,20	0,00	144,00	3,56
	Say-4	3,37	27,30	38,80	30,30	24,10	11,00	0,00	143,25	3,85
	Say-5	3,68	31,20	32,50	27,10	24,20	10,10	0,00	133,30	3,88
	Say-6	3,03	33,20	30,90	20,40	15,40	9,20	0,00	135,00	5,11
	Say-7	3,82	33,60	26,80	19,90	17,90	9,70	0,00	129,56	4,18
	Réf. Éch.	**w%**	**D_{max} (mm)**	**%5 mm**	**%2 mm**	**%0,5 mm**	**%80µm**	**I.f**	**Cu**	**Cc**
	Max	4,7	39,1	42,7	37,4	35,1	11,2	0,0	150,0	5,1
	Min	3,0	27,3	26,8	19,9	15,4	9,2	0,0	125,0	2,1
	Moy	3,7	33,0	34,5	27,2	23,8	10,3	0,0	137,2	3,7
	ET	0,48	3,31	4,82	5,53	5,81	0,69	0,00	8,23	0,87

Fillingué

	Réf. Éch.	w%	D_{max} (mm)	%5 mm	%2 mm	%0,5 mm	%80µm	I.f	Cu	Cc
Fillingué	Fil-1	5,61	56,70	44,80	36,90	32,00	25,90	0,00	400,00	0,44
	Fil-2	6,37	52,30	62,90	56,00	50,40	27,80	0,00	530,00	0,85
	Fil-3	5,00	55,50	52,60	48,80	42,40	27,10	0,00	400,00	0,06
	Fil-4	7,82	53,40	44,50	36,90	32,30	25,10	0,00	250,00	0,40
	Fil-5	6,26	43,50	42,50	30,90	26,80	28,40	0,00	171,00	3,85
	Fil-6	8,05	46,90	56,30	48,30	43,40	29,20	0,00	325,00	0,17
	Fil-7	7,17	56,40	44,30	34,30	29,90	24,30	0,00	280,00	0,36
	Fil-8	6,02	56,80	49,10	43,00	39,80	21,90	0,00	220,00	0,09
	Fil-9	6,38	54,30	48,80	38,70	33,40	23,60	0,00	160,00	0,36
	Fil-10	6,89	63,60	49,20	41,50	36,60	27,20	0,00	250,00	0,22
	Fil-11	7,69	52,00	61,10	49,30	44,20	23,40	0,00	240,00	0,27
	Fil-12	6,70	53,21	43,30	31,90	28,20	24,52	0,00	200,00	2,00
	Fil-13	8,08	55,70	40,50	31,80	28,20	25,90	0,00	400,00	2,00
	Fil-14	6,73	58,90	49,00	41,60	37,30	26,20	0,00	143,00	0,13
	Fil-15	8,10	54,30	45,80	38,60	34,10	28,30	0,00	400,00	0,25
	Fil-16	9,52	53,60	39,40	33,60	29,10	26,40	0,00	500,00	3,45

Réf. Éch.	w%	D_{max} (mm)	%5 mm	%2 mm	%0,5 mm	%80µm	I.f	Cu	Cc
Max	9,5	63,6	62,9	56,0	50,4	29,2	0,0	530,0	3,9
Min	5,0	43,5	39,4	30,9	26,8	21,9	0,0	143,0	0,1
Moy	7,0	54,2	48,4	40,1	35,5	26,0	0,0	304,3	0,9
ET	1,10	4,41	6,66	7,13	6,68	1,98	0,00	117,13	1,18

Dosso

	Réf. Éch.	w%	D_{max} (mm)	%5 mm	%2 mm	%0,5 mm	%80µm	I.f	Cu	Cc
Dosso	Dos-1	9,18	43,60	42,70	37,40	35,10	11,10	0,00	433,00	0,15
	Dos-2	8,53	42,30	35,40	37,75	25,30	10,90	0,00	138,00	7,00
	Dos-3	7,67	44,60	34,40	27,80	24,60	11,20	0,00	150,00	9,00
	Dos-4	8,37	49,60	38,80	30,30	24,10	11,00	0,00	150,00	4,17
	Dos-5	9,38	52,40	32,50	36,10	24,20	10,10	0,00	225,00	10,03
	Dos-6	9,03	42,30	30,90	25,60	15,40	12,20	0,00	75,00	8,00
	Dos-7	8,82	43,60	26,80	39,90	17,90	13,70	0,00	20,00	2,00

Réf. Éch.	w%	D_{max} (mm)	%5 mm	%2 mm	%0,5 mm	%80µm	I.f	Cu	Cc
Max	9,4	52,4	42,7	39,9	35,1	13,7	0,0	433,0	10,0
Min	7,7	42,3	26,8	25,6	15,4	10,1	0,0	20,0	0,2
Moy	8,7	45,5	34,5	33,6	23,8	11,5	0,0	170,1	5,8
ET	0,54	3,64	4,82	5,16	5,81	1,08	0,00	122,79	3,45

Guéchémé

	Réf. Éch.	w%	D_{max} (mm)	%5 mm	%2 mm	%0,5 mm	%80µm	I.f	Cu	Cc
Guéchémé	Gue-1	9,80	32,30	35,00	26,00	19,00	12,00	0,00	116,00	5,36
	Gue-2	9,60	34,50	43,00	33,00	25,00	11,80	0,00	100,00	1,44
	Gue-3	8,60	33,20	42,00	36,00	33,00	11,00	0,00	150,00	0,09
	Gue-4	8,91	34,40	41,00	35,00	33,00	13,00	0,00	189,00	0,14
	Gue-5	7,40	36,30	43,00	36,00	33,00	12,08	0,00	144,00	0,07
	Gue-6	9,30	39,70	39,00	27,00	21,00	11,96	0,00	100,00	9,00
	Gue-7	10,30	33,30	39,00	29,00	26,00	13,00	0,00	138,00	2,46
	Gue-8	9,70	35,11	38,00	30,00	28,00	13,00	0,00	171,00	4,76
	Réf. Éch.	w%	D_{max} (mm)	%5 mm	%2 mm	%0,5 mm	%80µm	I.f	Cu	Cc
	Max	10,3	39,7	43,0	36,0	33,0	13,0	0,0	189,0	9,0
	Min	7,4	32,3	35,0	26,0	19,0	11,0	0,0	100,0	0,1
	Moy	9,2	34,9	40,0	31,5	27,3	12,2	0,0	138,5	2,9
	ET	0,84	2,17	2,60	3,77	5,17	0,67	0,00	30,08	3,01

Annexe 3-2

Résultats globaux et données statistiques des limites d'Atterberg

Torodi

	Réf. Éch.	W_L (%)	W_p (%)	I_p	I_c
Torodi	Tor-1	32,10	16,92	15,18	1,66
	Tor-2	23,80	15,69	8,11	2,45
	Tor-3	29,60	15,59	14,01	1,78
	Tor-4	26,20	15,33	10,87	1,75
	Tor-5	29,20	13,89	15,31	1,38
	Tor-6	33,70	20,26	13,44	1,80
	Tor-7	30,80	17,28	13,52	1,90
	Réf. Éch.	W_L (%)	W_p (%)	I_p	I_c
	Max	33,7	20,3	15,3	1,2
	Min	23,8	13,9	8,1	1,2
	Moy	29,3	16,4	12,9	1,1
	ET	3,15	1,87	2,39	1,36

Tillabéry

	Réf. Éch.	W_L (%)	W_p (%)	I_p	I_c
Tillabéry	Til-1	27,30	13,79	13,51	1,24
	Til-2	31,20	14,60	16,60	1,23
	Til-3	29,60	13,32	16,28	1,13
	Til-4	30,28	15,20	15,08	1,36
	Til-5	28,60	12,90	15,70	1,21
	Til-6	29,40	11,60	17,80	1,08
	Til-7	27,90	13,30	14,60	1,12
	Til-8	28,40	12,40	16,00	1,13
	Réf. Éch.	W_L (%)	W_p (%)	I_p	I_c
	Max	31,2	15,2	17,8	1,4
	Min	27,3	11,6	13,5	1,1
	Moy	29,1	13,4	15,7	1,2
	ET	1,20	1,08	1,23	0,08

Ouallam

	Réf. Éch.	W_L (%)	W_p (%)	I_p	I_c
Ouallam	Oual-1	31,50	15,64	15,86	1,60
	Oual-2	23,70	11,94	11,76	1,51
	Oual-3	27,54	14,28	13,26	1,71
	Oual-4	30,10	14,68	15,42	1,61
	Oual-5	26,60	13,47	13,13	1,67
	Oual-6	22,40	10,65	11,75	1,53
	Oual-7	23,80	12,62	11,18	1,52
	Réf. Éch.	W_L (%)	W_p (%)	I_p	I_c
	Max	31,5	15,6	15,9	1,7
	Min	22,4	10,7	11,2	1,5
	Moy	26,5	13,3	13,2	1,6
	ET	3,18	1,59	1,70	0,07

Say

	Réf. Éch.	W_L (%)	W_p (%)	I_p	I_c
Say	Say-1	22,20	12,55	9,65	1,88
	Say-2	28,10	14,94	13,16	1,87
	Say-3	21,80	13,51	8,29	2,07
	Say-4	26,00	11,97	14,03	1,61
	Say-5	23,64	10,37	13,27	1,50
	Say-6	21,20	12,98	8,22	2,21
	Say-7	21,90	13,30	8,60	2,10
	Réf. Éch.	W_L (%)	W_p (%)	I_p	I_c
	Max	28,1	14,9	14,0	2,2
	Min	21,2	10,4	8,2	1,5
	Moy	23,5	12,8	10,75	1,9
	ET	2,39	1,31	2,43	0,24

Fillingué

	Réf. Éch.	W_L (%)	W_p (%)	I_p	I_c
Fillingué	Fil-1	23,10	12,23	10,87	1,61
	Fil-2	23,82	11,60	12,22	1,43
	Fil-3	30,10	14,16	15,94	1,57
	Fil-4	20,35	11,16	9,19	1,36
	Fil-5	24,31	12,08	12,23	1,48
	Fil-6	27,40	12,27	15,13	1,28
	Fil-7	24,81	11,63	13,18	1,34
	Fil-8	35,33	11,91	23,42	1,25
	Fil-9	26,35	10,68	15,67	1,27
	Fil-10	23,74	10,15	13,59	1,24
	Fil-11	25,20	11,30	13,90	1,26
	Fil-12	23,10	10,26	12,84	1,28
	Fil-13	26,75	11,94	14,81	1,26
	Fil-14	26,15	12,13	14,02	1,39
	Fil-15	25,36	11,73	13,63	1,27
	Fil-16	24,04	14,68	9,36	1,55
	Réf. Éch.	W_L (%)	W_p (%)	I_p	I_c
	Max	35,3	14,7	23,4	1,6
	Min	20,4	10,2	9,2	1,2
	Moy	25,6	11,9	13,8	1,4
	ET	3,28	1,16	3,16	0,12

Dosso

	Réf. Éch.	W_L (%)	W_p (%)	I_p	I_c
Dosso	Dos-1	15,20	9,55	5,65	1,07
	Dos-2	18,20	10,94	7,26	1,33
	Dos-3	21,74	11,15	10,59	1,33
	Dos-4	16,30	9,97	6,33	1,25
	Dos-5	16,00	10,26	5,74	1,15
	Dos-6	17,00	11,29	5,71	1,40
	Dos-7	16,90	10,30	6,60	1,22
	Réf. Éch.	W_L (%)	W_p (%)	I_p	I_c
	Max	21,7	11,3	10,6	1,4
	Min	15,2	9,6	5,7	1,1
	Moy	17,3	10,5	6,8	1,3
	ET	2,00	0,60	1,62	0,11

Guéchémé

	Réf. Éch.	W_L (%)	W_p (%)	I_p	I_c
Guéchémé	Gue-1	26,41	11,89	14,52	1,14
	Gue-2	21,74	12,31	9,43	1,29
	Gue-3	23,20	16,12	7,08	2,06
	Gue-4	25,05	12,37	12,68	1,27
	Gue-5	24,30	13,20	11,10	1,52
	Gue-6	22,90	9,09	13,81	0,98
	Gue-7	25,60	13,18	12,42	1,23
	Gue-8	27,04	11,77	15,27	1,14

Réf. Éch.	W_L (%)	W_p (%)	I_p	I_c
Max	27,0	16,1	15,3	2,1
Min	21,7	9,1	7,1	1,0
Moy	24,5	12,5	12,0	1,3
ET	1,71	1,82	2,56	0,31

Annexe 3-3

Résultats globaux et données statistiques des essais Proctor

Torodi

	Réf. Éch.	Wopm (%)	ϒopm (kN/m³)	ϒs (kN/m³)
Torodi	Tor-1	11,50	19,80	24,80
	Tor-2	13,50	20,40	24,10
	Tor-3	12,20	19,60	25,90
	Tor-4	11,20	19,70	24,50
	Tor-5	11,30	19,60	24,10
	Tor-6	12,80	20,50	25,30
	Tor-7	13,10	20,10	24,40
	Réf. Éch.	Wopm (%)	ϒopm (kN/m³)	ϒs (kN/m³)
	Max	13,5	20,50	25,90
	Min	11,2	19,60	24,10
	Moy	12,2	19,96	24,73
	ET	0,86	0,35	0,62

Tillabéry

	Réf. Éch.	Wopm (%)	ϒopm (kN/m³)	ϒs (kN/m³)
Tillabéry	Til-1	8,40	23,10	26,40
	Til-2	8,60	23,30	25,60
	Til-3	8,50	22,80	25,80
	Til-4	8,60	22,90	26,10
	Til-5	8,20	23,30	25,90
	Til-6	8,40	23,10	26,50
	Til-7	8,70	24,50	26,80
	Til-8	8,90	24,70	26,40
	Réf. Éch.	Wopm (%)	ϒopm (kN/m³)	ϒs (kN/m³)
	Max	8,9	24,70	26,80
	Min	8,2	22,80	25,60
	Moy	8,5	23,46	26,19
	ET	0,20	0,68	0,38

Ouallam

	Réf. Éch.	Wopm (%)	ϒopm (kN/m³)	ϒs (kN/m³)
Ouallam	Oual-1	11,60	19,60	24,80
	Oual-2	13,50	18,20	25,60
	Oual-3	10,80	20,30	25,20
	Oual-4	13,90	19,70	25,30
	Oual-5	15,20	18,90	25,20
	Oual-6	10,70	20,80	25,40
	Oual-7	9,98	18,30	26,10
	Réf. Éch.	Wopm (%)	ϒopm (kN/m³)	ϒs (kN/m³)
	Max	15,2	20,80	26,10
	Min	10,0	18,20	24,80
	Moy	12,2	19,40	25,37
	ET	1,82	0,91	0,37

Say

	Réf. Éch.	Wopm (%)	ϒopm (kN/m³)	ϒs (kN/m³)
Say	Say-1	8,40	23,30	26,00
	Say-2	9,60	21,70	27,20
	Say-3	8,70	24,30	26,40
	Say-4	8,90	22,50	26,90
	Say-5	8,30	24,10	27,50
	Say-6	8,80	20,90	27,40
	Say-7	9,20	23,80	25,90
	Réf. Éch.	Wopm (%)	ϒopm (kN/m³)	ϒs (kN/m³)
	Max	9,6	24,30	27,50
	Min	8,3	20,90	25,90
	Moy	8,8	22,94	26,76
	ET	0,42	1,19	0,61

Fillingué

	Réf. Éch.	Wopm (%)	ϒopm (kN/m³)	ϒs (kN/m³)
Fillingué	Fil-1	14,80	20,40	25,80
	Fil-2	11,00	19,80	25,20
	Fil-3	13,20	19,10	25,70
	Fil-4	10,60	20,50	25,60
	Fil-5	13,70	19,80	25,10
	Fil-6	11,40	19,60	24,20
	Fil-7	13,50	20,60	24,70
	Fil-8	12,60	18,50	25,70
	Fil-9	11,42	19,30	25,50
	Fil-10	13,90	19,90	24,90
	Fil-11	14,70	18,90	23,60
	Fil-12	16,70	19,80	24,70
	Fil-13	11,10	20,30	24,80
	Fil-14	13,86	18,90	24,70
	Fil-15	16,30	19,80	24,90
	Fil-16	11,89	20,50	25,70
	Réf. Éch.	Wopm (%)	ϒopm (kN/m³)	ϒs (kN/m³)
	Max	16,7	20,60	25,80
	Min	10,6	18,50	23,60
	Moy	13,2	19,73	25,05
	ET	1,81	0,63	0,59

Dosso

	Réf. Éch.	Wopm (%)	ϒopm (kN/m³)	ϒs (kN/m³)
Dosso	Dos-1	10,10	18,30	23,50
	Dos-2	9,80	17,80	24,20
	Dos-3	11,00	18,10	23,80
	Dos-4	9,60	17,50	24,00
	Dos-5	9,80	18,80	24,50
	Dos-6	9,30	19,10	24,10
	Dos-7	9,70	18,90	23,90
	Réf. Éch.	Wopm (%)	ϒopm (kN/m³)	ϒs (kN/m³)
	Max	11,0	19,10	24,50
	Min	9,3	17,50	23,50
	Moy	9,9	18,36	24,00
	ET	0,50	0,56	0,29

Guéchémé

	Réf. Éch.	Wopm (%)	ϒopm (kN/m³)	ϒs (kN/m³)
Guéchémé	Gue-1	8,90	24,90	27,00
	Gue-2	9,20	20,60	27,80
	Gue-3	9,10	24,40	27,20
	Gue-4	9,20	24,30	27,50
	Gue-5	9,60	26,80	27,10
	Gue-6	9,30	25,10	27,90
	Gue-7	8,80	21,60	27,60
	Gue-8	9,40	26,10	27,70

Réf. Éch.	Wopm (%)	ϒopm (kN/m³)	ϒs (kN/m³)
Max	9,6	26,8	27,90
Min	8,8	20,6	27,00
Moy	9,2	24,23	27,48
ET	0,24	1,98	0,32

Annexe 3-4

Résultats globaux et données statistiques des essais CBR

Torodi

	Réf. Éch.	CBR98	CBR95
Torodi	Tor-1	36,00	21,00
	Tor-2	26,00	17,00
	Tor-3	34,00	22,00
	Tor-4	39,00	18,00
	Tor-5	27,00	15,00
	Tor-6	38,00	23,00
	Tor-7	32,00	16,00
	Réf. Éch.	CBR98	CBR95
	Max	39,0	23,0
	Min	26,0	15,0
	Moy	33,1	18,9
	ET	4,73	2,90

Tillabéry

	Réf. Éch.	CBR98	CBR95
Tillabéry	Til-1	105,00	78,00
	Til-2	93,00	80,00
	Til-3	103,00	75,00
	Til-4	91,00	79,00
	Til-5	102,00	74,00
	Til-6	86,00	77,00
	Til-7	114,00	82,00
	Til-8	118,00	87,00
	Réf. Éch.	CBR98	CBR95
	Max	118,0	87,0
	Min	86,0	74,0
	Moy	101,5	79,0
	ET	10,40	3,87

Ouallam

	Réf. Éch.	CBR98	CBR95
Ouallam	Oual-1	34,00	7,00
	Oual-2	37,00	11,00
	Oual-3	31,00	12,00
	Oual-4	34,00	16,00
	Oual-5	24,00	11,00
	Oual-6	28,00	9,00
	Oual-7	35,00	10,00
	Réf. Éch.	CBR98	CBR95
	Max	37,0	16,0
	Min	24,0	7,0
	Moy	31,9	10,9
	ET	4,19	2,59

Say

	Réf. Éch.	CBR98	CBR95
Say	Say-1	98,00	52,00
	Say-2	85,00	48,00
	Say-3	79,00	51,00
	Say-4	103,00	49,00
	Say-5	67,00	43,00
	Say-6	82,00	39,00
	Say-7	107,00	53,00
	Réf. Éch.	CBR98	CBR95
	Max	107,0	53,0
	Min	67,0	39,0
	Moy	88,7	47,9
	ET	13,36	4,73

Fillingué

	Réf. Éch.	CBR98	CBR95
Fillingué	Fil-1	24,00	11,00
	Fil-2	15,00	8,00
	Fil-3	16,00	8,00
	Fil-4	17,00	12,00
	Fil-5	19,00	11,00
	Fil-6	16,00	9,00
	Fil-7	19,00	13,00
	Fil-8	18,00	10,00
	Fil-9	21,00	13,00
	Fil-10	17,00	9,00
	Fil-11	15,00	7,00
	Fil-12	23,00	14,00
	Fil-13	22,00	12,00
	Fil-14	26,00	8,00
	Fil-15	17,00	7,00
	Fil-16	31,00	13,00
	Réf. Éch.	CBR98	CBR95
	Max	31,0	14,0
	Min	15,0	7,0
	Moy	19,8	10,3
	ET	4,34	2,28

Dosso

	Réf. Éch.	CBR98	CBR95
Dosso	Dos-1	35,00	22,00
	Dos-2	24,00	19,00
	Dos-3	28,00	17,00
	Dos-4	32,00	20,00
	Dos-5	30,00	18,00
	Dos-6	25,00	16,00
	Dos-7	29,00	21,00
	Réf. Éch.	CBR98	CBR95
	Max	35,0	22,0
	Min	24,0	16,0
	Moy	29,0	19,0
	ET	3,55	2,00

Guéchémé

	Réf. Éch.	CBR98	CBR95
Guéchémé	Gue-1	123,00	111,00
	Gue-2	119,00	107,00
	Gue-3	124,00	117,00
	Gue-4	112,00	113,00
	Gue-5	132,00	115,00
	Gue-6	129,00	122,00
	Gue-7	128,00	118,00
	Gue-8	131,00	109,00

Réf. Éch.	CBR98	CBR95
Max	132,0	122,0
Min	112,0	107,0
Moy	124,8	114,0
ET	6,32	4,66

Références

Ackroyd, L. (1959). The engineering classification of some western Nigerian soils, and their qualities in road building. *Dept. of Sci. and Ind. Res. (U.K.), Road Res. Lab. Overseas Bull. No. 10*, 32p.

Adebisi, N. O., Oluwafemi, G. O., & Songca, S. P. (2013). Important properties of clay content of lateritic soils for engineering project. *Journal of Geography and Geologie*, 99-115.

Adebissi, N. O. (1999). Geological control of Eleyele dam: A case study of Ibadan metropolis. *PGD RS/GIS Projet RECTAS O.A.U. Ife-Ife*.

Adewuyi, I., & Okosun, J. (2013). An attempt to improve geotechnical properties of some highway lateritic soils with lime. *RMZ-M&G Vol. 60*, 287-296.

Adeyemi, G. O. (1992). Highway geotechnical properties of laterised residual soils in Ajebo-Ishara geological transition zone of Southwestern Nigeria. *Doctoral thesis, O.A.U., Ife-Ife, Nigeria*.

Aginam, C., Nwakaire, C., & Nwajuaku, A. (2015). Engineering Properties of Lateritic Soils from Anambra Central Zone, Nigeria. *International Journal of Soft Computing and Engineering (I.J.S.C.E.)*, 1-6.

Akoto, B., & Singh, G. (1981). Some geotechnical properties of a lime-stabilized laterite containing a high proportion of aluminium oxide. *Eng. Geol., 34*, 223-237.

Alexander, L. T., & Cady, J. G. (1962). Genesis and Hardening of Laterite in soils. *Technical Bulletin No. 1282*, 103p.

Alexandre, J. (2002). Les cuirasses latéritiques et autres formations ferrugineuses tropicales. Exemple du Haut Katanga Méridional. *Sc. Géol. Vol. 107*, 12-19.

Andrews, C. (1936). The relation between chemical composition and physical characteristics of some Hawaiian soils. *Proc. Int. COnf. Soil Mech. Found., 1st, Cambridge, Mass*, 30-32.

Asghar, C. A., Kangarani, F. F., & Abedini, A. (2015). Geochemical characteristics of a laterite: The Jurassic Zan Deposit, Iran. *Acta Geodyn. Gaomater., Vol. 12, No. 1*, 67-77.

Attoh-Okine, N. O. (2004). Application of gecnetic-based neural network to lateritic soil strength modeling. *Construction and Building Materials*, 619-623.

Attoh-Okine, N. O., & Fekpe, E. S. (1996). Strength characteristics modeling of lateritic soils using adaptive neural networks. *Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 8*, 577-582.

Attoh-Okine, N. O. (1995). Lime treatment of laterite soils and gravels-revisited. *Construction and Building Materials, Vol. 9 (N°5)*, 283-287.

Attoh-Okine, N. O. (1990). Stabilization effect of locally produced lime on selected lateritic soils. *Construction and Building Materials, 4 (2),* 86-91.

Aubert, G. (1954). Les sols latéritiques. *Conf. Génève 7-5 Cong. Intern. Sc. SOl. Léopoldville,* 13p.

Aubreville, A. (1949). Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. *Soc. Edit. Géo. Marit. Colo. Paris*, 357.

Autret, P. (1980). Contribution à l'étude des graveleux latéritiques traités au ciment. *Thèse de doctorat. Ecole National des Ponts et Chaussées. Paris*, 434p.

Autret, P. (1983). Latérites et graveleux latéritiques. *ISTED-LCPC*, 1-42.

Avwenagha, E., Arong, T., Overare, B., Okunuwadje, S., & Osokpor, J. (2014). Classification and compaction charactersitics of lateritic soils of Warri, Delta State, Nigeria. *Advances in Applied Science Research*, 451-457.

Badmus, B. (2010). Plasticty and compressibility characteristics of lateritic soil from Southwestern Nigeria. *Research Journal of Soil Water Management*, 10-14.

Bagarre, E. (1990). Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière. *ISTED*, 1-150.

Baldovin, G. (1969). The shear strength of lateritic soils. *Proc. Spec. Sess. Eng. Prosps. Laterite soils 7th Int. Conf. S.M.F.E. Mexico 1*, 129-142.

Barbillat, J., Bougeard, D., Buntinx, G., Dehlaye, M., Dhamelincourt, P., & Fillaux, F. (1999). Spectrométrie Raman. *Techniques de l'ingénieur P 2865*, 31p.

Beauvais, A. (1989). Etude pétrographique et géochimique de profils d'altération latéritique cuirassés dans le sud-est de la République Centrafricaine. *Centre ORSTOM - Géodynamique*, 71-91.

Bell, F. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Eng. Geol., 42*, 223-237.

Bellion, Y. (1989). Histoire géodynamique post-paléozoïque de l'Afrique de l'Ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaire (Sénégal, Taoudeni, Iullemmeden, Tchad). *Publ. CIFEG, 1989/17*.

Bello, A., & Adegoke, C. (2010). Evaluation of geotechnical Properties of Ilesha East Southwestern Nigeria's Lateritic Soil. *The Pacific Journal of Science and Technology Vol. 11 No. 2*, 617-624.

Beoglin, J. L. (1990). Evolutions minéralogique et géochimique des cuirasses ferrugineuses de la Région de Gaoura (Burkina Faso). *Thèse, Univ. L. Pasteur, Strasbourg*, 188p.

Bessoles, B. (1977). Géologie de l'Afrique - Le craton Ouest Africain. *Mémoire Bureau de Recherche Géologique et Minière (B.R.G.M.), 88, Paris, France*, 402p.

Bishop, A. (1966). The strength of soils as engineering materials. *Geotechnique, 16*, 89-130.

Bohi, Z. (2008). Caractérisation des sols latéritiques utilisés en construction routière: Le cas de la Région de l'Agnéby (Côte d'Ivoire). *Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, 121p.

Bouchardeau, A., & Lefevre, R. (1957). Monographie du Lac Tchad. *O.R.S.T.O.M., III p., multigr.*

Bourgeon, G., & Gunnell, Y. (2005). La latérite de Buchanan. *Etude et gestion des sols*, 87-100.

Bourman, R., & Ollier, C. (2002). A critique of the Schellmann definition and classification of 'laterite'. *CATENA 47,*, 117-131.

Bourman, R., & Ollier, C. (2003). Reply to the discussion of "A critique of the Schellmann definition and classification of laterite" by R.P. Bourmann and C.D. Ollier (Catena 47, 117-131). *CATENA 52,*, 81-83.

Braun, J.-J., Marechal, J.-C., Riotte, J., Boeglin, J.-L., Bedimo, J.-P. B., Ngoupayou, J. R., Viers, J. (2012). Elemental weathering fluxes and saprolite production rate in a Central African lateritic terrain (Nsimi, South Cameroon). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 243-270.

Broll, N. (1996). Caractérisation de solides cristallisés par diffraction des rayons X. *Techniques de l'ingénieur, PE 1080*.

Buchanan, F. (1807). A journey through the countries of Mysore, Canada and Malabar. *Asiana Educational Services, 3 Vols.*, 512-566.

Bui, E., Dixon, J., Shadfan, H., & Wilding, L. (1990). Geomorphic features and assiated iron oxides of the Dallol Bosso of Niger (West Africa). *CATENA Vol. 17*, 41-54.

Campbell, J. M. (1917). Laterite: its origin, structure and minerals. *Min. Mag.*, 67-229.

CEBTP. (1972). Normes de dimensionnement des routes dans les pays tropicaux.

CEBTP. (1984). Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. *ISBN 2-11-084-811-1*, 154p.

Clare, K., & O'Reilly, M. (1960). Road construction over tropical red clays. *Proc. Found. Civil Eng. London*, 243-266.

Clark, J. (1838). Origine of laterite. *Madras Journ. Lit. and Sci. 8*, 334-346.

Cole, R. (1836). Laterite of the red hill near Madras. *Madras Journ. Lit. and Sci. 4*, 100-108.

Cougny, G. (1988). Exploitation des emprunts de graveleux latéritiques par des méthodes géostatistiques. *Bulletin de l'A.I.G.I Paris N°38*, 45-53.

Daniel, M. N., & Newill, D. (1959). A laboratory examination of the properties of twelve Kenya soils. *Road Res. Note (U.K.), 3350*, 11p.

De Graft-Jonhson, J., & Bhatia, H. (1969). Engineering properties of lateritic soils. *General Report, Spec. Session on Eng. Prop. of Lateritic soils, 7th Int. Soil Mech. and Found. Eng., Mexico City, Vol. 1,* 117-128.

De Graft-Jonhson, J., & Irwin, M. (1959). A laboratory investigation of the stabilization with Portland cement of two gravels from Ghana. *Brit. Road Res. Note RN/3356,* 9p.

De Graft-Jonhson, J., Bhatia, H., & Gidigasu, M. D. (1968). The engineering characteristics of a lateritic residual clay of Ghana for earth dam construction. *Symp. Earth Rockfill Dams, New Delhi, India,* 94-107.

D'Hoore, J. (1954). L'accumulation des sesquioxydes libres dans les sols tropicaux. *Publ. INEAC, Sér. Sci. 62,,* 132p.

D'Hoore, J. (1963). La carte des sols d'Afrqiue au 1/5.000.000. *Coll. CCTA/FAO Lovanium. Congo Leop.*

Diamond, S., & Kinter, E. (1966). Absorption of calcium hydroxide by montmorillonite and kaolinite. *Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 22 (N°3),* 240-249.

Diamond, S., & Kinter, E. B. (1965). Mechanism of soil-lime stabilization. *Highway Research Records, N°92.*

Diamond, S., White, J., & Dolch, W. (1964). Transformation of clay minerals by calcium hydroxide attack. *Proc. 12th National Conference on Clay and Clay Minerals. Pergamon Press, New York,* 359-379.

Dreyfus, J. (1952). Les latérites, généralités, leur utilisation en technique routière. *RGRA N°245 Gen. Des Routes et Aérodromes Paris,* 3-11.

Dubois, D., & Lang, J. (1981). Etude lithostratigraphique et géomorphologique du Continental Terminal et du Cénozoïque inférieur dans le bassin des Iullemmeden (Niger). *Bull. I.F. d'Afrique Noire, T. 43, sér. A, nos 1-2, 1984.*

Duncan, N. (1970). Engineering geology and Rock Mechanics. *Leonard Hill, London, Vol. 1, 1st ed.,* 252p.

Dupuis, D., Pons, J., & Post, A. (1990). Mise en place de plutons et caractérisation de la déformation birimienne au Niger Occidental. *C.R. Acad. Sc. Paris,* 769-776.

Eades, J. L. (1962). Reactions of Ca(OH)2 with clay minerals in soil stabilization. *Ph. D. Thesis. University of Illinois, Geology Departement, Urbana,* 177p.

Elarabi, H., Taha, M., & Elkhawas, T. (2013). Some Geological and Geotechnical Properties of Lateritic Soils from Muglad Basin Located in the South-Western Part os Sudan. *Research Journal of Environnemental and Earth Sciences 5 (6),* 291-294.

Evans, E. A. (1958). A laboratory investigation of six lateritic gravels from Ouganda. *Brit. Road Lab., Note RN33241/EAE,* 20p.

Fabre, R. (1995). Evolution géodynamique des terrains du Protérozoïque inférieur (Birimien) dans le centre de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest): une mise au point. Habilitation à Diriger des Recherches. *Université de Bordeaux, France*, 422p.

Fall, M., Tisot, J.-P., & Cisse, I. (1994). Proposition pour une classification des graveleux latéritiques (Application au cas du Sénégal). *Bull. of the International Association of Engineering Geology*, 35p.

Fall, M., Tisot, J.-P., & Cisse, I. (1995). Comportement mécanique à l'appareil de cisaillement de Casagrande de trois graveleux latéritiques compactés provenant du Sénégal Occidental. *Bull. Of the International Association of Engineering Geology, Paris N°52*, 1-15.

Fall, M., Tisot, J.-P., & Cisse, I. (1997). Undrained behaviour of compacted gravel lateritic soils from western Senegal under monotonic and cyclic triaxial loading. *Engineering Geology*, 71-87.

Faniran, A., & Jeje, L. K. (1983). Humid tropical geomorphologic processes and landform in warm humid climates. *Longman Edition. Retrieved october 14, 2016, from http://www.getcited.org/pub/102217815*.

Fauck, R. (1967). *Réflexions sur le texte de M. Segalen intitulé: "Les facteurs de formation des sols ferrugineux tropicaux".*

Fauck, R. (1972). Les sols rouges sur sables et grès d'Afrique Occidentale. *Mém. ORSTOM Fr (61)*, 257p.

Faure, H. (1962). Reconnaissance géologique des formations sédimentaires post-paléozoïques du Niger Oriental. *Thèses, Paris et Mém. Bur. Rech. Géol. Min. (B.R.G.M.), N°29*, 630p.

Faure, H. (1965). Evolution des grands lacs sahariens à l'Holocène. *Congr. INQUA Denver*.

Favreau, G. (2000). Caractérisation et modélisation d'une nappe phréatique en hausse au Sahel. Dynamique et géochimie de la dépression piézométrique naturelle du koris de Dantiandou (Sud-ouest du Niger). *Thèse de doctorat Univ. Paris XI, Orsay, France*.

Fekpe, E., & Attoh-Okine, N. O. (1995). Deterioration modelling for lateritic-base. *Construction and Building Materials Vol. 9, No. 3*, 159-163.

Florentin, J., L'Hériteau, G., & Farhi, M. (1957). Etude de quelques propriétés physico-mécaniques d'échantillons de latérite éluviale. *Fourth Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., London, Vol. 1*, 28-31.

FORACO, 2014. Rapport d'étude de reconnaissance hydrogéologique dans la région de Tillabéry (Téra). *Projet hydraulique villageoise*. 15p

Foss, I. (1973). Red soil from Kenya as a foundation material. *Proc. 8th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Vol. 2*, 73-80.

Frank, N. (2014). Review of specifications for use of laterite in road pavements. *Council for Scientific & Industrial Research, South Africa,* 1-74.

Frost, R. (1967). Importante of correct pretesting preparation of som tropical soils. *Proc. First Southeast Asian Conf. on Soil Eng., Bangkok,* 43-53.

Frost, R., & Vassalo, A. (1996). The deshydroxylation of the kaolinite clay minerals using infrared emission spectroscopy. *Clays and Clay Miner, 44 (5),* 635-651.

Gavaud, M. (1969). Esquisse de l'histoire des sols du Niger Centre et Ouest Méridional. *Bulletin de l'I.F.A.N. Série A, T. 31, N°1,* 253-258.

Gavaud, M. (1970). Les grandes divisions du Quaternaire de régions Ouest-Africaines établies sur des bases pédologiques. *Note présente au Congrès de Géologie Africaine à Ibadan. Centre O.R.S.T.O.M. de Yaoundé, multigr.,* 185p.

Gavaud, M. (1977). Les grands traits de la pédogenèse du Niger Méridional. O.R.S.T.O.M., 1-101.

Gense, C. (1984). Contribution à l'analyse pétrologique à l'étude de la stabilisation par le ciment des graveleux latéritiques. *Paris VII - Laboratoire de pédologie,* 10-35.

Gidigasu, M. (1980). Geotechnical evaluation of residual gravels in pavement construction. *Eng. Geol., 15,* 173-194.

Gidigasu, M. D. (1972). Mode of formation and geotechnical characteristics of laterite materials of Ghana in relation to soil forming factors. *Eng. Geol.,* 79-150.

Gidigasu, M. D. (1974). Degree of weathering in the identification of laterite materials for engineering purposes. *Elsiever Science Publishing Company,* 213-240.

Gidigasu, M. D. (1976). Laterite soil engineering pedogenesis and engineering principles. *Elsiever Scientific Publishing Company,* 1-15.

Gidigasu, M. D. (1983). Development of acceptance specifications for tropical gravel paving materials. *Engineering Geologie Elsiever Science Publishers B. V.,* 213-240.

Gidigasu, M. D. (1991). Characterisation and use of tropical gravels for pavement construction in West Africa. *Geotechnical and Geological Engineering,* 219-260.

Gidigasu, M. D., & Yeboa, S. L. (1972). Significance of pretesting preparation in evaluating index properties of laterite materials. *Highw. Res. Rec.,* 105-116.

Giorgis, I., Bonetto, S., Giustetto, R., Lawane, A., Pantet, A., Rossetti, P., Vinai, R. (2014). The lateritic profile of Balkouin, Burkina Faso: Geochemistry, mineralogy and genesis. *Journal of African Earth Sciences,* 31-48.

Goldschmidt, V. M. (1937). The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. *J. Chem. Soc.,* 655-673.

Grant, K. (1974). Laterites, ferricretes, bauxite and silcretes. *Proc. Int. Cong. Int. Assoc. ENg. Geol., 2nd (Sao Paulo, Brazil), Vol. I*, 31.1-31.8.

Greigert, J. (1954). Eude hydrogéologique du Bassin Occidental du Niger. *Dir. Fed. Mines Géol. Dakar multigr.*

Greigert, J. (1957). Introduction à la connaissance hydrogéologique du bassin occidental du Niger. Structure de dépôts crétacés et tertiaires du bassin occidental du Niger. *Dir. Fed. Mines Geol. Dakar, multigr.*

Greigert, J. (1966a). Description des formations crétacées et tertiaires du bassin des Iullemmeden (Afrique Occidentale). *B.R.G.M. ed., Paris, France*, 229p.

Greigert, J. (1966b). Etude hydrogéologique de la vallée de Badéguichiri. Rapport de fin de campagne 1966. *Doc. B.R.G.M., NIA66A4*.

Greigert, J., & Pougnet, R. (1965). Carte géologique de la République du Niger au 1: 2 000 000. *B.R.G.M. ed. Paris, France*.

Grimshaw, R. W. (1945). Constitution of refractory clays II. *Trans. Brit. Ceram. Soc. 44*, 76-96.

Guero, A. (2003). Etude des relations hydrauliques entre les différentes nappes du complexe sédimentaire de la bordure Sud-Ouest du Bassin des Iullemmeden (NIGER): Approches géochimique et hydrodynamique. *Thèse de doctorat. Université Paris XI ORSAY*, 265p.

Hamilton, R. (1964). Microscopic studies of laterite formation in Ghana. *In: A. Jongerius (Editor), Soil Micromorphology. Elsevier, Amsterdam*, 269-278.

Harrassowitz, H. (1926). Laterite material und versuch erdgeschichtlicher. *Answertung. Fortschr Geol Pal 4 (14)*, 1-314.

Hisham, M. (2013). Effect of silica fume ont the characterization of geopolymer materials. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 5-12.

Holtzapffel, T. (1985). Les minéraux argileux. Préparation, analyse diffractométrique et détermination. 136p.

Humbert, R. P. (1948). The genesis of laterite. *Soil sci.*, 281-290.

Ibrahima, K., & Ndoye, M. (2007). Caractérisation physico-chimique des couches de base en latérite-ciment. *4ème CRA MSG, Yaoundé*, 59-70.

Ivan, F., Manoel, P., & Bernardo, C. (2015). Compressibility and microstructure of compacted laterites. *Transportation Geotechnics*, 20-34.

Jeambrun, M., & Machens, E. (1962). Prospection générale du Liptako (Républic du Niger). *Bur. Rech. Géol. Min. (B.R.G.M.), rapport, Dakar, multigr*.

Jennings, J., & Knight, K. (1957-58). The prediction of total heave from double oedometer test. *Symp. On Expansive Clays, So. African Inst. of Civil Eng.*, 13-19.

Jones, K. S., & Knill, J. L. (1965). The recording and interpretation of geological conditions in the foundations of Roseires, Kariba and Latiyan Dams. *Geotechnique*, 94-124.

Jouenne, C. (1980). Traité de céramique et matériaux minéraux. *Editions Septima, PAris*, 657p.

Khattab, S. A. (2002). Etude multi-échelles d'un sol argileux plastique traité à la chaux. *Thèse de doctorat. Université d'Orléans, France*, 250p.

King, W., & Foote, R. B. (1864). Laterite at Caperris Hill. *Mem. Geol. Survey India 4*, 257-267.

Lacroix, A. (1913). Les latérites de la Guinée et les produits d'altération qui leur sont associés. *Museum Natinal d'Histoire natrelles. Paris. Nouvelles archives Ser. 5*, 255-358.

Lang, J., Alidou, S., Dubois, D., & Houessou, A. (1980). Contribution au débat sur le concept du Continental Terminal dans les complexes continentaux sahariens et dans les bassin sédimentaires côtiers de l'Oeuest africain: Exemple du Bénin et du Niger. *Mém. Géol. Univ. de Dijon No. 7*, 425-431.

Legros, J. P. (2007). *Les grands Sols du Monde.* Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

Legros, J. P. (2013). Latérites et autres sols des régions intertropicales. *Académie des Sciences et Lettres de Montpellier Conf. N°4252, Séance académique du 09/12/2013. Bull. N°44*, 369-382.

Lelabousse, C. (2012). Diagenèse et reconstruction de variables environnementales à partir de la géochimie du corail porites sp. (Nouvelle Calédonie, Pacifique Sud-Ouest). *Thèse. Doctorat ParisTech. Spécialité "Mécanique des Fluides"*.

Letellier, M. (1986). Récupération et dosage des phases argileuses d'un sable de gisement. *Thèse de doctorat. Université de Toulouse. Sci. Miner Crist.*, 175p.

Lin, Z. (1986). On the engineering classification of laterite. *Proc. Int. I.A.E.G. Congress, 5th (Buenos Aires, Argentina), Balkema, Rotterdam*, 23-35.

Little, A. L. (1969). The engineering classification of residual tropial soils. *Proc. Sess. Eng. Propo. of lateritic soils, Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. 7th Mexico*, 1-10.

Lohnes, R., & Demirel, T. (1973). Strength and structure of laterites and lateritic soils. *Eng. Geol.*, 13-33.

Lohnes, R., Fish, R., & Demirel, T. (1971). Geotechnical properties of selected Puerto Rican soils in relation to climate and parent rock. *Geol. Soc. AM Bull. 82*, 2617-2624.

Lompo, P. (1980). Les matériaux utilisés en construction routière en Haute Volta. *Un matériau non traditionnel "Le lithostab" IVème Conf. Rout. Afri., 20-25 janvier - Nairobi, Kenya*, 42p.

Lucas, S., & Roger, A. (2015). Shear strength of a natural and compacted Tropical Soil. *EJGE*, 1-12.

Lumb, P. (1962). The properties of decomposed granite. *Geotechnique*, 226-243.

Lyon Associates. (1971). Laterite and lateritic soils and other problem soils of Africa. *Inc. Baltimore Maryland, USA Building and Road Institute*, 64-140.

Machens, E. (1973). Contribution à l'étude des formations du socle cristallin et de la couverture sédimentaire de l'Ouest de la République du Niger. *Mémoire du Bureau des Recherches Géologiques et Minières, France N°82*, 167p.

Madu, R. (1977). An investigation into the geotechnical and engineering properties of some laterites of Eastern Nigeria. *Eng. Geol. 11*, 25-101.

Mahalinga-Iyer, U., & Williams, D. (1991). Engineering properties of a laterite soil profile. *Eng. Geol., 31*, 45-58.

Mahalinga-Iyer, U., & Williams, D. (1994). Consolidation and shear strength properties of a lateritic soil. *Engineering Geology*, 53-63.

Mahalinga-Iyer, U., & Williams, D. J. (1997). Properties and performance of lateritic soil in road pavements. *Eng. Geol.* , 71-80.

Maignien, R. (1954). Différents processus de cuirassement en A.O.F. *C.R. 2ème Conf. Int. Afric. Sols, Léopoldville*, 86-118.

Maignien, R. (1958). Le cuirassement des sols en Afrique Tropicale de l'Ouest. *Thèse Strasbourg. Mémoires de la carte géologique d'Alsace et Lorraine*, 16-239.

Maignien, R. (1962). Tropical Sub-arid Brown soils of West Africa. *First Soil Corell. Seminar Tashkent*, 36-44.

Maignien, R. (1966). Review of research on laterites. *Beman Associates*, 95-553.

Maiti, G., & Freund, F. (1981). Deshydration-related proton conductivity in kaolinie. *Clays and Clay Miner, 16*, 395-413.

Malomo, S. (1981). The compressibility characteristics of compacted laterite soil. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol, 24*, 11-15.

Malomo, S. (1983). Stress-strain behavior of some compacted laterite soils from North-east Brazil. Bull. N°28. *Eng. Geol. Paris*, 1-6.

Martin, J. F., & Doyne, H. C. (1927). Laterite and lateritic Soils in Sierra Leone. *Journ. Agric. Science 17 ibid.*, 135-143.

Massamba, N. (2013). Contribution à l'étude de sols latéritiques du Sénégal et du Brésil. *Thèse de doctorat. Université Paris-Est*, 163p.

Matyas, E. (1969). Some engineering properties of Sasumua clay. *Proc., Spec. Sess. Eng. Prop. of laterite Soils, Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., 7th, Mexico, 1*, 144-151.

McFarlane, M. J. (1991). Some sedimentary aspects of lateritic weathering profile development in the major bioclimatic of tropical Africa. *Journal of African Earth Sciences, Vol. 12, No. 1/2*, 267-282.

Merleis, J. (1967). Trial pavements of laterite base course. *Proc. Fourth Reg. Conf. for Africa on Soil Mech. and Found. Eng., Cape Town, Vol. 1*.

Messou, M. (1980). Comportement mécanique d'une couche de base en graveleux latéritiques améliorés au ciment: cas des routes en Côte d'Ivoire. *Thèse de doctorat en Génie civile. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC). Paris*, 197p.

Michael, F. (1996). Laterites revisited. *Progress in Physical Geography 20,1*, 113-121.

Milesi, J., Feybesse, J., Ledru, P., Dommanget, A., Ouedraogo, M., Marcoux, E., Lagny, P. (1989). Les minéralisations aurifères de l'Afrique de l'Ouest. *Chronique de la Recherche Minière, 497*, 3-98.

Millogo, Y. (2008). Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuses et latéritiques du Burkina Faso améliorées aux liants hydrauliques: Application au génie civil (bâtiment et route). *Thèse de doctorat. Université de Ouagadougou/ UFR Sci. exactes et appliquées*, 144p.

Millogo, Y., Traoré, K., Ouedraogo, R., Kaboré, K., Blanchart, P., & Thomassin, J. H. (2008). Geotechnical, mechanical, chemical and mineralogical characterization of a lateritic gravels of Sapouy (Burkina Faso) used in road construction. *Construction and Bulding Materials*, 1-7.

Milot, G., Perriaux, J., & Lucas, J. (1961). Signification climatique de la couleur rouge des grès Permo-Triasiques et des grandes séries détritiques rouges. *Bull. Serv. Carte Géo. Als. Lorr. t. 14, fasc. 4*, 91-100.

Moh, Z. C. (1965). Reactions of soil minerals with cement and chemicals. In Highway Research Record 86. *National Research Council, Washington, D. C.*, 39-61.

Moh, Z., & Mahzar, F. (1969). Effects of methode of preparation on index properties of lateritic soils. *Proc. of the Spec. Session on Eng. Prop. of Lateritic Soils, Seventh Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Mexico City, Vol. 1*, 23-35.

Nanda, R. L., & Krishnamachari, R. (1958). Study of aggregates from different parts of India with view to their use in road construction. *Central Road Res. Inst., Road Res. Pap.,*, 15-32.

Nascimento, U. (1959). Laterites of Portuguese Overseas Territories. *Natl. Civil Eng. Lab., Mem.*, 133-141.

Newbold, T. J. (1844). Notes, chiefly geological, across the Peninsula from Masulipatam to Goa. *J. Asiatic Soc. Bengal I3*, 984-1004.

Newill, D. (1961a). An investigation of linear shrinkage test applied to tropical soils and its relation to plasticity. *Lab. Note RN/4106/DN*, 6p.

NF P 94-056. (Mars 1996). Analyse granulométrique par tamisage. *Association Française de Normalisation (AFNOR).*

NF P 94-051. (Mars 1993). Détermination des limites d'Atterberg. *Association Française de Normalisation (AFNOR).*

NF P 94-057. (Mai 1992). Analyse granulométrique des sols. Méthode par sédimentation. *Association Française de Normalisation (AFNOR).*

NF P 94-071-1. (Août 1994). Essai de cisaillement rectiligne à la boîte - Partie 1: Cisaillement direct. *Association Française de Normalisation (AFNOR).*

NF P 94-078. (Décembre 1992). Détermination de l'Indice CBR après immersion - Indice CBR immédiat - Indice Portant immédiat. *Association Française de Normalisation (AFNOR).*

NF P 94-093. (Octobre 1999). Détermination des références de compactage d'un matériau. *Association Française de Normalisation (AFNOR).*

Nguetnkam, J.-P., Fouateu, A., Bitom, D., Bilong, P., & Volkoff, B. (2006). Etude pétrologique d'une formation latéritique sur granite en milieu tropical forestier sud-camerounais (Afrique Centrale). *Etude et Gestion des sols, Vol. 13.2*, 89-102.

Novais-Ferreira, H., & Correia, J. (1965). The hardness of laterite concretions and its influence in the performance of soil mechanics tests. *Sixth Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng, Montreal, Vol. 1*, 82-86.

Novais-Ferreira, H., & Meireles, J. (1969). The influence of temperature of humidification of the geotechnical properties of lateritic soils. *Proc. of the Spec. Session on Eng. Prop. of Leteritic Soils, Seventh Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Mexico City, Vol. 1*, 65-74.

Novais-Ferreira, H., & Meireless, J. (1968). Some methods of laterite study for application to roads and airfield. *L.E.A. Luanda*.

Odalele, A., Olusola, J., & Emmanuel, T. (2012). Engineering properties of lateritic soils around Dall Quarry in Sango Area, Ilorin, Nigeria. *Earth Science Research, Vol. 1, No. 2*, 1-11.

Ogunsanwo, O. (1986). Influence of angle of inclination of schistosity planes on the geotechnical properties of a schist saprolite. *Eng. Geol., 23*, 137-143.

Ogunsanwo, O. (1988). Basic geotechnical properties, chemistry and mineralogy of some laterite soils from S.W. Nigeria. *Bull. Of the International Association of Engineering geology N°37 Paris*, 1-5.

Ogunsanwo, O. (1989). Some geotechnical properties of two soils compacted at different energies. *Eng. Geol, 26*, 261-269.

Omotosho, P., & Akinmusuru, J. (1992). Behaviour of soils (lateritic) subjected to multi-cyclic compaction. *Eng. Geol., 32:*, 53-58.

O'Reilly, M., & Baker, A. (1963). A survey of subgrade conditions on roads in East Africa. *Brit. Raod Res. Lab. Note*.

Ormsby, W. C., & Bolz, L. H. (1966). Microtexture and composition of reaction products in the system kaolin-lime-water. *Journ. Am. Ceram. Soc., Vol. 49 (N°7)*, 364-366.

Osula, D. O. (1991). Lime modification of problem laterite. *Eng. Geol., 30*, 141-154.

Osula, D. O. (1996). A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite. *Eng. Geol. 42*, 71-81.

Oyediran, I., & Durojaiye, H. (2011). Variability in the Geotechnical properties of some residual clay soils from Southwestern Nigeria. *International Journal of Scientific and Engineering Research Vol. 2, Issue 9*, 235-240.

Pias, J. (1970). Les formations sédimentaires Tertiaires et Quaternaires de la cuvette Tchadienne et les sols qui en dérivent. *Mémoires ORSTOM N° 43 Paris*, 425p.

P'Kla, A. (2002). Caractérisation en compression simple de blocs de terre comprimée. *Eng. Geol., 26*, 21-42.

Priard, F. (1964). Reconnaissance hydrogéologique du Niger Oriental. *Bur. Rech. Geol. Min., Dakar*, 109p.

Programme hydraulique villageoise, C.-B. (1997). Rapport final des travaux de 35 forages.

Projet FAO/SF: 281/NIR 8. (1970). Etudes en vu de la mise en valeur du Dallol Maouri, Niger: les eau souterraines. *Cart., graph.*, 162p.

Projet PNUD/DCTD - NER86/001/NEX. (1997). Schéma Directeur de Mise en valeur et de Gestion des Ressources en Eau du département de Dosso. Rép. Niger.

Radier, H. (1957). Contribution à l'étude géologique du Soudan Oriental (A.O.F.). *Bulletin du service géologique et de prospection minière, N°26, Dakar, 1959*.

Reichelt, P. (1961). Géologie et hydrogéologie de la bordure sud-est du Gourma (République du Niger). *Bur. Rech. Géol. Min. (B.R.G.M.), Dakar 62, A 29*.

Remillon, A. (1967). Les recherches routières entreprises en Afrique d'expression française. *An. de l'Inst. Tech. du Bâtiment et des Travaux Publics No. 231*, 366-388.

Robbin, G. (1998). Microscopie. *Techniques de l'ingénieur, R 6710*, 15p.

Robert, P., & Clifford, D. (2002). A critique of the Schellmann definition and classification of laterite. *CATENA*, 117-131.

Ruste, J. (2009b). Microanalyse X par sonde électronique. Principe et instrumentation. *Techniques de l'ingénieur, P885*, 20p.

Salard-Cherboldaeff, M., Miko-angoula, I., & Lang, J. (1995). Approche palynologique des paléoenvironnements du Continetal Terminal dans le bassin des Iullemmeden (Niger). *Rev. Miccop., Vol. 38, N°4*, 329-338.

Samb, F., Ba, M., Fall, M., & Berthaud, Y. (2013). Etude du comportement cyclique de graveleux latéritiques du Sénégal. *Conf. Int. Ecomatériaux de construction 10-12 juin 2013 Ouagadougou (Burkina Faso)*, 1-5.

Sandipan, G., & Sanat, G. (2015). Characterization and evolution of laterites in West Bengal: Implication on the Geology of Northwest Bengal Basin. *Trans. Inst. Indian Geographers Vol. 37, No. 1*, 93-119.

Schellmann, W. (1986). A new definition of laterite. *Geological Survey of India Memoir 120*, 1-7.

Schellmann, W. (1994). Geochemical differentiation in laterite and bauxite formation. *CATENA*, 131-143.

Schellmann, W. (2003). Discussion of "A critique of the Schellmann definition and classification of laterite" by R.P. Bourman and C.D. Ollier (Catena 47, 117-131) . *CATENA 52,*, 77-79.

Schofield, A. N. (1957). Lime stabilization of nodular clayey pea-laterite in Nyasaland. *Dept. Sci. and Ind. Res. (U.K.), Road Res. Lab. Overseas Bull. No. 3*, 15p.

Segalen, P. (1967). Les sols et la géomorphologie du Cameroun. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédolo. Vol. 2*, 137-187.

Ségalen, P. (1994). Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique. *ORSTOM Editions Tome 1*, 1-579.

Sigg, J. (1991). Les produits de la terre cuite. *Editions Septima, Paris*, 494p.

Soumaila, A. (2000). Etude structurale, Pétrographique et Géochimique de la ceinture birimienne de Diagorou-Darbani, Liptako, Niger Occidental (Afrique de l'Ouest). *Thèse. Université de Franche-Comté, France*, 253p.

Soumaila, A., & Konaté, M. (2005). Caractérisation de la déformation dans la ceinture birimienne (Paléoprotérozoïque) de Diagorou-Darbani(Liptako nigérien, Afrique de l'Ouest). *African Geoscience Review, Vol. 12, No. 3*, 161-178.

Stephens, C. G. (1946). Pedogenesis following the dissection of laterite regions in Southern Australia. *C.S.I.R.O. Australia Bull. No 206*, 32-40.

St-Julien, P. (1992). Etude structurale préliminaire des indices de Kourki, de Dounga, de Kossa et Borobon dans la ceinture de Gorouol (Liptako). *Rapport trimestriel N°3. Projet ACDI N°700/10047, PBK Engineering Ltd, Annexe XII*, 30p.

Stocker, P. T. (1972). Diffusion and diffuse cementation in lime and cement stabilized clayey soils. *Special Report 8. Australian Research Board, Victoria, Australia*.

Tardy, Y. (1993). Pétrologie des latérities et des sols tropicaux. *Masson, Paris*.

Terzaghi, K. (1958). The design and performance of Sasumua dam. *Proc. I.C.E. p*, 64-369.

Thompson, M. R. (1966). Lime reactivity of Illinois soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division (A.S.C.E.), Vol. 9 2 (No SM5)*, 67-92.

Tockol, I. (1993). Contribution à l'étude des graveleux latéritiques dans les pays du Sahel: cas de routes non revêtues. *Thèse de M. Sc. A. (Génie civl) Univ. de Moncton*, 183p.

Townsend, F. C., Phillip, G. M., & Parcher, J. V. (1969). Effect of remoulding on the properties of a laterite soil. *Highw. Res. Rec.*, 76-84.

Tucker, M. (1988). Techniques in Sedimentology. *Blackwell Scientific Publications*.

Urvoy, Y. (1942). Les bassins du Niger. *Mémoires de l'I.F.A.N.N°4*, 139p.

Vadagbalkar, S. (2014). Study of laterites around Talmod, Maharashtra State, India. *International Science Journal Vol. 1, Issue-2*, 1-5.

Vallerga, B. A., Shuster, J. A., Love, A. L., & Van Til, C. J. (1969). Engineering study of laterite and lateritic soils in connection with construction of roads, highways and airfields. *U.S. Agency Int. Develop., Contract AKD/SCD 1810*, 110-165.

Vargas, M. (1953). Some engineering properties of residual clay soils occuring in Southern Brazil. *Prc. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. 3rd, Zurich, 1*, 67-71.

Vargas, M. (1974). Engineering properties of residual soils from South-Central Brazil. *Proc. 2nd Int. Congr. Int. Assoc. Eng. Geology. Sao Paulo Brazil. Vol. 1 IV-PC*, 5-26.

Vargas, M. (1975). Engineering properties of residual soils of South-Central region of Brazil. *Proc. Int. Cong. I.A.E.G. IV-PC-5*, 1-26.

Vargas, M., Silva, F., & Tubio, M. (1965). Residual clay dams in the state of Sao Paulo, Brazil. *Proc. Int. Conf. Soil Mech. Found. ENg., 6th, Montreal, 2*, 578-582.

Vialisse-Terrisse, H. (2000). Interaction des silicates de calcium hydratés, principaux constituans du ciment, avec les chlorures d'alcalin. Analogie avec les argiles. *Thèse de doctorat. Université de Bourgogne, UFR Sciences et Techniques, France*, 256p.

Walker, P. J. (1995). Strengh, durability and shrinkage characteristics of cement stabilized soils blocks. *Cem. Concr. comp.,17*, 301-310.

Wallace, K. (1973). Structural behaviour of residual soils of the continually wet highland of Papua New Guinea. *Geotechnique 23*, 203-218.

Walther, J. (1915). Laterite in West Australian. *Z. Deut. Geol. Ges., 67B*, 113-140.

Westshondo, D. (2012). Caractérisation et valorisation des matériaux argileux de la Province de Kinshasa (RD Congo). *Thèse de doctorat. Université de Liège*, 336p.

Whitehouse, F. W. (1940). Studies in the late geological history of Queensland. *Dept. Geol. Mineral. Pap.*, 1-23.

Wilson, M. J. (1986). Mineral weathering processes in podzolic soils on granitic materials and their implications for surface water acidification. *Journal of the Geological Society of London, 143*, 691-697.

Wooltorton, F. (1947). The relation between the plastic index percentage of fines in granular soil stabilzation. *Proc. Highw. Res. Board, Washington*, 479-40.

Wooltorton, F. (1968). Discussion on residual soils of Kumasi district in Ghana. *Geotechnique*, 278-280.

XP P 94-090-1. (Décembre 1997). Essai oedométrique. Partie 1: Essai de compressibilité sur matériaux fins quasi-saturés avec chargement par palliers. *Association Française de Normalisation (AFNOR).*