



**HAL**  
open science

**CARACTERISATION CHIMIQUE,  
MINERALOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DES  
GRAVELEUX LATERITIQUES  
D'OBALA-MBANDJOCK (CENTRE CAMEROUN)  
EN VUE DE LEUR UTILISATION EN  
CONSTRUCTION ROUTIERE**

Aloys Thierry Ndzié Mvindi

► **To cite this version:**

Aloys Thierry Ndzié Mvindi. CARACTERISATION CHIMIQUE, MINERALOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DES GRAVELEUX LATERITIQUES D'OBALA-MBANDJOCK (CENTRE CAMEROUN) EN VUE DE LEUR UTILISATION EN CONSTRUCTION ROUTIERE. Minéralogie. Université de Yaoundé I, 2019. Français. NNT: . tel-03357160

**HAL Id: tel-03357160**

**<https://theses.hal.science/tel-03357160v1>**

Submitted on 28 Sep 2021

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE  
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE DOCTORALE  
EN GEOSCIENCES ET APPLICATIONS

ATTESTATION DE CORRECTION DE THESE DE DOCTORAT/Ph. D

\*\*\*\*\*

Option : Sol, Eau, Sciences Géotechniques  
Spécialité : Sciences Géotechniques

Nom et Prénoms du candidat : NDZIE MVINDI ALOYS THIERRY

Matricule : 01Y067

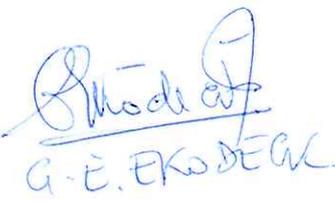
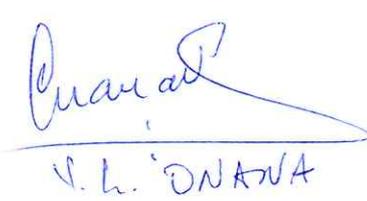
Titre de la thèse :  
"Caractérisation minéralogique, géochimique et géotechnique des graveleux latéritiques de la zone Obala – Mbandjock (Centre Cameroun)"

Date de soutenance : Jeudi, le 19 décembre 2019.

Nous, membres du jury, après avoir lu le document qui nous a été présenté, attestons que le candidat a effectué toutes les corrections, conformément aux observations formulées lors de la soutenance.

En foi de quoi, la présente **Attestation de correction** lui est délivrée, pour servir et valoir ce que de droit.

Les membres

  
N. Adam Ngoupayou J.R.  
  
G. E. EKO DEAK  
  
V. L. DNANA

Le Président

  
Robert MEDJO EKO, PhD, P.E.  
Professor

**UNIVERSITE DE YAOUNDE I**  
FACULTE DES SCIENCES  
CENTRE DE RECHERCHE  
ET FORMATION DOCTORALE  
EN SCIENCES, TECHNOLOGIES  
ET GEOSCIENCES



**THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I**  
FACULTY OF SCIENCE  
POSTGRADUATE SCHOOL  
IN SCIENCES, TECHNOLOGY  
AND GEOSCIENCES

**DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE**  
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

**UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE DOCTORALE**  
**EN GEOSCIENCES ET APPLICATIONS**

**Laboratoire de Géosciences des formations superficielles et Applications**  
Laboratory of Geosciences of Superficial Formations and Applications

**CARACTERISATION MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE ET  
GEOTECHNIQUE DES GRAVELEUX LATERITIQUES DE LA  
ZONE OBALA-MBANDJOCK (CENTRE CAMEROUN)**

**Thèse présentée en vue de l'obtention du Doctorat/Ph.D en Sciences de la Terre**

**Option : Sol, Eau, Sciences Géotechniques**

**Spécialité : Sciences Géotechniques**

Par

**Ndzie Mvindi Aloys Thierry**

Matricule 01Y067

Master en Sciences de la Terre

Sous la co-direction de

**Onana Vincent Laurent**

Maître de Conférences

*Université de Yaoundé I*

**Ekodeck Georges Emmanuel**

Professeur

*Université de Yaoundé I*

**Année 2019**

*A Dieu tout puissant,*  
*A la mémoire de Joseph Mengang Mewondo,*  
*A René Théodore Efoua Fono,*  
*A mon professeur Vincent Laurent Onana,*  
*A mes chers parents Mvindi Abada et Adele Mendouga.*

*«L'Eternel fait mourir et Il fait vivre. Il fait descendre au séjour des morts et Il en fait remonter. L'Eternel appauvrit et Il enrichit, Il abaisse et Il relève. De la poussière Il retire le pauvre, du fumier Il relève l'indigent, pour les faire asseoir avec les grands.»*

*1 Samuel, 2 :7-8.*

## Table des matières

<b>Dédicace</b> .....	i
<b>Citation</b> .....	ii
<b>Table des matières</b> .....	iii
<b>AVANT-PROPOS</b> .....	vii
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	xi
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	xiv
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	xvi
<b>RESUME</b> .....	xviii
<b>ABSTRACT</b> .....	xix
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>CHAPITRE I</b> .....	5
<b>INTRODUCTION</b> .....	6
<b>I. MILIEU NATUREL</b> .....	6
I.1. Localisation géographique .....	6
I.2. Climat.....	6
I.3. Végétation .....	6
I.4. Géomorphologie .....	10
I.5. Géologie.....	10
I.5.1. Socle.....	10
I.5.2. Sols.....	12
I.5.2.1. Sols ferrallitiques faiblement désaturés rajeunis et appauvris .....	12
I.5.2.2. Sols hydromorphes.....	14
<b>II. TRAVAUX ANTERIEURS COMPLEMENTAIRES</b> .....	14
II.1. Travaux sur les roches .....	14
II.1.1. Géologie.....	14
II.1.2. Propriétés géotechniques des roches.....	15
II.2. Travaux sur les graveleux latéritiques .....	15
II.2.1. Définitions et généralités .....	15
II.2.2. Caractéristiques génétiques .....	21
II.2.2.1. Graveleux latéritiques sur roches métamorphiques .....	23
II.2.2.2. Graveleux latéritiques sur roches plutoniques .....	24
II.2.3. Caractéristiques géotechniques des graveleux latéritiques .....	25
II.2.3.1. Graveleux latéritiques sur roches métamorphiques .....	25

II.2.3.2. Graveleux latéritiques sur roches plutoniques .....	27
II.2.4. Variabilité statistique des propriétés génétiques et géotechniques des graveleux latéritiques .....	29
II.2.4.1. Corrélations entre paramètres géotechniques des graveleux latéritiques .....	29
II.2.4.2. Corrélations entre caractéristiques génétiques et paramètres géotechniques .....	31
II.2.5. Utilisation des graveleux latéritiques en construction routière.....	32
II.2.5.1. Classification des graveleux latéritiques .....	32
II.2.5.2. Spécifications des graveleux latéritiques en construction routière .....	34
<b>CONCLUSION</b> .....	38
<b>CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES</b> .....	40
<b>INTRODUCTION</b> .....	41
<b>I. ENQUETES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	41
<b>II. METHODES D'ACQUISITION DES DONNEES D'ANALYSES EXPERIMENTALES</b> .....	41
II.1. Méthodes d'acquisition des données de terrain.....	41
II.1.1. Localisation des carrières et matériels .....	41
II.1.2. Prélèvement des échantillons de roche .....	41
II.1.3. Prélèvement des échantillons de graveleux latéritiques .....	41
II.2. Méthodes d'acquisition des données de laboratoire .....	42
II.2.1. Physico - chimie et pétrologie des matériaux.....	42
II.2.1.1. Mesures du pH et Eh.....	42
II.2.1.2. Pétrographie .....	42
II.2.1.3. Analyses minéralogiques.....	42
II.2.1.4. Analyses géochimiques .....	44
II.2.2. Essais géotechniques .....	44
II.2.2.1. Essais sur roches .....	45
II.2.2.1.1. Caractéristiques géométriques des granulats .....	45
II.2.2.1.2. Caractéristiques intrinsèques des granulats .....	45
II.2.2.2. Essais sur graveleux latéritiques .....	47
II.2.2.2.1. Essais d'identification .....	47
II.2.2.2.2. Essais de compactage.....	49
<b>III. METHODES D'EXPLOITATION DES DONNEES D'ANALYSES EXPERIMENTALES</b> .....	52
III.1. Méthodes d'exploitation des données minéralogiques .....	52
III.2. Méthodes d'exploitation des données géochimiques .....	52
III.2.1. Indices et diagrammes géochimiques .....	52
III.2.2. Restructuration normative altérologique .....	52
III.3. Méthodes d'exploitation des données géotechniques.....	55
III.4. Méthodes d'analyse statistique des données.....	55

III.4.1. Analyses descriptives .....	55
III.4.2. Analyse de régression .....	56
III.4.3. Analyse en composantes principales .....	56
III.4.4. Classification ascendante hiérarchique .....	57
<b>CONCLUSION</b> .....	58
<b>CHAPITRE III. RESULTATS</b> .....	60
<b>INTRODUCTION</b> .....	61
<b>I. LOCALISATION DES POINTS DE PRELEVEMENTS</b> .....	61
<b>II. CARACTERISATION PETROLOGIQUE DES MATERIAUX</b> .....	61
II.1. Caractérisation pétrologique des gneiss .....	61
II.1.1. Pétrographie et minéralogie .....	61
II.1.2. Géochimie .....	67
II.2. Caractérisation physico – chimique et pétrologique des graveleux latéritiques .....	67
II.2.1. Variation du pH et Eh .....	67
II.2.2. Pétrographie des graveleux latéritiques .....	71
II.2.3. Minéralogie des graveleux latéritiques .....	77
II.3. Synthèse des données macromorphologiques et pétrologiques .....	88
<b>III. CARACTERISATION GEOTECHNIQUE DES MATERIAUX</b> .....	88
III.1. Caractérisation géotechnique des gneiss .....	88
III.1.1. Caractéristiques physiques .....	88
III.1.1.1. Granularité .....	88
III.1.1.2. Coefficient d’aplatissement .....	91
III.1.1.3. Propreté des granulats .....	91
III.1.2. Caractéristiques intrinsèques .....	91
III.1.2.1. Masse volumique des grains solides .....	91
III.1.2.2. Résistance à l’usure : données Micro Deval (MDE) et de friabilité des sables (FS) .....	91
III.1.2.3. Résistance aux chocs : données Los Angeles (LA) .....	91
III.1.2.4. Caractéristiques de compactage et de portance .....	91
III.2. Caractérisation géotechnique des graveleux latéritiques .....	93
III.2.1. Masse volumique des grains solides .....	93
III.2.2. Granularité .....	93
III.2.3. Caractéristiques de plasticité .....	93
III.2.4. Paramètres dérivés .....	96
III.2.5. Classification .....	96
III.2.6. Paramètres de compactage .....	96
<b>IV. VARIABILITE STATISTIQUE DES MATERIAUX DANS LA ZONE OBALA - MBANDJOCK</b> .....	97

IV.1. Corrélations entre paramètres pétrologiques .....	97
IV.2. Corrélations entre paramètres géotechniques .....	100
IV.2.1. Analyses de régression .....	100
IV.2.2. Analyse en composantes principales .....	110
IV.3. Synthèse des données géotechniques .....	113
IV.3.1. Masse volumique des grains solides .....	113
IV.3.2. Paramètres de plasticité .....	113
IV.3.3. Paramètres granulométriques.....	116
IV.3.4. Paramètres dérivés .....	116
IV.3.5. Classification .....	118
IV.3.6. Paramètres de compactage.....	118
<b>CONCLUSION</b> .....	121
<b>CHAPITRE IV. DISCUSSION</b> .....	123
<b>INTRODUCTION</b> .....	124
<b>I. INTENSITE DE L'ALTERATION DANS LES GRAVELEUX LATERITIQUES</b> .....	124
<b>II. TYPES DE GRAVELEUX LATERITIQUES DANS LA ZONE D'ETUDE</b> .....	130
<b>III. LIENS ENTRE PARAMETRES PETROLOGIQUES ET PARAMETRES GEOTECHNIQUES</b>	133
III.1. Corrélations entre paramètres géochimiques et propriétés géotechniques .....	133
III.2. Corrélations entre paramètres d'altération chimique et paramètres géotechniques .....	139
III.3. Corrélations entre composition minéralogique et propriétés géotechniques .....	142
<b>IV. INTERETS DES MATERIAUX EN CONSTRUCTION ROUTIERE</b> .....	144
IV.1. Gneiss.....	144
III.2. Graveleux latéritiques de savane humide .....	146
IV.3. Graveleux latéritiques de savane mixte.....	148
IV.4. Graveleux latéritiques de savane sèche .....	149
<b>CONCLUSION</b> .....	152
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</b> .....	154
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	158
<b>ANNEXES</b>	

## AVANT-PROPOS

Dans le cadre de cette étude, j'ai eu à m'intéresser à deux problèmes concernant l'étude des graveleux latéritiques en zone équatoriale dans le plateau sud camerounais, la minéralogie et la géochimie d'une part et, d'autre part, la géotechnique ; l'idée étant de faire ressortir par le biais d'études statistiques, les liens existant entre les données minéralogiques et chimiques et les paramètres géotechniques de ces matériaux, dont l'intérêt en construction routière n'est plus à démontrer. Ce travail s'inscrit dans le vaste projet de caractérisation et de valorisation des graveleux latéritiques du Cameroun au sein du Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et d'Altérologie (LGIA) de l'Université de Yaoundé I. N'ayant pas été l'objet d'un financement externe, cette thèse a été réalisée dans des conditions matérielles très difficiles. Néanmoins, les modestes moyens matériels et financiers dont nous disposions ont permis d'aboutir au présent mémoire de Thèse de Doctorat/Ph.D, avec l'aide de certaines personnes, que je trouve opportun de remercier.

En m'inscrivant en cycle de Doctorat, je n'avais qu'une certitude, celle de pouvoir compter sur Dieu. Il m'avait donné la grâce de soutenir le Master, je savais aussi qu'Il allait le faire pour le Doctorat. J'aimerais donc remercier le Bon Dieu pour m'avoir donné l'opportunité de financer cette thèse, pour sa protection et pour toutes les autres grâces qu'Il m'a accordées durant tout ce parcours plein d'embûches.

Je remercie de façon très respectueuse le Professeur Georges Emmanuel Ekodeck, pour avoir accepté de diriger ces travaux. Sa rigueur et son enthousiasme scientifiques sont un exemple pour moi. Bien évidemment, ces quelques mots ont du mal à exprimer l'estime et le respect que je lui porte ainsi que le plaisir et la chance que j'ai eu l'avoir comme enseignant, puis comme encadreur.

Je remercie mon co-directeur, que dis-je, mon père, mon grand frère, mon ami, mon modèle, le professeur Vincent Laurent Onana. Je remercie le Bon Dieu de l'avoir placé sur mon chemin parce que je lui dois tout sur le plan académique et humain. Je le remercie pour sa disponibilité, sa rigueur et pour cette relation particulière qu'il me permet d'avoir avec lui. J'espère que cette thèse sera à la hauteur de ses attentes.

Je remercie le Docteur Sylvie Désirée Noa Tang, (« la grande sœur » comme on aime à l'appeler, mon ami Arnaud et moi), l'épouse du Professeur Onana, pour son hospitalité à chacun de mes séjours à Ebang, sa bienveillance de tous les instants et surtout ses subtils conseils.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit du Professeur Emile Ekomane pour ses conseils et sa protection, et aussi au Professeur Guillaume Ewodo Mboudou, qui m'avait donné

des précieux conseils sur l'interprétation des données d'analyses en composantes principales (ACP) avant le début de mes travaux. Ma reconnaissance va également au Docteur Roger Firmin Donald Ntouala, pour toute sa disponibilité et pour les moments agréables passés au laboratoire.

Je ne saurais clore ce volet académique sans remercier particulièrement certains de mes enseignants du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, pour toutes les connaissances, à moi, transmises. Il s'agit des Professeurs Paul-Désiré Ndjigui, Véronique Kamgang Kabeyene Beyala, Dieudonné Bitom, Jean Paul Nzenti, Robert Roger Medjo Eko, Joseph Mvondo Ondo, Rose Yongue-Fouateu, Joseph Quentin Yene Atangana, Jules Rémy Ndam Ngoupayou, et du Docteur Daniel Lamilen Billa.

L'éducation d'un homme passe par plusieurs étapes. Depuis le début de mon existence et, à chaque étape de ma vie, j'ai toujours bénéficié de l'aide de certaines personnes que le Bon Dieu a placées sur mon chemin. Que mes parents Mvindi Abada et Adele Mendouga m'excusent de ne pouvoir trouver un mot plus grand que 'MERCI', pour leur amour et pour tout ce qu'ils ont fait pour moi de ma naissance jusqu'à ce jour. J'espère mes chers et tendres parents, que ce travail vous permettra de voir que vos efforts n'ont pas été vains.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur René Théodore Efoua Fono, pour tout ce qu'il a fait pour moi. Il m'a permis d'avoir un emploi au Labogénie. Cet emploi m'a donné la possibilité de financer mes travaux de thèse, mais aussi de pouvoir m'assumer en tant qu'homme. Mes remerciements vont également à Mme Véronique Efoua, pour sa grande générosité, mais aussi et surtout sa rigueur d'esprit.

Le Bon Dieu dans son omniscience m'a permis de travailler à Douala, ville dans laquelle réside Agathe Ndjolé, la veuve du regretté Joseph Mewondo Mengang, à qui j'avais dédié mon mémoire de Master. Je la remercie, pour tout ce qu'elle a fait pour moi, pour m'avoir hébergé pendant toutes ces années, sans jamais rien demander en retour. Merci pour toutes les fois où tu as dû te lever tôt parce que je devais voyager pour Yaoundé, merci pour ta bonté de cœur. Que le Seigneur te le rende au centuple.

Je remercie Monsieur Florient Menkouo Fouma, pour tous ses précieux conseils et son soutien de tous les instants.

Dans l'adolescence, période sensible, j'ai été encadré par une famille : la famille Atangana. Je remercie Monsieur Michel Atangana, pour m'avoir élevé comme un fils. Je le remercie pour sa rigueur qui a été très bénéfique pour moi. Ces remerciements vont également à Madame Jeanne Atangana, pour sa sollicitude et, surtout pour ses judicieux conseils.

En avril 2018, mon ordinateur contenant mes travaux de thèse a été volé alors que la dernière sauvegarde en ma possession datait de décembre 2017. Pendant que je me posais un million de questions et qu'une foule de sentiments confus assiégeaient mon esprit, Monsieur René Jacques Ngolo, quelques instants après la perte de mon ordinateur, m'a spontanément offert son ordinateur. Cet acte m'a profondément marqué et m'a fait passer en un instant, d'une grande tristesse à un grand espoir. J'ai dû faire un grand effort pour ne pas fondre en larmes tellement ce geste m'avait marqué. Je te remercie infiniment grand-frère pour tous tes encouragements et tous tes conseils et, espère que cette thèse te rendra fier de moi.

Je remercie tous ceux qui m'ont accompagné pendant mon stage en 2010 dans le chantier de construction de la route Obala – Batchenga - Nkolessong. Ce chantier aura marqué de façon particulière ma vie. Il s'agit de Messieurs Justin Dampand, Gustave Kamdem, Philippe Bihina, Francis Pechake, Bruno Toubi, Ghislain Mvondo, Pascal Kabong, Etienne Kabong, Robert Kamdem et Linus Vushigha. Mes remerciements vont également à Pauline Tapele et Dorine Zabze, pour toute leur aide et leur bienveillance.

Je remercie mes compagnons de terrain lors des différentes campagnes menées à savoir, le Professeur Vincent Laurent Onana, le Docteur Roger Firmin Donald Ntouala, Henri Mvondo Mbida, Arnaud Ngo'o Ze, Carine Yvane Tsoungui, Marthe Betyi, Asaph Ateba, Athanase Belibi, Hervé Abada et Passy Mvindi.

Mes remerciements vont également à mes camarades de promotion pour tous les moments passés au Laboratoire. Il s'agit de Carine Yvane Tsoungui, Hervé Nyassa Ohandja, Michel Awana Atéba, Josty Christian Doum Motanoc, Pascal Eyenga, Jules Mbanga Nyobe, Ghislain Bekon Ndongo, Michel Wongolo, Cyrille Awona et Herman Kemogne. Je remercie de façon particulière Georges Ndzana, pour toute la documentation qu'il a bien voulu m'envoyer depuis la Chine, mais aussi, Calixte Edzimbi et Plastini Ngami, qui ont accepté d'analyser mes échantillons en laboratoire et, Christian Balla pour la partie cartographie. Je remercie aussi mes cadets de laboratoire que sont Joël Nyemb Bayamack et Marie Thérèse Nanga Bineli, pour l'aide qu'ils m'ont apportée. Que le Bon Dieu vous accorde la grâce de terminer vos travaux de thèse de Doctorat/PhD.

Ma reconnaissance et ma gratitude vont aussi à l'endroit de mon ami et camarade Arnaud Ngo'o Ze, pour m'avoir permis de garder le lien avec l'Université de Yaoundé I. Je le remercie pour toute son aide et sa disponibilité, mais aussi pour toutes les discussions, parfois houleuses qu'on a eues durant la préparation de cette thèse.

J'exprime ma gratitude à la famille Mengoué et notamment à Mario Engamba, à mon ami de longue date Thierry Mvondo, à Chimène Dorine Bekola, Didier Arnold Assong, Celia Ndézoum, Ange Brandy Messong et Vicky Love Mpandé, pour leur soutien.

Je remercie les membres des grandes familles Abada Salomon à Salla et Ndzie Aloys à Bilik, pour toutes leurs bénédictions.

Ma reconnaissance va aussi à tous mes collègues du 2<sup>e</sup> Pont sur le Wouri. Il s'agit de Prudence Nkamta, Daniel Tebid, Alain Kouedjou, Abel Belga, François Nkemta, Cyprain Ngoa, mon frère Christian Mbarga, mon voisin Daniel Tchanya et, le doyen Ndoko Epesse, pour toute sa documentation.

Je remercie vivement mes frères et sœurs Arlette Abada, Willy Mvindi, Nike, Dave, Dimitri et Joël Evan Lionnel B. Mengang, et surtout Hervé Abada, qui a particulièrement consenti beaucoup de sacrifices pour moi.

De nombreuses personnes ont énormément contribué à la réalisation de ce mémoire. J'ai malheureusement oublié de mentionner leurs noms. Qu'elles trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Salla, Nyong et Mfoumou  
Aloys Thierry Ndzié Mvindi

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Carte de localisation de la zone Obala - Mbandjock (d'après la carte topographique de la zone de Bafia, feuilles NB-32-VI-2c et NB-32-VI-2a au 1/50 000 de L'INC-Cameroun) ....	7
Figure 2. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1957) appliqué aux données climatiques de la station d'Obala pour la période allant de 1984 à 2016 .....	8
Figure 3. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1957) appliqué aux données climatiques de la station de Mbandjock, pour la période allant de 1984 à 2016 .....	9
Figure 4. Carte géomorphologique de la zone Obala - Mbandjok (d'après la carte topographique de la zone de Bafia, feuilles NB-32-VI-2c et NB-32-VI-2a au 1/50 000, INC - Cameroun) .....	11
Figure 5. Carte géologique de la zone Obala - Mbandjock (d'après la carte géologique du Cameroun au 1/500 000 de Weecksteen (1957)) .....	13
Figure 6. Formes typiques des grosses pisolithes dans les sols latéritiques (De Graft-Johnson et Bhatia, 1969) .....	19
Figure 7. Etapes de la classification des sols latéritiques (d'après Rodrigues et al., 2010) .....	35
Figure 8. Classification des sols latéritiques pour une utilisation en couche de chaussée de faible coût dans les pays tropicaux et subtropicaux (d'après Rodrigues et al., 2010) .....	36
Figure 9. Carrière de graveleux latéritiques dans le secteur d'Olembé (PK 25 + 700) en zone de savane humide, entre Obala et Ndjoré .....	43
Figure 10. Carrière de graveleux latéritiques dans le secteur de Ndji (PK 49 + 000) en zone de savane sèche, entre Ndjoré et Mbandjock .....	43
Figure 11. Sélection des tamis et tamisage des granulats .....	46
Figure 12. Appareillage pour essais mécaniques sur roches .....	48
Figure 13. Types de boules utilisées pour les essais mécaniques sur roches .....	48
Figure 14. Réalisation de l'essai de détermination des limites d'Atterberg (limite de plasticité) .....	50
Figure 15. Réalisation de l'essai Proctor .....	51
Figure 16. Réalisation de l'essai CBR .....	51
Figure 17. Localisation des points d'échantillonnage des graveleux latéritiques sur la carte des unités géomorphologiques de la zone Obala - Mbandjock (D'après la carte topographique de la zone de Bafia, feuilles NB-32-VI-2c et NB-32-VI-2a au 1/50 000, INC - Cameroun) .....	62
Figure 18. Localisation des points d'échantillonnage des roches et des graveleux latéritiques .....	63
Figure 19. Organisation macroscopique des gneiss dans la zone d'Obala – Mbandjock .....	65
Figure 20. Aspects microscopiques des gneiss du secteur d'Obala – Mbandjock .....	66
Figure 21. Position des gneiss dans le diagramme discriminant SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> versus K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O des métasédiments de Wimmenauer (1984) .....	69
Figure 22. Position des gneiss dans le diagramme binaire K <sub>2</sub> O – SiO <sub>2</sub> de Le Maître et al. (1989) .....	69
Figure 23. Position des graveleux latéritiques de la zone d'Obala - Mbandjock dans les diagrammes Eh - pH de conditions de formation des matériaux .....	72
Figure 24. Disposition des sols en zone de savane humide, entre Obala et Ndjoré .....	73
Figure 25. Caractères macroscopiques des graveleux latéritiques de savane humide, entre Obala et Ndjoré .....	74
Figure 26. Disposition des sols en zone de savane sèche, entre Ndjoré et Mbandjock .....	76
Figure 27. Caractères macroscopiques des graveleux latéritiques en zone de savane sèche, entre Ndjoré et Mbandjock .....	78
Figure 28. Diffractogrammes de rayons X des graveleux latéritiques de savane humide et de savane sèche .....	80

Figure 29. Position des graveleux latéritiques dans le diagramme géochimique SiO <sub>2</sub> – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	83
Figure 30. Position comparée des graveleux latéritiques dans le diagramme géochimique SiO <sub>2</sub> – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	85
Figure 31. Courbe granulométrique de la fraction 0/4 des gneiss dans la zone d'Obala - Mbandjock	89
Figure 32. Courbe granulométrique de la fraction 4/6,3 des gneiss dans la zone d'Obala - Mbandjock	89
Figure 33. Courbe granulométrique de la fraction 6,3/10 des gneiss dans la zone d'Obala - Mbandjock	90
Figure 34. Cercle de corrélations des composants chimiques des graveleux latéritiques dans la zone Obala – Mbandjock	98
Figure 35. Répartition des graveleux latéritiques en fonction des composants chimiques	99
Figure 36. Cercle de corrélation des données minéralogiques des graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock par la méthode d'Yvon et al. (1990)	101
Figure 37. Répartition des graveleux latéritiques de la zone d'Obala - Mbandjock suivant la composition minéralogique sur le plan factoriel F1-F2	102
Figure 38. Répartition des graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock dans le plan factoriel F1-F2 en fonction des corrélations chimiques et minéralogiques	103
Figure 39. Nuage des points entre G <sub>m</sub> et <425 µm et courbe ajustée	103
Figure 40. Nuage de points entre <425 µm et <75 µm et courbe ajustée	104
Figure 41. Nuage des points entre P <sub>m</sub> et <75 µm et courbe ajustée	104
Figure 42. Nuage des points entre IP et ε <sub>s</sub> et courbe ajustée	106
Figure 43. Nuage des points entre <2 mm et <425 µm et courbe ajustée	106
Figure 44. Nuage des points entre P <sub>p</sub> et <425 µm et courbe ajustée	107
Figure 45. Nuage des points entre P <sub>p</sub> et <75 µm et courbe ajustée	107
Figure 46. Nuage des points entre P <sub>p</sub> et IP et courbe ajustée	108
Figure 47. Nuage des points entre IP et LL et courbe ajustée	108
Figure 48. Nuage des points entre TEO et DSM et courbe ajustée	109
Figure 49. Nuage des individus issu de l'ACP	111
Figure 50. Cercle de corrélation des paramètres géotechniques	112
Figure 51. Biplot des variables et des individus des graveleux latéritiques de la zone Obala – Mbandjock	114
Figure 52. Comparaison des valeurs de masse volumique des grains solides	114
Figure 53. Comparaison des valeurs de limite de liquidité (LL)	115
Figure 54. Position des mortiers des graveleux latéritiques dans le diagramme de plasticité de Casagrande	115
Figure 55. Comparaison des valeurs de l'indice de plasticité IP	117
Figure 56. Comparaison des valeurs de teneur en eau optimale (TEO)	119
Figure 57. Comparaison des valeurs de densité sèche maximale (DSM)	119
Figure 58. Comparaison des valeurs de CBR	120
Figure 59. Position comparée des différents degrés d'altération des graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock et ceux des autres auteurs dans le diagramme molaire Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – CaO* + Na <sub>2</sub> O – K <sub>2</sub> O (A – CN – K)	125
Figure 60. Position comparée des différents degrés d'altération des graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock et ceux des autres auteurs dans le diagramme molaire A – L – F	127
Figure 61. Illustration des différents degrés d'altération des graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock dans le diagramme ternaire SiO <sub>2</sub> – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (SAF)	127
Figure 62. Illustration comparée des différents degrés d'altération des graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock dans le diagramme AF – CNK – M	128

Figure 63. Covariation de la perte au feu (LOI) et de l'indice chimique d'altération (CIA) dans les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock .....	128
Figure 64. Covariation comparée perte au feu (LOI) – Indice de latéritisation (IOL) dans les graveleux latéritiques de la zone Obala – Mbandjock.....	129
Figure 65. Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les graveleux latéritiques sur gneiss à amphibole et épidote, d'après le diagramme L–I–C d'Ekodeck et Kamgang (2002, 2011) ; L : Lixiviation ; I : Induration ; C : Confinement.....	131
Figure 66. Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les graveleux latéritiques sur gneiss à amphibole et épidote d'après le diagramme A – I –C d'Ekodeck et Kamgang (2002, 2011) ; A : Altération ; I : Induration ; C : Confinement.....	131
Figure 67. Caractérisation de l'importance des facteurs pédogénétiques dans les graveleux latéritiques sur gneiss à amphibole et épidote de la zone Obala - Mbandjock, d'après le diagramme carré d'Ekodeck et Kamgang (2002, 2011), en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; Lixiviation potentielle .....	132
Figure 68. Caractérisation de l'importance de l'altération dans les graveleux latéritiques sur gneiss à amphibole et épidote de la zone Obala - Mbandjock, d'après le diagramme carré d'Ekodeck et Kamgang (2002, 2011), en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; Altération .....	132
Figure 69. Dendrogramme des graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock.....	134
Figure 70. Typologie de graveleux latéritiques dans la zone Obala - Mbandjock.....	135
Figure 71. Esquisse de la carte géotechnique des graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock .....	135
Figure 72. Diagramme des niveaux .....	136
Figure 73. Courbes granulométriques de la fraction 0/31,5 des gneiss à amphibole et épidote de la zone Obala - Mbandjock à l'intérieur des fuseaux de spécification pour couche de base et grave bitume (CEBTP, 1984).....	145
Figure 74. Graveleux latéritiques de savane humide à l'intérieur des fuseaux de spécification pour couches de fondation et de base (CEBTP, 1984).....	147
Figure 75. Graveleux latéritiques de savane sèche à l'intérieur des fuseaux de spécification pour couches de fondation et de base (CEBTP, 1984).....	151

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Données sur les précipitations et températures moyennes annuelles de la zone d'Obala (1984 – 2016).....	8
Tableau 2. Données sur les précipitations et températures moyennes annuelles de la zone de Mbandjock (1984 – 2016) .....	9
Tableau 3. Données récapitulatives des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques sur gneiss.....	26
Tableau 4. Données récapitulatives des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques sur micaschistes .....	28
Tableau 5. Données récapitulatives des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques sur schistes ....	28
Tableau 6. Données récapitulatives des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques sur roches plutoniques .....	28
Tableau 7. Données récapitulatives des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques du Sud Cameroun .....	30
Tableau 8. Correspondances entre $f \times IP$ et les caractéristiques mécaniques.....	35
Tableau 9. Spécifications des graveleux latéritiques utilisés en construction routière (CEBTP, 1984) .....	37
Tableau 10. Classes de portance en fonction du trafic (DEGN, 1987) .....	37
Tableau 11. Données de géolocalisation des différentes carrières de graveleux latéritiques .....	64
Tableau 12. Distribution des éléments majeurs (%) dans les gneiss de la zone Obala - Mbandjock .....	68
Tableau 13. Valeurs de pH et Eh dans les graveleux latéritiques de la zone d'Obala – Mbandjock .....	70
Tableau 14. Description pétrographique détaillée des graveleux latéritiques de savane humide, entre Obala et Ndjoré.....	75
Tableau 15. Description pétrographique détaillée des graveleux latéritiques de savane sèche, entre Ndjoré et Mbandjock.....	79
Tableau 16. Estimation semi-quantitative (%) du cortège minéralogique des graveleux latéritiques (fraction totale) étudiés (d'après la méthode d'Yvon <i>et al.</i> , 1990) .....	81
Tableau 17. Données d'analyses géochimiques (%) de la fraction totale des graveleux latéritiques dans la zone d'Obala - Mbandjock.....	82
Tableau 18. Valeurs des indices géochimiques dans les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock .....	86
Tableau 19. Valeurs des paramètres normatifs altérologiques des graveleux latéritiques dans la zone d'Obala - Mbandjock.....	87
Tableau 20. Données des paramètres géotechniques des gneiss dans la zone d'Obala - Mbandjock .....	92
Tableau 21. Valeurs moyennes des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques dans la zone d'Obala - Mbandjock.....	94
Tableau 22. Données statistiques élémentaires des caractéristiques géotechniques des graveleux latéritiques de savanes humide et sèche dans la zone d'Obala - Mbandjock .....	95
Tableau 23. Matrice de corrélation des composants chimiques (% d'oxydes) des graveleux latéritiques de savanes humide et de savane sèche dans la zone Obala – Mbandjock.....	98
Tableau 24. Matrice de corrélation des minéraux des graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock.....	101
Tableau 25. Matrice de corrélation des données chimiques et minéralogiques des graveleux.....	102
Tableau 26. Cosinus carré des variables .....	111
Tableau 27. Principales caractéristiques des graveleux latéritiques par classes dans la zone d'Obala - Mbandjock.....	134
Tableau 28. Matrice de corrélation entre composants chimiques et propriétés géotechniques dans les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock .....	138

Tableau 29. Matrice de corrélation entre paramètres d'altération et propriétés géotechniques dans les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock .....	140
Tableau 30. Matrice de corrélation entre paramètres d'altération normatifs et propriétés géotechniques dans les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock.....	141
Tableau 31. Matrice de corrélation entre données minéralogiques semi-quantitatives et paramètres géotechniques dans les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock .....	143
Tableau 32. Spécifications pour couches de base et couches de fondation (CEBTP, 1984).....	147
Tableau 33. Utilisation des graveleux latéritiques en fonction des valeurs de CBR (DEGN, 1987).....	150

## LISTE DES ABREVIATIONS

AASHTO : American Association of State Highway and Transportation Officials.

ACP : Analyse en composantes principales

AFNOR : Association française de normalisation

CA : Coefficient d'aplatissement

CAH : Classification Ascendante Hiérarchique

CBR : Californian Bearing Ratio

$C_c$  : coefficient de courbure

CIA : Chemical Index of Alteration

CIPW : Cross, Iddings, Pirrson and Washington

CEBTP : Centre d'Expertise du Bâtiment et des Travaux Publics.

$C_u$  : Coefficient d'uniformité

CV : Coefficient de variation

D : Coefficient Déval

DEGN : Direction des Etudes Générales et de la Normalisation

DSM : densité sèche maximale

DVAR : degré virtuel d'altération de la roche

DVRAR : degré virtuel relatif d'altération de la roche

EN : Norme Européenne

ESE : Essieu standard équivalent

ESM : équivalent de sable moyen

ESP : équivalent de sable au piston

ESV : équivalent de sable visuel

ET : Ecart type

F<sub>s</sub> : friabilité des sables

GPS : Global positioning system

G<sub>m</sub> : module de classement

HRB : Highway Research Board.

IAL : Indice d'Alumine Libre

ICDD : International Center for Diffraction Data

ICP : Indice de Confinement Potentiel

IFL : Indice de Fer Libre

IIP : Indice d'Induration Potentielle

ILP : Indice de Lixiviation Potentielle  
INC : Institut National de Cartographie.  
IOL : Index of Lateritisation  
IP : Indice de Plasticité  
IRCP : Indice Relatif de Confinement Potentiel  
IRGM : Institut de Recherches Géologiques et Minière.  
IRLP : Indice Relatif de Lixiviation Potentielle  
IRIP : Indice Relatif d'Induration Potentielle  
JCPDS : Joint Committee on Powder Diffraction Standards  
LA : Los Angeles  
LABOGENIE : Laboratoire national de Génie civil.  
LBTP : Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics.  
LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées  
LL : Limite de liquidité  
LOI : Loss on Ignition  
LP : Limite de plasticité  
MIA : Mafic index of Alteration  
MDE : Micro deval humide  
NF : Norme Française  
OPM : Optimum proctor modifié  
PDF : Powder Diffraction File  
PI : Indice de plasticité  
PK : Point Kilométrique  
Pm : module de plasticité  
Pp : produit de plasticité  
PPFAL : prédominance potentielle des oxyhydroxydes de fer et d'aluminium libres  
Ra : Rapport altérologique  
RDC : République Démocratique du Congo  
SAF : Silice Alumine Fer  
SETRA : Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements.  
SH : Savane Humide  
SS : Savane Sèche  
TEO : Teneur en Eau Optimale  
USCS : Unified Soil Classification System

## RESUME

Ce travail avait pour but d'étudier la variabilité des propriétés pétrologiques et géotechniques des graveleux latéritiques développés sous un même climat, une même végétation, un même substratum rocheux gneissique, mais localisés dans des conditions hydriques différentes, en vue de leur utilisation en construction routière. L'étude a été menée dans une carrière rocheuse et 18 carrières de graveleux latéritiques. Les échantillons prélevés ont fait l'objet d'études macroscopique, pétrologiques et géotechniques. La microscopie optique, la diffractométrie des rayons X, la fluorescence X et, la titrimétrie ont été appliquées à ces matériaux. Les études géotechniques ont porté sur les essais d'identification et de compactage et, sur les essais mécaniques sur roches. Les résultats obtenus montrent que les gneiss de la zone d'Obala-Mandjock de couleur grise sont à amphibole et épidote. Au microscope ils se composent de quartz, biotite, amphibole, pyroxène, orthose, microcline et épidote et de texture granonématoblastique. Ces gneiss sont majoritairement composés de  $\text{SiO}_2$  (55,76 %) et d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  (16,46 %). Les graveleux latéritiques (GL) développés sur ces gneiss se subdivisent en 02 zones, en fonction des caractères hydriques. Ceux de savane humide (GLSH), jaunâtres à matrice argilo-sableuse et, ceux de savane sèche (GLSS) rouges, à matrice argileuse. Ces matériaux sont composés de quartz, kaolinite, hématite, goéthite, et parfois de gibbsite et anatase. L'hématite et la goéthite, sont majoritaires en savane sèche alors que le quartz est plus abondant en savane humide. Les teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (31,41 %) et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (18,04 %) sont plus élevées en savane sèche tandis que celles en  $\text{SiO}_2$ , 51,13 %, sont majoritaires en savane humide. L'interprétation des indices géochimiques CIA,  $\text{MIA}_{(O)}$  et IOL, associés respectivement aux diagrammes A-CN-K, A-L-F et SAF ainsi que le diagramme AF-CN-K-M, montrent que la latéritisation est modérée à forte dans les GL étudiés. Les GLSH sont kaolinisés à modérément latéritisés alors que ceux de savane sèche, sont modérément à fortement latéritisés. Les diagrammes altérologiques indiquent que l'altération est faible à moyenne dans les GLSH et, moyenne, dans les GLSS. On observe également une prévalence de la ferruginisation dans les GLSS. Les valeurs de LA, MDE, CA et CBR indiquent que les granulats issus des gneiss d'Obala - Mbandjock sont utilisables en couches de base et de roulement. Les résultats de l'Analyse en Composantes Principales et de la Classification Ascendante Hiérarchique révèlent l'existence de 03 groupes de matériaux : (1) les GLSH ( $< 75 \mu\text{m} = 32,9 \%$ , Indice de plasticité (IP) = 27 %, Densité sèche maximale (DSM) = 1,9, Californian Bearing ratio (CBR) = 31 %); (2) ceux de la zone intermédiaire ou savane mixte ( $< 75 \mu\text{m} = 24,0 \%$  ; IP = 22 % ; DSM = 2,0 ; CBR = 44 %), et les GLSS ( $< 75 \mu\text{m} = 18,9 \%$  ; IP = 19 % ; DSM = 2,1 ; CBR = 51 %). Les GLSH sont caractérisés par la granulométrie et les paramètres de plasticité tandis que ceux les GLSS sont caractérisés par les paramètres physiques et de compactage. Les GL étudiés sont tous utilisables en couche de fondation. Cependant, ceux de savane mixte sont utilisables en couche de base pour trafic T1 et, les GLSS, en couche de base pour trafic T2 après lithostabilisation

**Mots-clés** : Gneiss, Graveleux latéritiques, Pétrologie, Propriétés géotechniques, Variabilité statistique, Construction routière.

## ABSTRACT

The present work aims to study the variability of the petrological and geotechnical properties of lateritic gravel developed under the same climate, the same vegetation, the same gneissic bedrock, but located under different hydric conditions, with a view to their use in road construction. The study was conducted on a rock quarry and 18 lateritic gravels quarries. After a detailed macroscopic description of the materials, the samples taken were the subject of petrological and geotechnical studies. The mineralogy of the powders of rock and lateritic gravels samples was determined by optical microscopy and X-ray diffractometry. The chemical determinations of the major elements of the materials were carried out by X-ray fluorescence and the determination of ferrous iron FeO, by titrimetry. Geotechnical studies focused on identification and compaction tests and on mechanical rock tests only. The results obtained show that the rocks of the Obala-Mandjock area are amphibole and epidote gneisses. Gray in color and granoblastic texture, these gneisses are composed of quartz, biotite, amphibole, pyroxene, orthoclase, microcline and epidote. Geochemically, this rock is predominantly composed of SiO<sub>2</sub> (55.76 %) and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (16.46 %). The lateritic gravels developed on these gneisses are subdivided into 02 zones, according to the water character. Those of humid savannah, yellowish with clay-sandy matrix and, those of dry savannah, red, with clay matrix. They are formed in acid (pH= 5.7) and reducing (Eh= 0.07 mV) environments, the environment being more reducing in humid savannah than in dry savannah. These materials are composed of quartz, kaolinite, hematite, goethite, and sometimes gibbsite and anatase. Hematite, goethite, are predominant in dry savannah while quartz is more abundant in humid savanna. The contents of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, respectively 31.41 % and 18.04 %, are higher in dry savannah while those in SiO<sub>2</sub>, 51.13 %, are predominate in humid savannah. These materials are silico-ferrugino-aluminous. The interpretation of these geochemical indices CIA, MIA<sub>(O)</sub> and IOL, respectively associated with A-CN-K, A-L-F and SAF diagrams as well as the AF-CN-K-M diagram show that the decrease of the labile elements (Ca, Na, K and Mg), very important in the lateritic gravel of the Obala - Mbandjock zone, is accompanied by a moderate to strong lateritization phenomenon. The lateritic gravels of humid savannah are kaolinitized to moderately lateritized, while those of dry savannah are moderately to strongly lateritized. Alterological charts indicate that alteration is low to medium in humid savannah and medium in dry savannah. Ferruginization, allitization and monosilitization prevail in these materials, with a prevalence of ferruginization in lateritic gravels of dry savannah. With LA < 30 %, MDE ≤ 20 %, CA ≤ 25 % and CBR ≥ 100 % values, aggregates from Obala - Mbandjock gneiss can be used as base layer and wearing course. The results of the Principal Component Analysis (PCA) and through Agglomerative Hierarchical Clustering (AHC) reveal the existence of 03 groups of materials, (1) the lateritic gravels of a humid savannah (< 75 μm = 32.9 %, Plasticity Index (PI) = 27 %, maximal dry density (MDD) = 1.9 g/cm<sup>3</sup>, Californian Bearing ratio (CBR) = 31 %), (2) intermediate lateritic gravels (<75 μm = 24.0%, PI = 22 %, MDD = 2.0 g/cm<sup>3</sup>, CBR = 44 %) and (3) lateritic gravels of dry savannah (<75 μm = 18.9%, PI = 19 %, MDD = 2.1 g/cm<sup>3</sup>, CBR = 51 %). The lateritic gravels of humid savannah are characterised by the granulometry and plasticity parameters while those of the dry savannah are characterised by physical and compaction parameters. The studied lateritic gravels are both usable as sub-base layer. However, those of mixte zone can be use as base layer for T1 traffic and, those of dry savannah, as sub-base layer for T2 traffic after lithostabilisation.

**Keywords :** Gneiss, Lateritic gravels, Pétrology, Geotechnical properties, Statistical variability, Road construction.

# **INTRODUCTION GENERALE**

Les latérites ou sols latéritiques représentent une grande famille de sols qui se forment dans les régions tropicales et qui résultent de certains processus d'altération. Leur utilisation systématique comme matériaux de construction commence à en faire une ressource rare dans certaines parties d'Afrique. Il devient donc nécessaire d'évaluer les ressources disponibles et d'étudier comment étendre le domaine des propriétés acceptables pour ces sols ou, d'utiliser des matériaux naturels de remplacement (Bohi, 2008).

Les latérites ont été l'objet de nombreuses études qui ont ressorti cinq facteurs susceptibles d'influencer la formation de ces sols à savoir, le climat, la végétation, la roche mère, la topographie et le temps (Maignien, 1966 ; Ekodeck, 1984 ; Bagarre, 1990 ; Duchaufour, 2001 ; Kamgang Kabeyene *et al.*, 2001). La combinaison variable de ces différents facteurs produit nécessairement des matériaux à texture, composition et caractéristiques chimico-minéralogiques variables (Santoir et Villiers, 1995). Ainsi, pour une aire géographique donnée possédant un même climat, un même substratum rocheux, une même végétation, des formations latéritiques de même âge mais, localisées à des positions topographiques différentes présenteront des propriétés géotechniques et mécaniques différentes.

Des latérites, les graveleux latéritiques, particulièrement, sont abondamment utilisés dans la construction des routes et des barrages, dans les programmes de développement des infrastructures des pays tropicaux (Sikali et Djalal, 1987 ; Millogo *et al.*, 2008 ; Kassogue *et al.*, 2002). Leur utilisation est justifiée par leur disponibilité, leur abondance dans ces régions et leur faible coût d'exploitation (Sikali et Djalal, 1987 ; Tockol, 1993). La plupart des travaux réalisés sur ces matériaux prennent en compte le plus souvent en guise de paramètres le climat et le type de roche (Nwaiwu *et al.*, 2006 ; Millogo *et al.*, 2008 ; Onana *et al.*, 2015 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017 ; Ngo'o Ze *et al.*, 2019 ; Nyemb Bayamack *et al.*, 2019). Cependant, l'hétérogénéité des caractéristiques géotechniques et mécaniques des graveleux latéritiques n'a pas toujours pu être expliquée en considérant uniquement ces deux paramètres. Ceci a amené les géotechniciens à étudier la relation entre le milieu de formation et les caractéristiques des graveleux latéritiques, dans le but de faciliter la prospection des gisements (Mesida, 1987 ; Fall, 1993 ; Nkoumou *et al.*, 2004) et, de prédire leur comportement sur le chantier (Bagarre, 1990 ; Fall, 1993 ; Millogo *et al.*, 2008 ; Onana *et al.*, 2017 ; Ngo'o Ze *et al.*, 2019). Les rapports entre le type de végétation et les latérites ont été établis concernant l'induration, la forme des nodules, la teneur en éléments grossiers et le drainage. Certains travaux (Ola, 1980 ; Santoir et Villiers, 1995 ; Kamgang Kabeyene *et al.*, 2001) concernant la comparaison 'latérites de forêt' – 'latérites de savane' ont été réalisés sous des environnements géologiques différents (roche parentale, géomorphologie et climat). La Direction des Etudes

Générales et de la Normalisation du Cameroun (DEGN, 1987) a caractérisé les latérites du Cameroun et a émis l'hypothèse d'une répartition par zones (zone de forêt, zone de savane, zone côtière et zone montagneuse). Très peu ou presque pas d'études existent sur l'influence des caractères hydriques sur le comportement géotechnique des graveleux latéritiques. En outre, malgré le caractère moyen à bon des graveleux latéritiques de la région du Centre Cameroun (Sikali et Djalal, 1987 ; Hieng, 2003), des dégradations et des déformations ont été observées sur le réseau routier de cette région, à cause de la qualité de la mise en œuvre des matériaux, et de l'insuffisance des tests géotechniques. En effet, s'agissant des tests géotechniques, il a été constaté que, les graveleux latéritiques choisis seulement sur la base de leurs propriétés géotechniques se sont mal comportés sur les chaussées (Tockol *et al.*, 1994 ; Mahalinga-Iyer et Williams, 1997 ; Millogo *et al.*, 2008). En conséquence, ces auteurs proposent d'associer les analyses minéralogiques et chimiques aux essais géotechniques classiques.

Le présent travail a donc pour but d'étudier la variabilité des propriétés pétrologiques et géotechniques des graveleux latéritiques développés sous un même climat, un même type de couvert végétal, un même substratum rocheux (gneiss), mais localisés dans des conditions hydriques différentes, en vue de leur utilisation en construction routière.

Les objectifs spécifiques de l'étude sont :

- caractériser les graveleux latéritiques étudiés sur le plan pétrologique ;
- déterminer les propriétés géotechniques des graveleux étudiés ;
- établir les liens entre les caractères hydriques et les types de graveleux latéritiques,
- effectuer des tests statistiques : analyses descriptives et analyses de régression, analyses factorielles en composantes principales (ACP), classification hiérarchique ascendante (CAH), entre propriétés minéralogiques, propriétés chimiques, propriétés géotechniques d'une part, et entre propriétés géotechniques et caractéristiques minéralogiques et chimiques, d'autre part ;
- réaliser une analyse factorielle globale, afin de mettre en évidence de nouvelles approches pour la gestion de l'utilisation des latérites en construction routière.

Le présent mémoire de thèse, après l'introduction générale comprend, 04 chapitres :

- le premier chapitre, Généralités, porte sur le cadre naturel de la zone d'étude et la revue complémentaire des travaux antérieurs,
- le deuxième chapitre, Matériels et méthodes, présente les travaux effectués sur le terrain et en laboratoire, ainsi que les différents modes d'exploitation des données obtenues ;

- le troisième chapitre, 'Résultats', rapporte les principaux faits d'observation et d'analyses pétrologique et géotechnique des roches et des graveleux latéritiques étudiés et, évalue la variabilité statistique des graveleux latéritiques ;
- le quatrième chapitre, 'Discussion' ; après avoir quantifié l'intensité du phénomène d'altération dans les graveleux latéritiques, établit des corrélations entre les paramètres pétrologiques et les paramètres géotechniques. Il précise enfin l'intérêt des matériaux étudiés en construction routière.

La thèse s'achève par une conclusion générale suivie des principales perspectives.

**CHAPITRE I**  
**GENERALITES**

## **INTRODUCTION**

Le présent chapitre définit le cadre géographique, les données climatologiques, hydrographiques et phytogéographiques de la zone d'étude Obala - Mbandjock. Par la suite, il présente une revue des travaux antérieurs complémentaires, dans le souci de mieux appréhender les propriétés minéralogiques, chimiques et géotechniques des matériaux étudiés.

## **I. MILIEU NATUREL**

### **I.1. Localisation géographique**

La zone d'étude est située dans le Plateau sud camerounais, entre Obala et Mbandjock. Elle s'étend entre 4°00' et 4°30' de latitude Nord, et entre 11°30' et 12°00' de longitude Est. Cette zone se localise le long de l'axe routier, entre Obala et Nanga Eboko, sur la nationale 1 (N1) (Fig. 1). Sur le plan administratif, la zone d'étude appartient à la région du Centre et aux départements de la Lékié (Obala - Ndjoré) et de la Haute - Sanaga (Ndjoré - Mbandjock).

### **I.2. Climat**

La moyenne annuelle des précipitations pour la période allant de 1984 à 2016 est de 1600 mm (Tab. 1) dans la zone Obala et 1500 mm (Tab. 2) dans la zone de Mbandjock. La température moyenne pour la même période est de 24,7°C dans les deux régions (Youta, 1998 ; Nguegang Asaa, 2008) (Figs. 2 & 3). Le climat de la zone Obala - Mbandjock est sub-équatorial de type guinéen forestier, ou équatorial de transition et présente 04 saisons :

- une grande saison sèche de décembre à février,
- une petite saison de pluies de mars à juin,
- une petite saison moins humide à tendance sèche, de juillet à août,
- une grande saison des pluies de septembre à novembre.

### **I.3. Végétation**

La région d'étude est une zone de transition forêt-savane. Elle regroupe les essences végétales des zones guinéennes et soudano-guinéennes et, appartient au vaste ensemble des savanes péri-forestières de Letouzey (1985). Selon certains auteurs (Vallerie, 1995 ; Santoir et Bopda, 1995), cette végétation est constituée de :

- forêt semi-caducifoliée dégradée ;
- recrus forestiers ;
- savane arbustive à raphiales dans les marécages et les zones hydromorphes ;

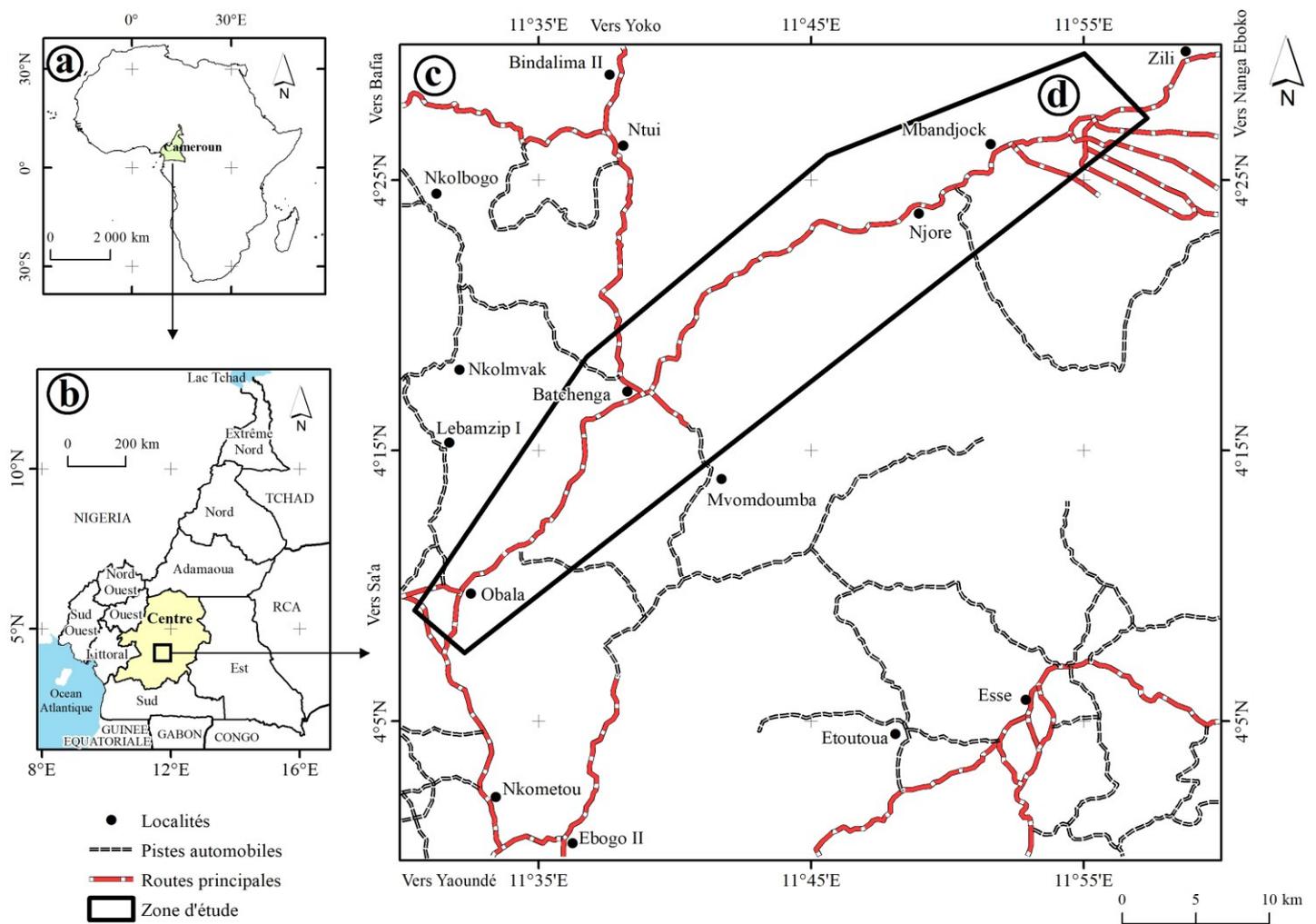


Figure 1. Carte de localisation de la zone Obala - Mbandjock (d'après la carte topographique de la zone de Bafia, feuilles NB-32-VI-2c et NB-32-VI-2a au 1/50 000 de L'INC-Cameroun)

Tableau 1. Données sur les précipitations et températures moyennes annuelles de la zone d'Obala (1984 – 2016)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total	Moy
$P_m$ (mm)	16,0	48,0	133,0	184,2	214,3	160,0	84,0	113,0	265,0	292,0	108,0	21,2	1638,0	-
$T_m$ (°C)	25,3	25,7	25,7	25,4	25,0	24,2	23,4	23,4	24,1	24,1	24,5	25,3	-	24,7

$P_m$  (mm) : précipitations en mm

$T_m$  (°C) : températures moyennes en °C

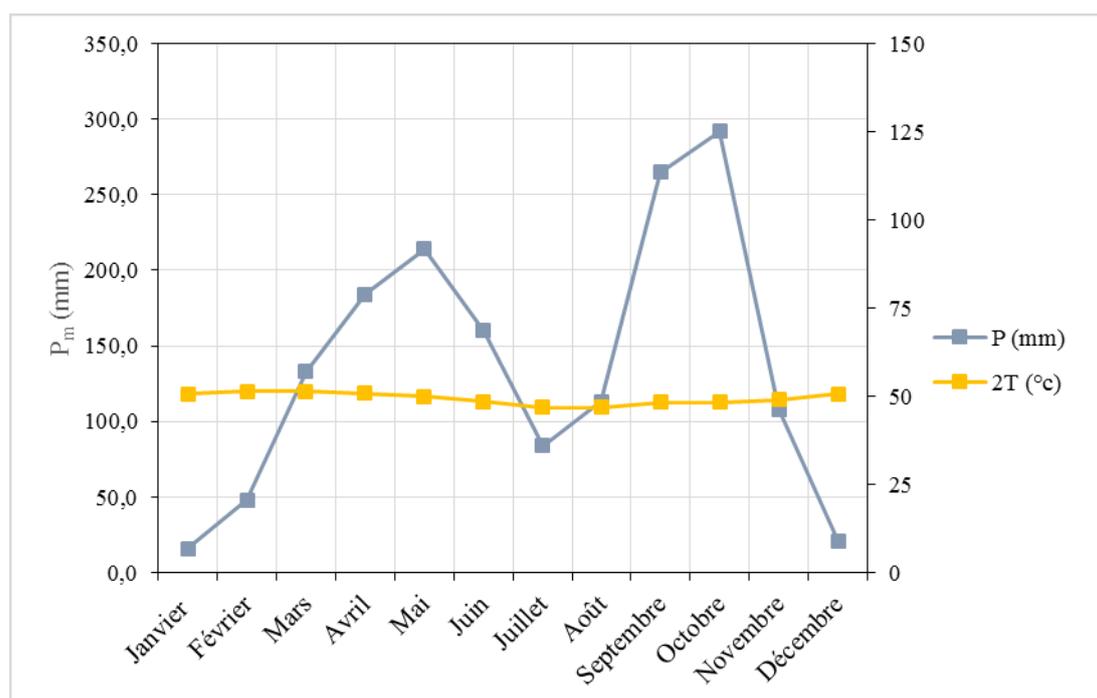


Figure 2. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1957) appliqué aux données climatiques de la station d'Obala pour la période allant de 1984 à 2016

Tableau 2. Données sur les précipitations et températures moyennes annuelles de la zone de Mbandjock (1984 – 2016)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total	Moy
$P_m$ (mm)	12,0	40,0	116,0	170,0	206,0	148,0	85,0	112,0	257,0	289,0	92,0	18,0	1545,0	-
$T_m$ (°C)	25,1	25,8	25,9	25,1	24,8	24,3	23,4	23,5	24,1	24,2	24,6	25,2	-	24,7

$P_m$  (mm) : précipitations en mm

$T_m$  (°C) : températures moyennes en °C

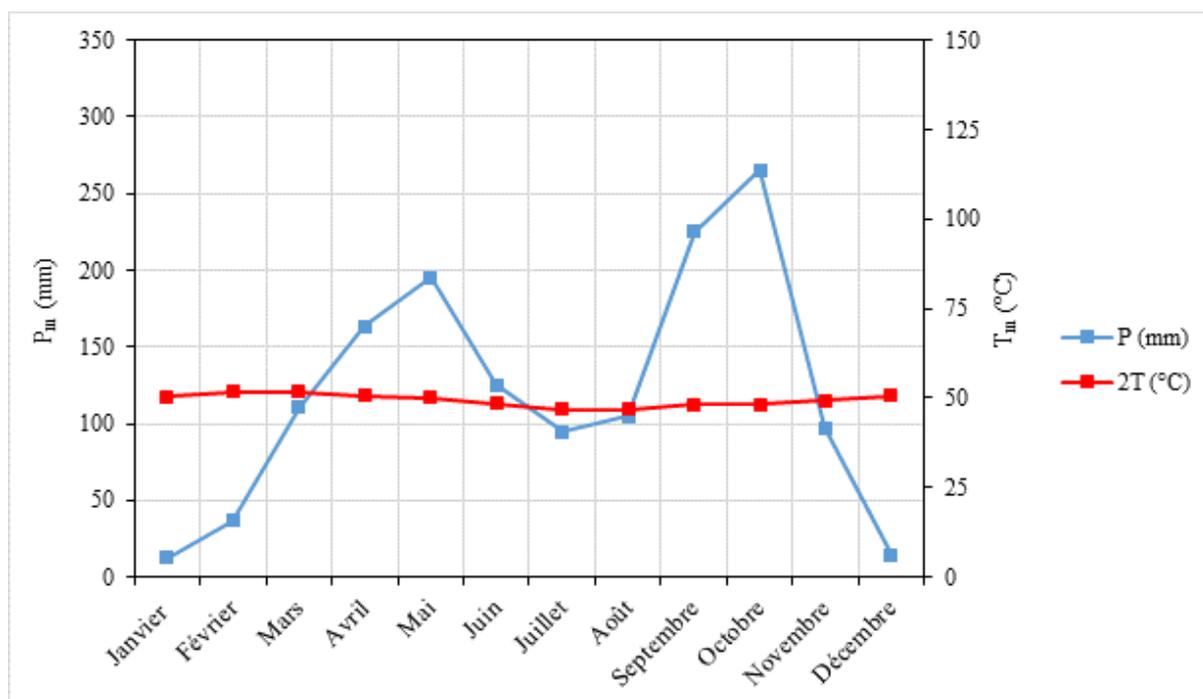


Figure 3. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1957) appliqué aux données climatiques de la station de Mbandjock, pour la période allant de 1984 à 2016

- savane arbustive à *Annona Saneglensis*, *Bridelia ferruginea* et *Terminalia glaucescens*.

#### **I.4. Géomorphologie**

Sur le plan orographique, la zone Obala - Mbandjock est située sur une pénéplaine dont l'altitude moyenne est de 520 m. Elle fait partie de la vaste pénéplaine ondulée qui couvre le Plateau sud camerounais (Santoir et Villiers, 1995). La carte des unités géomorphologiques fait apparaître 03 zones (Fig. 4) :

- une zone d'altitudes inférieures à 550 m, qui représente la zone humide,
- une zone d'altitudes comprises entre 550 et 650 m, qui correspond à la zone sèche,
- une zone d'altitudes supérieures à 650 m.

Sur le plan hydrographique, la zone Obala - Mbandjock appartient au bassin de la Sanaga dont la superficie est de 135 000 km<sup>2</sup>, soit plus de 25 % de la superficie totale du Cameroun (Santoir et Bopda, 1995). Le réseau hydrographique, bien hiérarchisé, très dense et dendritique, découpe de nombreuses vallées dans la pénéplaine (Ekodeck, 1984). Les cours d'eau présentent comme dans tous les milieux tropicaux humides, une succession de biefs calmes et de rapides (Olivry, 1986). La Sanaga dans son cours moyen, beaucoup moins régulier que celui du Nyong, coule à une altitude inférieure (450 m) à celle du Nyong (650 m). Ce bassin versant a une direction générale E - W (Youta, 1998). Les principaux affluents de la Sanaga dans la zone d'étude, l'Afamba, l'Avo'o, le Minkouma, l'Assamba, le Nia et le Nto ont un sens d'écoulement général N - S, tandis que le Mengola, le Messimi, le Messeme et le Banga, coulent du NW vers le SE.

#### **I.5. Géologie**

##### **I.5.1. Socle**

Les roches constituant le socle dans la zone Obala - Mbandjock appartiennent à la zone mobile d'Afrique centrale qui a subi un rajeunissement au Panafricain, il y'a 500 à 600 Ma. Ce socle s'étend sur une superficie de plus de 7 000 km<sup>2</sup> (Mvondo, 2003). Le Sud Cameroun correspond au domaine situé au Sud de l'accident de la Sanaga. La chaîne panafricaine dans le Sud Cameroun est constituée de roches métamorphiques plissées mais de natures variées. Deux ensembles lithologiques y sont définis à l'échelle régionale (Olinga, 2003) :

- un ensemble faiblement métamorphisé (séries d'Ayos, Bengbis et Yokadouma),

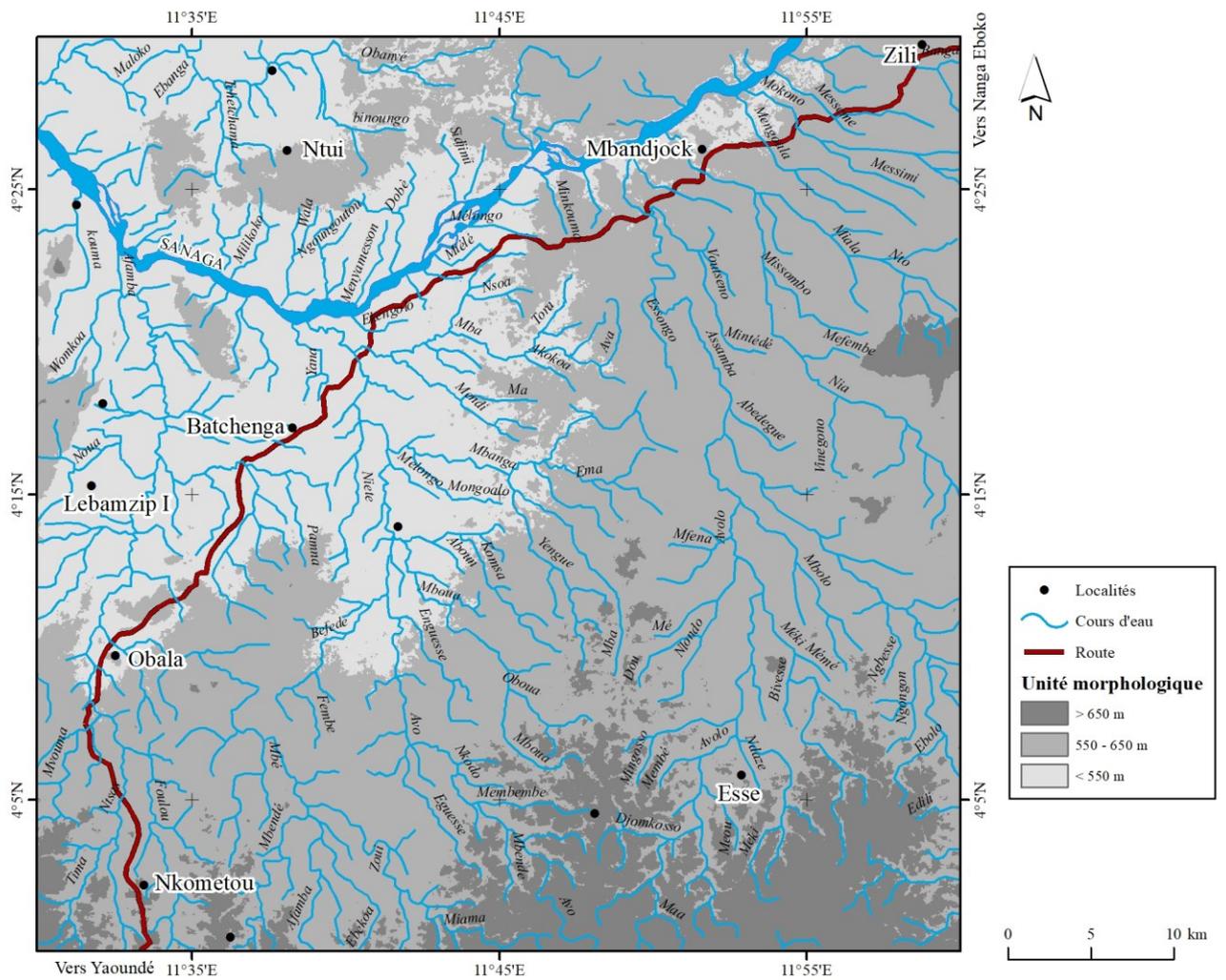


Figure 4. Carte géomorphologique de la zone Obala - Mbandjok (d'après la carte topographique de la zone de Bafia, feuilles NB-32-VI-2c et NB-32-VI-2a au 1/50 000, INC - Cameroun)

- un ensemble de moyen à haut degré métamorphique, composé de gneiss, migmatites, micaschistes, amphibolites et de roches à silicates calciques (séries de Yaoundé et de Nanga-Eboko).

Le groupe de Yaoundé est constitué par la série de Yaoundé (migmatites, gneiss, amphibolites, micaschistes et quartzites) et la série de Mbalmayo (schistes et quartzites à séricite et à chlorite). Ce groupe de Yaoundé est chevauché au Nord par le groupe de Bafia (Numbem Tchakounté *et al.*, 2007).

La zone étudiée est constituée de 04 principaux groupes lithologiques, les migmatites et gneiss migmatitiques, les amphibolites, les micaschistes et les quartzites micacés (Ekodeck, 1984). La zone Obala - Mbandjock est située en rive gauche de la Sanaga et, est en majorité constituée de gneiss migmatitiques à épидote (Ekodeck, 1984). L'esquisse de la carte géologique montre que le substratum de la zone d'étude est constitué majoritairement de gneiss (Fig. 5).

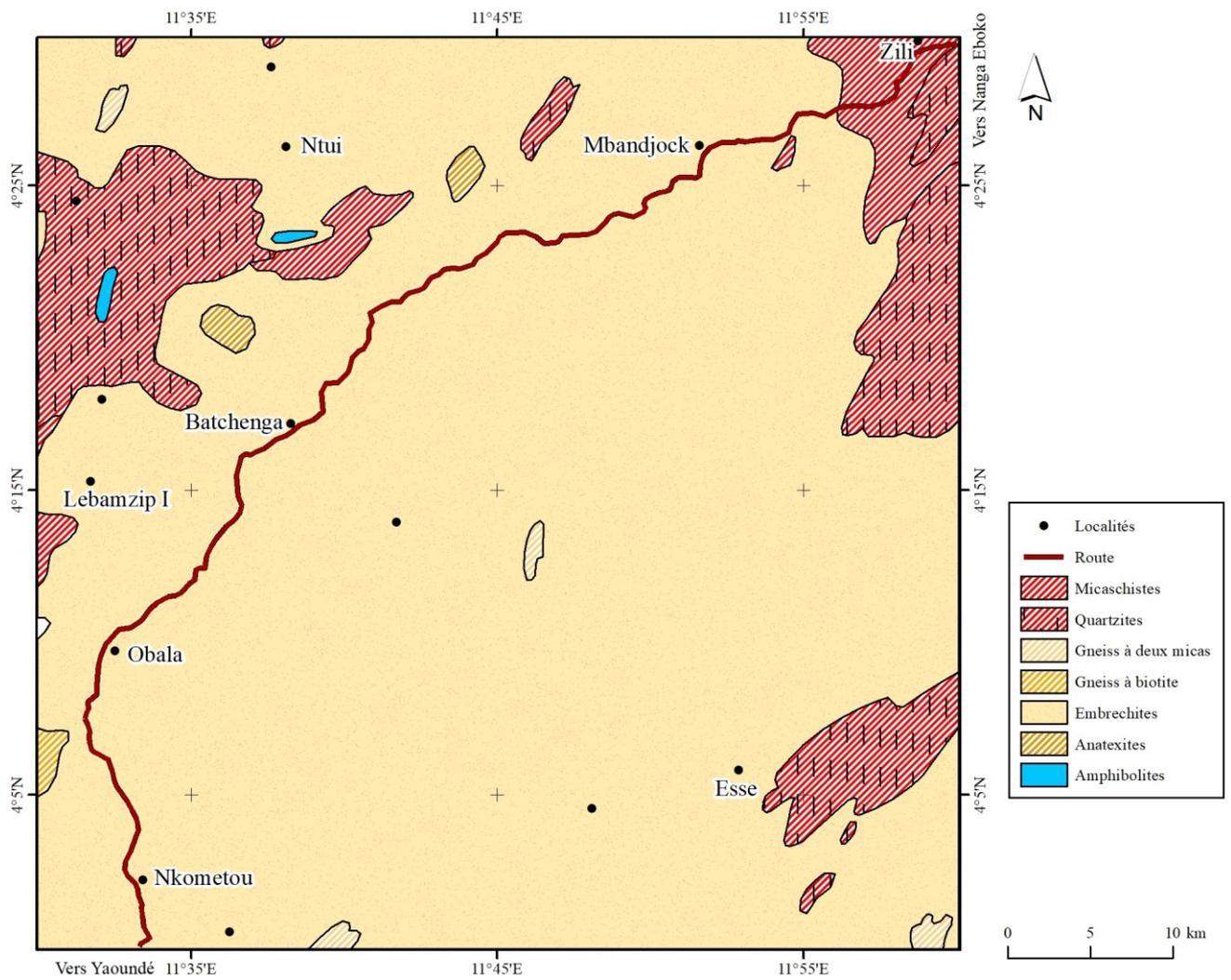
### **I.5.2. Sols**

Dans la zone de Batchenga, les sols sont pour la plupart moyennement à faiblement désaturés en bases (Ekodeck, 1984). Par ailleurs, dans la partie centrale du Cameroun et plus précisément dans la partie Nord de Yaoundé, la morphologie de la région est favorable au développement de 02 principales catégories de sols. Il s'agit des sols hydromorphes et des sols ferrallitiques (Ekodeck, 1984 ; Vallerie, 1995). Les sols ferrallitiques se rencontrent sur les collines et interfluves, alors que les sols hydromorphes se rencontrent dans les fonds de vallées humides et les berges des cours d'eau.

La zone d'étude est constituée d'une juxtaposition de sols ferrallitiques faiblement désaturés rajeunis et appauvris, et de sols hydromorphes (Vallerie, 1995).

#### **I.5.2.1. Sols ferrallitiques faiblement désaturés rajeunis et appauvris**

L'altération des minéraux primaires dans ces sols est complète avec présence toutefois de minéraux hérités tels que l'illite. On note l'abondance de quartz résiduel et l'élimination de la majeure partie des bases et de la silice. Ces sols ont une épaisseur variable (1,5 à 3 m) au-dessus des matériaux d'altération. Leur texture, sableuse à sablo-argileuse en surface, devient argilo-sableuse en profondeur. Sur le plan agricole, le potentiel chimique de ces sols est favorable et convient aussi bien aux cultures vivrières qu'aux cultures arbustives (Vallerie, 1995).



PK : Point kilométrique ; D : côté droit ; G : côté Gauche

Figure 5. Carte géologique de la zone Obala - Mbandjock (d'après la carte géologique du Cameroun au 1/500 000 de Weecksteen (1957))

### **I.5.2.2. Sols hydromorphes**

L'évolution des sols hydromorphes organiques dominants est marquée par l'action temporaire ou permanente d'un excès d'eau, dû à un engorgement temporaire ou permanent d'une partie ou de la totalité des horizons (Ekodeck, 1984). Les textures de ces sols sont très variables. Elles sont de types, sableux avec recouvrement limono-argileux, sablo-argileux et sablo-argileux, devenant argilo-sableux en profondeur (Vallerie, 1995). L'étude aux rayons X de ces sols révèle la présence d'illite et de montmorillonite à côté de la kaolinite, en quantité croissante avec la profondeur (Vallerie, 1995). Sur le plan agricole, ces sols sont très peu exploités mais paraissent favorables du point de vue chimique, à l'exception du phosphore qui en manque (Vallerie, 1995).

## **II. TRAVAUX ANTERIEURS COMPLEMENTAIRES**

Plusieurs travaux ont été réalisés sur les gneiss de la région de Yaoundé et sur les graveleux latéritiques du Cameroun et d'ailleurs. Ces travaux ont porté sur la géologie et la géotechnique.

### **II.1. Travaux sur les roches**

#### **II.1.1. Géologie**

Les roches de la zone d'étude appartiennent au groupe des roches métamorphiques de haut degré (Olinga, 2003). Les faciès lithologiques les plus répandus dans le secteur sont les gneiss et les migmatites. Sur le plan de la composition minéralogique, les différences entre les gneiss et les migmatites ne sont pas suffisamment grandes pour induire des différences de comportement (Ekodeck, 1984). Ces roches se composent principalement de quartz, orthose, microcline, plagioclase, biotite pour les migmatites à biotite et, de quartz, orthose, plagioclase, biotite, grenat, et parfois d'amphibole, disthène et muscovite pour les gneiss migmatitiques (Ekodeck, 1984). Dans cette zone de plateau sud camerounais, les gneiss migmatitiques sont caractérisés par des teneurs élevées en  $\text{SiO}_2$  (51 – 60 %), modérées  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15,07 – 16,20 %) et en  $\text{Fe}_2\text{O}_{3t}$  (6,84 – 9,34 %), faibles en  $\text{MgO}$  (2,96 – 4,51 %),  $\text{CaO}$  (2,02 – 5,32 %),  $\text{Na}_2\text{O}$  (2,05 – 5,32 %),  $\text{K}_2\text{O}$  (1,78 – 2,91 %) et  $\text{TiO}_2$  (1,03 – 1,24 %), et très faibles en  $\text{MnO}$  (0,12 – 0,19 %) et  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0,15 – 0,25 %) (Yongue Fouateu, 1986). Les gneiss de Yaoundé se caractérisent par des teneurs variables en  $\text{SiO}_2$  (39,07 – 74,34 %). Les teneurs modérées à moyennes en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oscillent entre 9,19 % et 30,22 %, tandis que celles en  $\text{Fe}_2\text{O}_{3t}$  varient entre 5,06 % et 12,91 %. Les autres oxydes présentent des valeurs généralement inférieures à 5 % (Ndjigui *et al.*, 1998 ; Nzabakurikiza, 2018).

## **II.1.2. Propriétés géotechniques des roches**

En zone de plateau sud camerounais, les migmatites et les gneiss possèdent respectivement des valeurs de masse volumique des grains solides variant entre 2,92 g/cm<sup>3</sup> et 3,02 g/cm<sup>3</sup> (Ekodeck, 1984). A l'Est Cameroun, les valeurs de masse volumique des grains solides des gneiss sont de 2,78 g/cm<sup>3</sup>, pour les classes granulométriques 6/10 et 10/14 et, de 2,76 g/cm<sup>3</sup>, pour la classe granulométrique 0/5 (Nzabakurikiza, 2018).

Les valeurs moyennes du coefficient Los Angeles (LA) des gneiss sont de 34 % pour la fraction granulométrique 3/8 (Sikali, 1977 in Nzabakurikiza, 2018). Ces valeurs de LA sont de 26 % pour la fraction granulométrique 10/14 et, de 29 % pour la fraction 6/10 (Nzabakurikiza, 2018).

Les valeurs du coefficient d'aplatissement (CA) varient entre 16 et 23 %, tandis que celles de LA, oscillent entre 26 % et 32 % dans les gneiss à l'Est du Cameroun (Nzabakurikiza, 2018). Dans ces roches, les valeurs de l'équivalent de sable (ES) varient entre 74 et 80 %. Ces gneiss présentent une valeur moyenne de densité apparente de 1,16, tandis que la valeur moyenne de densité sèche est de 2,36. Leur valeur moyenne de teneur en eau est de 6 %. Les gneiss en zone de plateau sud camerounais présentent une valeur moyenne de Californian Bearing Ratio (CBR) de 175 % (Nzabakurikiza, 2018).

## **II.2. Travaux sur les graveleux latéritiques**

### **II.2.1. Définitions et généralités**

Le terme « latérite » a été employé pour la première fois par Buchanan en 1807 in Ekodeck (1984), pour désigner les dépôts ferrugineux recouvrant de vastes surfaces dans les régions montagneuses de Malabar en Inde (Bohi, 2008 ; Massamba Ndiaye, 2013 ; Oyelami et Van Rooy, 2016). C'est l'un des meilleurs matériaux de construction, rempli de cavités et de pores, possédant de grandes quantités de fer, et de coloration rouge ou jaune. L'intérieur du matériau, s'il est à l'abri de l'air, est si tendre que tout instrument métallique le coupe. Aussitôt taillée à la forme voulue, la masse devient aussi dure qu'une brique, et résiste à l'eau et à l'air, bien mieux que toute autre brique aux Indes (Buchanan, 1907 in Ekodeck, 1984). La latérite de Buchanan a été étudiée de façon très détaillée par Bourgeon et Gunnel (2005). Ces propriétés des latérites expliquent leur emploi fréquent comme matériau de construction, emploi comparable à celui des briques. Dans les langues locales, ces formations sont dénommées « terre à brique ». Le vocable « latérite » n'est donc que la traduction latine d'une terminologie vernaculaire. Latérite a pour racine *later*, qui signifie brique en latin, et ceci uniquement par référence à l'utilisation des blocs. Toutefois, cette définition cache bien les caractères

particuliers de la formation de ces matériaux. Plus d'une trentaine de définitions sont proposées par les spécialistes des différentes disciplines qui s'y intéressent, notamment la pédologie, la géologie minière et la géomécanique (Massamba Ndiaye, 2013).

Le terme latérite ne définit pas un matériau ayant des propriétés constantes mais, plutôt, une famille de matériaux différents, développés dans diverses parties du monde (Seaton *et al.*, 1938). Cet aspect de « famille » est lié à l'existence d'un certain nombre de conditions nécessaires à leur formation, qui sont tous reconnues par les chercheurs et ont été résumées au 7ème Congrès International de Mécanique des sols et des travaux de fondation (De Graft-Johnson et Bhatia, 1969). La combinaison de ces différents paramètres crée des matériaux à texture et à compositions minéralogique et chimique variables.

Le terme « latérite » est employé dans le sens très général d'« ensemble des produits d'altération de la zone intertropicale » (Slansky *et al.*, 1964). Les pédologues utilisent très souvent un autre terme pour caractériser cette évolution : la ferrallitisation, qui évoque le fait que, les accumulations alumineuses vont le plus souvent de pair avec les accumulations à dominance ferrique.

Madu (1975) recommande d'utiliser le terme 'latérites' pour définir les matériaux contenant plus de 50 % de sesquioxydes et, 'latérites ferrugineuses', pour ceux en contenant moins de 50 %. Une extension de cette définition a permis à certains auteurs de classer dans la catégorie des sols latéritiques tous les matériaux contenant entre 20 % et 49 % de sesquioxydes (Madu, 1980).

La définition qui reflète le plus la réalité est celle de Schellmann (1986) selon Millogo (2008) car, elle s'appuie sur les conditions d'altération de la roche mère et sa composition minéralogique. Pour Schellmann (1986) : « Les latérites sont des produits d'intense altération météorique constitués d'un assemblage minéralogique qui peut être fait de goethite, hématite, hydroxydes d'aluminium, kaolinite et quartz. ». Cette définition correspond globalement aussi bien aux argiles latéritiques qu'aux graveleux latéritiques.

Pour l'ingénieur routier, les latérites c'est-à-dire les graveleux 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 limono-argileuse (Autret, 1983). Il n'existe donc pas de consensus international sur la définition des graveleux latéritiques à cause de leur complexité et de leur hétérogénéité (Paige-Green *et al.*, 2015). Vu la diversité des définitions liées à ces matériaux, le terme "latérite", trop générique, est devenu obsolète (Ekodeck, 1984 ; Fall, 1993). Il a donc été préconisé d'utiliser des termes tels que graveleux latéritiques, argiles latéritiques, cuirasse latéritique, etc., rejoignant ainsi Autret (1983) qui

propose de distinguer :

- les sols fins latéritiques ;
- les graveleux latéritiques (matériau 0/D), utilisés en construction routière comme couche de forme, couche de fondation ou couche de base ;
- la carapace latéritique ou horizon latéritique, couche très dure, pouvant être détruite par un engin de terrassement, ou à la pioche ;
- la cuirasse latéritique, couche très dure de matériau aggloméré ressemblant à des scories, difficilement destructible par des engins à lame.

Les facteurs qui ont une influence prépondérante sur la formation de ces matériaux sont : le climat, la roche mère, la topographie (érosion, drainage), la végétation, et le facteur temps (De Graft-Johnson et Bhatia, 1969 ; Ekodeck, 1984 ; Sikali et Djalal, 1987 ; Bagarre, 1990 ; Fall, 1993 ; Biswal *et al.*, 2016).

Le climat agit sous l'action jumelée de la température et du bilan hydrique. Une pluviométrie importante est nécessaire pour provoquer l'altération des roches, mais le mouvement de l'eau dans le sol ou bilan hydrique, exerce une influence déterminante sur la nature du produit final (Bohi, 2008 ; Massamba Ndiaye, 2013). Le rôle de l'eau étant surtout de lessiver le matériau ; l'efficacité de son action dépend de la nature de la roche (Bohi, 2008). La température catalyse les réactions chimiques et joue sur l'altération, en favorisant la formation ou la destruction de l'humus (Bagarre, 1990). Un climat chaud et pluvieux à 02 saisons alternées et bien marquées, est nécessaire pour la formation des sols latéritiques (Bohi, 2008 ; Massamba Ndiaye, 2013). Ces résultats soulignent et confirment une fois de plus l'influence du climat et des facteurs de station dans la néoformation des minéraux argileux et dans la différenciation des sols en zone intertropicale (Nguetnkam *et al.*, 2006).

La nature de la roche mère 'ne semble' pas avoir d'incidence sur l'existence du phénomène de latérisation, puisque celui-ci concerne autant les roches basiques ignées de type « basalte » que les roches acides de type « granite » ou « gneiss » ou d'autres roches sédimentaires de type « grès », « schistes » et « calcaires ». Par contre, elle exerce une influence sur le type de réaction et la nature du constituant argileux ; les roches cristallines basiques comme les basaltes sont peu riches en silice et composées en partie d'olivine, qui s'altère en montmorillonite. Les roches cristallines et cristallophylliennes acides, telles que les granites et les gneiss respectivement, s'altèrent principalement en kaolinite ou en halloysite. Les roches sédimentaires argileuses, telles les schistes et les grès, s'altèrent en illite (Autret, 1983).

Le relief conditionne le drainage et contrôle la vitesse de l'altération (Bohi, 2008). La topographie influe donc sur le processus de latérisation en favorisant ou en défavorisant l'accumulation d'eau (Autret, 1983). Les cuirasses ou carapaces latéritiques se trouvent généralement dans les zones plates et, rarement sur les pentes (dans le cas où la formation de la pente est postérieure au phénomène de latérisation), où l'on trouve le plus souvent des fragments de carapace dans les éboulis (Autret, 1983). De nombreux auteurs ont étudié la relation entre les différentes formes de terrain et les latérites et, ils s'accordent à affirmer que les formations latéritiques, et surtout les latérites indurées, sont associées à des topographies subhorizontales et à des plateaux élevés ou ayant un moutonnement doux (Bohi, 2008).

La végétation influence le ruissellement et le bilan hydrique, elle favorise aussi la formation d'un type de latérites spécifiques selon qu'on se trouve en zones de forêt ou de savane (Tockol, 1993). Il semble cependant que, la latérite sous forme de carapace, soit plus fréquente en zone de savane qu'en zone de forêt, que les graveleux à pisolites sont plus fréquents en forêt qu'en savane, tandis que, c'est l'inverse pour les brèches latéritiques (Autret, 1983).

Le facteur temps peut aussi expliquer de très importantes différenciations géochimiques à la surface de la terre.

Au total, toutes les définitions des latérites traduisent l'idée selon laquelle, elles proviennent d'une altération physique et chimique de la roche en place, provoquée par l'alternance de phases arides et humides dans les conditions imposées par le milieu ambiant (topographie, végétation). On peut donc retenir la définition suivante : la latérite est un « matériau de structure vacuolaire, souvent bariolé, avec des teintes allant du jaune au rouge, plus ou moins foncées, tirant même au noir, constitué par une croûte continue d'épaisseur et de dureté variables et, ayant souvent l'aspect d'une scorie, ou encore contenant des concrétions isolées, oolithiques ou pisolithiques, de plus ou moins grande résistance, mélangées à une partie argileuse (Massamba Ndiaye, 2013). »

Ainsi, les sols latéritiques présentent une grande variabilité de caractéristiques morphologiques, liées en général aux conditions dans lesquelles ils se sont formés et, à la nature de la roche mère (Massamba Ndiaye, 2013) (Fig. 6). Les caractéristiques morphologiques des sols latéritiques sont l'induration, la structure, la couleur et la densité.

Les descriptions et les définitions des latérites et, plus précisément, des graveleux latéritiques, mettent en exergue l'induration "in-situ" en place ou acquise après exposition à l'air (Bohi, 2008). Cependant, l'appréciation de l'induration est empirique, car aucune caractéristique liée à la mécanique du matériau ne peut être chiffrée. On considère généralement qu'il y a induration, quand le milieu a une consistance dure et fragile qui se conserve à l'humidité (Bohi, 2008).

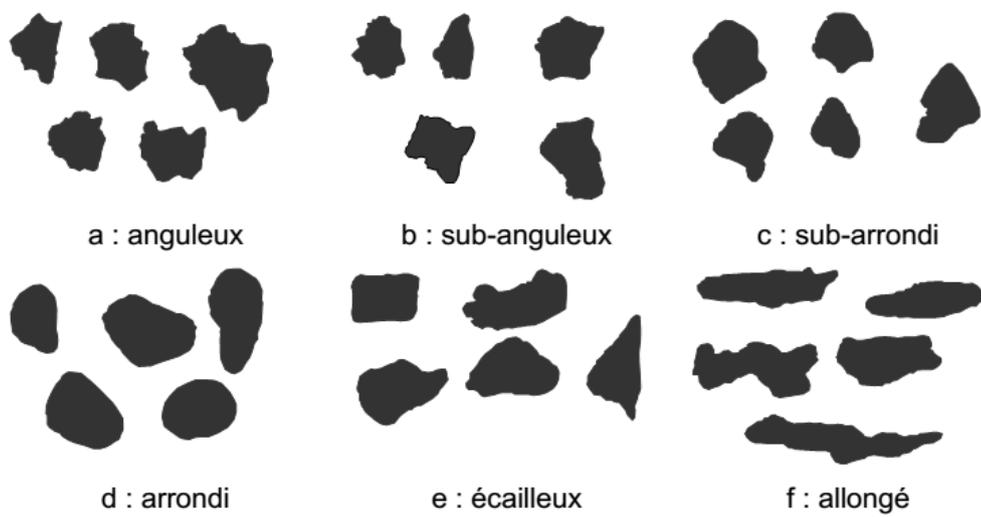


Figure 6. Formes typiques des grosses pisolithes dans les sols latéritiques (De Graft-Johnson et Bhatia, 1969)

Les descriptions et les définitions des latérites et, plus précisément, des graveleux latéritiques, mettent en exergue l'induration "in-situ" en place ou acquise après exposition à l'air (Bohi, 2008). Cependant, l'appréciation de l'induration est empirique, car aucune caractéristique liée à la mécanique du matériau ne peut être chiffrée. On considère généralement qu'il y a induration, quand le milieu a une consistance dure et fragile qui se conserve à l'humidité (Bohi, 2008).

L'induration des matériaux dépend de plusieurs facteurs (Bohi, 2008) :

- la composition et le degré de cristallisation des composants ; plus les teneurs en sesquioxydes sont élevées, plus l'induration est forte ; la dureté croît avec les teneurs en fer ; les latérites les plus dures sont aussi les moins hydratées ;
- l'assemblage des différents constituants : les cuirasses à faciès massif sont plus indurées que les cuirasses à faciès alvéolaire ; les matériaux de composition homogène sont plus durs que ceux à composants ségrégués ; la présence de corps étrangers diminue la résistance de l'ensemble ;
- du degré de vieillissement : pour un même type de latérite, les plus âgées sont souvent plus dures que les plus récentes.

La structure des latérites est extrêmement variée mais les modes d'assemblage peuvent se réduire à 03 éléments (Bohi, 2008) :

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

Ces types d'assemblage présentent cependant une grande variabilité, corrélative de la forme et de la grosseur des éléments qui entrent en jeu, ainsi que des différents degrés d'induration (Bohi, 2008).

En ce qui concerne particulièrement les graveleux latéritiques, on peut distinguer les structures hétérogènes ou discontinues les plus communes (Massamba Ndiaye, 2013). Elles se divisent en :

- structures de roches meubles, généralement graveleuses ; c'est le cas fréquent des horizons concrétionnés ou gravillonnaires ;
- structures de roches cohérentes à aspects variés (conglomératiques, poudinguiformes, volcaniques, scoriacés ou spongieux) ;
- les structures ordonnées (lamellaires, pisolithiques (Fig. 6) et oolithiques).

La couleur des sols latéritiques est variée et d'intensité vive. Les teintes les plus courantes sont le rouge, le jaune, le brun, le rose et l'ocre (Bohi, 2008 ; Massamba Ndiaye, 2013). Il est généralement admis que la couleur du sol est due, dans une large mesure, à la présence de fer ; ainsi, les couleurs vives, rouges ou jaunes, sont dues aux oxydes ou hydroxydes ferriques. La couleur rouge est relative à la présence d'hématite et la couleur jaune à celle de la goethite (Lyon Associates, 1971, Autret, 1983 ; Bagarre, 1990). Certaines formations présentent des taches et des trames violettes, d'autres des marbrures verdâtres. Cependant, à l'exception des colorations extrêmes, qui correspondent à l'hématite rouge et à la goethite ou à la lépidocrocite jaunes, il ne semble pas exister de relation entre la coloration et l'indice d'hydratation (Bohi, 2008). En milieu réducteur, les composants du fer donnent une coloration gris-noir et, le manganèse, une couleur noire à aspect velouté. En milieu oxydant, le fer donne une couleur ocre, rouge ou noire et le manganèse, une couleur violette. L'alumine, à l'état pur, est de couleur blanche. Mais, dans les niveaux indurés, elle est souvent en mélange avec le fer pour donner des teintes roses. La silice, ordinairement blanchâtre et généralement imprégnée d'hydroxydes de fer, peut donner une couleur rouge ou rouille. Les kaolinites fixent le fer sur leur surface et prennent une couleur rouge franc. Bref, c'est le mélange de ces minéraux différemment colorés qui donne la coloration extrêmement variée des latérites (Bohi, 2008). Il faut noter que l'appréciation des couleurs ne donne qu'une idée de la composition des latérites. Elle permet cependant d'apprécier le degré d'évolution et le milieu de formation : les cuirasses ferrugineuses rouges ou ocre dans leurs stades juvéniles deviennent plus foncées en vieillissant. Elles sont alors brunes, parfois, presque noires. Au contraire, les cuirasses alumineuses deviennent plus claires avec le temps. En milieu mal drainé, les cuirasses ferrugineuses sont plus brunes qu'en milieu oxydant où, elles sont rouges (Bohi, 2008).

La densité des particules des sols latéritiques, qui varie dans d'assez grandes proportions (2,5 à 3,6), dépend de leur composition chimique. Elle augmente avec les teneurs en fer et diminue avec les teneurs en alumine (Bohi, 2008). Les formes oxydées sont plus denses que les formes hydratées (Lyon Associates, 1971).

### **II.2.2. Caractéristiques génétiques**

Les caractéristiques génétiques des graveleux latéritiques représentent l'ensemble des caractéristiques liées à leur processus de formation. Il s'agit des caractéristiques minéralogiques et géochimiques. L'intérêt de la caractérisation géochimique et minéralogique des graveleux latéritiques s'est imposé, non seulement à cause de la nécessité de comprendre leur processus de formation, mais aussi, pour les géotechniciens, afin de corréliser leurs caractéristiques

génétiques à leur comportement géomécanique (Tockol, 1993 ; Millogo, 2008 ; Onana *et al.*, 2015, 2017 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Ngo'o Ze *et al.*, 2019 ). La connaissance précise des processus de formation des latérites est nécessaire au géotechnicien qui veut prédire de façon efficiente leur comportement dans les ouvrages du génie civil.

Les caractéristiques géochimiques les plus recherchées sur les latérites sont leurs teneurs en oxydes ferriques, en silice et en alumine, teneurs qui influencent fortement les caractéristiques géomécaniques (Nkoumou *et al.*, 2004). Les latérites se caractérisent par des teneurs élevées en sesquioxydes de fer et/ou d'alumine.

Dans certaines latérites, les teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  peuvent avoisiner 80 %; dans d'autres au cas, les teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  peuvent atteindre 60 % (Fall, 1993 ; Tockol, 1993 ; Millogo, 2008). Le fer s'y rencontre sous forme de goethite ( $\alpha\text{FeO}(\text{OH})$ ) ou d'hématite ( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). L'aluminium est contenu dans la gibbsite ( $\gamma\text{Al}(\text{OH})_3$ ) et, dans la boehmite ou le diaspre ( $\text{AlO}(\text{OH})$ ) (Fall, 1993 ; Tockol, 1993 ; Millogo, 2008).

Les teneurs en silice combinée sont faibles dans les latérites riches en sesquioxydes, mais de nombreuses variétés peuvent contenir des quantités appréciables. Cette silice combinée se rencontre essentiellement dans la kaolinite, argile caractéristique de la plupart des formations tropicales. Certaines latérites contiennent des quantités parfois appréciables de manganèse et peuvent être exploitées comme minerais. Il en est de même pour le titane, fréquemment rencontré dans les latérites, et, à un moindre degré, pour le vanadium et le chrome (Bohi, 2008).

L'eau combinée, déterminée par la perte au feu, se trouve toujours en quantité appréciable (10 à 30 %). Sa teneur est plus élevée dans les latérites alumineuses que dans les latérites ferrugineuses.

Le quartz est parfois absent ou en faibles quantités et, est généralement un composant significatif. C'est un quartz résiduel, particulièrement présent dans les formations dérivées des roches éruptives acides (Bohi, 2008).

Dans le plateau sud camerounais, les graveleux latéritiques se situent dans l'ensemble médian gravillonnaire des profils d'altération et constituent l'horizon B ou horizon nodulaire. Ils sont généralement constitués de silice (sous forme combinée ou résiduelle), goethite ou hématite, kandites (kaolinite et halloysite), gibbsite, illite, montmorillonite (Ndjigui *et al.*, 2008 ; Onana *et al.*, 2016).

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour caractériser les latérites à partir des données géochimiques. On peut citer le rapport molaire S/R (Tockol, 1993 ; Millogo *et al.*, 2008) dont la formule est :

$$S/R = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3) \quad (1)$$

La classification issue de ce rapport est :

- S/R < 1,33 : latérites vraies,
- 1,33 < S/R < 2,00 : roches latéritiques,
- S/R > 2,00 : matériaux non latéritiques.

La classification sur la base de ce rapport a été remise en cause par plusieurs auteurs car le pourcentage des sesquioxydes varie généralement selon la classe granulométrique du matériau analysé. Ce rapport n'a aucune signification minéralogique et il est donc conseillé d'utiliser une classification basée sur les processus pédogénétiques (Tockol, 1993 ; Bohi, 2008 ; Massamba Ndiaye, 2013). L'interprétation des valeurs de S/R est difficile pour les matériaux latéritiques, car leur variation au sein du profil d'altération n'obéit à aucune règle. Par exemple, les valeurs obtenues pour les sols dans les zones de Ngoumou et Ntui (Centre Cameroun) classent ces derniers parmi les sols "non latéritiques", ce qui montre une discordance manifeste avec les observations naturelles et les conceptions courantes (Ekodeck, 1984). Cette classification ne fait donc pas l'unanimité car, si le rapport S/R a le mérite de séparer les latérites des argiles telles les kaolinites, en revanche, il classe parmi les latérites, le minerai de fer, la bauxite et de nombreux grès ferrugineux (Autret, 1983).

Dans le même ordre d'idées, une méthode de restructuration normative altérologique, permettant la différenciation quantitative des roches et des produits d'altération a été proposée (Ekodeck, 1984 ; Ekodeck et Kamgang, 2002, 2011). Cette méthode, inspirée de la méthode Américaine CIPW (Cross *et al.*, 1903) présente l'avantage d'être, non seulement applicable à l'étude des altérations mais aussi, à la quantification des paramètres d'altération, aux fins d'établir des liens avec les paramètres géotechniques (Onana *et al.*, 2007 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017).

Les principaux travaux réalisés sur les graveleux latéritique du plateau sud camerounais ont porté sur ceux développés sur roches métamorphiques (gneiss, migmatites, chloritoschistes, schistes, quartzites micacées) et sur roches plutoniques (granites et syénites).

### **II.2.2.1. Graveleux latéritiques sur roches métamorphiques**

Des travaux récents ont étudié les caractéristiques pétrographiques, minéralogiques et géochimiques des graveleux latéritiques développés sur roches métamorphiques ou cristallophylliennes, afin de les caractériser sur le plan pétrologique, mais aussi pour corrélés leurs caractéristiques génétiques à leurs propriétés géotechniques. Ces travaux ont été réalisés

sur gneiss (Onana *et al.*, 2015), sur amphibolites (Ekodeck, 1984), sur migmatites (Nzabakurikiza *et al.*, 2012), sur schistes (Onana, 2010 ; Ntouala, 2014 ; Ngo'o Ze *et al.*, 2019), sur micaschistes (Ngo'o Ze *et al.*, 2019) et sur charnockites (Onana *et al.*, 2017). Il en ressort que les graveleux latéritiques étudiés sont principalement composés de quartz, kaolinite, goethite et hématite. La gibbsite est présente dans les matériaux sur amphibolites et sur quartzites micacés. Les schistes et les quartzites micacés contiennent de la muscovite. Ces matériaux sont majoritairement constitués de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , qui représentent 82,00 à 86,00 % du poids total d'oxydes. Les valeurs de perte au feu sont comprises entre 6,00 et 15,00 %. Les valeurs plus élevées se rencontrent dans les matériaux développés sur amphibolites, gneiss et migmatites. Les teneurs élevées en  $\text{SiO}_2$  sont comprises entre 23,76 et 70,99 %, celles modérées à moyennes en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , entre de 9,00 et 27,26 %, celles modérées à fortes en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , entre 7,38 et 44,18 %. Les teneurs en  $\text{TiO}_2$  sont en moyenne égales à 1,00 %. Le taux de sesquioxydes dans ces matériaux oscille entre 41,10 et 61,80 %. Ces matériaux sont le siège de la monosiallisation (Ntouala, 2010).

#### **II.2.2.2. Graveleux latéritiques sur roches plutoniques**

Les graveleux latéritiques développés sur roches plutoniques ont été l'objet de nombreux travaux. Ces travaux ont été menés sur les graveleux latéritiques développés sur granites (Nguetnkam *et al.*, 2006 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017), sur charnockites (Onana *et al.*, 2017) et sur syénites (Bilong, 1992). Plusieurs de ces travaux ont corrélé les paramètres génétiques des graveleux latéritiques à leurs propriétés géotechniques (Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017). Les graveleux latéritiques développés sur roches plutoniques présentent des teneurs élevées en  $\text{SiO}_2$  et des teneurs modérées en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Ces oxydes représentent 80 à 90 % du poids total. La valeur de perte au feu dans ces matériaux est toujours supérieure à 9 %. Tous les autres oxydes sont présents, soit en faibles quantités, soit en traces. Les sesquioxydes ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) représentent 34 à 58 % de ces matériaux. Les cortèges minéralogiques montrent que les graveleux latéritiques développés sur roches plutoniques en zone de plateau sud camerounais sont majoritairement composés de quartz, kaolinite, hématite et gibbsite. La goethite et l'ilménite sont présentes dans 67 % des matériaux étudiés tandis que la muscovite est présente uniquement sur les matériaux développés sur syénites et charnockites. Par une analyse semi-quantitative, on obtient des taux majoritaires de kaolinite (24 à 31 %), modérés de quartz (12 à 31 %), hématite (5 à 24 %), goethite (10 à 24 %) et gibbsite (9 à 16 %) et, faibles d'illite (5 à 8 %). Ces matériaux sont silico-ferrugino-alumineux et se localisent dans le domaine de la monosiallisation.

Le substratum lithologique en zone de plateau sud camerounais est majoritairement constitué de roches métamorphiques (gneiss, migmatites, quartzites micacés et schistes) et plutoniques (granites et syénites). Du fait de la diversité de leurs facteurs et processus de formation, les graveleux latéritiques sont des matériaux évolutifs dont les caractéristiques minéralogiques et chimiques varient, dans le détail, d'un lieu à un autre.

### **II.2.3. Caractéristiques géotechniques des graveleux latéritiques**

Les graveleux latéritiques sont sur le plan géotechnique des sols meubles de granulométrie 0/20 à 0/40 mm comportant 10 à 35 % de fines, 20 à 60 % de squelette et un mortier dont la valeur de plasticité varie de 10 à 35 % (Bagarre, 1990). La courbe granulométrique montre très généralement un palier entre 0,080 et 2 mm, qui traduit bien la dualité d'origine des composants du mélange naturel qu'est ce matériau (Ekodeck, 1984).

Les essais réalisés sont ceux requis pour le choix d'un matériau comme matière première d'assise de chaussée en construction routière. Il s'agit de la densimétrie, des essais de détermination de la teneur en eau naturelle, des limites d'Atterberg, de la valeur du bleu de méthylène, de la granularité, des essais Proctor, CBR, traction et compression simple. Les investigations menées ont permis de regrouper ces travaux en 02 groupes, les travaux sur les graveleux latéritiques sur roches métamorphiques d'une part et, ceux sur graveleux latéritiques dérivés de roches plutoniques d'autre part.

#### **II.2.3.1. Graveleux latéritiques sur roches métamorphiques**

Les travaux sur les graveleux latéritiques dérivés des roches métamorphiques concernent surtout les gneiss, les migmatites, les micaschistes, les schistes et les quartzites. De nombreux travaux ont été recensés sur graveleux latéritiques issus de gneiss en zone de Plateau sud camerounais (Nzabakurikiza *et al.*, 2012). Les valeurs moyennes des paramètres étudiés sont présentées dans le tableau 3. Les valeurs de masse volumique des grains solides sont comprises entre 2,44 et 2,90 g/cm<sup>3</sup>, soit une moyenne de 2,74 g/cm<sup>3</sup>. Les valeurs de limite de liquidité, comprises entre 46 et 81 %, présentent une moyenne de 64 %. Les valeurs d'indice de plasticité varient entre 22 et 39 %, pour une moyenne de 34 %. Les paramètres Proctor varient entre 9,5 et 24,0 % pour la teneur en eau à l'optimum Proctor modifié (TEO) et, entre 1,75 et 2,06, pour la densité sèche maximale (DSM). Les valeurs moyennes sont de 14,1 % et 1,99, respectivement pour TEO et DSM. Les valeurs de CBR sont comprises entre 31 et 88 %, soit une moyenne de 51 %. Les valeurs de portance indiquent des matières premières potentielles pour la construction des couches de fondation et des couches de

Tableau 3. Données récapitulatives des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques sur gneiss

Paramètres	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	IP (%)	TEO (%)	DSM	CBR (%)
Total	8	9	9	9	9	9
<b>Moyenne</b>	<b>2,73</b>	<b>64</b>	<b>30</b>	<b>14,12</b>	<b>1,99</b>	<b>51</b>
Minimum	2,44	46	22	9,50	1,75	31
Maximum	2,90	81	39	24,00	2,06	88

$\rho_s$  : masse volumique des grains solides ; LL : limite de liquidité ; LP : limite de plasticité ; IP : indice de plasticité ; TEO : teneur en eau à l'optimum Proctor modifié ; DSM : densité sèche maximale ; CBR : *Californian Bearing Ratio*

fondation et des couches de base.

Les travaux de Kamtchueng *et al.* (2015) réalisés sur les graveleux latéritiques développés sur micaschistes montrent que, les valeurs de masse volumique des grains solides sont comprises entre 2,69 et 3,05 g/cm<sup>3</sup>, soit une moyenne de 2,83 g/cm<sup>3</sup> (Tab. 4). Les valeurs de limite de liquidité, comprises entre 46 et 71 %, ont une moyenne de 60 %. Les valeurs d'indice de plasticité oscillent entre 15 et 37 %, soit une moyenne de 27 %. Les valeurs des paramètres Proctor varient entre 11,0 et 15,5 % pour TEO et, entre 1,91 et 2,12, pour DSM. Les valeurs moyennes sont de 12,51 % et 2,04 respectivement pour TEO et DSM. Les valeurs de CBR sont comprises entre 21 et 54 %, soit une moyenne de 36 %. Ces matériaux sont aptes à une utilisation en couches forme et, en couches de fondation pour tout type de trafic.

Les travaux réalisés sur les graveleux latéritiques dérivés des schistes (Ekodeck, 1984 ; Onana, 2010) révèlent que les valeurs de masse volumique des grains solides sont comprises entre 2,69 et 2,92 g/cm<sup>3</sup>, soit une moyenne de 2,83 g/cm<sup>3</sup> (Tab. 5). Les valeurs de limite de liquidité sont comprises entre 40 et 72 % et leur valeur moyenne est de 61 % (Tab. 5). Les valeurs d'indice de plasticité varient entre 10 et 39 %, soit une moyenne de 28 % (Tab. 5). Les valeurs des paramètres Proctor varient entre 7,2 et 18,0 % (TEO) et entre 1,84 et 2,34 (DSM). Les valeurs moyennes sont de 12,1 % (TEO) et 2,07 (DSM). Les valeurs de CBR, comprises entre 23 et 88 %, ont une moyenne de 45 % (Tab. 5). Les valeurs de portance de ces matériaux indiquent qu'ils sont utilisables comme matériaux pour couches de forme, de fondation et de base (Onana, 2010).

### **II.2.3.2. Graveleux latéritiques sur roches plutoniques**

Au Cameroun, très peu de travaux ont été effectués sur les graveleux latéritiques dérivés de roches plutoniques (Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017). Les résultats obtenus (Tab. 6) indiquent une valeur moyenne de masse volumique des grains solides de 2,83 g/cm<sup>3</sup>. La valeur moyenne de limite de liquidité est de 67 % et, celle d'indice de plasticité, de 32 %. Les valeurs moyennes des paramètres Proctor sont de 11,4 % (TEO) et 2,08 (DSM). La valeur moyenne de CBR est de 53 %. Ces matériaux sont utilisables en couche de fondation pour tout type de trafic et en couche de base pour les chaussées à faible trafic.

Les graveleux latéritiques développés sur roche plutonique présentent des épaisseurs variables. Ils sont de couleur rouge à jaune et appartiennent pour la plupart à la classe A-2-7.

Les valeurs masse volumique des grains solides varient entre 2,44 et 3,05 g/cm<sup>3</sup>, soit une moyenne 2,82 g/cm<sup>3</sup>. Les valeurs d'indice de plasticité sont comprises entre 10 et 55 %

Tableau 4. Données récapitulatives des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques sur micaschistes

	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	IP (%)	TEO (%)	DSM	CBR (%)
Total	19	19	19	19	19	19
<b>Moyenne</b>	<b>2,84</b>	<b>61</b>	<b>28</b>	<b>12,5</b>	<b>2,04</b>	<b>36</b>
Maximum	3,05	71	37	15,5	2,12	54
Minimum	2,69	46	15	11	1,91	21

Tableau 5. Données récapitulatives des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques sur schistes

	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	IP (%)	TEO (%)	DSM	CBR (%)
Total	36	36	36	36	36	36
<b>Moyenne</b>	<b>2,83</b>	<b>61</b>	<b>28</b>	<b>12,13</b>	<b>2,07</b>	<b>45</b>
Minimum	2,69	40	10	7,2	1,84	23
Maximum	2,92	72	39	18,0	2,34	88

Tableau 6. Données récapitulatives des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques sur roches plutoniques

	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	IP (%)	DSM (%)	TEO (%)	CBR (%)
Total	20	20	20	20	20	20
<b>Moyenne</b>	<b>2,84</b>	<b>67</b>	<b>32</b>	<b>2,07</b>	<b>11,8</b>	<b>53</b>
Minimum	2,69	46	20	1,91	8,6	31
Maximum	2,99	95	55	2,20	14,5	78

$\rho_s$  : masse volumique des grains solides ; LL : limite de liquidité ; LP : limite de plasticité ; IP : indice de plasticité ; TEO : teneur en eau à l'optimum Proctor modifié ; DSM : densité sèche maximale ; CBR : *Californian Bearing Ratio*

avec une moyenne de 29 %. Leur mortier est argileux et de plasticité moyenne à haute. Les valeurs de DSM varient entre 1,67 et 2,34 pour une moyenne de 2,04. Les valeurs de l'indice portant CBR à 95 % sont comprises entre 21 et 88 % avec une moyenne de 45 %. Les graveleux latéritiques présentent une portance CBR moyenne supérieure à 30 % (Tab. 7). Les valeurs de CBR les plus élevées sont obtenues sur les matériaux développés sur gneiss (51 %) et quartzites (49 %). Les recommandations pour l'utilisation des sols tropicaux en construction routière formulées par le Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP, 1984) indiquent que ces matériaux sont convenables pour la réalisation des couches de fondation.

L'optimisation de leur utilisation en couche de base nécessite une amélioration physique (lithostabilisation) ou chimique (ciment, chaux), car les matériaux présentant des valeurs de CBR supérieures ou égales à 80 % sont rares. Les données détaillées des paramètres géotechniques figurent en annexe.

#### **II.2.4. Variabilité statistique des propriétés génétiques et géotechniques des graveleux latéritiques**

L'existence ou non de corrélations entre les propriétés des matériaux et, notamment celles des graveleux latéritiques, a été le but de nombreux travaux scientifiques (Bagarre, 1990). L'objectif étant d'établir des corrélations entre les propriétés génétiques et les paramètres géotechniques, ou de (re)lier la géologie à la géotechnique, afin de prédire le comportement de ces matériaux lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations externes. Le but ultime est donc de faciliter les décisions d'ingénierie, de gagner du temps et d'économiser en efforts humains et financiers, pour mener à bien un programme d'essais complet (Farooq *et al.*, 2016).

##### **II.2.4.1. Corrélations entre paramètres géotechniques des graveleux latéritiques**

Des corrélations ont été établies pour prédire les caractéristiques des graveleux latéritiques, notamment la valeur du CBR, à partir des autres paramètres.

Par exemple, la relation suivante a été établie (Lyon Associates, 1971) :

$$CBR = 72,5 \log \frac{\gamma d_{max}}{IP} - 7,5 \quad (2)$$

Les travaux réalisés dans certains pays africains (Cameroun, RCA, Congo, Burkina Faso, Togo et RDC) mettent en évidence des relations entre le CBR et les paramètres géotechniques courants d'identification, soit individuellement, soit en les combinant entre eux. (CEBTP, 1984).

Tableau 7. Données récapitulatives des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques du Sud Cameroun

	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	IP (%)	TEO (%)	DSM	CBR (%)
Total	81	82	82	82	82	82
<b>Moyenne</b>	<b>2,82</b>	<b>63</b>	<b>29</b>	<b>2,04</b>	<b>12,6</b>	<b>45</b>
Minimum	2,44	40	10	1,67	7,2	21
Maximum	3,05	95	55	2,34	25,3	88

$\rho_s$  : masse volumique des grains solides ; LL : limite de liquidité ; LP : limite de plasticité ; IP : indice de plasticité ; TEO : teneur en eau à l'optimum Proctor modifié ; DSM : densité sèche maximale ; CBR : *Californian Bearing Ratio*

Les corrélations de CBR présentant des valeurs de coefficients de corrélation  $r$  supérieures à 0,5 ont été obtenues avec :

- le pourcentage des fines (Congo - Togo - Burkina Faso - RDC),
- le refus à 2 mm (Burkina Faso),
- l'indice de plasticité IP (Congo - Togo),
- le produit  $f \times IP$  (Congo - Togo),
- la densité sèche maximale à l'OPM (Burkina Faso - RDC),
- le rapport densité sèche maximale OPM sur IP (Congo),
- la relation  $\log \frac{(\text{refus } 2\text{mm} \times \gamma_d \text{ OPM})}{IP}$  (Congo) (3)

D'autres travaux ont démontré qu'il est possible de déterminer les valeurs de CBR des graveleux latéritiques à partir de 07 paramètres physiques simples (Yato Katte *et al.*, 2018). Sur les graveleux latéritiques du Sud-ouest Cameroun, un coefficient de détermination de  $r^2 = 0,95$  a été obtenu avec 4 paramètres avec pour équation  $\text{CBR} = -0,0616 (< 75 \mu\text{m}) + 0,0892IP - 0,1035\text{TEO} + 0,9347\text{DSM} + \beta$  (constante) (Nyemb Bayamack *et al.*, 2019).

Les faibles valeurs de coefficients de corrélation et, la grande variabilité des caractéristiques géotechniques obtenues ont emmené à penser que le CBR est entaché d'une erreur de mesure spécifique qui brouille sa corrélation avec les autres paramètres géotechniques (CEBTP, 1984).

#### **II.2.4.2. Corrélations entre caractéristiques génétiques et paramètres géotechniques**

Des corrélations entre la composition minéralogique de la roche mère et les propriétés géotechniques des graveleux latéritiques ont été établis (Bagarre, 1990 ; Adeyemi, 1995 ; Nkoumou *et al.*, 2004 ; Fall et Sarr, 2007). Les roches mères acides, riches en quartz, produisent des graveleux latéritiques à faibles masses volumiques des grains solides. Les roches basiques, riches en ferromagnésiens, produisent des latérites plus épaisses et plus denses.

La recherche des relations entre la composition minéralogique des graveleux latéritiques et leur comportement géomecanique est menée dans le but pour certains de faciliter la prospection des gisements (Mesida, 1987 ; Fall, 1993 ; Nkoumou *et al.*, 2004), pour d'autre, de prédire leur comportement sur le chantier (Bagarre, 1990 ; Fall, 1993 ; Tockol, 1993 ; Millogo, 2008 ; Onana, 2010). Les corrélations établies sont nombreuses, différentes et parfois contradictoires d'un auteur à un autre.

Dans les graveleux latéritiques, l'hématite augmente les valeurs de la densité sèche et du CBR, alors que le quartz semble les diminuer. Le fer est l'élément le plus dense et le mieux

à même de résister aux contraintes (Bagarre, 1990). Cet élément a donc un effet bénéfique sur les propriétés géomécaniques des graveleux latéritiques qui en contiennent en grandes quantités. Les chaussées doivent donc leur portance au squelette des graveleux latéritiques qui est riche ou possède des proportions considérables en fer. Les matériaux présentant de fortes teneurs en sesquioxydes ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) et, de faibles teneurs en silice, se sont bien comportés par rapport à ceux possédant des teneurs élevées en silice et, faibles, en sesquioxydes. L'hypothèse a donc été émise de déterminer le taux de silice à partir duquel des graveleux latéritiques peuvent être acceptés ou rejetés dans les travaux routiers. Un abaque, complémentaire aux classifications classiques et, permettant de classer les graveleux latéritiques utilisés en construction routière pour les routes en terre (Tockol, 1993) a été élaboré. Les teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  des graveleux latéritiques ont des conséquences sur leurs caractéristiques géomécaniques. Les quantités relatives de ces oxydes sont liées à la composition minéralogique de la roche sous-jacente (Ferreira et Correira, 1991 in Fall, 1993). Le comportement mécanique des sols latéritiques est donc fortement influencé par leurs propriétés physiques (densité des grains, indice de plasticité et granularité) et minéralogiques (Rodrigues *et al.*, 2010).

Le CBR des graveleux latéritiques est la propriété la plus couramment utilisée dans le dimensionnement des chaussées. Des études récentes ont encore été réalisées pour établir un lien entre le CBR et les propriétés des sols. Il en ressort que, la nature argileuse du sol a une influence significative sur la compression et sur la valeur de CBR et, que le CBR est mieux corrélé à la limite de plasticité, selon que le sol est kaolinitique ou montmorillonique (Nagaraj et Suresh, 2018).

Vu l'hétérogénéité des propriétés géotechniques des graveleux latéritiques et, la diversité des résultats et corrélations statistiques obtenues, il est nécessaire d'étudier les graveleux latéritiques à une échelle régionale pour préciser les liens entre leurs caractéristiques génétiques et leurs propriétés géotechniques.

## **II.2.5. Utilisation des graveleux latéritiques en construction routière**

### **II.2.5.1. Classification des graveleux latéritiques**

Pour une utilisation adéquate en géotechnique, les graveleux latéritiques doivent être classés selon un système, le but étant de permettre, à partir d'observations de terrain et d'essais simples de laboratoire, de prévoir le comportement mécanique des matériaux (Tockol, 1993 ; Zeynal, 2016) ; et de regrouper les sols en familles, aux caractéristiques géomécaniques voisines (Bagarre, 1990).

La classification indique par classe de sol, la portance à laquelle on peut s'attendre (Tockol, 1993). Malgré la multitude de systèmes de classification, aucun n'a pu obtenir un consensus universel. Les paramètres le plus souvent évalués sont la granularité, la plasticité et la portance CBR (DEGN, 1987 ; Fall, 1993 ; Tockol, 1993 ; Millogo, 2008 ; Akaha et Adunola, 2016) et, les caractéristiques de compactage (Bagarre, 1990).

Dans la classification HRB (*Highway Research Board*) ou AASHTO (*American Association for State Highway Transportation Officials*), les graveleux latéritiques couvrent plusieurs classes. Les sols les plus graveleux sont de classes A-2-6 et A-2-7, tandis que les plus argileux (passant à 80  $\mu\text{m}$  > 35 %) sont de classes A-7-5 et A-7-6. On rencontre parfois des matériaux de classes A-5 et A-6 (DEGN, 1987). L'un des paramètres important de cette classification est l'indice de groupe qui permet de qualifier les matériaux comme couche d'infrastructure routière. Il se calcule comme suit :

$$I_g = (F - 35)[0,2 + 0,005(\omega_L - 40)] + 0,01[(F - 15)(I_p - 10)] \quad (4)$$

où : F = nombre entier exprimant le pourcentage de passant au tamis de 75  $\mu\text{m}$ ,

$\omega_L$  = limite de liquidité,

$I_p$  = indice de plasticité.

Dans la classification USCS (*Unified Soil Classification System*)/LCPC (Laboratoire Central des ponts et Chaussées), les graveleux latéritiques entrent en général dans la catégorie des sols grenus (Bagarre, 1990). Ils se répartissent entre les classes GC (graviers argileux) et SC (sables argileux), lorsque leur granularité maximale est réduite.

Dans la nouvelle classification française des sols, la quasi-totalité des graveleux latéritiques est située dans la classe B6 ( $D < 50$  ;  $f$  : 12 à 35 % ;  $IP > 10$  %) (Millogo, 2008).

La complexité des graveleux latéritiques et les nombreux problèmes d'adaptation de ces différents systèmes de classification au contexte tropical a amené de nombreux pays africains comme le Ghana, la Côte d'Ivoire, le Burkina Faso, le Nigéria et le Sénégal à tenter d'établir une classification ou, simplement, de résumer les caractéristiques des matériaux rencontrés dans ces régions (Tockol, 1993 ; Bohi, 2008). Les plus importantes sont :

- la classification de la Lyon Associates (1971) qui reprend la classification génétique (Tockol, 1993). Elle est utilisée au Ghana et au Nigéria,
- la classification Ivoirienne qui tient compte du facteur génétique établit en 1984 par le Laboratoire du Bâtiment et Travaux Publics (LBTP) (Tockol, 1993 ; Bohi, 2008),
- la classification du CEBTP (1984), basée sur le pourcentage des fines, l'indice de

plasticité et, le produit pourcentage de fines ( $f$ ) par l'indice de plasticité (IP). Ce produit  $f \times IP$  constitue une caractéristique importante du comportement des graveleux latéritiques (CEBTP, 1984 ; DEGN, 1987 ; Sikali et Djalal, 1987) (Tab. 8). Cette classification retient 03 types de matériaux, GL1, GL2 et GL3, en fonction de leurs caractéristiques.

La classification de Rodrigues *et al.* (2010), spécifique aux sols latéritiques et dont les principales étapes sont consignées à la figure 7, est basée sur 06 paramètres :

- la valeur de bleu de méthylène ( $V_{BS}$ ),
- la limite de retrait ( $w_s$ ),
- le coefficient de dégradabilité ( $I_{DG}$ ) qui est un paramètre représentatif du comportement de certains matériaux rocheux, dont les caractéristiques géotechniques (granularité, argilosité, plasticité) évoluent par rapport à celles observées immédiatement après leur extraction,
- le coefficient de fragmentabilité ( $I_{FR}$ ) qui est un des paramètres représentatifs du comportement de certains matériaux rocheux, dont la granularité évolue continûment depuis leur extraction jusqu'au terme de leur mise en œuvre et qui, pour quelques-uns d'entre eux, se poursuit encore durant la vie des ouvrages,
- le coefficient de friabilité des sables ( $I_{FS}$ ) qui est un des paramètres représentatifs de la résistance à la fragmentation des sables et l'indice CBR ( $I_{CBR}$ ).

Ces paramètres permettent d'obtenir 03 types de sols à savoir les sols latéritiques graveleux (SLG), les sols latéritiques sableux (SLS) et les sols latéritiques fins (SLF) (Fig. 8).

La diversité des systèmes de classification confirme l'hétérogénéité des graveleux latéritiques et, la diversité des possibilités d'utilisations de ce matériau suivant les régions. C'est dans ce sens que certains auteurs pensent la classification régionale de ce matériau est plus adaptée (Tockol, 1993 ; Bohi, 2008).

#### **II.2.5.2. Spécifications des graveleux latéritiques en construction routière**

Selon des recommandations du CEBTP (1984) et DEGN (1987), les graveleux latéritiques peuvent être utilisés à différents niveaux du corps de chaussée (Tab. 9) :

- en couche de forme pour tous les trafics ;
- en couche de fondation pour trafic faible de classes T1 à T3 ; et, pour les trafics T4 et T5, il est nécessaire de les stabiliser ;
- en couche de base pour trafic faible T1, T2 et, éventuellement T3.

Les graveleux latéritiques correspondent aux classes S5, S6 et S7 et les graves argileuses aux classes S2, S3 et S4 (Tab. 9 et 10).

Tableau 8. Correspondances entre  $f \times IP$  et les caractéristiques mécaniques

$f \times IP$	CBR à 95 % OPM	Données Proctor	
		DSM	TEO (%)
< 250	20 – > 80	2,1 – 2,5	5 – 8
250 – 600	15 – 40	2,0 – 2,25	7 – 10
600 – 1600	< 30	1,9 – 2,2	8 – 12

$f$  : fines ;  $IP$  : indice de plasticité ; CBR : *Californian Bearing Ration* ; OPM : optimum Proctor modifié ; TEO : teneur en eau à l’optimum Proctor modifié ; DSM : densité sèche maximale

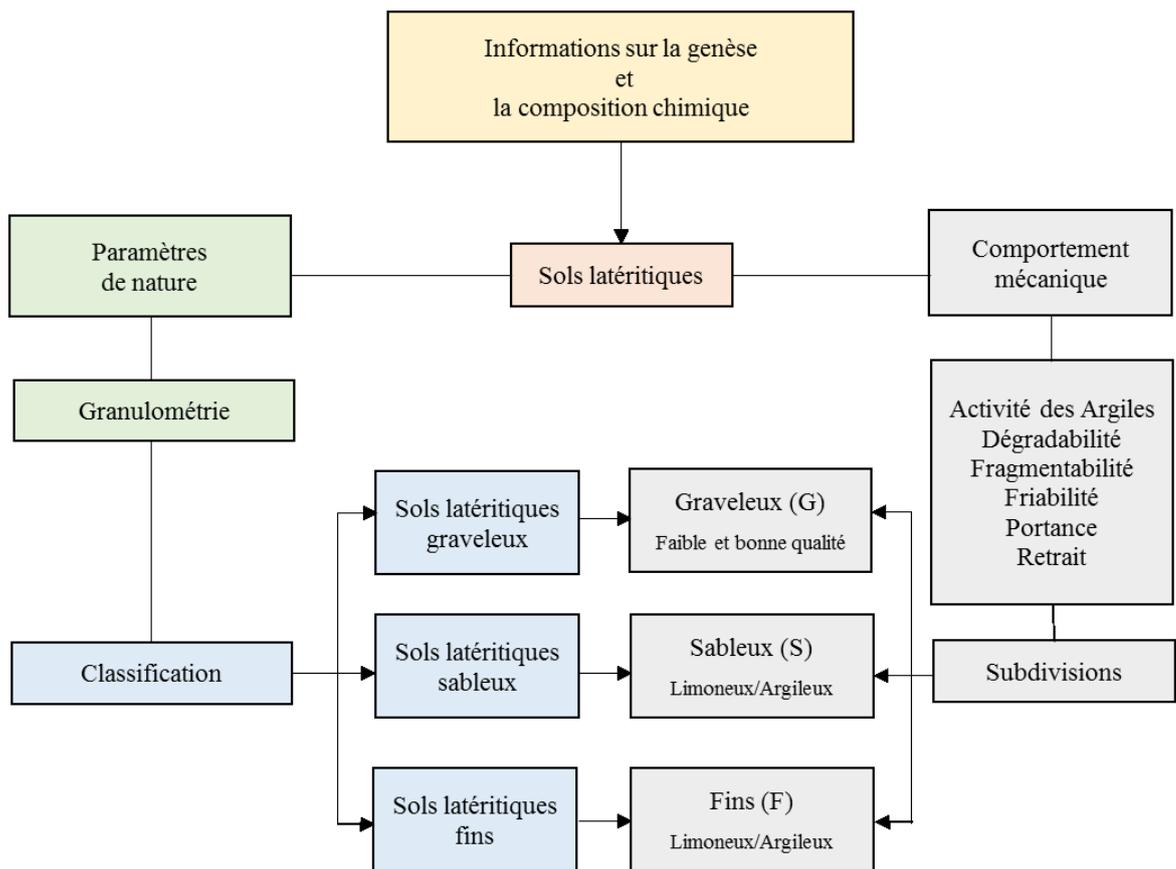


Figure 7. Etapes de la classification des sols latéritiques (d’après Rodrigues *et al.*, 2010)

<b>SOLS LATÉRIQUES [SL] [Composition chimique et genèse]</b>															
Passant tamis 80 µm ≤ 30 %										Passant tamis de 80 µm > 30 %					
Passant tamis 2 mm ≤ 30 %					Passant tamis 2 mm > 30 %										
Sols latéritiques graveleux [SLG]					Sols latéritiques sableux [SLS]					Sols latéritiques fins [SLF]					
$I_{FR} \leq 7$ & $I_{DG} \leq 7$		$I_{FR} < 7$ ou $I_{DG} > 7$			$I_{FR} > 7$ & $I_{DG} > 7$	$V_{BS} \leq 1,5$				$V_{BS} > 1,5$	$V_{BS} \leq 3$				$V_{BS} > 3$
$I_{CBR} \geq 60 \%$	$30 \% \leq I_{CBR} \leq 60 \%$	$I_{CBR} \geq 30 \%$	$30 \% \leq I_{CBR} \leq 60 \%$	$I_{FS} \leq 60$				$I_{FS} > 60$	$w_s \geq 25 \%$		$w_s < 20 \%$				
				$w_s \geq 15 \%$		$w_s < 15 \%$			$I_{CBR} \geq 10 \%$	$I_{CBR} < 10 \%$	$I_{CBR} \geq 10 \%$	$I_{CBR} < 10 \%$			
<b>SLGB1</b>	<b>SLGB2</b>	<b>SLGF1</b>	<b>SLGF2</b>	<b>SLGF3</b>	<b>SLSL1</b>	<b>SLSL2</b>	<b>SLSL3</b>	<b>SLSL4</b>	<b>SLSL5</b>	<b>SLSA</b>	<b>SLFL1</b>	<b>SLFL2</b>	<b>SLFL3</b>	<b>SLFL4</b>	<b>SLFA</b>
<b>COUCHE DE BASE [<math>I_{CBR} \geq 60 \%</math>]</b>															
Sans traitement	Avec traitement														
<b>COUCHE DE FONDATION [<math>I_{CBR} \geq 30 \%</math>]</b>															
Sans traitement		Avec traitement		Sans traitement	Avec traitement										
<b>COUCHE DE FORME [<math>I_{CBR} \geq 30 \%</math>]</b>															
Sans traitement				Sans traitement		Avec traitement			Sans traitement	Avec traitement					
Observations: Trafic faible ( $N < 10^6$ ) Charge à l'essieu < 13 tonnes F = Faible qualité ; B = Bonne qualité ; L = Limoneux ; A = Argileux $I_{FR}$ = Coefficient de fragmentabilité ; $I_{DG}$ = Coefficient de dégradabilité ; $I_{FS}$ = Coefficient de friabilité des sables ; $w_s$ = Limite de retrait ; $V_{BS}$ = Valeur au bleu de méthylène															

Figure 8. Classification des sols latéritiques pour une utilisation en couche de chaussée de faible coût dans les pays tropicaux et subtropicaux (d'après Rodrigues *et al.*, 2010)

Tableau 9. Spécifications des graveleux latéritiques utilisés en construction routière (CEBTP, 1984)

Graveleux latéritiques	Couche de base	Couche de fondation
$\Gamma_{dmax}$	2,00 Min	1,90 Min
LL(%)	35 Max	50 Max
IP (%)	25 Max	15 Max
$\epsilon_s$ (%)	0,3 Min	1 Min
Passant (mm)	–	–
38	85 – 100	80 – 100
19	70 – 100	65 – 100
10	50 – 95	50 – 100
5	40 – 90	35 – 100
2,5	30 – 80	25 – 80
0,7	15 – 45	15 – 55
0,08	5 – 20	5 – 35
CBR après 4 jours d'imbibition à 95 % OPM	80 Min	30 Min

$\gamma_{dmax}$  : masse volumique sèche maximale à l'optimum Proctor modifié ; LL : limite de liquidité ; LP : limite de plasticité ;  $\epsilon_s$  : gonflement linéaire ; Min : Minimum ; Max : Maximum

Tableau 10. Classes de portance en fonction du trafic (DEGN, 1987)

Types de sols	Portance	Utilisations
S1	CBR < 5	Matériau ne devant pas se trouver dans le corps de remblai sauf dans les zones où les sols latéritiques sont pratiquement absents
S2	5 < CBR < 10	Remblais
S3	10 < CBR < 15	Remblais et couche de forme
S4	15 < CBR < 30	Couche de forme et couche de fondation pour trafic T1
S5	30 < CBR < 60	Couche de fondation pour trafic T2, T3 et de base ou de roulement pour trafic T1
S6	60 < CBR < 120	Couche de fondation pour trafic T3, T4 et couche de base pour trafic T2
S7	CBR > 120	Couche de base pour trafic T3

CBR : Californian Bearing Ratio

Pour la couche de forme, on recommande des matériaux qui répondent aux caractéristiques suivantes :

- CBR > 10 %,
- fines < 35 ou 45 %,
- IP < 20 ou 30 %,
- gonflement linéaire < 2 %.

L'utilisation des graveleux latéritiques en couche de forme est envisageable pour toutes les classes de trafic.

En dehors des caractéristiques de portance spécifiées (Tab. 10), les matériaux utilisés en couches de fondation et en couches de base doivent satisfaire aux caractéristiques suivantes :

- dimension maximale des grains  $\leq 60$  mm,
- pourcentage des passants au tamis de  $80 \mu\text{m} < 35$ ,
- IP < 35 % avec une  $w_L < 70$  %.

Les spécifications liées à l'utilisation des graveleux latéritiques en couches de chaussée sont consignées dans le tableau 10.

## CONCLUSION

La zone Obala – Mbandjock, dans le de plateau sud camerounais est une pénéplaine d'altitude moyenne de 520 m, soumise à un climat équatorial de transition à 04 saisons. Le réseau hydrographique est de type dendritique. La végétation est constituée d'un vaste ensemble de savanes péri-forestières. Les activités principales des populations sont l'agriculture, la chasse, la pêche et la collecte du sable. Le socle de la zone d'étude est constitué de gneiss, roches de haut degré métamorphique (série de Yaoundé), majoritairement constitués de  $\text{SiO}_2$  et de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . . Les gneiss présentent une valeur moyenne de masse volumique des grains solides de  $2,83 \text{ g/cm}^3$  ; des valeurs de LA inférieures à 35 %, celles de CA inférieures à 24 % et, des valeurs de CBR de 175 %. Les graveleux latéritiques du plateau sud camerounais sont rouges à jaunes, de masse volumique moyenne  $2,82 \text{ g/cm}^3$ , de IP moyen 29 %, et de CBR moyen 45 %. Ils sont utilisables en couche de fondation. Les graveleux latéritiques sont des matériaux évolutifs à cause de la diversité de leurs facteurs de formation et de la complexité de leurs processus de formation. Les caractéristiques physiques, minéralogiques et géochimiques varient d'un lieu à un autre. La diversité des propriétés géotechniques et des corrélations statistiques obtenues, oblige à étudier les graveleux latéritiques à une échelle locale pour préciser les liens entre leurs caractéristiques génétiques et leurs propriétés géotechniques.

L'hétérogénéité des graveaux latéritiques ainsi que la diversité des possibilités d'utilisation donnent naissance à une diversité de systèmes de classification. Des corrélations entre propriétés génétiques et géotechniques dans les graveaux latéritiques, ont été établies afin de prédire le comportement de ces matériaux lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations externes. Le chapitre suivant présente les matériels et méthodes utilisés pour atteindre les objectifs fixés.

**CHAPITRE II**  
**MATERIELS ET METHODES**

## **INTRODUCTION**

Après les enquêtes bibliographiques, les travaux de terrain ont consisté en la localisation des carrières de roches et de graveleux latéritiques, en la description des matériaux et au prélèvement des échantillons. Les travaux de laboratoire ont consisté aux études pétrologiques, aux essais géotechniques et aux études statistiques.

## **I. ENQUETES BIBLIOGRAPHIQUES**

Les enquêtes bibliographiques ont consisté en l'exploitation de différentes cartes topographiques, géologiques et à celle d'articles et ouvrages scientifiques, dédiés au thème d'étude.

## **II. METHODES D'ACQUISITION DES DONNEES D'ANALYSES EXPERIMENTALES**

### **II.1. Méthodes d'acquisition des données de terrain**

#### **II.1.1. Localisation des carrières et matériels**

Une carrière de roche et 18 carrières de graveleux latéritiques ont été localisées aux abords de l'axe routier Obala – Mbandjock. Le matériel utilisé comprend un récepteur Global Positioning System (GPS) de marque Garmin, des cartes topographiques et géologiques, des machettes, des pelles, une pioche, une barre-à-mine, des sacs à échantillonner de 100 et 50 kg de contenance.

#### **II.1.2. Prélèvement des échantillons de roche**

Les échantillons de roche ont été prélevés dans la carrière de Nkolmekok au PK 14+400. Le prélèvement a été effectué à l'aide d'une massette.

#### **II.1.3. Prélèvement des échantillons de graveleux latéritiques**

Les échantillons de graveleux latéritiques ont été prélevés dans les 18 carrières sélectionnées aux abords de l'axe routier Obala - Mbandjock. Trois carrières (PK 33+700, PK 17+450 et PK 1+475) ont nécessité l'exécution des puits de prélèvement. Les échantillons des 15 autres carrières ont été prélevés sur les talus rencontrés dans les carrières de graveleux latéritiques. Les échantillons de graveleux latéritiques prélevés ont pour code leur position kilométrique. Environ 40 à 50 kg de matériaux, par carrière ont été prélevés pour les analyses géotechniques et, 50 à 100 g environ, pour les analyses minéralogiques et géochimiques. Ces matériaux ont été prélevés en zone de savane humide (Fig. 9), entre Obala et Ndjoré (~ PK 42),

soit 11 carrières pour 199 échantillons et, en zone de savane sèche (~ PK 68), entre Ndjoré et Mbandjock (Fig. 10), soit 7 carrières pour 122 échantillons de graveleux latéritiques. Un échantillon moyen a été constitué dans chaque emprunt pour les analyses minéralogiques et chimiques, soit 18 échantillons au total.

## **II.2. Méthodes d'acquisition des données de laboratoire**

### **II.2.1. Physico - chimie et pétrologie des matériaux**

#### **II.2.1.1. Mesures du pH et Eh**

Le potentiel d'hydrogène (pH) et le potentiel redox (Eh) ont été mesurés en laboratoire à l'aide d'un pH - mètre de type Schott Geräte CG818 digital et d'un agitateur magnétique de marque Stirrer\_B 212. Ces paramètres sont mesurés dans une solution sol/eau préalablement agitée pendant 800 tours par minute.

#### **II.2.1.2. Pétrographie**

Les études pétrographiques macroscopiques et microscopiques détaillées des matériaux prélevés ont été effectuées au Département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I. Les lames minces de roches saines ont été confectionnées au laboratoire de pétrographie de l'Institut de Recherches Géologiques et Minières (IRGM) de Nkol Bisson à Yaoundé au Cameroun. Un microscope optique polarisant de marque XP 201 muni d'une caméra OPTICAM a été utilisé pour réaliser ces études. Les proportions des minéraux ont été déterminées visuellement. La couleur des matériaux a été déterminée à l'aide de la charte des teintes Munsell (2000).

#### **II.2.1.3. Analyses minéralogiques**

Les échantillons de roches saines et de graveleux latéritiques retenus pour les analyses géochimiques ont été séchés à l'étuve à une température voisine de 70°C.

Ils ont par la suite été broyés au Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et Altérologie du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, à l'aide d'une pulvérisette électrique de marque FRITSCH.

La minéralogie des poudres d'échantillons de roche et de graveleux latéritiques a été déterminée par diffractométrie des rayons X (DRX). La diffraction des rayons X est l'une des techniques couramment utilisée pour l'identification des espèces minérales cristallisées d'une matière première (Millogo, 2008).



Figure 9. Carrière de graveleux latéritiques dans le secteur d'Olembé (PK 25 + 700) en zone de savane humide, entre Obala et Ndjoré



Figure 10. Carrière de graveleux latéritiques dans le secteur de Ndji (PK 49 + 000) en zone de savane sèche, entre Ndjoré et Mbandjock

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

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (5)$$

avec :

n : ordre de la diffraction,

$\lambda$  : longueur d'onde de la source émettrice,

d : espacement entre 02 plans parallèles successifs du réseau cristallin.

Pour une source émettrice de rayons X donnée ( $\lambda$ ), le balayage selon un angle d'incidence ( $\theta$ ) d'une préparation représentative d'un échantillon, permet d'accéder à la connaissance de tous les espacements réticulaires (d) de cet échantillon. Elle est effectuée sur une poudre dont la granulométrie est inférieure à 80  $\mu\text{m}$ . Les analyses ont été réalisées à l'aide d'un PAN Analytical X' PERT PRO, muni d'une électrode en Co à 40 kV et 45 mA. Ces analyses ont été effectuées dans les laboratoires de Géosciences de l'Ontario Geological Survey à Sudbury (Canada).

#### **II.2.1.4. Analyses géochimiques**

Dans le but de déterminer la perte au feu et éliminer les éléments volatiles et le fer oxydé, les poudres de roche et de graveleux latéritiques ont successivement été chauffées à 105°C sous azote et, à 1000°C sous oxygène. Les concentrations en éléments majeurs ont été déterminées par fluorescence X après chauffage et dilution des échantillons. Les poudres d'échantillon ont été fondues avec un flux de tétraborate de lithium avant l'analyse, en utilisant un spectromètre à fluorescence X à dispersion de longueur d'onde de marque Rigaku RIX-3000. Les références internationales des matériaux utilisés étaient BIR-1-1242 et BIR-1-1243. Les normes standards internes étaient MRB-29-8539, NPD-1-0964 et NPD-1-0965. Les valeurs d'erreur relative sur les échantillons analysés varient entre 0,2 % et 5 %. Les concentrations en fer ferreux ont été obtenues par titrage au dichromate de potassium. La norme internationale utilisée était SY-4-0397 dans le package FEO, tandis que les normes internes au laboratoire étaient MRB-29-8536, MRB-29-8537 et MRB-32-1411. Toutes ces analyses ont été réalisées dans les laboratoires de Géosciences de l'Ontario Geological Survey à Sudbury(Canada). Les teneurs en NiO ont été déterminées par ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry*).

#### **II.2.2. Essais géotechniques**

Les essais géotechniques réalisés sur les échantillons de roche et sur les graveleux

latéritiques ont porté sur la détermination de leurs propriétés physiques et mécaniques.

### **II.2.2.1. Essais sur roches**

Les classes granulaires testées sont : 0/4 - 0/31,5 - 4/6,3 et 6,3/10 (Fig. 11). Deux essais, par classe granulaire, ont été effectués.

#### **II.2.2.1.1. Caractéristiques géométriques des granulats**

Les caractéristiques géométriques sont liées aux conditions de fabrication des granulats. Ces caractéristiques sont la granularité, l'aplatissement, l'angularité, la propreté des sables et l'absorption.

L'analyse granulométrique par tamisage a pour but de déterminer les proportions de grains de différentes tailles d'un matériau. L'essai est réalisé selon la norme NF EN 933-1 (AFNOR, 1997).

La construction des corps de chaussées et des couches de roulement nécessite de n'utiliser que des granulats ayant une forme assez ramassée, en excluant les granulats plats. Les granulats plats produisent des couches de roulement trop glissantes. La détermination du coefficient d'aplatissement permet de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats. L'essai consiste en un double tamisage : le premier sur des tamis à mailles carrées et le deuxième sur les tamis à fentes. Cet essai est réalisé selon la norme NF EN 933-3 (AFNOR, 1997).

L'essai d'équivalent de sable permet d'évaluer la propreté d'un sable. Il rend compte globalement de la qualité et de la quantité des éléments fins. En effet, pour les granulats routiers, le pourcentage des éléments fins joue un rôle important dans les différentes formulations effectuées. L'essai est réalisé selon la norme NF EN 933-8 (AFNOR, 1997).

#### **II.2.2.1.2. Caractéristiques intrinsèques des granulats**

Ces caractéristiques sont liées à la nature et à la qualité de la roche exploitée. Ces caractéristiques sont, entre autres : le poids volumique absolu ou poids volumique des grains solides, le coefficient Micro Deval, le coefficient Los Angeles, les paramètres Proctor et le CBR.

Le poids volumique des particules solides  $\gamma_s$  représente le poids de granulat sec rapporté au volume absolu de matière pleine. La détermination de  $\gamma_s$  est importante parce que les caractéristiques intrinsèques des matériaux dépendent de leurs poids volumiques absolus.



Figure 11. Sélection des tamis et tamisage des granulats

Les informations relatives à la réalisation de l'essai sont présentées dans les normes NF EN 1097-7 (AFNOR, 1999) et NF EN 1097-6 (AFNOR, 2001).

La résistance à l'usure, déterminée par l'essai Micro Deval, est une caractéristique très importante pour les matériaux entrant dans la composition des assises de chaussées soumises à des déformations périodiques dues au passage des véhicules. L'essai Micro Deval est réalisé selon la norme NF EN 1097-1 (AFNOR, 1996) et permet la détermination du coefficient Micro Deval MDE (Fig. 12a & 13a). La valeur de MDE est d'autant plus élevée que le matériau est sensible à l'usure.

L'essai Los Angeles permet de déterminer la résistance à la fragmentation par chocs et, à l'usure par frottements réciproques. Le mode opératoire est décrit dans la norme NF EN 1097-2 (AFNOR, 1998) (Fig. 12b & 13b).

Les paramètres Proctor (densité sèche maximale DSM et teneur en eau optimale TEO) sont déterminés par des essais réalisés selon la norme NF EN 13286-2 (AFNOR, 2005).

L'indice portant Californien (CBR) est déterminé, en appliquant à un matériau traité ou non aux liants hydrauliques, après compactage dans un moule et conservation spécifiée, une force par l'intermédiaire d'un piston pour obtenir un enfoncement fixé. Le mode opératoire est présenté dans la norme NF EN 13286-47 (AFNOR, 2004).

## **II.2.2.2. Essais sur graveleux latéritiques**

### **II.2.2.2.1. Essais d'identification**

Les essais d'identification se rapportent à des caractéristiques intrinsèques, c'est-à-dire qui varient peu ou pas, ni dans le temps, ni au cours des différentes manipulations que subit le sol au cours de sa mise en œuvre (Anonyme, 2000). Ces paramètres renseignent sur les caractéristiques physiques des matériaux, et donc sur leurs traits minéralogiques (Hieng, 2003). Parmi les paramètres physiques courants, seuls la masse volumique des grains solides, la granularité, les limites d'Atterberg et l'indice de plasticité ont été déterminés.

La méthode utilisée pour déterminer la masse volumique des particules solides est celle du pycnomètre, décrite dans la norme NFP 94-054 (AFNOR, 1991).

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

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



(a) Appareil Micro Deval



(b) Appareil Los Angeles

Figure 12. Appareillage pour essais mécaniques sur roches



(a) Charge abrasive pour essai  
Micro Deval



(b) Charge abrasive pour Essai  
Los Angeles

Figure 13. Types de boules utilisées pour les essais mécaniques sur roches

densité de la suspension à des intervalles de temps variables permet de calculer la proportion de grains de chaque diamètre.

L'analyse granulométrique par tamisage a été réalisée selon le mode opératoire décrit par la norme NF P94-056 (AFNOR, 1996).

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

- le passage d'un sol de l'état solide sans retrait à l'état solide avec retrait : limite de retrait ( $\omega_s$ ),
- le passage d'un sol de l'état solide à l'état plastique : limite de plasticité ( $\omega_p$ ),
- le passage d'un sol de l'état plastique à l'état liquide : limite de liquidité ( $\omega_L$ ).

Ces limites représentent la teneur en eau du sol à l'état de transition considérée, exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute. Seules les limites de liquidité et de plasticité ont été déterminées dans le présent travail.

La différence  $I_p = \omega_L - \omega_p$ , qui définit l'étendue du domaine plastique, est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité. Cet indice permet d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon. La détermination des limites d'Atterberg a été réalisée selon la norme NF P 94-051 (AFNOR, 1993) (Fig. 14).

#### **II.2.2.2.2. Essais de compactage**

Les paramètres de compactage ne sont pas propres au sol mais, sont fonction de l'environnement dans lequel le sol se trouve. Ces paramètres permettent d'évaluer l'influence de la teneur en eau sur la portance du matériau après compactage. Ils sont déterminés par les essais Proctor et CBR (Fig. 15 & 16). L'ingénieur américain Proctor a démontré que, pour une énergie de compactage donnée, la teneur en eau du matériau avait une grande influence sur la compacité obtenue. En construction routière, c'est l'essai Proctor modifié qui est le plus souvent utilisé. Il est réalisé selon la norme NFP 94-093 (AFNOR, 2014).

L'indice portant Californien CBR est une notion purement empirique utilisée pour évaluer la qualité des différents matériaux du corps d'une chaussée. C'est un essai incontournable pour le dimensionnement mécanique des chaussées (Tockol, 1993 ; Millogo, 2008) et pour la classification des matériaux (CEBTP, 1984). Cet essai a été réalisé selon la norme NFP 94 - 078 (AFNOR, 1997).



Figure 14. Réalisation de l'essai de détermination des limites d'Atterberg (limite de plasticité)



Figure 15. Réalisation de l'essai Proctor



(a) Immersion des éprouvettes



(b) Poinçonnement des éprouvettes

Figure 16. Réalisation de l'essai CBR

### III. METHODES D'EXPLOITATION DES DONNEES D'ANALYSES EXPERIMENTALES

#### III.1. Méthodes d'exploitation des données minéralogiques

L'exploitation des données minéralogiques a consisté au dépouillement manuel des diffractogrammes à l'aide des fiches PDF (*Powder Diffraction File*) du JCPDS-ICDD.

Les déterminations semi-quantitatives des phases minérales ont été effectuées à l'aide de la méthode développée par Yvon *et al.* (1990). Cette méthode utilise les résultats de l'analyse chimique, la composition idéale de chaque minéral et la diffraction des rayons X. La composition semi-quantitative des phases minérales de l'échantillon est évaluée en utilisant la relation :

$$T(a) = \sum M_i P_i(a) \quad (6)$$

avec :

$T(a)$  = % massique de l'oxyde de l'élément chimique  $a$  dans l'échantillon ;

$M_i$  = % massique en minéral  $i$  dans le matériau étudié ;

$P_i$  = proportion massique de l'oxyde de l'élément  $a$  dans le minéral  $i$  déduite de la formule idéale attribuée à ce minéral  $i$ .

Le site internet [www.webmineral.com](http://www.webmineral.com) et les abaques de minéralogie ont été utilisés pour la détermination des compositions chimiques idéales des différents minéraux identifiés.

#### III.2. Méthodes d'exploitation des données géochimiques

Après avoir été utilisées dans les déterminations semi-quantitatives des différentes espèces minérales, les données d'analyses géochimiques ont également servi aux études géochimiques proprement dites.

##### III.2.1. Indices et diagrammes géochimiques

Plusieurs indices d'altération chimique ont été calculés à partir des données d'analyses géochimiques. Trois types de diagrammes ont été utilisés pour l'exploitation des données géochimiques à savoir les diagrammes binaires, les diagrammes ternaires et les diagrammes quaternaires.

##### III.2.2. Restructuration normative altérologique

La restructuration normative altérologique est une méthode d'étude géochimique à partir de laquelle 07 paramètres ont été définis pour caractériser les roches et les matériaux

d'altération qui en dérivent (Ekodeck, 1984, 1989 ; Ekodeck et Kamgang Kabeyene, 2002). Cette méthode d'étude, inspirée de la méthode américaine CIPW (Cross *et al.*, 1903) est fondée uniquement sur les résultats d'analyses géochimiques des constituants majeurs. Le principe consiste en la combinaison de 14 constituants chimiques comprenant l'eau de constitution. Cinq groupes standards rassemblant 37 espèces minérales sont susceptibles de se former et permettent de reconstituer une constitution minéralogique virtuelle pour chaque échantillon. Les paramètres évalués sont de 03 types :

- les paramètres d'enrichissement du milieu d'altération (PPFAL, IAL, IFL, IIP),

$$PPFAL = \frac{(\text{Gibbsite} + \text{Boehmite} + \text{Corindon})}{\text{Goethite} + \text{Hematite}} \quad (7)$$

$$IAL = \frac{(\text{Gibb} + \text{Boeh} + \text{Cor})}{\text{Gibb} + \text{Boeh} + \text{Cor} + \text{Goe} + \text{Hem} + \text{Co}} \times 100 \quad (8)$$

$$IFL = \frac{(\text{Goe} + \text{Hem})}{\text{Gibb} + \text{Boe} + \text{Cor} + \text{Goe} + \text{Hem} + \text{Co}} \times 100 \quad (9)$$

$$IIP = \frac{(\text{Oxydes} + \text{Hydroxydes de } \text{Fe}^{3+}, \text{Al}^{3+}, \text{Mn}^{2+})}{\text{Tous les minéraux}} \times 100 \quad (10)$$

Cor : corindon; Goe : goethite; Hem : hematite ; Gibb : gibbsite;

Co: coefficient de pondération permettant d'éviter les valeurs indéterminées ou infinies des paramètres. Il s'exprime comme suit :

$$Co = \%aT - (\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3) \quad (11)$$

%aT : pourcentage analytique total de tous les éléments majeurs,

%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : teneur initiale en alumine,

%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : teneur initiale en fer ferrique,

- les paramètres d'appauvrissement du milieu d'altération (ILP, DVAR),

$$ILP = \frac{(\text{Gibb} + \text{Boeh})100 + (\text{Kand})75 + (\text{Sil.al Ca.alc})50 + (\text{Sil.al FeMg})25}{\text{Gibb} + \text{Boeh} + \text{Cor} + \text{Sil}} \quad (12)$$

$$DVAR = \frac{[[(\text{Gibb} + \text{Boeh} + \text{Si.am})100 + (\text{Kndt})75] + ss[(c-a)50 + (f-m)25]]}{(\text{Gibb} + \text{Boeh} + \text{Cor} + ss + sp)} \quad (13)$$

- Boeh : boehmite ; Kand : kandites ; Sil : silicates ; Sil.al : silicates d'altération ;  
 Ca.alc : calcoalcalins ; FeMg : ferromagnésiens,  
 - les paramètres de caractérisation du milieu (ICP)

$$ICP = \frac{(\text{Silicates} - \text{Kandites})}{\text{Gibb} + \text{Cor} + \text{Silicates}} \times 100 \quad (14)$$

Les degrés virtuels et indices virtuels ainsi définis concernent essentiellement la phase silicatée. Ce sont donc des paramètres absolus. Ils ne s'appliquent à l'ensemble de la roche que lorsque le rapport altérologique est égal à 100. Ils sont alors dits paramètres relatifs. Ce rapport est donné par la formule :

$$ra = \frac{\%aT - \%Tr}{\%T} \times 100 \quad (15)$$

%T : pourcentage analytique total ou pourcentage initial cumulé de tous les constituants chimiques majeurs,

%Tr : pourcentage total résiduel ou pourcentage cumulé de tous les constituants majeurs résiduels.

La valeur du paramètre relatif est obtenue en multipliant le rapport ra par le paramètre absolu.

Les différents paramètres ainsi présentés permettent de mettre en évidence quantitativement les principales caractéristiques des roches étudiées du point de vue de l'altération supergène. Plus précisément, ils permettent :

- de préciser la classe normative de la roche étudiée,
- de connaître la prédominance relative des oxyhydroxydes libres d'aluminium ou de fer ferrique pouvant indurer un matériau,
- d'avoir une claire vision, non seulement du degré de transformation des silicates primaires en minéraux d'altération, mais aussi du degré de fermeture et/ou d'ouverture du système.

La méthode restructuration normative altérologique a été utilisée afin de corréler les caractéristiques génétiques des matériaux étudiés à leurs paramètres géotechniques.

### III.3. Méthodes d'exploitation des données géotechniques

L'exploitation des données géotechniques des matériaux a été réalisée par comparaison des résultats obtenus aux spécifications définies par les normes AFNOR (Association Française de Normalisation) et par les documents de référence tels que, le guide de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux (CEBTP, 1984) et les directives et recommandations des études générales au Cameroun (DEGN, 1987, 1988).

La classification des matériaux a été réalisée conformément aux prescriptions des systèmes USCS (*Unified Soil Classification System*) et AASHTO (*American Association for state Highway and Transportation Officials*).

### III.4. Méthodes d'analyse statistique des données

Les analyses statistiques ont été réalisées sur les données minéralogiques, géochimiques et géotechniques au moyen du logiciel XLSTAT version 2014.5.03.

#### III.4.1. Analyses descriptives

L'analyse statistique descriptive a pour but d'une part, de dégager les propriétés essentielles que l'on peut déduire d'une masse importante de données et, d'autre part, de donner une image simplifiée de la réalité (Veysseyre, 2014). Cette analyse regroupe les paramètres de position (moyenne, médiane, mode) et les paramètres de dispersion (étendue, variance, écart-type). Deux types d'analyses descriptives ont été réalisées, l'analyse descriptive univariée et l'analyse descriptive bivariée.

L'analyse descriptive univariée consiste à effectuer une étude des variables une par une, en évaluant les paramètres tels que la valeur minimale, la valeur maximale, la moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation. Les formules permettant de calculer la moyenne, la variance et l'écart-type sont les suivantes :

$$\text{Moyenne} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (16)$$

$$\text{Variance} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (17)$$

$$\text{Ecart - type} = \sqrt{\text{variance}} \quad (18)$$

X : variable ;  $n_i$  : effectif ;  $x_i$  : valeur de la variable

Le coefficient de variation (CV) est une mesure relative de la dispersion des données. Rarement utilisé, il a cependant des propriétés importantes.

$$CV = \frac{Ecart - type}{Moyenne} \times 100 \quad (19)$$

Les propriétés de CV sont les suivantes :

- il ne dépend pas des unités choisies,
- il permet d'apprécier la représentativité de la moyenne par rapport à l'ensemble des données ;
- il permet d'apprécier l'homogénéité d'une série d'observations : une valeur de CV inférieure à 15 % traduit une bonne homogénéité de cette distribution ;
- il peut être utilisé pour comparer deux séries d'observations dont les moyennes sont des ordres de grandeur très différents car, dans ce cas, la comparaison des variations peut conduire à des conclusions erronées.

L'analyse descriptive bivariée consiste elle, à étudier simultanément 02 variables quantitatives prises dans chaque jeu de données de l'analyse. L'interprétation passe par l'étude de la matrice de corrélation entre ces variables.

#### **III.4.2. Analyse de régression**

L'analyse de la régression est une méthode statistique permettant la modélisation des relations entre différentes variables, dépendantes et indépendantes. Elle est utilisée pour décrire et analyser les relations entre les données. Il s'agit en fait de ressortir les équations fonctionnelles qui lient 02 paramètres bien corrélés.

Le principe de la régression linéaire est de modéliser une variable dépendante quantitative Y, au travers d'une combinaison linéaire de p variables explicatives quantitatives, X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, ..., X<sub>p</sub>. Le modèle déterministe, ne prenant pas en compte d'aléa, s'écrit pour une observation i.

#### **III.4.3. Analyse en composantes principales**

L'analyse en composantes principales (ACP) a pour but d'examiner si l'utilisation de l'analyse factorielle, sous la forme de l'analyse en composantes principales, peut apporter des résultats différents des analyses déjà effectuées par l'établissement de corrélations et de régressions linéaires. La méthode d'analyse en composantes principales permet d'étudier un tableau d'individus X, variables dans le cas où toutes les variables ont des valeurs numériques. La méthode permet d'obtenir une carte des individus en fonction de leur proximité et une carte des variables en fonction de leurs corrélations. Il est également possible d'obtenir une

représentation simultanée (Biplot). La possibilité d'analyser des individus et des variables supplémentaires, quantitatives ou qualitatives, est offerte.

Au moyen du logiciel XLSTAT version 2014.5.03, 188 individus (échantillons) ont été analysés, à l'aide :

- d'un vecteur contenant les valeurs propres, qui expriment la variance de chaque composante principale,
- d'une matrice contenant les vecteurs propres, qui sont les pondérations à appliquer aux variables pour obtenir les facteurs,
- d'une matrice contenant les corrélations entre les variables de départ et les facteurs.

La projection des individus et des caractères est réalisée sur l'espace principal considéré. En général, comme il est possible de le vérifier, le plan défini par les 02 premiers axes factoriels comprend un pourcentage important de l'information ( $\approx 75\%$ ).

L'interprétation des résultats et de leurs représentations graphiques conduit aux informations suivantes :

- l'origine des axes G est le centre de gravité du nuage : il représente la tendance moyenne des individus. Les individus situés loin du centre présentent un écart important par rapport à cette moyenne et influencent grandement les statistiques ;
- l'inertie d'un axe, représentée par la valeur propre associée à son vecteur directeur, témoigne de la représentativité de cet axe par rapport au nuage de points : plus l'inertie du plan est forte, plus la projection du nuage sur ce plan est réaliste, avec un minimum de perte de l'information ;
- les coordonnées des points sur les axes factoriels sont les coefficients de corrélation des individus qu'ils représentent sur ces axes. La valeur du produit scalaire des vecteurs joignant deux points à l'origine est le coefficient de corrélation entre les deux variables correspondantes : des vecteurs voisins indiquent des variables fortement corrélées ;
- la proximité, dans le plan, d'individus et de variables, n'a pas de signification. Un lien entre ces paramètres nécessite une interprétation de la signification des facteurs.

#### **III.4.4. Classification ascendante hiérarchique**

Il existe de nombreuses techniques statistiques visant à partitionner une population en différentes classes ou sous-groupes. La classification ascendante hiérarchique (CAH) est l'une d'entre elles (Chessel *et al.*, 2004). On cherche à ce que les individus regroupés au sein d'une même classe (homogénéité intra-classes) soient le plus semblables possibles tandis, que les classes elles, doivent être le plus dissemblables (hétérogénéité inter-classes).

La classification ascendante hiérarchique est une méthode de classification itérative dont le principe est simple. Les étapes sont les suivantes :

- calculer la dissimilarité entre les N objets,
- regrouper les 02 objets dont le regroupement minimise un critère d'agrégation donné, créant ainsi une classe comprenant ces 02 objets,
- calculer ensuite la dissimilarité entre cette classe et les N-2 autres objets, en utilisant le critère d'agrégation. Puis regrouper les 02 objets ou classes d'objets dont le regroupement minimise le critère d'agrégation.

Le principe de la CAH est de rassembler des individus selon un critère de ressemblance défini au préalable qui s'exprimera sous la forme d'une matrice de distances, exprimant la distance existant entre chaque individu pris deux à deux. Deux observations identiques auront une distance nulle. Plus les 02 observations seront dissemblables, plus la distance sera importante. La CAH va ensuite rassembler les individus de manière itérative afin de produire un dendrogramme ou arbre de classification. La classification est ascendante car, elle part des observations individuelles ; elle est hiérarchique car, elle produit des classes ou groupes de plus en plus vastes, incluant des sous-groupes en leur sein. En découpant cet arbre à une certaine hauteur choisie, on produira la partition désirée.

La notion de ressemblance ou non entre observations est évaluée par une distance entre individus ou dissimilarité. Plusieurs types de distances existent selon les données utilisées, la distance de Gower, du  $\Phi^2$ , de Bray et Curtis, de Manhattan, etc. La distance de Bray - Curtis a été choisie pour l'analyse des données parce que c'est la méthode la plus utilisée en sciences naturelles.

Pour construire le dendrogramme, il existe aussi plusieurs méthodes, le saut minimum, la distance maximum, la moyenne, la méthode de Ward, etc. Dans le cadre de ces travaux, la méthode de Ward a été utilisée. Cette méthode cherche à minimiser l'inertie intra-classes et à maximiser l'inertie inter-classes, afin d'obtenir des classes les plus homogènes possibles.

## **CONCLUSION**

En vue de caractériser les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock, en zone de Plateau sud camerounais, sur les plans pétrologique et géotechnique, 18 carrières ont été sélectionnés au sein lesquelles 321 échantillons ont été prélevés. Les matériaux prélevés ont été l'objet de descriptions macroscopiques et microscopiques (roches). Les travaux de laboratoire ont porté sur les analyses pétrographiques, minéralogiques et géochimiques, à la réalisation des essais géotechniques, dans le but de déterminer les propriétés génétiques, physiques et

mécaniques des matériaux. Les études de la variabilité statistique de données obtenues ont été les dernières manipulations en laboratoire. Les analyses et essais effectués ont abouti à des résultats qui sont consignés dans le prochain chapitre.

**CHAPITRE III**  
**RESULTATS**

## **INTRODUCTION**

Les travaux effectués tant sur le terrain qu'en laboratoire ont permis d'obtenir des résultats qui sont consignés dans le présent chapitre. Ceux-ci portent sur les données pétrographiques, minéralogiques et géochimiques des matériaux de la zone Obala – Mbandjock d'une part et, d'autre part sur les caractéristiques géotechniques.

### **I. LOCALISATION DES POINTS DE PRELEVEMENTS**

Après des descriptions macroscopiques, 02 types de matériaux ont été prélevés, les roches et les graveleux latéritiques. Les échantillons de roche ont été prélevés dans la carrière de Nkolmekok au PK 14+400. Dix-huit carrières de graveleux latéritiques ont été localisées aux abords de l'axe routier Obala – Mbandjock. Les échantillons de graveleux latéritiques ont été collectés sur un même substratum lithologique mais à des positions topographiques variables (Figs. 17 & 18). Les données de géolocalisation de ces carrières sont consignées dans le tableau 11.

## **II. CARACTERISATION PETROLOGIQUE DES MATERIAUX**

### **II.1. Caractérisation pétrologique des gneiss**

#### **II.1.1. Pétrographie et minéralogie**

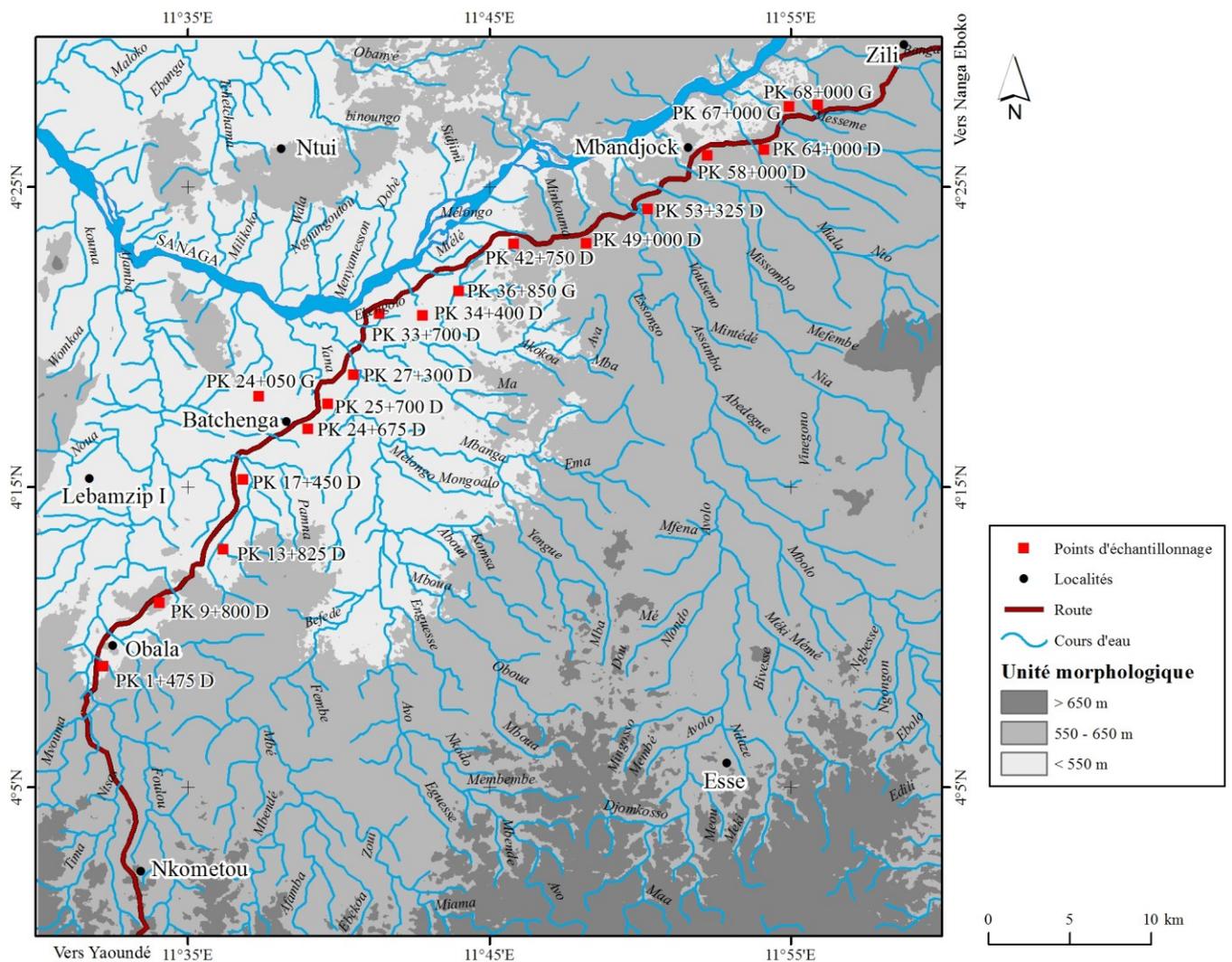
La roche a un aspect d'ensemble gris sombre à gris clair (Fig. 19). Elle présente un litage compositionnel, caractéristique des gneiss, marqué par une alternance de lits clairs quartzo-feldspathiques et de lits sombres ferromagnésiens. Les minéraux observables à l'échelle macroscopique sont le quartz, la biotite et les feldspaths.

Au microscope, elle présente une texture granonématoblastique (Fig. 20). Les minéraux sont pour la plupart orientés et plus ou moins automorphes. On observe dans l'ensemble, la prédominance des minéraux sombres (55 %) sur les minéraux clairs (45 %).

Le quartz (35 %) se présente sous forme de cristaux subautomorphes de tailles variables. Par endroits, on l'observe associé aux feldspaths (15 %), ou en inclusions dans la biotite (10 %) et l'amphibole (20 %). Il présente une extinction roulante.

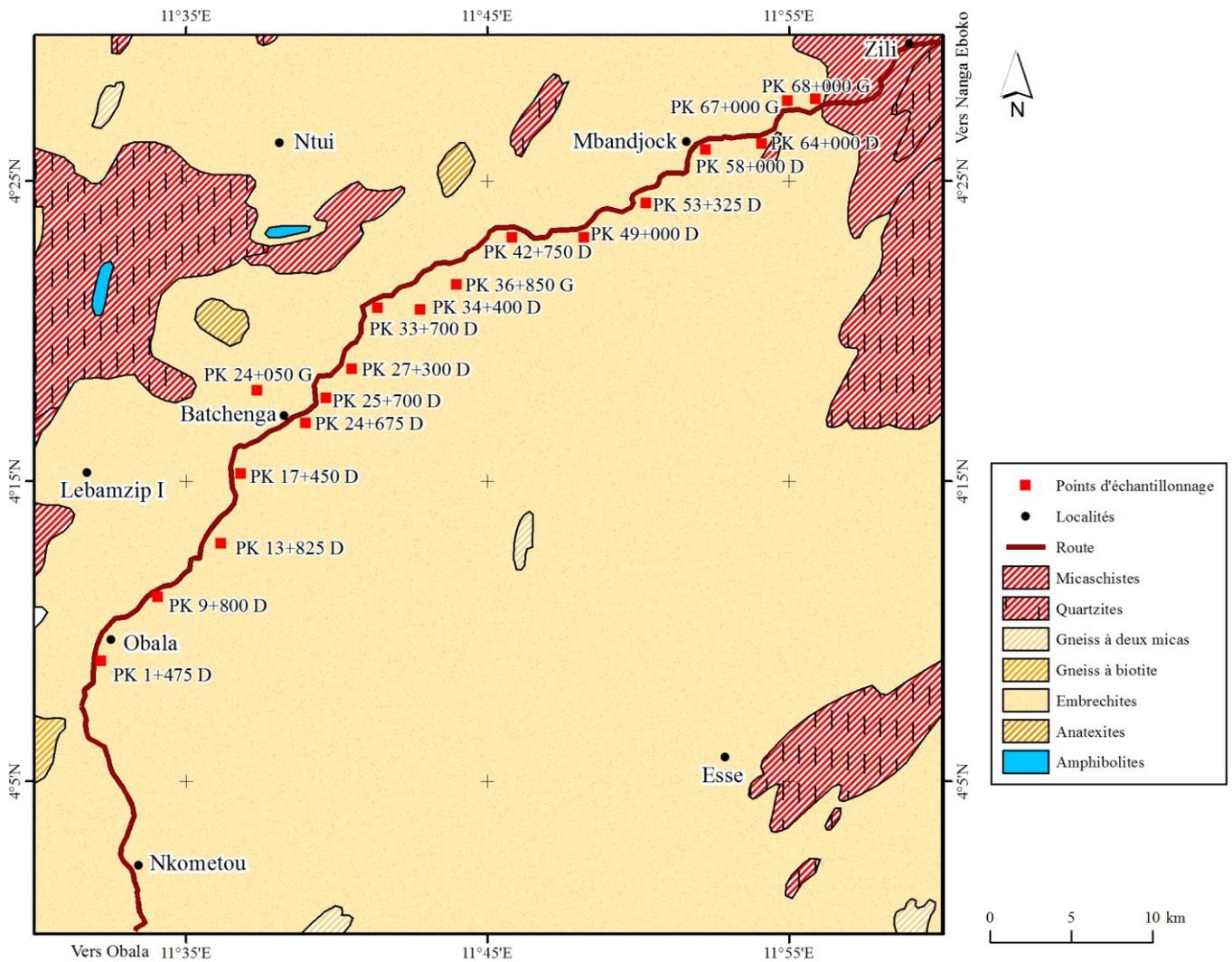
Les cristaux de plagioclase sont plus abondants que ceux de feldspaths alcalins. Les plagioclases sont représentés par l'orthose et le microcline. Ils sont déformés par endroits et présentent des macles en biseau. Le microcline est reconnaissable par la macle polysynthétique qui le caractérise.

L'amphibole est une hornblende verte. Elle est abondante dans la roche et présente un pléochroïsme dans les tons roses à vert jaunâtre. Certains cristaux d'amphibole sont poecélitiques à inclusions de quartz.



PK : point kilométrique ; D : côté droit ; G : côté gauche

Figure 17. Localisation des points d'échantillonnage des graveleux latéritiques sur la carte des unités géomorphologiques de la zone Obala - Mbandjock (D'après la carte topographique de la zone de Bafia, feuilles NB-32-VI-2c et NB-32-VI-2a au 1/50 000, INC - Cameroun)



PK : point kilométrique ; D : côté droit ; G : côté gauche

Figure 18. Localisation des points d'échantillonnage des roches et des graveleux latéritiques sur la carte géologique de la zone Obala - Mbandjock (d'après la carte géologique du Cameroun au 1/500 000 de Weecksteen (1957)).

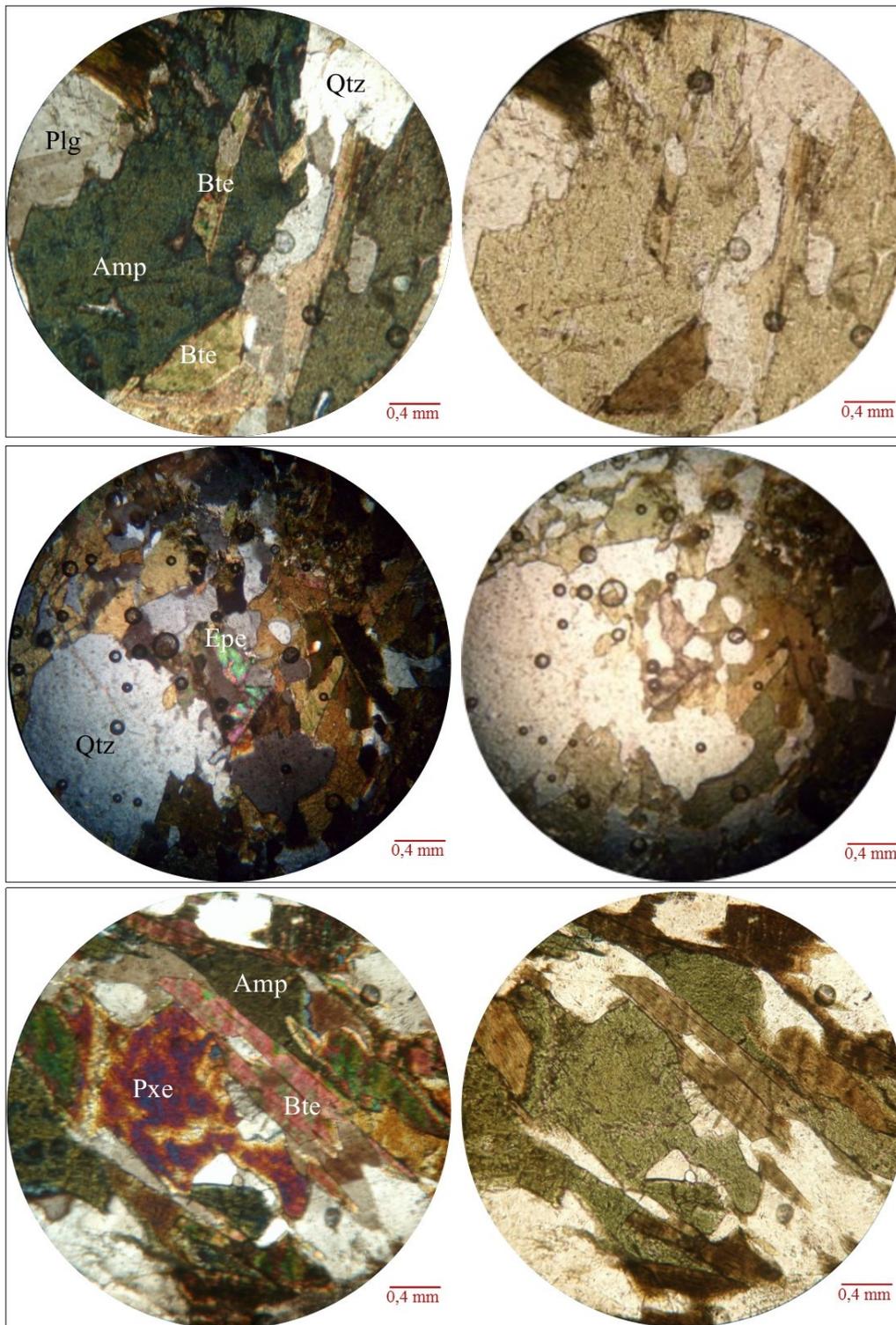
Tableau 11. Données de géolocalisation des différentes carrières de graveleux latéritiques

Carrière	Localité	Coordonnées GPS		Altitude (m)
		Latitude Nord	Longitude Est	
Roche	Nkolmekok	04°17'6"	11°36'47"	522,0
PK 1+475 D	Emana	04°8'0,76"	11°32'11,6"	559,4
PK 9+800 D	Minkama	04°11'7,73"	11°34'3,9"	565,2
PK 13+800 D	Elomezok	04°12'55,1"	11°36'10,3"	526,0
PK 17+450 D	Elon	04°15'14,9"	11°36'50,0"	495,0
PK 24+050 G	Batchenga	04° 18' 1,1"	11° 37' 21,7"	500,2
PK 24+675 D		04° 16' 56"	11° 38' 59"	500,0
PK 25+700 D	Olembé	04° 17' 45,6"	11° 39' 39"	525,6
PK 27+300 D		04° 18' 12,6"	11° 39' 36,6"	500,5
PK 33+700 D	Ndji	04° 20' 46"	11° 41' 21,7"	491,3
PK 34+400 D		04° 20' 43,3"	11° 42' 47,1"	524,4
PK 36+850 D		04° 21' 32,5"	11° 43' 59,1"	516,0
PK 42+750 D	Ekombitié	04° 23' 17,8"	11° 45' 44,8"	537,2
PK 49+000 D		04° 22' 56,7"	11° 48' 7,3"	564,9
PK 53+325 D	Doua	04° 24' 29"	11° 50' 47,3"	570,5
PK 58+000 D	Niobabouté	04° 26' 2,9"	11° 52' 14,6"	566,3
PK 64+000 D	Mbandjock	04° 27' 6,9"	11° 55' 11,6"	566,1
PK 67+000 G		04° 27' 56,3"	11° 56' 43,8"	581,3
PK 68+000 G		04° 28' 3,0"	11° 57' 36,2"	583,8

PK : Point kilométrique ; D : côté droit ; G : côté gauche, à partir de la borne 0 km



Figure 19. Organisation macroscopique des gneiss dans la zone d'Obala – Mbandjock



(a) LPA

(b) LPNA

Plg : Plagioclase ; Qtz : Quartz ; Bte : Biotite ; Pxe : Pyroxène ; Amp : Amphibole ; Epe :  
 épidote (d'après Whitney et Evans, 2010)

Figure 20. Aspects microscopiques des gneiss du secteur d'Obala – Mbandjock

La biotite se présente, soit sous forme de paillettes, soit sous forme de phénocristaux de couleur brun clair à brun sombre. Ces cristaux sont déformés par endroit et montrent une légère orientation préférentielle. La biotite est présente parfois en inclusions dans la hornblende verte.

Le pyroxène (8 %) qui se présente sous forme de cristaux de tailles moyennes est peu abondant et montre des inclusions de hornblende verte.

L'épidote (1 – 2 %) est xénomorphe avec un clivage fort. Ce minéral est légèrement pléochroïque et présente des teintes de polarisation vives. Les minéraux opaques sont rares et de formes variées. Ils sont rencontrés en inclusions dans les amphiboles.

### **II.1.2. Géochimie**

Les données des éléments majeurs sont consignées dans le tableau 12. Les gneiss dans la zone d'Obala - Batchenga présentent des teneurs élevées en SiO<sub>2</sub> (55,76 %), modérées en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (16,46 %), CaO (6,83 %), FeO (5,05 %), Na<sub>2</sub>O (4,80 %) et MgO (3,90 %). Les teneurs en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et K<sub>2</sub>O sont respectivement de 2,35 et 1,63 %. Les autres oxydes ont des teneurs inférieures à 1 %.

Les rapports K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O et SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Wimmenauer, 1984) dont les valeurs respectives sont 0,40 et 3,39 indiquent que le protolithe de ce gneiss correspond aux grauwackes pelitiques (Fig. 21). Ce fait est confirmé par la présence des minéraux de grenats sur certains affleurements. D'après le diagramme de Le Maître *et al* (1989), ce gneiss appartient à la série calcoalcaline (Fig. 22).

Les gneiss de la zone d'étude ont une valeur de CIA de 44,9 %. Cette valeur de CIA est inférieure à celle des chloritoschistes d'Ayos (60,6 %), Bengbis (62,9 %) et Mbalmayo (50,8 %) (Onana *et al.*, 2016). Les gneiss étudiés sont donc plus riches en feldspaths que ces autres types pétrographiques.

## **II.2. Caractérisation physico – chimique et pétrologique des graveleux latéritiques**

### **II.2.1. Variation du pH et Eh**

La qualité de l'eau souterraine a un rôle dans les mouvements des différents éléments chimiques des sols. Pour essayer de comprendre les conditions de formation des graveleux latéritiques dans la zone d'étude, les valeurs des paramètres pH et Eh ont été déterminées. Les résultats sont consignés dans le tableau 13.

En savane humide, les valeurs de pH varient entre 4,53 et 6,50, soit une moyenne de 5,90. En savane sèche, elles oscillent entre 4,63 et 6,22, soit une moyenne de 5,50.

Tableau 12. Distribution des éléments majeurs (%) dans les gneiss de la zone Obala - Mbandjock

Code		Gneiss
SiO <sub>2</sub>	0,04*	55,76
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	16,46
LOI	0,05	1,31
MgO	0,01	3,90
MnO	0,002	0,12
CaO	0,006	6,83
BaO	0,004	0,15
Na <sub>2</sub> O	0,02	4,08
K <sub>2</sub> O	0,01	1,36
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	2,35
FeO	0,06	5,05
TiO <sub>2</sub>	0,01	0,96
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,002	0,29
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,002	0,20
NiO	0,001	0,00
Total	-	98,83
CIA, %	-	44,9

\* : limite de détection ; LOI : Loss on ignition

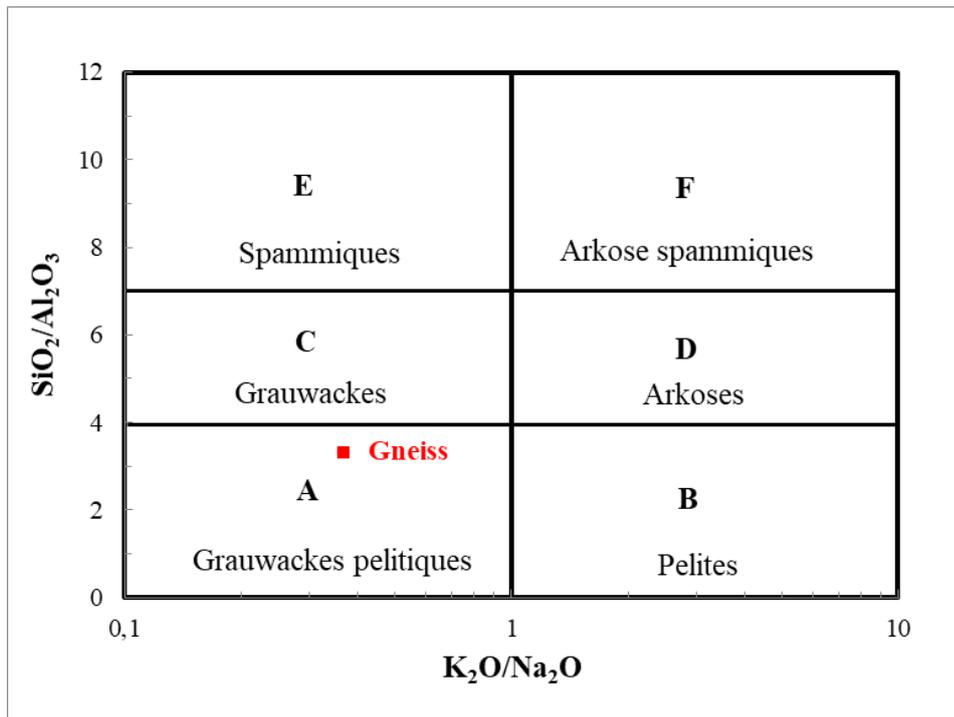


Figure 21. Position des gneiss dans le diagramme discriminant  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  versus  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  des métasédiments de Wimmenauer (1984)

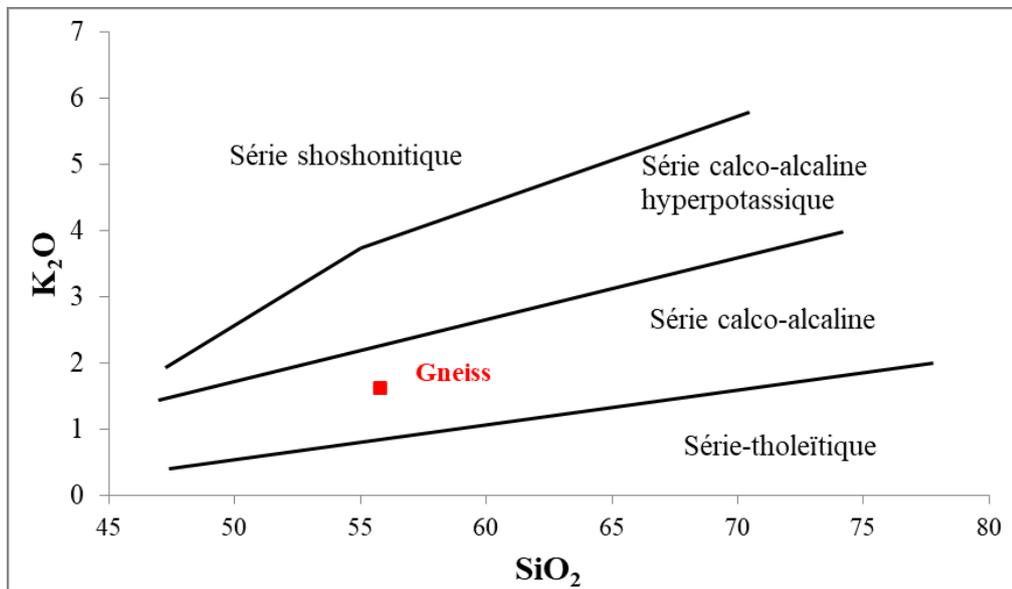


Figure 22. Position des gneiss dans le diagramme binaire  $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  de Le Maître et al. (1989).

Tableau 13. Valeurs de pH et Eh dans les graveleux latéritiques de la zone d'Obala – Mbandjock

		Carrière	pH	Eh (mV)
Savane humide	Emana	PK 1+475	6,26	18,7
	Minkama	PK 9+800	6,50	26,65
	Elomezok	PK 13+825	5,89	55,55
	Elon	PK 17+450	6,18	43,65
	Batchenga	PK 24+050	5,82	68,55
		PK 24+675	6,26	37,27
	Olembé	PK 25+700	4,53	+144,1
		PK 27+300	6,15	42,47
	Ndji	PK 33+700	6,23	+45,0
		PK 34+400	5,43	86,93
		PK 36+850	5,69	73,60
		Minimum	4,53	18,70
		Maximum	6,50	86,93
		<b>Moyenne</b>	<b>5,90</b>	<b>50,37</b>
		Ecart-type	0,55	22,58
	CV	9,30	44,82	
Savane Sèche	Ekombitié	PK 42+750	4,63	+137,8
		PK 49+000	6,22	47,70
	Doua	PK 53+325	5,61	106,65
	Niobabouté	PK 58+000	6,09	51,65
	Mbandjock	PK 64+000	5,61	75,63
		PK 67+000	5,13	+108,9
		PK 68+000	5,22	101,00
		Minimum	4,63	47,70
		Maximum	6,22	106,65
		<b>Moyenne</b>	<b>5,50</b>	<b>76,53</b>
		Ecart-type	0,56	27,19
	CV	10,12	35,53	

PK : Point Kilométrique

CV : coefficient de variation

Les valeurs de Eh, en savane humide varient entre +18,70 et +144,1 mV, pour une moyenne de +50,37 mV ; alors qu'en savane sèche, elles varient entre +47,70 et +137,8 mV, soit une moyenne de 76,53 mV.

Les conditions de formation des graveleux latéritiques dans la zone d'Obala-Mbandjock peuvent donc être déduites de l'analyse du diagramme Eh - pH (Fig. 23a), où les contours de solubilité pour Fe et Al (en moles/l) sont représentés. Le diagramme est divisé en 02 zones par une courbe de solubilité égale pour les oxydes et hydroxydes de Al et Fe ( $R_{Al} = R_{Fe}$ ). La courbe d'isosolubilité est la courbe  $\sum Al = \sum Fe$ , qui sépare les zones où, respectivement, les phases Al (zone 1) ou Fe (Zone 2) sont les plus solubles. A droite de la ligne en pointillés ni Fe ni Al ne sont mobiles (solubilité  $\leq 10^{-6}$  moles/l) Les deux lignes verticales pleines correspondent aux courbes de kaolinite (Kln) et gibbsite (Gbs). Le Diagramme Eh - pH montre les environnements de formation des graveleux latéritiques étudiés sous conditions atmosphériques (Fig. 23b). À faibles valeurs de pH et Eh (zone 1), les minéraux de Fe sont plus solubles, alors qu'au-dessus de cette ligne (zone 2), la gibbsite est plus soluble. Sur la droite de la ligne en pointillés, la solubilité de Fe et Al est très faible, ce qui suggère que la latérite (ou bauxite) ne se formera que si le protolithe est relativement riche en Fe (ou Al). La position des courbes kaolinite-in et kaolinite-gibbsite dépendantes du pH est également montrée ; leurs emplacements sont très approximatifs, car fonction de la composition du fluide.

## II.2.2. Pétrographie des graveleux latéritiques

Dans la zone de savane humide, entre Obala et Ndjoré, la partie visible de la coupe pédologique montre que les sols (Fig. 24) sont généralement peu épais (1 à 1,5 m) et de couleur jaune à jaunâtre. Le niveau nodulaire qui correspond aux graveleux latéritiques est épais de 0,20 à 0,60 m, tandis que le niveau argileux meuble superficiel possède moins de 0,20 m d'épaisseur. La limite entre ces 02 niveaux est nette et ondulée. Ces graveleux latéritiques de savane humide (Fig. 25) ont une couleur jaune brunâtre (10YR 6/6) à brun foncé (7,5YR 5/8). La matrice qui les enveloppe (40%) est argilo-sableuse, parfois parsemée de grains de quartz. Les nodules présentent une variété de cortex : brun (7,5YR 4/3), brun jaunâtre (10YR 5/6), rouge jaunâtre (5YR 5/6), jaune (10YR 7/6) et rouge (2,5YR 4/8). Leurs tailles sont centimétriques (50 – 60 %) à pluricentimétriques (40 – 50 %) et, leurs formes, arrondies à subarrondies (Tab. 14).

En zone de savane sèche, les sols (Fig. 26) sont généralement épais (~ 3 m) et de couleur rouge. Le niveau cuirassé observable est épais et présente parfois des blocs de cuirasse démantelés. Les graveleux latéritiques rencontrés ont une épaisseur comprise entre 0,30 et 1,90 m, alors que le niveau argileux meuble superficiel sus-jacent est moins épais (0,30 – 1,00 m).

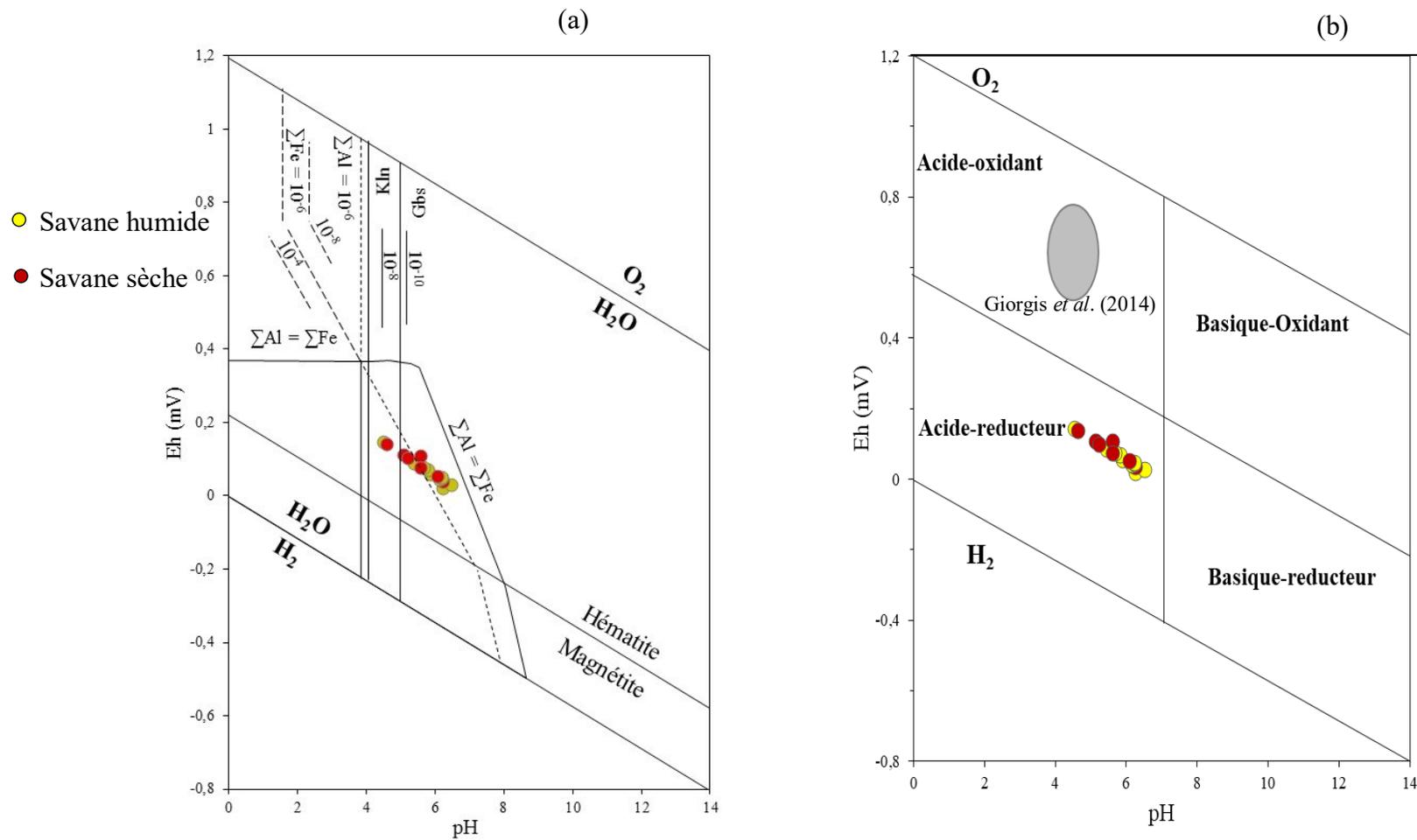


Figure 23. Position des graveleux latéritiques de la zone d'Obala - Mbandjock dans les diagrammes Eh - pH de conditions de formation des matériaux

(a) Position des graveleux latéritiques dans le diagramme Eh - pH montrant les relations de solubilité entre hématite, gibbsite et eau à  $T = 25^{\circ}\text{C}$  et  $P = 1 \text{ atm}$  (d'après Norton, 1973 in Giorgis *et al.*, 2014)

(b) Position des graveleux latéritiques dans le diagramme Eh - pH montrant les environnements dans les conditions atmosphériques (d'après Garrels et Christ, 1965 in Giorgis *et al.*, 2014)

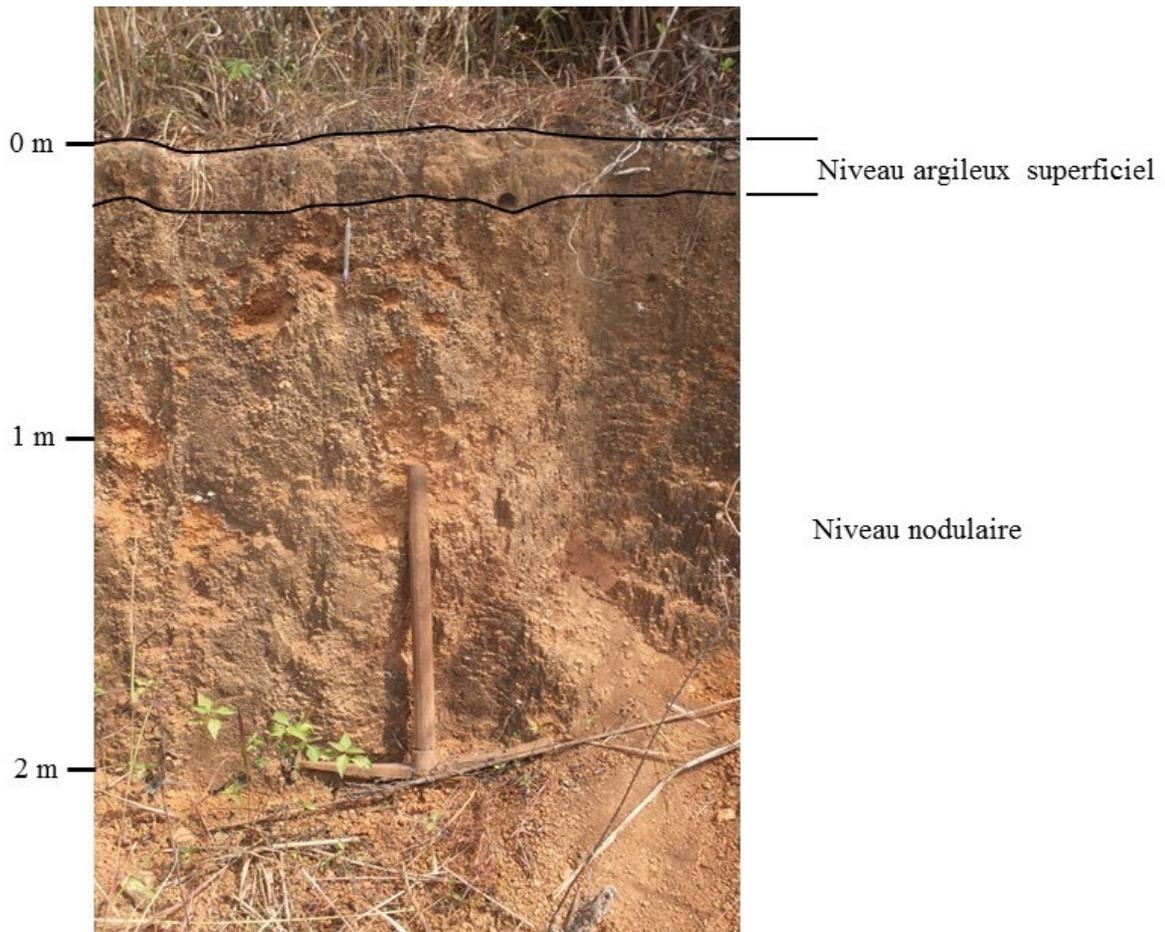


Figure 24. Disposition des sols en zone de savane humide, entre Obala et Ndjoré



Figure 25. Caractères macroscopiques des graveleux latéritiques de savane humide, entre Obala et Ndjoré

Tableau 14. Description pétrographique détaillée des graveleux latéritiques de savane humide, entre Obala et Ndjoré

	Localités	PK	Observations en laboratoire
Savane humide	Emana	1+475	Couleur d'ensemble jaune brunâtre (10YR 6/6) ou brun jaune (10YR 5/6), matrice argilo-sableuse formé de quartz et de nodules arrondis enrobés dans la matrice. Taches blanches (10YR 8/1) blocs de quartz altérés, nodules indurés à cortex noir (10YR 2/1)
	Minkama	9+800	Matériau à matrice argilo-sableuse brun foncé (7,5YR 5/8) nodules de formes arrondies millimétriques (50 %) à pluricentimétriques (50 %)
	Elomezok	13+825	Couleur d'ensemble brun jaunâtre (10YR 5/8), matrice argilo-sableuse nodules de formes arrondies à subarrondies, présence de quelques grains de quartz nodules millimétriques (60 – 70 %) et pluricentimétriques (30 – 40 %)
	Elon	17+450	Couleur d'ensemble brun jaunâtre (10YR 5/6), matrice argilo-sableuse nodules subarrondis et de formes irrégulières nodules millimétriques (60 – 70 %) et pluricentimétriques (30 – 40 %)
	Batchenga	24+050	Couleur d'ensemble jaune rougeâtre (7,5YR 6/8), matrice argilo sableuse nodules de formes arrondies à subarrondies, présence de quelques grains de quartz nodules millimétriques (60 – 70 %) et pluricentimétriques (30 – 40 %) matrice 50 – 60 % et nodules 40 – 50 % nodules de petites tailles à cortex rouge jaunâtre (5YR 5/6)
		24+675	Couleur d'ensemble jaune rougeâtre (7,5YR 6/8), matrice argilo sableuse nodules de forme irrégulière, nodules de couleur brune (2,5YR 4/8) tachetés de jaune (10YR 4/8) nodules plurimillimétriques à centimétriques matrice 50 – 60 % et nodules 40 – 50 % 50 % de tailles millimétriques et 50 % de tailles pluricentimétriques
	Olemb	25+700	Couleur d'ensemble brun foncé (7,5YR 5/8) nodules de formes arrondies à subarrondies de couleur noire (7,5YR 2,5/1), altérés nodules millimétriques (60 %) à pluricentimétriques (40 %) matrice argileuse 50 % et nodules 50 %
		27+300	Couleur d'ensemble brun foncé (7,5YR 5/8) nodules ferrugineux à cortex noir (7,5YR 2,5/1) nodules arrondis, matrice 40 – 50 %, nodules 50 – 60 % nodules millimétriques à centimétriques (70 – 75 %), nodules pluricentimétriques (25 – 30 %)
	Ndji	33+700	Couleur d'ensemble brun jaunâtre (10YR 5/6), matrice argilo-sableuse nodules millimétriques de forme irrégulière avec présence de grains de quartz matrice 30 – 40 % nodules 30 – 70 % nodules plurimillimétriques (85 – 90%) dégradés ou altérés
		34+400	Couleur d'ensemble brun foncé (7,5YR 5/8), matrice argilo-sableuse nodules de formes subarrondies à irrégulières, dégradés au cœur noir et à cortex brun (7,5YR 4/3) matrice 40 – 50 %, nodules 50 – 60 % nodules plurimillimétriques (50 %) et pluricentimétriques (50 %)
		36+850	Couleur d'ensemble jaune rougeâtre (7,5YR 6/8), matrice argilo-sableuse nodules à cortex brun (7,5YR 4/3), présence de grains de quartz nodules de formes arrondies à subarrondies matrice 50 % et nodules 50 % nodules plurimillimétriques 80 – 90 % de nodules pluricentimétriques (10 – 20 %)

PK : Point Kilométrique

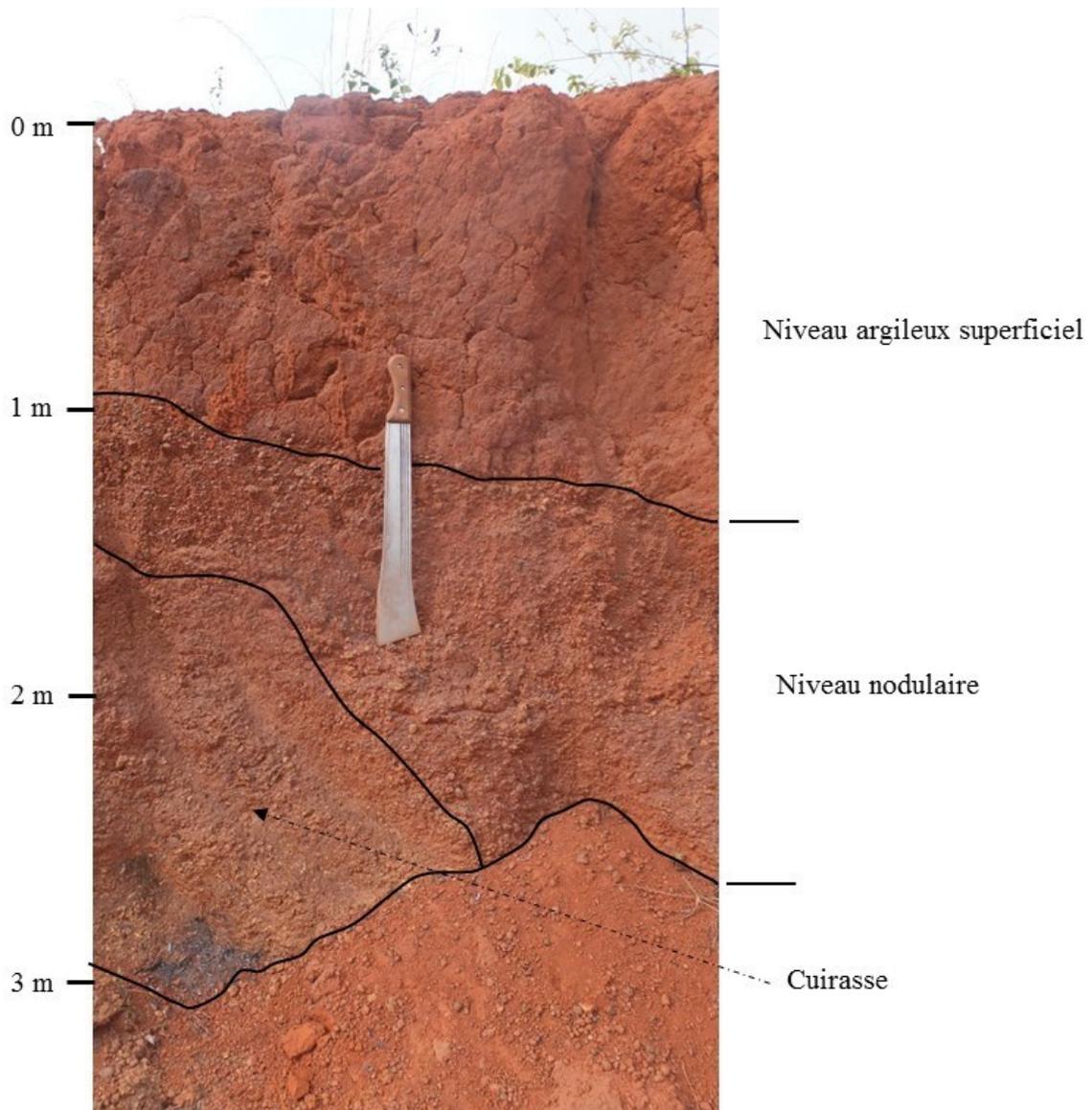


Figure 26. Disposition des sols en zone de savane sèche, entre Ndjoré et Mbandjock

Les graveleux latéritiques (Fig. 27) ont une couleur rouge (2,5YR 5/8). La matrice qui les enveloppe est argileuse et parfois parsemée de grains de quartz arrondis ou anguleux. Les nodules ferrugineux (~60 %), arrondis à subarrondis, sont indurés et, de couleur gris rougeâtre foncé (2,5YR 4/1) à jaune rougeâtre (7,5YR 6/8). Leurs tailles sont centimétriques (20 – 30 %) à pluricentimétriques (70 – 80 %) (Tab. 15).

### II.2.3. Minéralogie des graveleux latéritiques

L'exploitation des spectres de diffraction de rayons X (Fig. 28) montre que les graveleux en savane humide et en savane sèche sont composés de quartz, kaolinite, goethite, hématite, gibbsite et, parfois de muscovite et d'anatase.

Les résultats de l'analyse semi-quantitative des graveleux latéritiques par la méthode d'Yvon *et al.* (1990) qui utilise les proportions des éléments chimiques sont présentés dans le tableau 16. En zone de savane humide et en zone de savane sèche respectivement, on rencontre le quartz (38,9 et 22,0 %), la kaolinite (17,9 et 24,8 %), la goethite (7,5 et 14,6 %), l'hématite (13,5 et 18,9 %), la gibbsite (5,7 et 7,4 %), la muscovite (9,4 et 6,7 %) et, accessoirement l'anatase, en faibles quantités (1,7 et 1,1 %).

### II.2.4. Géochimie des graveleux latéritiques

Les résultats de l'analyse chimique des éléments majeurs (%) des graveleux latéritiques montrent les teneurs en SiO<sub>2</sub> sont de 51,19 % en moyenne en savane humide et, de 36,22 %, en moyenne savane sèche. Les teneurs Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, modérées, sont de 14,29 % en savane humide et de 18,04 % en savane sèche. Les teneurs moyennes en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont de 20,31 % et 31,41 % respectivement en savane humide et en savane sèche. Les valeurs de perte au feu (LOI) oscillent dans les deux zones entre 10,36 % et 11,55 %. MgO, MnO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ont des teneurs inférieures à 1 % mais, toutefois, plus élevées en savane humide. FeO et TiO<sub>2</sub>, et Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont présents en faibles teneurs dans ces graveleux latéritiques, mais possèdent des teneurs plus élevées en savane sèche. Les teneurs en NiO sont nulles dans les graveleux latéritiques étudiés (Tab. 17).

Le diagramme SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Fig. 29) montre globalement un regroupement des graveleux latéritiques par zone. Les graveleux latéritiques de savane humide sont en majorité silico - ferrugino - alumineux tandis que, ceux de savane sèche sont en général ferrugino - silico - alumineux.

Les graveleux latéritiques de savane sèche sont plus ferrugineux que ceux de savane humide ; ces matériaux de savane sèche possèdent des valeurs de LOI plus élevées (11,6 %)

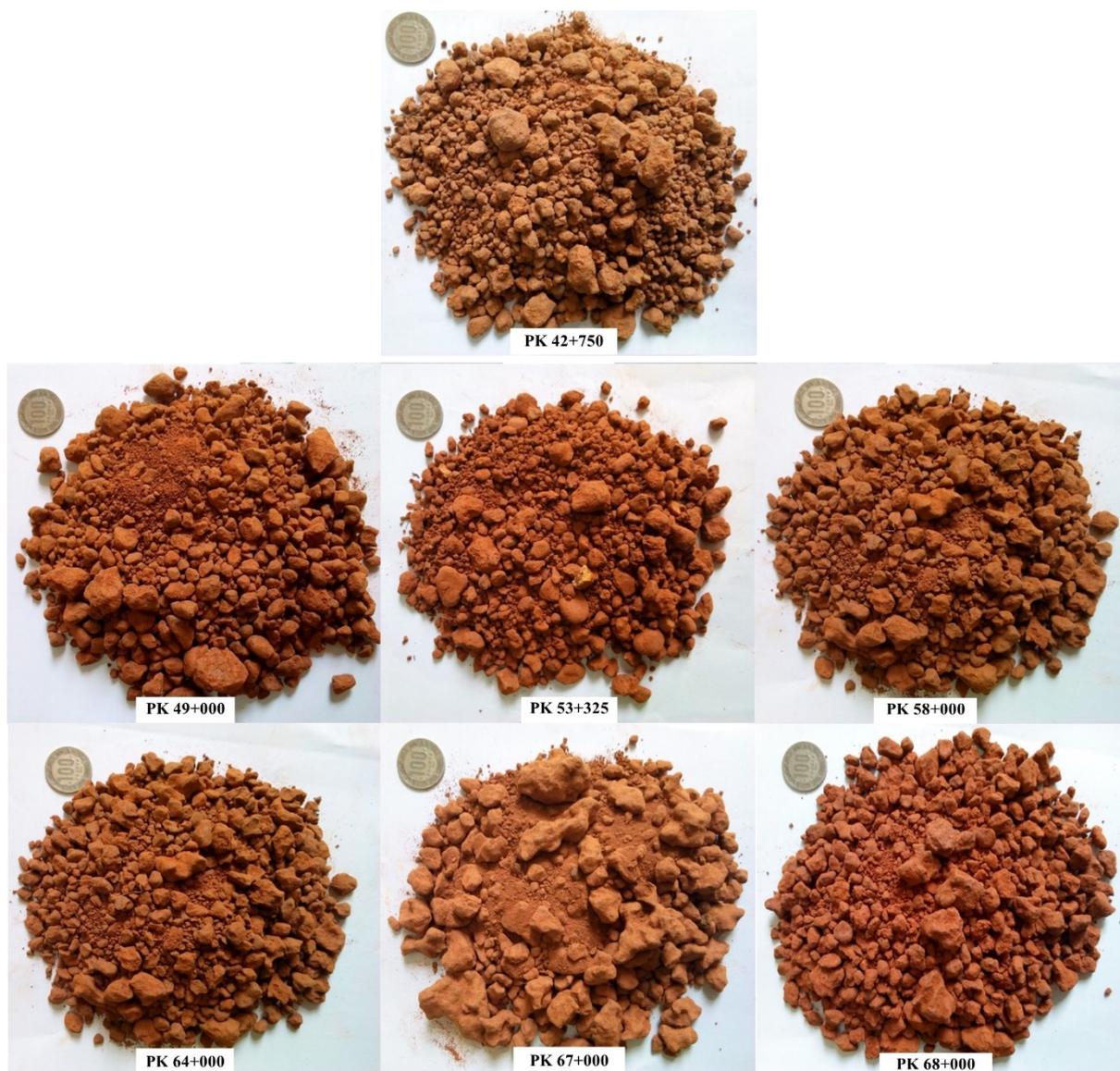
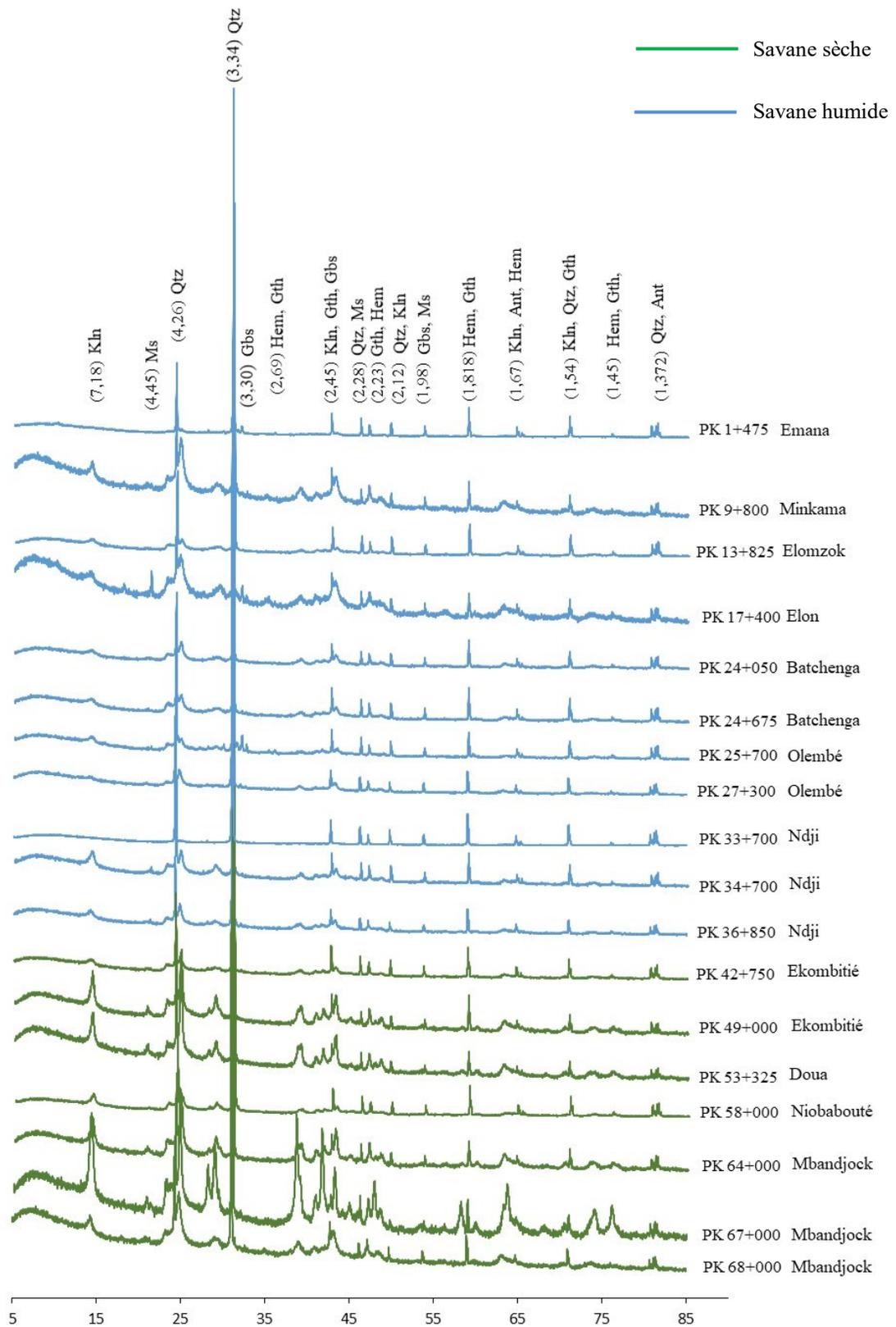


Figure 27. Caractères macroscopiques des graveleux latéritiques en zone de savane sèche, entre Ndjoré et Mbandjock

Tableau 15. Description pétrographique détaillée des graveleux latéritiques de savane sèche, entre Ndjoré et Mbandjock

	Localités	PK	Observations en laboratoire
Savane sèche	Ekombitié	42+750	Couleur d'ensemble brun foncé (7,5YR 5/8), matrice argilo-sableuse nodules ferrugineux arrondis à alvéolaires de couleur brun (7,5YR 4/3) matrice 40 – 50 %, nodules 50 – 60 % avec présence de grains de quartz anguleux et de forme irrégulière nodules plurimillimétriques (50 – 60 %) à pluricentimétriques (40 – 50%)
	Ekombitié	49+000	Couleur d'ensemble rouge (2,5YR 5/8) à gris rougeâtre (2,5YR 4/1), matrice argileuse rouge nodules indurés à cortex gris noir rougeâtre et nodules dégradés à cortex jaune rougeâtre (7,5YR 6/8) présence de stone-line et de grains de quartz anguleux matrice 40 – 50 % nodules 60 – 50 %, de formes arrondies à subarrondies nodules plurimillimétriques 40 – 50 %, nodules pluricentimétriques 50 – 60 %
	Doua	53+325	Couleur d'ensemble rouge (2,5YR 5/8) à gris rougeâtre (2,5YR 4/1), matrice argileuse rouge nodules ferrugineux indurés à cortex gris noir rougeâtre, présence de grains et petits blocs de quartz présence de stone-line et de grains de quartz anguleux et subanguleux matrice 40 – 50 %, nodules 50 – 60 %, de formes arrondies à subarrondies nodules plurimillimétriques 40 – 50 % nodules pluricentimétriques 50 – 60 %
	Niobabouté	58+000	Couleur d'ensemble rouge (2,5YR 5/8) à gris rougeâtre (2,5YR 4/1), matrice argileuse rouge nodules ferrugineux indurés à cortex noir gris rougeâtre et dégradés à cortex jaune rougeâtre (7,5YR 6/8) présence de blocs et grains de quartz altérés, arrondies à subarrondies matrice 40 – 50 %, nodules 50 – 60 %, de formes arrondies à subarrondies et irrégulières nodules plurimillimétriques 30 – 40 % nodules pluricentimétriques 60 – 70 %
	Mbandjock	64+000	Couleur d'ensemble rouge jaunâtre (5YR 5/8) à gris sombre (5YR 3/1), matrice argileuse rouge jaunâtre nodules ferrugineux indurés à cortex gris sombre de formes variées matrice 30 – 40 %, nodules 60 – 70 %, de forme arrondie à subarrondie et irrégulière nodules plurimillimétriques 20 – 30 % nodules pluricentimétriques 70 – 80 %
		67+000	Couleur d'ensemble rouge (2,5YR 4/8) matrice argileuse rouge nodules majoritairement centimétriques à pluricentimétriques nodules 80 – 90%, matrice 10 – 20 % nodules plurimillimétriques 20 – 30% nodules pluricentimétriques 70 – 80 %
		68+000	Couleur d'ensemble rougeâtre (2,5YR 5/8), matrice argileuse nodules ferrugineux indurés à cortex noir rougeâtre (2,5YR 2,5/1) ou noir gris rougeâtre (2,5YR 4/1) nodules plurimillimétriques 10 – 20 %, nodules pluricentimétriques 80 – 90 % nodules 80 – 90 %, matrice 10 – 20 % nodules de formes arrondies à subarrondies

PK : Point Kilométrique



Qtz : quartz, Kln : kaolinite, Gbs : gibbsite, Ms: muscovite, Hem: hematite, Gth: goethite, Ant: anatase.  
 Abréviations selon Whitney et Evans (2010).

Figure 28. Diffractogrammes de rayons X des graveleux latéritiques de savane humide et de savane sèche

Tableau 16. Estimation semi-quantitative (%) du cortège minéralogique des graveleux latéritiques (fraction totale) étudiés (d'après la méthode d'Yvon *et al.*, 1990)

	Localités	Carrière	Quartz	Kaolinite	Goethite	Hématite	Gibbsite	Muscovite	Anatase	Balance
Savane humide	Emana	PK 1+475	61,0	8,2	3,1	5,6	4,0	12,6		5,5
	Minkama	PK 9+800	13,5	15,6	13,4	24,1	5,5	19,2	1,8	6,8
	Elomezok	PK 13+825	48,5	20,8	5,6	10,0	7,4		1,0	6,7
	Elon	PK 17+450	17,0	14,0	11,7	21,1	4,2	21,5	2,4	8,1
	Batchenga	PK 24+050	37,4	24,8	8,5	15,3	7,5		traces	6,5
	Batchenga	PK 24+675	40,0	27,1	6,6	11,9	8,2		traces	6,2
	Olembé	PK 25+700	38,7	14,1	4,9	8,9	4,3	21,8	traces	7,3
	Olembé	PK 27+300	34,8	10,7	9,8	17,5	3,2	16,5	traces	7,6
	Ndji	PK 33+700	70,0	4,4	2,5	4,4	1,5	12,0	traces	5,2
	Ndji	PK 34+400	33,8	30,5	7,4	13,2	9,2		traces	5,9
	Ndji	PK 36+850	32,7	26,6	9,3	16,9	8,0		traces	6,6
	<b>Moyenne</b>	<b>38,9</b>	<b>17,9</b>	<b>7,5</b>	<b>13,5</b>	<b>5,7</b>	<b>9,4</b>	<b>1,7</b>	<b>6,6</b>	
Savane sèche	Ekombitié	PK 42+750	34,6	13,9	6,9	12,5	4,2	21,5	traces	6,4
	Ekombitié	PK 49+000	17,8	16,5	11,4	20,6	5,0	25,5	traces	3,2
	Doua	PK 53+325	15,8	27,6	20,0	27,0	8,3		traces	1,3
	Niobabouté	PK 58+000	45,9	26,1	5,3	9,6	8,0		1,1	4,0
	Mbandjock	PK 64+000	16,5	32,9	12,1	21,8	10,0		1,1	5,6
	Mbandjock	PK 67+000	13,1	27,6	30,8	13,0	6,4	-	traces	9,1
	Mbandjock	PK 68+000	10,1	29,0	15,5	27,8	10,0		traces	7,7
		<b>Moyenne</b>	<b>22,0</b>	<b>24,8</b>	<b>14,6</b>	<b>18,9</b>	<b>7,4</b>	<b>6,7</b>	<b>1,1</b>	<b>5,3</b>

PK : Point Kilométrique

Tableau 17. Données d'analyses géochimiques (%) de la fraction totale des graveleux latéritiques dans la zone d'Obala - Mbandjock

Localités	Oxydes	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI	MgO	MnO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	
	<i>Limite de détection</i>	0,04	0,02	0,05	0,01	0,002	0,006	0,02	0,01	0,010	0,06	0,010	0,002	0,002	0,001	
Nkolmekok	gneiss	55,76	16,46	1,31	3,90	0,12	6,83	4,08	1,63	2,35	5,05	0,96	0,29	0,00	0,00	
Savane humide	Emana	PK 1+475D	70,48	9,68	5,94	0,70	0,077	0,129	0,20	1,68	8,43	0,31	0,80	0,083	0,02	0,00
	Minkama	PK 9+800	27,75	17,31	14,18	0,14	0,139	0,077	0,09	0,14	36,19	0,13	1,8	1,458	0,14	0,00
	Elomezok	PK 13+825	58,14	14,51	9,51	0,20	0,251	0,108	0,07	0,34	15,07	0,11	1,02	0,108	0,05	0,00
	Elon	PK 17+450	27,84	16,48	14,99	0,57	0,724	0,183	0,14	0,80	31,67	0,11	2,35	2,459	0,06	0,00
	Batchenga	PK 24+050	48,93	14,71	11,11	0,11	0,439	0,039	0,07	0,11	22,91	0,17	0,91	0,107	0,04	0,00
	Batchenga	PK 24+675	52,43	16,06	10,97	0,18	0,046	0,087	0,14	0,32	17,92	0,38	0,87	0,073	0,01	0,00
	Olembé	PK 25+700	55,14	16,7	10,12	0,20	0,139	0,089	0,26	1,38	13,30	0,11	0,88	0,097	0,02	0,00
	Olembé	PK 27+300	47,24	12,63	10,66	0,20	0,338	0,108	0,16	0,34	26,28	0,17	0,91	0,143	0,03	0,00
	Ndji	PK 33+700	82,07	5,23	3,97	0,24	0,048	0,078	0,11	0,40	6,42	0,09	0,39	0,042	0,03	0,00
	Ndji	PK 34+400	48,02	18,1	11,44	0,10	0,404	0,018	0,09	0,19	19,85	0,13	0,83	0,101	0,03	0,00
	Ndji	PK 36+850	45,04	15,73	11,06	0,11	0,203	0,046	0,11	0,20	25,32	0,17	0,92	0,180	0,06	0,00
		Minimum	27,75	5,23	3,97	0,10	0,05	0,02	0,07	0,11	6,42	0,09	0,39	0,04	0,01	0,00
		Maximum	82,07	18,10	14,99	0,70	0,72	0,18	0,26	1,68	36,19	0,38	2,35	2,46	0,14	0,00
		<b>Moyenne</b>	<b>51,19</b>	<b>14,29</b>	<b>10,36</b>	<b>0,25</b>	<b>0,26</b>	<b>0,09</b>	<b>0,13</b>	<b>0,54</b>	<b>20,31</b>	<b>0,17</b>	<b>1,06</b>	<b>0,44</b>	<b>0,04</b>	<b>0,00</b>
	CV	31,22	26,73	30,51	79,12	81,30	52,14	44,60	98,72	45,81	53,65	50,85	177,72	79,92	0,00	
Savane sèche	Ekombitié	PK 42+750	50,79	16,48	10,89	0,15	0,200	0,027	0,10	0,32	18,72	0,17	0,97	0,108	0,03	0,00
	Ekombitié	PK 49+000	35,19	19,55	11,95	0,05	0,028	0,0058	0,06	0,04	30,85	0,23	0,95	0,246	0,07	0,00
	Doua	PK 53+325	28,62	16,35	11,57	0,04	0,041	0,0058	0,05	0,04	40,33	0,38	0,83	0,311	0,09	0,00
	Niobabouté	PK 58+000	57,95	15,45	8,85	0,07	0,035	0,027	0,08	0,06	14,37	0,47	1,14	0,118	0,08	0,00
	Mbandjock	PK 64+000	31,78	19,48	13,02	0,06	0,033	0,012	0,05	0,05	32,65	0,18	1,09	0,556	0,07	0,00
	Mbandjock	PK 67+000	25,99	19,27	11,56	0,04	0,014	0,022	0,06	0,07	41,30	0,17	1,04	0,229	0,07	0,00
	Mbandjock	PK 68+000	23,22	19,7	13,03	0,04	0,024	0,026	0,06	0,05	41,65	0,17	0,9	0,524	0,09	0,00
		Minimum	23,22	15,45	8,85	0,04	0,01	0,01	0,05	0,04	14,37	0,17	0,83	0,11	0,03	0,00
		Maximum	57,95	19,70	13,03	0,15	0,20	0,03	0,10	0,32	41,65	0,47	1,14	0,56	0,09	0,00
		<b>Moyenne</b>	<b>36,22</b>	<b>18,04</b>	<b>11,55</b>	<b>0,06</b>	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>	<b>0,07</b>	<b>0,09</b>	<b>31,41</b>	<b>0,25</b>	<b>0,99</b>	<b>0,30</b>	<b>0,07</b>	<b>0,00</b>
	CV	36,29	10,28	12,36	61,48	121,60	54,59	27,58	113,31	35,25	48,37	10,98	60,13	28,50	0,00	

PK : Point Kilométrique ; CV : Coefficient de Variation

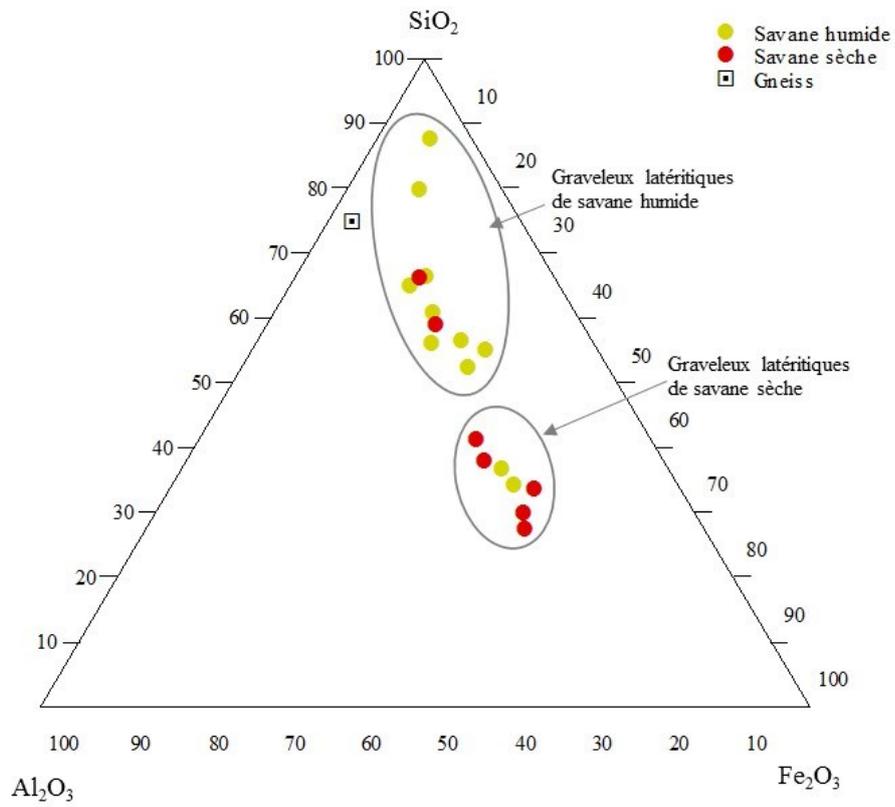


Figure 29. Position des graveaux latéritiques dans le diagramme géochimique  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$

que ceux de savane humide (10,4 %). En effet, les matériaux ferrugineux ont des valeurs de LOI élevées (Bohi, 2008). Ce phénomène est généralement rencontré dans les matériaux développés sur roches felsiques alors que les roches mafiques (Fig. 30) produisent des matériaux ferrugino-alumino-siliceux. Cependant, les graveleux latéritiques développés sur migmatites à l'Est du Cameroun sont soit siliceux, soit ferriques (Nzabakurikiza *et al.*, 2012). L'hématite et la goethite sont présentes en raison des teneurs élevées en  $Fe_2O_3$ . Les teneurs en goethite sont liées aux proportions élevées en LOI. Les teneurs en kaolinite reflètent celles en  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  et LOI. La présence de la gibbsite indique que les matériaux étudiés se localisent dans un milieu aéré et sont sujets à une forte hydrolyse dans cette zone à forte pluviométrie (1400 mm/an).

Les teneurs en  $SiO_2$ ,  $MnO$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $FeO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $TiO_2$  et  $P_2O_5$ , sont plus élevées en savane humide qu'en savane sèche, alors que celles en  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  et LOI sont plus importantes en savane sèche, à cause de la position topographique.

Les valeurs des indices d'altération étudiés sont consignées dans le tableau 18. Une valeur CIA de 100 % dans les matériaux d'altération indique une disparition complète des éléments mobiles et, la présence de kaolinite et de gibbsite (Nesbitt et Young, 1982). Les graveleux latéritiques étudiés présentent des valeurs de CIA proches de 100 % (Tab. 18). Cependant, ceux de savane sèche présentent en moyenne des valeurs de CIA plus élevées (99,7 %) ; ce qui suggère l'abondance de kaolinite et de gibbsite dans les matériaux, par rapport à ceux de savane humide (95,4 %). Ce fait corrobore les données de l'analyse minéralogique semi-quantitative.

Les valeurs croissantes de  $MIA_{(O)}$  représentent des roches progressivement plus altérées, comme pour CIA. Une valeur de 100 % indique une disparition complète des éléments mobiles (Babechuk *et al.*, 2014). Les valeurs de  $MIA_{(O)}$  des graveleux latéritiques dans la zone Obala - Mbandjock (Tab. 18) sont toutes proches de 100 %, la valeur moyenne en savane sèche (99,7 %) est supérieure à celle en savane humide (95,5 %) ; ce qui corrobore les données de CIA et celles de l'analyse minéralogique.

Les valeurs élevées de IOL (Tab. 18) correspondent aux matériaux les plus intensivement altérés (Babechuk *et al.*, 2014). Les valeurs moyennes de ce paramètre sont plus élevées en savane sèche (59,4 %) qu'en savane humide (40,1 %).

Ces résultats d'analyses chimiques ont également permis la détermination des paramètres normatifs altérologiques (Tab. 19). Les paramètres déterminés sont l'indice relatif de lixiviation potentielle (IRLP), le degré virtuel relatif d'altération de la roche (DVRAR), l'indice relatif d'induration potentielle (IRIP) et l'indice relatif de confinement potentiel (IRCP). Les valeurs de DVRAR (A) varient entre 11,53 et 58,87 %, soit une moyenne de 34,82 % en savane humide, alors qu'en savane sèche, elles oscillent entre 31,20 et 74,37 % pour 52,57 % de moyenne. En savane humide, les valeurs de IRLP (L) varient entre 60,95 et 96,38 %, soit une moyenne de 86,04 %,

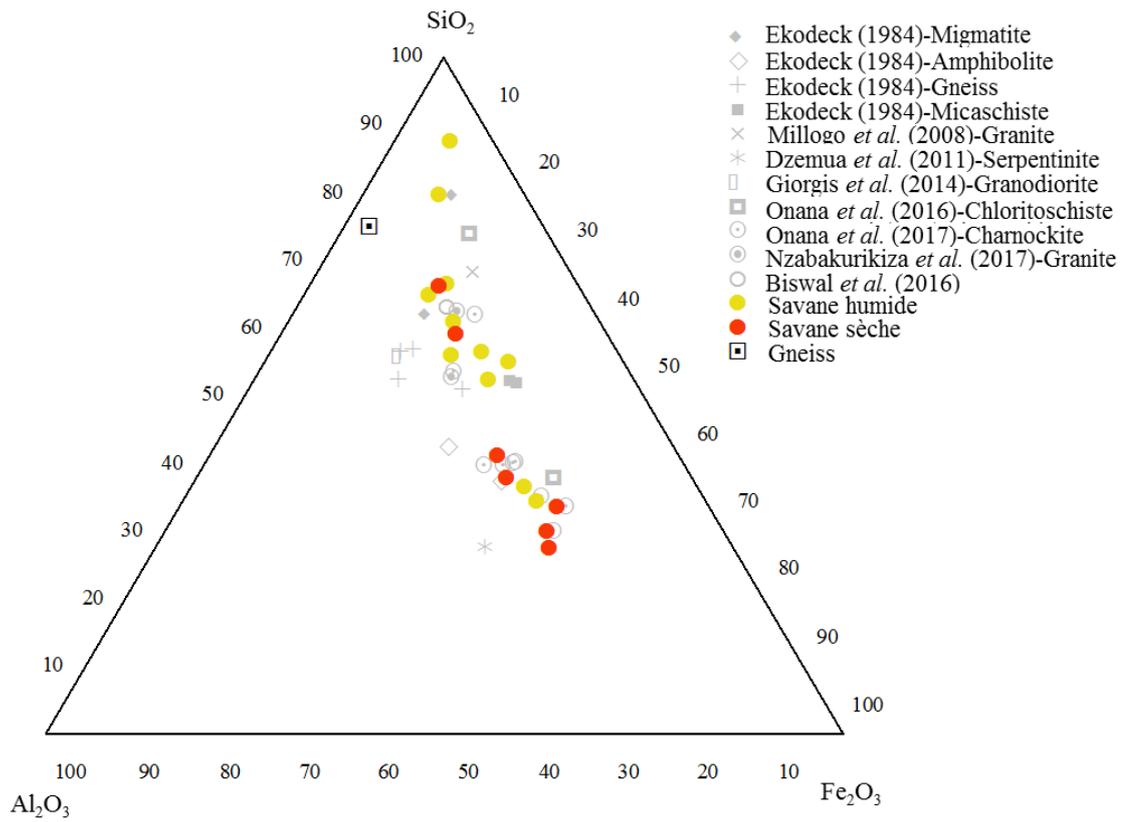


Figure 30. Position comparée des graveleux latéritiques dans le diagramme géochimique  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$

Tableau 18. Valeurs des indices géochimiques dans les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock

	Localités		CIA (%)	MIA <sub>(o)</sub> (%)	IOL (%)	
Roche	Nkolmekok	Gneiss	44,9	37,4	25,2	
Savane humide	Emana	PK 1+475 D	81,6	79,4	20,8	
	Minkama	PK 9+800 D	100,0	100,0	54,0	
	Elomezok	PK 13+825 D	97,2	97,4	44,3	
	Elon	PK 17+450 D	100,0	100,0	58,7	
	Batchenga	PK 24+050 G	99,7	98,8	40,1	
	Batchenga	PK 24+675 D	96,6	96,1	36,2	
	Olembé	PK 25+700 D	90,0	93,4	43,9	
	Olembé	PK 27+300 D	96,3	94,4	28,9	
	Ndji	PK 33+700 D	88,9	93,4	23,5	
	Ndji	PK 34+400 D	99,2	98,9	47,6	
	Ndji	PK 36+850 D	99,7	98,8	43,5	
		Minimum		81,6	79,4	20,8
		Moyenne		<b>95,4</b>	<b>95,5</b>	<b>40,1</b>
	Maximum		100,0	100,0	58,7	
Savane sèche	Ekombitié	PK 42+750 D	98,2	98,2	48,3	
	Ekombitié	PK 49+000 D	100,0	100,0	63,1	
	Doua	PK 53+325 D	100,0	100,0	52,1	
	Niobabouté	PK 58+000 D	100,0	99,6	45,6	
	Mbandjock	PK 64+000 D	100,0	100,0	65,7	
	Mbandjock	PK 67+000 G	100,0	100,0	70,2	
	Mbandjock	PK 68+000 G	100,0	100,0	70,7	
		Minimum		98,2	98,2	45,6
		Moyenne		<b>99,7</b>	<b>99,7</b>	<b>59,4</b>
	Maximum		100,0	100,0	70,2	

PK : Point Kilométrique ; D : côté droit ; G : côté gauche

CIA =  $100 \times [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)]$ , Nesbitt et Young (1982) ;

MIA =  $100 \times [Al_2O_3 + Fe_2O_{3(T)} / (Al_2O_3 + Fe_2O_{3(T)} + MgO + CaO^* + Na_2O + K_2O)]$ , Babechuk *et al.* (2014) ;

IOL =  $100 \times [Al_2O_3 + Fe_2O_{3(T)} / (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_{3(T)})]$ , Babechuk *et al.* (2014).

Tableau 19. Valeurs des paramètres normatifs altérologiques des graveleux latéritiques dans la zone d'Obala - Mbandjock

	Localités		DVRAR (A)	IRLP (L)	IRIP (I)	IRCP (C)	
	Nkolmekok	Gneiss	5,72	6,67	0,14	100,00	
<b>Savane humide</b>	Emana	PK 1+475	22,04	60,95	15,67	74,45	
	Minkama	PK 9+800	52,04	95,41	66,71	5,75	
	Elomezok	PK 13+825	28,97	91,05	37,36	16,86	
	Elon	PK 17+450	58,87	81,49	57,81	30,31	
	Batchenga	PK 24+050	33,89	96,38	48,01	6,47	
	Batchenga	PK 24+675	34,21	92,72	43,03	13,76	
	Olembé	PK 25+700	35,53	77,55	33,38	44,09	
	Olembé	PK 27+300	33,90	88,14	47,04	22,59	
	Ndji	PK 33+700	11,53	75,13	12,95	47,14	
	Ndji	PK 34+400	36,98	93,40	47,67	7,39	
	Ndji	PK 36+850	35,03	94,26	51,62	10,76	
			Minimum	11,53	60,95	12,95	5,75
			Maximum	58,87	96,38	66,71	74,45
			Moyenne	<b>34,82</b>	<b>86,04</b>	<b>41,93</b>	<b>25,42</b>
		CV	36,58	12,90	39,05	85,76	
<b>Savane sèche</b>	Ekombitié	PK 42+750	34,23	92,98	45,20	13,37	
	Ekombitié	PK 49+000	53,48	82,59	48,20	1,29	
	Doua	PK 53+325	54,34	82,04	56,52	1,54	
	Niobabouté	Pk 58+000	31,20	87,34	32,45	4,91	
	Mbandjock	PK 64+000	51,65	88,75	58,65	3,99	
	Mbandjock	PK 67+000	68,71	74,80	47,46	2,75	
	Mbandjock	PK 68+000	74,37	74,37	46,96	2,58	
			Minimum	31,20	74,37	32,45	1,29
			Maximum	<b>74,37</b>	<b>88,75</b>	<b>58,65</b>	<b>4,91</b>
			Moyenne	52,57	83,26	47,92	4,34
		CV	30,41	8,40	17,81	96,12	

PK : Point Kilométrique

CV : Coefficient de Variation

tandis qu'en savane sèche, elles varient entre 74,37 et 88,75 %, soit une moyenne de 83,26 %. Les valeurs de IRIP (I) oscillent entre 12,95 et 66,71 % pour 41,93 % de moyenne en zone humide, alors qu'en zone sèche, elles varient entre 32,45 et 58,65 %, soit une moyenne de 47,92 %. Dans les graveleux latéritiques de la zone de savane humide, les valeurs de IRCP (C) varient entre 5,75 et 74,45 %, soit une moyenne de 25,42 %, tandis qu'en zone de savane sèche, ces valeurs oscillent entre 1,29 et 4,91 %, soit 4,34 % de valeur moyenne.

### **II.3. Synthèse des données macromorphologiques et pétrologiques**

Les graveleux latéritiques de la zone de savane humide (Obala - Ndjoré) ont une matrice couleur jaune brunâtre. Ils sont constitués de nodules centimétriques associés aux grains de quartz. Ceux de savane sèche (Ndjoré - Mbandjock) sont rouge sombre, à matrice argileuse et nodules pluricentimétriques. Cette morphologie est souvent observée en zone équatoriale (Gidigas, 1983 ; Ekodeck, 1984 ; Ndjigui *et al.*, 2008 ; Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Onana *et al.*, 2015). Le cortège minéralogique des graveleux latéritiques dans la zone d'Obala - Mbandjock, en savane humide comme en savane sèche, comprend le quartz, la kaolinite, la goethite, l'hématite, la gibbsite et, accessoirement la muscovite et l'anatase. Ce cortège minéralogique est caractéristique des sols ferrallitiques (Ndjigui *et al.*, 1998, 2008 ; Nguetnkam *et al.*, 2006 ; Kamgang Kabeyene *et al.*, 2012). En zones de savane humide et de savane sèche, respectivement, la proportion des minéraux par ordre d'abondance déterminée par la méthode d'Yvon *et al.*, (1990) est la suivante : quartz (38,9 – 22,0 %), kaolinite (17,9 – 24,8 %), hématite (13,5 – 18,9 %), goethite (7,5 – 14,6 %), muscovite (9,4 – 6,7 %), gibbsite (5,7 – 7,4 %) et anatase (1,7 – 1,1 %).

Le quartz et la muscovite présentent des teneurs plus élevées en savane humide qu'en savane sèche, par contre kaolinite, goethite, hématite, et anatase sont plus abondants en savane sèche. La proportion de gibbsite est presque égales dans les deux zones. Les graveleux de la zone sèche sont donc plus altérés.

## **III. CARACTERISATION GEOTECHNIQUE DES MATERIAUX**

### **III.1. Caractérisation géotechnique des gneiss**

#### **III.1.1. Caractéristiques physiques**

##### **III.1.1.1. Granularité**

Les figures 31, 32 et 33 représentent les courbes granulométriques des fractions 0/4, 4/6,3 et 6,3/10, respectivement. Les valeurs de coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) pour les fractions granulométriques 4/6,3, 6,3/10 et 0/31,5 sont respectivement de 1,4 – 1,3 et 52,5. Les valeurs

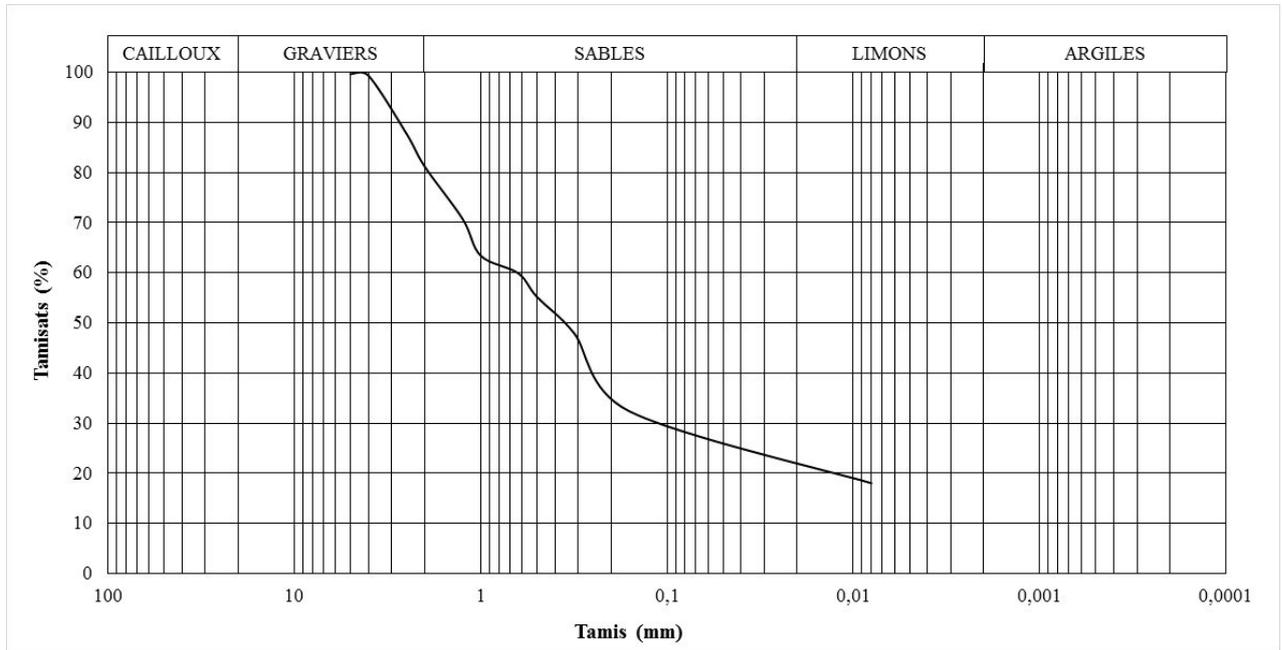


Figure 31. Courbe granulométrique de la fraction 0/4 des gneiss dans la zone d'Obala - Mbandjock

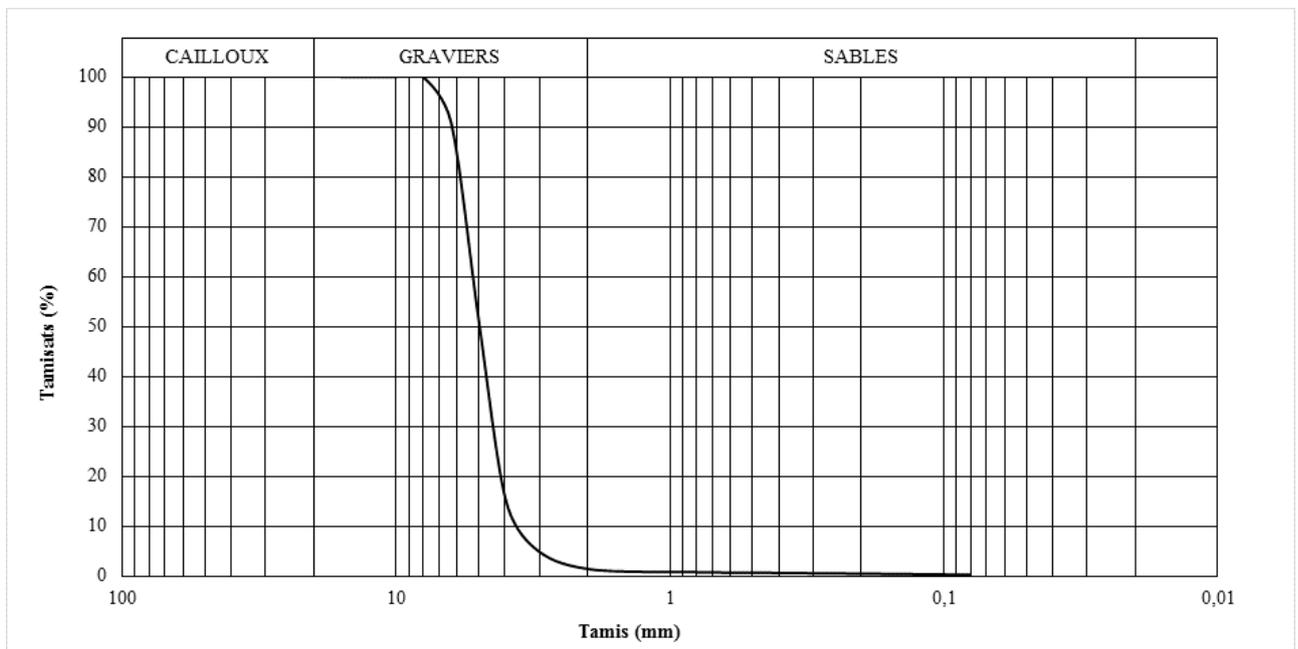


Figure 32. Courbe granulométrique de la fraction 4/6,3 des gneiss dans la zone d'Obala - Mbandjock

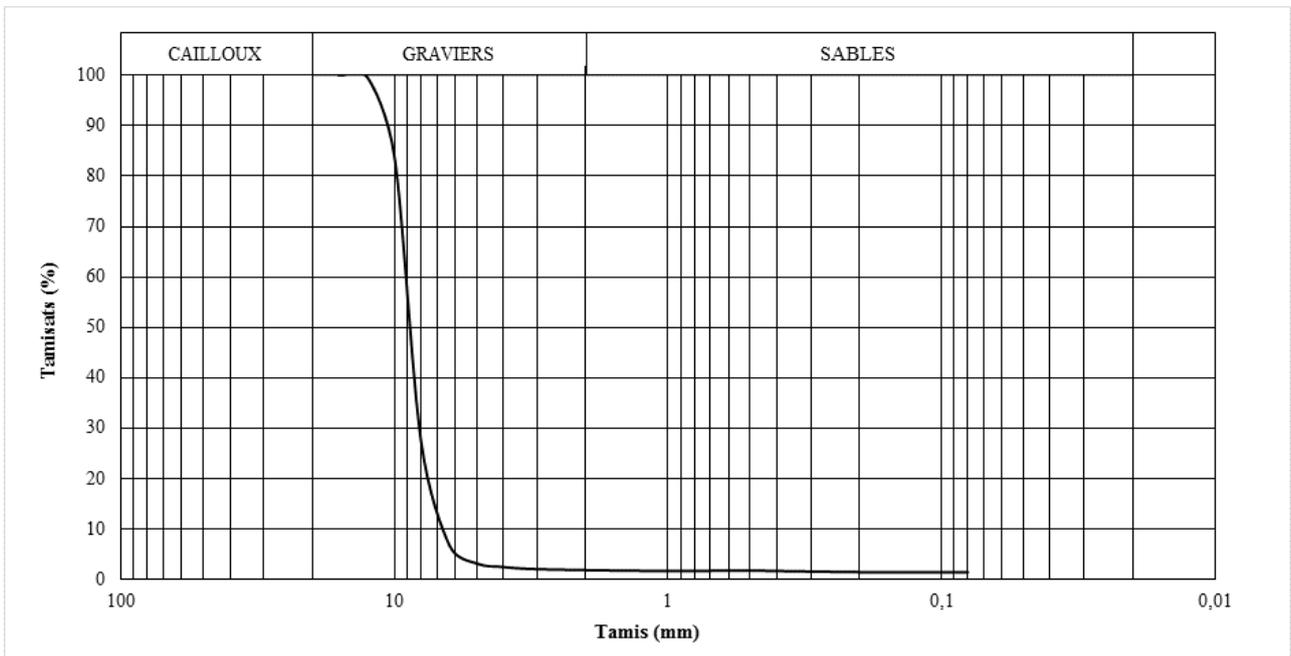


Figure 33. Courbe granulométrique de la fraction 6,3/10 des gneiss dans la zone d'Obala - Mbandjock

de coefficient de courbure ( $C_c$ ) sont de 1 – 1 et 4, pour les mêmes fractions, respectivement.

### **III.1.1.2. Coefficient d'aplatissement**

Les valeurs du coefficient d'aplatissement CA sont comprises entre 13,8 % et 24,3 %. La moyenne pour chaque classe est :  $CA_{4/6,3} = 24,1$  % ;  $CA_{6,3/10} = 18,8$  % ;  $CA_{0/31,5} = 14,8$  %.

### **III.1.1.3. Propreté des granulats**

Les valeurs moyennes de l'équivalent de sable visuel (ESV), de l'équivalent de sable au piston (ESP) et, celle de la moyenne des 02 valeurs (ESM) sont consignées dans le tableau 20. En fonction de la fraction granulaire, les valeurs de ESV varient entre 51 % et 63 %, celles de ESP oscillent entre 47,2 % et 57,0 %, et, celles de ESM, entre 50 % et 60 %. Les données détaillées des résultats figurent en annexe II.

## **III.1.2. Caractéristiques intrinsèques**

### **III.1.2.1. Masse volumique des grains solides**

Les différentes classes granulométriques présentent des valeurs de masse volumique des grains solides comprises entre 2,78 et 2,87 g/cm<sup>3</sup> (Tab. 20). Les données détaillées des résultats figurent en annexe II.

### **III.1.2.2. Résistance à l'usure : données Micro Deval (MDE) et de friabilité des sables (FS)**

Les valeurs du coefficient Micro Deval par voie sèche sont comprises entre 10 % et 24 % (Tab. 20). Celles du coefficient Micro Deval par voie humide oscillent entre 11 % et 24 % (Tab. 20).

La valeur moyenne du coefficient de friabilité (FS) pour la fraction granulaire 0/4 est de 40 %. Les données détaillées des résultats figurent en annexe II.

### **III.1.2.3. Résistance aux chocs : données Los Angeles (LA)**

Les valeurs du coefficient Los Angeles des gneiss étudiés sont comprises entre 25 % et 32 % (Tab. 20). Les valeurs moyennes de LA sont :  $LA_{4/6,3} = 32$  % ;  $LA_{6,3/10} = 27$  % ;  $LA_{0/31,5} = 26$  %. Les données détaillées des résultats figurent en annexe II.

### **III.1.2.4. Caractéristiques de compactage et de portance**

Les résultats de l'essai de compactage et les courbes obtenues sont consignés en annexe 1. La valeur moyenne de densité sèche maximale est de 2,41. La valeur moyenne de teneur en eau optimale est de 5,8 %.

Tableau 20. Données des paramètres géotechniques des gneiss dans la zone d'Obala -  
Mbandjock

Fraction granulométrique (mm)	ESV (%)	ESP (%)	ESM (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	MDE/FS (%)	LA (%)
0/4	63,0	57,0	60,0	2,78	40	-
4/6,3	51,6	48,9	50,3	2,87	23	32
6,3/10	63,0	57,0	60,0	2,86	18	27
0/31,5	54,1	47,2	51,0	2,87	11	26

ESV : équivalent de sable visuel ; ESP : équivalent de sable au piston ; ESM : équivalent de sable moyen ;  $\rho_s$  : masse volumique des grains solides ; MDE : coefficient Micro Deval ; D : coefficient Deval ; LA : coefficient Los Angeles

La valeur moyenne de CBR à 95 % de l'optimum Proctor modifié (OPM) est égale à 102 %. Les courbes CBR et effort - déformation figurent en annexe II.

### **III.2. Caractérisation géotechnique des graveleux latéritiques**

Seules les valeurs moyennes des paramètres géotechniques déterminées à partir de 321 échantillons (Tabs. 21 et 22). Les résultats détaillés par carrière sont consignés en annexe III.

#### **III.2.1. Masse volumique des grains solides**

Les valeurs de masse volumique des grains solides ( $\rho_s$ ) des graveleux latéritiques de savane humide varient entre 2,36 et 2,95 g/cm<sup>3</sup>, soit une moyenne de 2,63 g/cm<sup>3</sup> (Tab. 21 et 22). En savane sèche, ces valeurs oscillent entre 2,48 et 3,00 g/cm<sup>3</sup>, soit une moyenne de 2,80 g/cm<sup>3</sup>.

#### **III.2.2. Granularité**

Les caractéristiques granulométriques des graveleux latéritiques sont des facteurs importants non seulement pour leur classification, mais aussi pour leur aptitude au compactage. Les fractions les plus importantes permettant de caractériser la granularité des graveleux latéritiques sont le squelette (< 2 mm), le mortier (< 0,425 mm), les fines (< 75  $\mu$ m) et les argiles (< 2  $\mu$ m).

En zone de savane humide, les teneurs en squelette varient entre 24,4 % et 95,5 %, celles en mortier entre 15,6 % et 72,7 % et, celles en fines, entre 14,0 % et 60,3 %, pour une valeur moyenne de 27,2 % (Tab. 21).

En zone de savane sèche, la teneur en squelette des graveleux latéritiques varie entre 21,1 % et 49,0 % et, celle en mortier, entre 16,9 % et 33,2 %. Le pourcentage des fines est compris entre 12,4 % et 27,3 %, pour une moyenne de 20,8 % (Tab. 21 et 22).

#### **III.2.3. Caractéristiques de plasticité**

Les valeurs de limite de liquidité LL en zone de savane humide varient entre 24 % et 88 %, soit une moyenne de 51 % (Tabs. 20 et 21). Les valeurs correspondantes d'indice de plasticité IP sont comprises entre 9 % et 48 %, pour une moyenne de 23 % (Tab. 21 et 22).

En savane sèche, les valeurs de LL des graveleux latéritiques sont comprises entre 32 % et 54 %, soit une moyenne de 48 % (Tab. 20 et 21). Celles de IP varient entre 12 % et 26 %, soit 19 % de moyenne.

Tableau 21. Valeurs moyennes des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques dans la zone d'Obala - Mbandjock

Localisation	N	$\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	< 2 mm (Squelette) %	< 425 $\mu$ m (Mortier) %	< 75 $\mu$ m (Fines) %	Sable %	Gravier %	LL (%)	IP (%)	Gm	Pm	Pp	$\epsilon_s$	TEO (%)	DSM	CBR (%)	Classification	
																	AASHTO	USCS
PK	Savane humide (N = 199)																	
1+475	17	2,670	53,9	35,6	27,1	27,7	45,5	52	22	2,029	764	605	0,011	14,0	1,925	46	A-2-7 (0)	GM
9+800	17	2,708	44,5	28,5	24,1	21,2	54,9	44	20	1,940	585	487	0,010	13,0	1,974	41	A-2-7 (0)	GC
13+825	18	2,673	55,8	34,7	26,8	29,9	45,9	45	20	1,827	734	560	0,010	11,6	2,021	45	A-2-7 (0)	GC
17+450	13	2,682	48,5	27,3	22,9	28,4	50,4	48	21	2,012	600	481	0,011	11,7	1,913	40	A-2-7 (0)	GC
24+050	12	2,629	49,8	32,5	26,4	25,3	47,7	50	22	1,900	744	594	0,012	13,4	1,969	39	A-2-7 (0)	GC
24+675	13	2,664	56,2	34,9	22,2	26,0	44,0	41	19	1,867	674	421	0,010	10,3	2,046	46	A-2-7 (0)	GC
25+700	11	2,494	61,5	39,3	33,8	32,1	38,3	71	36	1,653	1436	1261	0,034	15,7	1,845	25	A-2-7 (4)	GM
27+300	15	2,625	68,7	41,9	33,5	41,1	30,7	69	35	1,558	1504	1234	0,033	15,8	1,855	30	A-2-7 (4)	SM
33+000	30	2,562	66,7	37,4	29,7	40,6	32,0	49	23	1,872	699	700	0,012	11,9	1,954	27	A-2-7 (1)	SC
34+400	27	2,673	53,1	31,7	26,1	26,5	48,0	48	21	1,890	686	562	0,011	12,9	1,937	34	A-2-7 (0)	GC
36+850	26	2,608	54,2	33,0	26,3	28,6	45,7	48	21	1,910	632	557	0,010	11,0	1,992	36	A-2-7 (0)	GC
	Savane sèche (N = 122)																	
42+750	14	2,658	40,8	25,9	21,1	22,3	58,1	45	19	2,123	493	397	0,008	10,9	2,040	56	A-2-7 (0)	GC
49+000	15	2,811	34,4	25,8	19,8	19,0	63,2	46	19	2,200	489	374	0,008	11,3	2,080	54	A-2-7 (0)	GC
53+325	21	2,786	32,3	25,4	21,1	13,3	66,0	48	20	2,205	513	419	0,009	11,9	2,060	50	A-2-7 (0)	GM
58+000	16	2,800	33,3	26,6	22,1	15,5	65,4	48	21	2,178	574	473	0,011	12,4	2,020	45	A-2-7 (0)	GC
64+000	12	2,825	32,5	25,7	22,0	14,0	66,4	48	21	2,199	552	464	0,011	13,0	2,030	53	A-2-7 (0)	GC
67+000	22	2,918	27,5	22,1	18,9	11,1	71,1	49	20	2,315	448	378	0,009	10,8	2,140	58	A-2-7 (0)	GM
68+000	22	2,829	31,5	25,0	21,1	13,7	65,8	49	21	2,224	527	444	0,010	12,3	2,050	53	A-2-7 (0)	GM

N = nombre d'échantillons ;  $G_m = [300 - (\% \leq 2 \text{ mm} + \% < 425 \mu\text{m} + \% < 75 \mu\text{m})]/100$  ;  $P_m = PI \times$  pourcentage passants au tamis de 425  $\mu$ m (Charman, 1988) ;  
 $P_p = IP \times$  pourcentage passants au tamis de 75  $\mu$ m (Charman, 1988) ;  $\epsilon_s = 1 \times 10^{-5} PI^{2.24}$  (Millogo et al., 2008) ; TEO : teneur en eau optimale ; DSM : densité sèche maximale ;  
 AASTHO : American Association for State Highway and Transportation ; USCS : Unified Soil Classification System.

Tableau 22. Données statistiques élémentaires des caractéristiques géotechniques des graveleux latéritiques de savanes humide et sèche dans la zone d'Obala - Mbandjock

Zone	Statistiques	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	<2 mm (Squelette) %	<0.425 $\mu$ m (Mortier) %	<75 $\mu$ m (Fines) %	Sable (%)	Gravier (%)	LL (%)	IP (%)	Gm	Pm	Pp	$\varepsilon_s$	TEO (%)	DSM	CBR (%)
Savane humide	Minimum	2,36	24,4	15,6	14,0	21,2	30,7	24	9	0,73	171	144	0,002	7,4	1,580	10
	Moyenne	2,63	56,2	34,2	27,2	29,8	43,9	51	23	1,84	797	656	0,014	12,7	1,950	36
	Maximum	2,95	95,5	72,7	60,1	41,1	54,9	88	48	2,46	3000	2880	0,064	24,2	2,180	67
	ET	0,08	16,2	10,2	8,1	6,1	7,4	10	6	0,31	427	363	0,009	2,6	0,01	11
	CV (%)	3	29	30	30	21	17	19	25	17	54	55	67	21	5	31
Savane sèche	Minimum	2,48	21,1	16,9	12,3	11,1	58,1	32	12	1,95	220	149	0,003	8,3	1,84	40
	Moyenne	2,81	32,7	25,0	20,8	15,6	65,1	48	20	2,21	510	420	0,009	11,8	2,06	53
	Maximum	3,00	49,0	33,2	29,3	22,3	71,1	54	26	2,46	784	634	0,016	17,8	2,25	70
	ET	0,10	6,3	3,69	3,3	3,8	3,9	4	3	0,12	118	97	0,003	1,6	0,08	6
	CV (%)	3	19	15	16	24,6	6,0	8	13	5	23	23	28	14	4	12

ET. : écart-type ; CV : coefficient de variation ;  $G_m = [300 - (\% \leq 2 \text{ mm} + \% < 425 \mu\text{m} + \% < 75 \mu\text{m})]/100$  ;  $P_m = PI \times \text{pourcentage passant au tamis de } 425 \mu\text{m}$  (Charman, 1988) ;  $P_p = IP \times \text{pourcentage passants au tamis de } 75 \mu\text{m}$  (Charman, 1988);  $\varepsilon_s = 1 \times 10^{-5} PI^{2.24}$  (Millogo *et al.*, 2008) ; TEO : teneur en eau optimale ; DSM : densité sèche maximale

### III.2.4. Paramètres dérivés

Les paramètres dérivés étudiés sont : le module de classement  $G_m$ , le produit de plasticité  $P_p$ , le module de plasticité  $P_m$  et le potentiel de gonflement ( $\epsilon_s$ ) (Tab. 21 et 22).

En zone de savane humide, les valeurs de  $G_m$  obtenues varient entre 0,73 et 2,46 ; tandis qu'en zone de savane sèche, ces valeurs oscillent entre 1,95 et 2,46 (Tab. 20 et 21).

Le module de plasticité ( $P_m$ ) présente des valeurs comprises entre 171 et 3000, soit une moyenne de 797 en savane humide, tandis qu'en zone de savane sèche, ces valeurs varient entre 220 et 784, pour une moyenne de 510 (Tab. 21 et 22).

Les valeurs de  $P_p$  en savane humide varient entre 144 et 2880, soit une moyenne de 656. En savane sèche, les valeurs de ce paramètre oscillent entre 149 et 634, pour une moyenne de 420 (Tab. 21 et 22).

L'expression du potentiel de gonflement  $\epsilon_s$  utilisée est celle des sols contenant entre 8 et 65 % de phase argileuse. Les valeurs de potentiel de gonflement en zone de savane humide varient entre 0,002 et 0,014 et, en zone de savane sèche, entre 0,003 et 0,016.

### III.2.5. Classification

Les matériaux en zone de savane humide sont des graviers et des sables argileux appartenant à diverses classes de la classification AASHTO. Ces graveleux latéritiques sont de classes A-2-7 (80 %), A-7-5 (9 %), A-2-6 (6 %), A-7-6 (4 %) et A-2-4 (1 %). D'après la classification USCS, les matériaux de savane humide sont à 66 % des graviers argileux (GC), à 32 % des graviers silteux (GM). Les 2 % restants représentent des matériaux des groupes CH, MH et SC.

D'après la classification AASHTO, les matériaux étudiés en zone de savane sèche représentent à 94 % des graviers et des sables argileux ou limoneux de la classe A-2-7. Six pour cent de ces matériaux sont de classe A-2-6. Selon la classification USCS, 53 % de ces graveleux latéritiques sont des graviers argileux (GC) et, 47 %, des graviers silteux (GM).

### III.2.6. Paramètres de compactage

Les valeurs moyennes des données de compactage par carrière sont présentées dans le tableau 21. Les valeurs de teneur en eau optimale (TEO) des graveleux latéritiques de la zone de savane humide varient entre 7,4 % et 24,2 %, soit une moyenne de 12,7 % (Tab. 21 et 22). Un seul échantillon possède une teneur supérieure à 20 % (24,2 %). En écartant cette valeur, la valeur maximale devient 19,3 %. Les valeurs de TEO des graveleux latéritiques de savane sèche varient entre 8,3 % et 17,8 %, soit une moyenne de 11,8 % (Tab. 21 et 22).

Les valeurs de densité sèche maximale (DSM) en zone de savane humide varient entre 1,60 et 2,20, pour une moyenne de 2,00 ; tandis qu'en zone de savane sèche, ces valeurs oscillent entre 1,84 et 2,25, soit une moyenne de 2,06 (Tab. 21 et 22).

En zone de savane humide, les valeurs de CBR à 95% OPM sont comprises entre 10 % et 67 %, soit une moyenne de 36 %, alors qu'en savane sèche, elles varient entre 40 % et 70 % pour 53 % de moyenne (Tab. 21 et 22).

#### **IV. VARIABILITE STATISTIQUE DES MATERIAUX DANS LA ZONE OBALA - MBANDJOCK**

##### **IV.1. Corrélations entre paramètres pétrologiques**

Dans le but de regrouper les éléments ayant le même comportement dans le système géochimique, une étude statistique fondée sur l'analyse en composantes principales (ACP) selon la matrice de corrélation de Pearson a été réalisée. L'intérêt est uniquement porté sur  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et LOI, qui sont les oxydes qui influencent le plus le comportement mécanique des graveleux latéritiques. La matrice de corrélation (Tab. 23) réalisée sur les matériaux de savane sèche et de savane humide montre de bonnes corrélations positives et négatives.

De fortes corrélations négatives existent entre  $\text{SiO}_2$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (-0,83),  $\text{SiO}_2$  -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (-0,96) et  $\text{SiO}_2$  - LOI (-0,91). Par contre des corrélations positives apparaissent entre  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,70), LOI -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,79) et LOI -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,84). Le pourcentage de variabilité représenté sur les deux premiers axes de l'ACP est de 74,52 % ; ce qui indique que cette représentation de la figure 34 est de bonne qualité. La position de  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , proches de la périphérie du cercle de corrélation de l'ACP, indique que ces oxydes interviennent majoritairement dans la formation des graveleux latéritiques dans la zone d'Obala - Mbandjock, suivi de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Les corrélations qui existent entre ces trois oxydes sont confirmées par leurs positions sur le cercle de corrélation. La présence majoritaire de ces oxydes est en accord avec les travaux réalisés sur les graveleux latéritiques (Millogo *et al.*, 2008 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017). Le nuage des individus (Fig. 35) permet d'observer que l'axe F2 oppose les graveleux latéritiques de savane humide à ceux de savane sèche. Il existe donc une répartition des oxydes en rapport avec le caractère hydrique des graveleux latéritiques.

Les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock sont constitués de quartz, kaolinite, hématite, goethite, gibbsite, muscovite et anatase. Deux méthodes de quantification des différentes phases minérales ont été utilisées. Les résultats de la méthode des aires des pics (Cf. Annexe IV) n'ont pas été discutés, les proportions d'anatase obtenues ne reflétant pas les

Tableau 23. Matrice de corrélation des composants chimiques (% d'oxydes) des graveleux latéritiques de savanes humide et de savane sèche dans la zone Obala – Mbandjock

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI
SiO <sub>2</sub>	<b>1,00</b>												
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>-0,83</b>	<b>1,00</b>											
MnO	-0,08	-0,03	<b>1,00</b>										
FeO	0,06	0,03	-0,43	<b>1,00</b>									
MgO	0,38	-0,52	0,40	-0,07	<b>1,00</b>								
CaO	0,28	-0,47	0,53	-0,24	0,84	<b>1,00</b>							
Na <sub>2</sub> O	0,45	-0,38	0,18	-0,10	0,62	0,64	<b>1,00</b>						
K <sub>2</sub> O	0,46	-0,42	0,16	-0,09	0,82	0,67	0,88	<b>1,00</b>					
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>-0,96</b>	<b>0,70</b>	-0,04	-0,05	-0,43	-0,35	-0,54	-0,54	<b>1,00</b>				
TiO <sub>2</sub>	-0,54	0,36	0,55	-0,16	0,30	0,45	-0,01	0,03	0,39	<b>1,00</b>			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-0,53	0,23	0,53	-0,27	0,36	0,48	-0,02	0,05	0,44	<b>0,93</b>	<b>1,00</b>		
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,67	0,44	-0,20	0,05	-0,37	-0,30	-0,57	-0,51	0,71	0,47	0,48	<b>1,00</b>	
LOI	<b>-0,91</b>	<b>0,84</b>	0,33	-0,15	-0,29	-0,12	-0,31	-0,39	<b>0,79</b>	0,68	0,62	0,53	<b>1,00</b>

*N = 18; p-value = 5 %*

*\* Les valeurs en gras indiquent les corrélations significatives.*

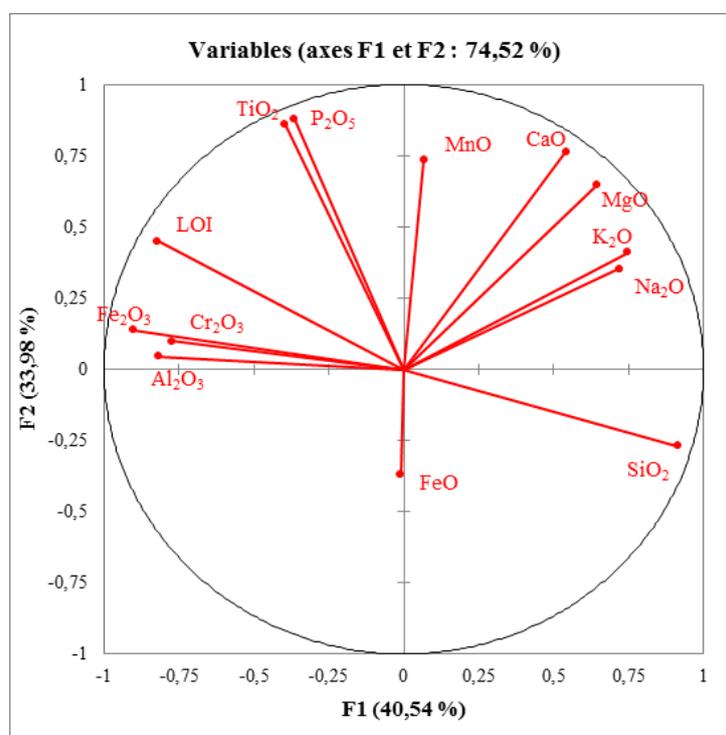


Figure 34. Cercle de corrélations des composants chimiques des graveleux latéritiques dans la zone Obala – Mbandjock

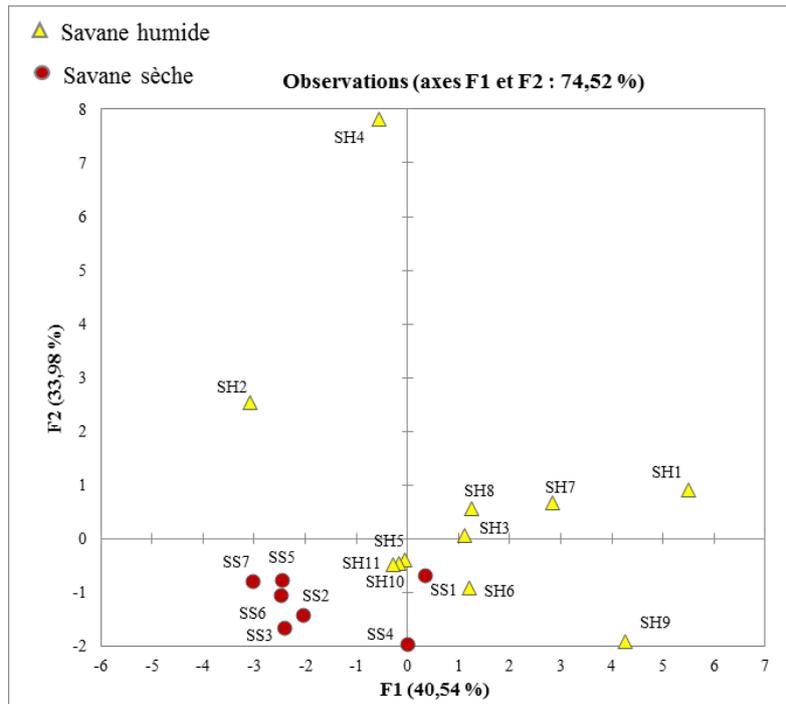


Figure 35. Répartition des graveleux latéritiques en fonction des composants chimiques

SH: Savane Sèche SH1: PK 1+475D ; SH2: PK 9+800 ; SH3: PK 13+825 ; SH4: PK 17+400 ; SH5: PK 24+050 ; SH6: 24+675 ; SH7: PK 25+700 ; SH8: PK 33+700 ; SH9: 34+700 ; SH10: 36+850.

SH: Savane Sèche SS1: PK 42+750 ; SS2: PK 49+000 ; SS3: PK 53+325 ; SS4: PK 58+000 ; SS5: PK 64+000 ; SS6: PK 67+000 ; SS7: PK 68+000.

proportions de  $TiO_2$  dans les matériaux. Cette méthode tend donc à surévaluer les quantités d'anatase présentes. La matrice de corrélation appliquée aux données minéralogiques semi-quantitatives obtenues par la méthode de Yvon *et al.* (1990) est présentée dans le tableau 24. On note une corrélation négative modérée entre le quartz et la kaolinite (-0,51) et, entre la goethite et hématite (0,56). Des corrélations, fortes, apparaissent entre goethite - quartz (-0,77) et muscovite - quartz (-0,63) et, très fortes, entre quartz - hématite (-0,88) et kaolinite - gibbsite (0,96). L'analyse en composantes principales sur les 18 échantillons montre que 79,72 % de la variance totale est exprimée sur les 02 premiers axes. Ce qui représente un bon pourcentage pour une interprétation suivant le plan de ces 02 axes (Fig. 36). On observe que les paramètres quartz, gibbsite et kaolinite sont situés sur le cercle de corrélation ; ceci indique qu'ils s'expriment bien suivant ces axes. Il en est de même dans une moindre mesure pour les paramètres hématite, goethite et muscovite qui sont très éloignés du centre du cercle. La position du quartz par rapport à l'hématite, la goethite et la muscovite, confirme les corrélations négatives entre ces minéraux. La représentation du nuage des individus sur le plan factoriel (Fig. 37) confirme le regroupement des graveleux latéritiques en fonction des zones.

Une matrice de corrélation (Tab. 25) et une ACP (Fig. 38) appliquée aux données minéralogiques et chimiques a permis de ressortir des corrélations et des regroupements. Le quartz est fortement et inversement corrélé à  $Al_2O_3$  (-0,86),  $Fe_2O_3$  (-0,95) et LOI (-0,91). La goethite (0,53) et l'hématite (0,89) sont directement corrélés à LOI.

L'ACP indique que les deux premiers axes factoriels F1 et F2 expriment 71 % de la variance totale. La représentation des individus sur le plan factoriel permet d'observer que l'axe F2 oppose les graveleux latéritiques de savane humide à ceux de savane sèche. Ce regroupement est donc fonction des caractères hydriques.

## **IV.2. Corrélations entre paramètres géotechniques**

### **IV.2.1. Analyses de régression**

En savane sèche, les valeurs de  $G_m$  sont liées à celles de mortier ( $<425 \mu m$ ) suivant une relation linéaire (Eq. 20) et, à celles des fines ( $<75 \mu m$ ), suivant une relation polynomiale d'ordre 3 (Fig. 39). Les valeurs de mortier ( $<425 \mu m$ ) sont liées à celles de la fraction fine ( $<75 \mu m$ ) selon une relation polynomiale d'ordre 3 (Fig. 40). Le module de plasticité ( $P_m$ ) est lié au mortier ( $<425 \mu m$ ) et au produit de plasticité  $P_p$  suivant une relation linéaire (Eq. 21 et 22, respectivement) et, à  $<75 \mu m$ , suivant une relation polynomiale d'ordre 3 (Fig. 41). Le produit de plasticité  $P_p$  est lié au potentiel de gonflement  $\epsilon_s$  et à l'indice de plasticité IP suivant des relations linéaires (Eq. 23 et 24). L'indice de plasticité IP est lié à  $\epsilon_s$  suivant une relation

Tableau 24. Matrice de corrélation des minéraux des graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock

	Quartz	Kaolinite	Goethite	Hématite	Gibbsite	Muscovite
Quartz	<b>1,00</b>					
Kaolinite	<b>-0,51</b>	<b>1,00</b>				
Goethite	<b>-0,77</b>	0,44	<b>1,00</b>			
Hématite	<b>-0,88</b>	0,41	<b>0,56</b>	<b>1,00</b>		
Gibbsite	-0,43	<b>0,96</b>	0,28	0,44	<b>1,00</b>	
Muscovite	<b>-0,63</b>	0,29	0,24	0,44	0,22	<b>1,00</b>

$N = 18$ ;  $p$ -value = 5 %

\* Les valeurs en gras indiquent les corrélations significatives.

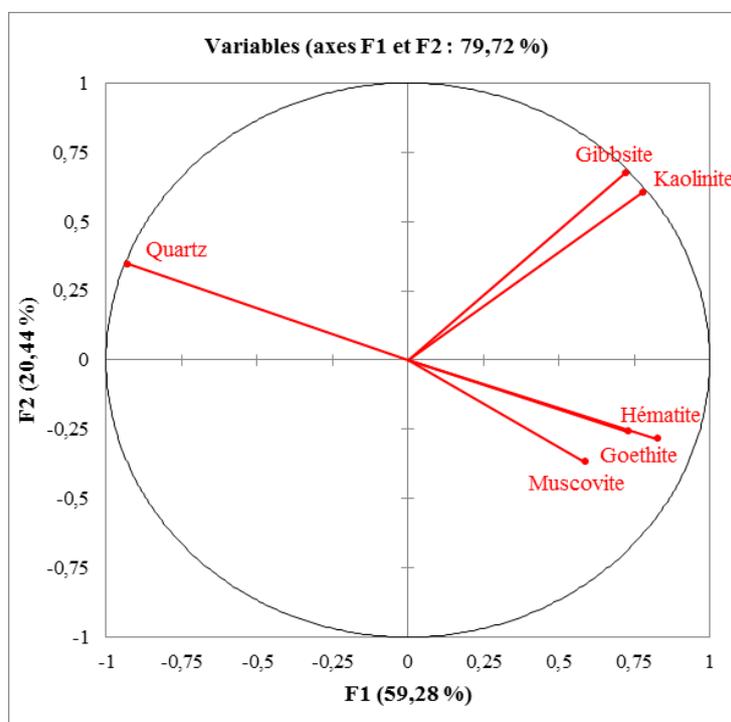


Figure 36. Cercle de corrélation des données minéralogiques des graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock par la méthode d'Yvon et al. (1990)

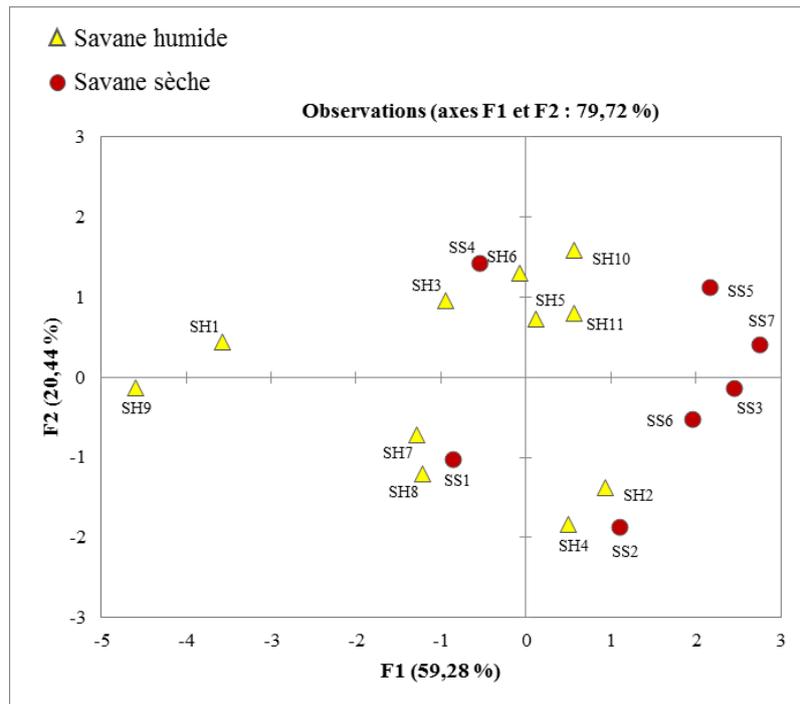


Figure 37. Répartition des graveleux latéritiques de la zone d'Obala - Mbandjock suivant la composition minéralogique sur le plan factoriel F1-F2

Tableau 25. Matrice de corrélation des données chimiques et minéralogiques des graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI	Quartz	Kaolinite	Goethite	Hématite	Gibbsite	Muscovite
SiO <sub>2</sub>	<b>1,00</b>									
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,83	<b>1,00</b>								
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,96	0,70	<b>1,00</b>							
LOI	-0,91	0,84	0,79	<b>1,00</b>						
Quartz	<b>0,99</b>	<b>-0,86</b>	<b>-0,95</b>	<b>-0,91</b>	<b>1,00</b>					
Kaolinite	<b>-0,52</b>	<b>0,69</b>	<b>0,48</b>	<b>0,48</b>	-0,51	<b>1,00</b>				
Goethite	<b>-0,79</b>	<b>0,56</b>	<b>0,87</b>	<b>0,53</b>	-0,77	0,44	<b>1,00</b>			
Hématite	<b>-0,89</b>	<b>0,63</b>	<b>0,89</b>	<b>0,81</b>	-0,88	0,41	0,56	<b>1,00</b>		
Gibbsite	-0,45	<b>0,63</b>	0,41	0,44	-0,43	0,96	0,28	0,44	<b>1,00</b>	
Muscovite	<b>-0,58</b>	<b>0,79</b>	0,41	<b>0,70</b>	-0,63	0,29	0,24	0,44	0,22	<b>1,00</b>

$N = 18$  ;  $p\text{-value} = 5\%$

\* Les valeurs en gras indiquent les corrélations significatives.

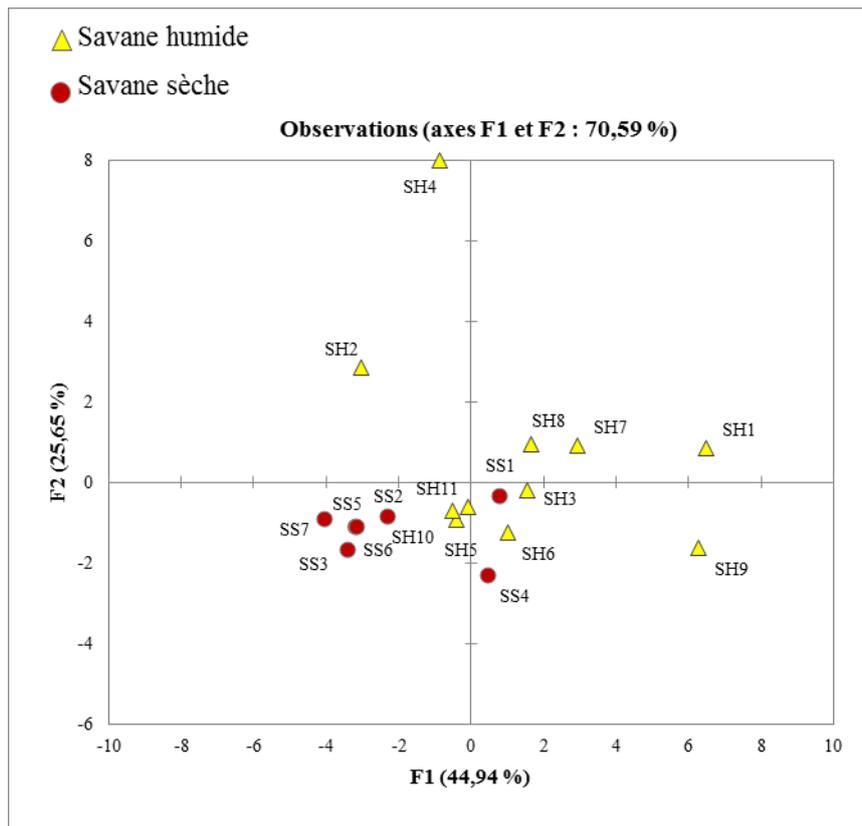


Figure 38. Répartition des graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock dans le plan factoriel F1-F2 en fonction des corrélations chimiques et minéralogiques

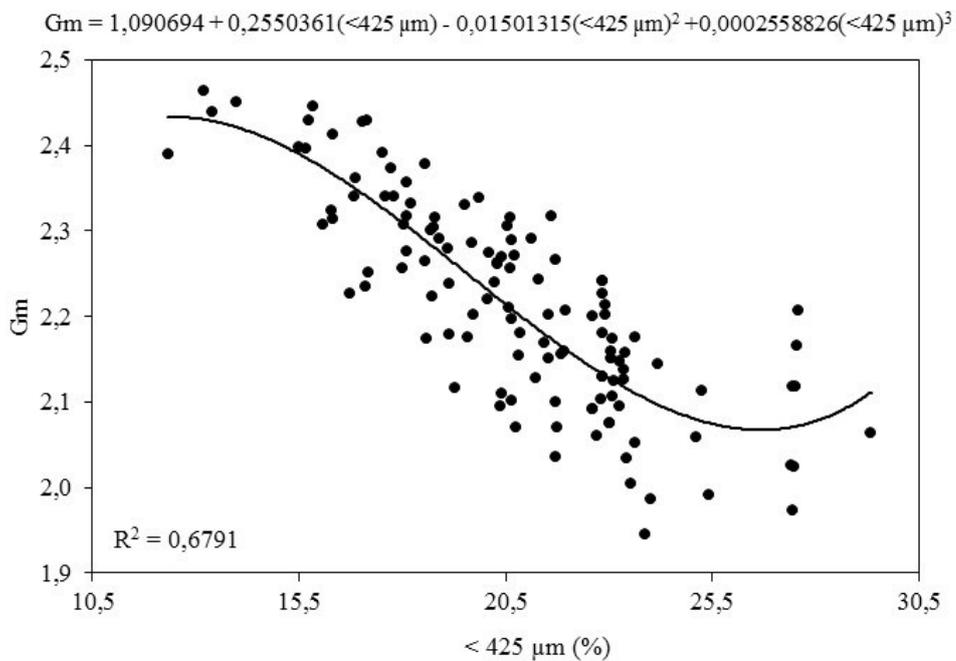


Figure 39. Nuage des points entre  $G_m$  et  $<425 \mu\text{m}$  et courbe ajustée

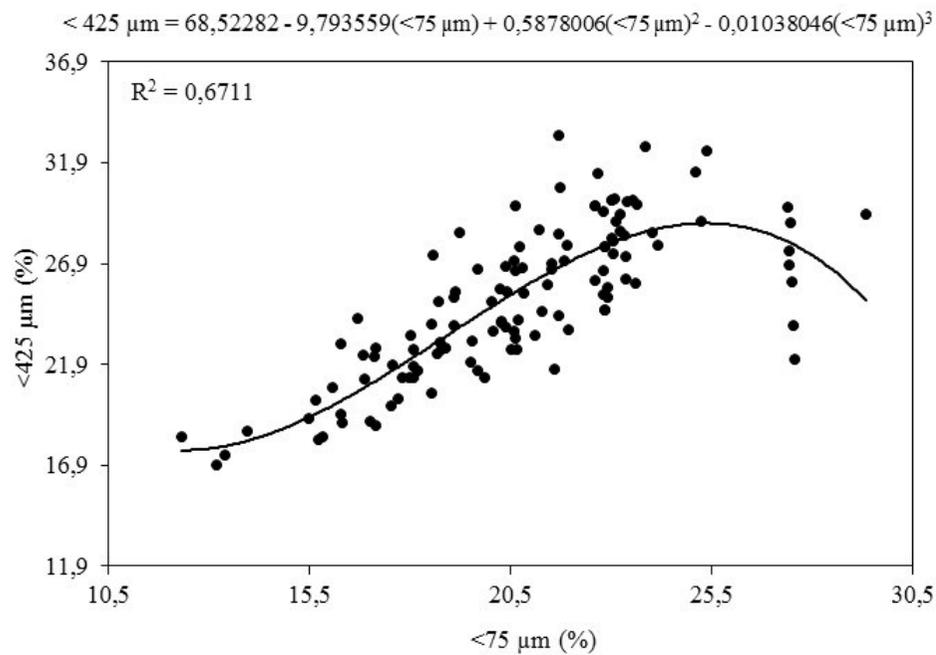


Figure 40. Nuage de points entre <425 μm et <75 μm et courbe ajustée

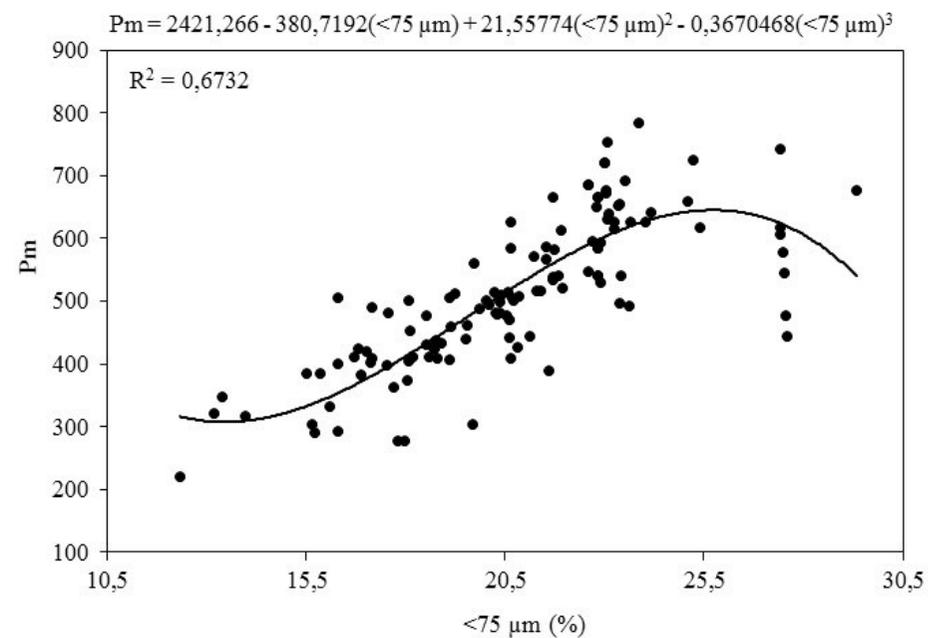


Figure 41. Nuage des points entre Pm et <75 μm et courbe ajustée

polynomiale d'ordre 2 (Fig. 42).

$$G_m = 2,9739404 - 0,0303493(< 425 \mu\text{m}) \quad R^2 = 0,8867(20)$$

$$P_m = -185,329 + 27,792(< 425 \mu\text{m}) \quad R^2 = 0,7535(21)$$

$$P_m = 82,28701 + 1,0205P_p \quad R^2 = 0,7014(22)$$

$$P_p = 123,50 + 31540,77 \quad R^2 = 0,7623(23)$$

$$P_p = -224,865 + 31,866PI \quad R^2 = 0,7657(24)$$

En zone de savane humide, le squelette (<2 mm) est lié au mortier (<425  $\mu\text{m}$ ) suivant une relation polynomiale d'ordre 2 (Fig. 43). Le mortier (<425  $\mu\text{m}$ ) est lié à la fraction fine (<75  $\mu\text{m}$ ) suivant une relation linéaire (Eq. 25). Le produit de plasticité  $P_p$  est respectivement lié à  $\varepsilon_s$  suivant une relation linéaire (Eq. 26), à <425  $\mu\text{m}$  et <75  $\mu\text{m}$  suivant des relations polynomiales d'ordre 3 (Fig. 44 et 45) et, à IP par une relation polynomiale d'ordre 4 (Fig. 46).

L'indice de plasticité IP est lié à LL suivant une relation polynomiale d'ordre 2 (Fig. 47). Les valeurs de TEO sont liées à celles de DSM suivant une relation polynomiale d'ordre 3 (Fig. 48). Les expressions des équations 25 et 26, sont les suivantes :

$$< 425 \mu\text{m} = 3,56247 + 1,13003(< 75 \mu\text{m}) \quad R^2 = 0,7867(25)$$

$$P_p = 207,57 + 33630,72\varepsilon_s \quad R^2 = 0,7180(26)$$

Au total, le module de classement  $G_m$  est lié à la teneur en fines (<75  $\mu\text{m}$ ) suivant une relation polynomiale d'ordre 3 en savane sèche et, suivant une relation linéaire, en savane humide.

Le module de plasticité  $P_m$  est linéairement lié au module classement  $G_m$  uniquement en zone de savane sèche. Le paramètre <425  $\mu\text{m}$  est fonction de <75  $\mu\text{m}$  selon des relations polynomiales d'ordre 3 en zone de savane sèche et, d'ordre 1 en savane humide.

En zone de savane sèche, les valeurs de module de plasticité  $P_m$  sont linéairement liées à celles du mortier <425  $\mu\text{m}$ ,  $P_p$ , PI et  $\varepsilon_s$ . Cette relation est polynomiale d'ordre 3 entre les valeurs de  $P_m$  et celles des fines <75  $\mu\text{m}$ . Par contre, en savane humide, les valeurs de  $P_m$  ne sont liées à aucun des paramètres <425  $\mu\text{m}$ ,  $P_p$ , PI, et  $\varepsilon_s$ . Le paramètre  $P_p$  est lié au mortier (<425  $\mu\text{m}$ ) selon une relation polynomiale d'ordre 3 en savane humide et, à LL, selon une relation polynomiale d'ordre 2, en savane sèche. Ce paramètre  $P_p$  est lié à la fraction fine (<75  $\mu\text{m}$ ) selon une relation polynômiale d'ordre 3 en savane humide tandis qu'en savane sèche, la relation est polynômiale, mais d'ordre 2. L'indice de plasticité IP est respectivement lié à  $\varepsilon_s$  suivant une relation polynomiale d'ordre 2 en savane sèche et, à LL, suivant une relation linéaire, en savane humide.

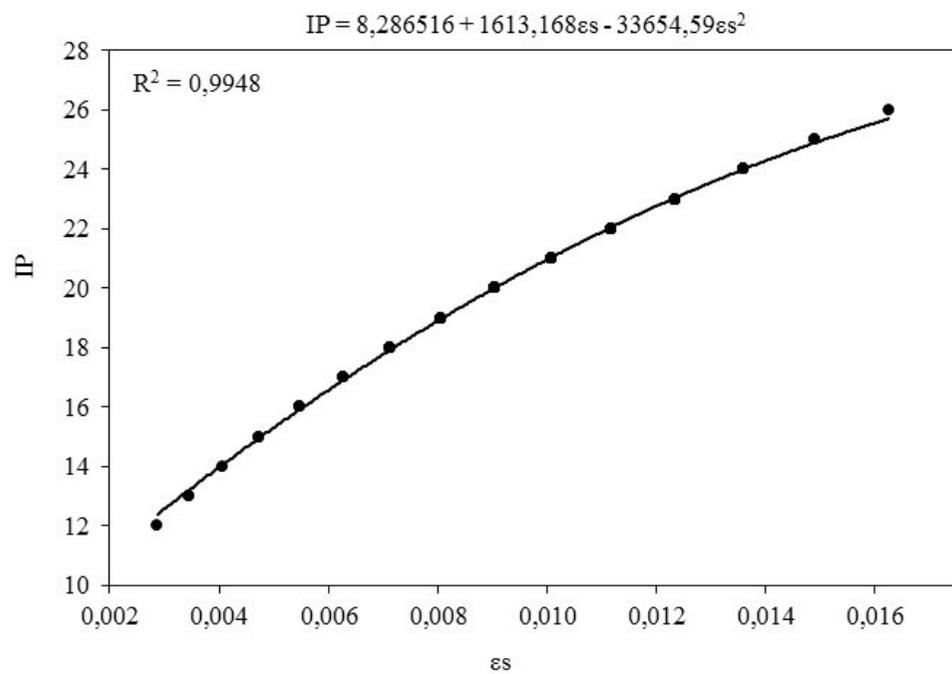


Figure 42. Nuage des points entre IP et εs et courbe ajustée

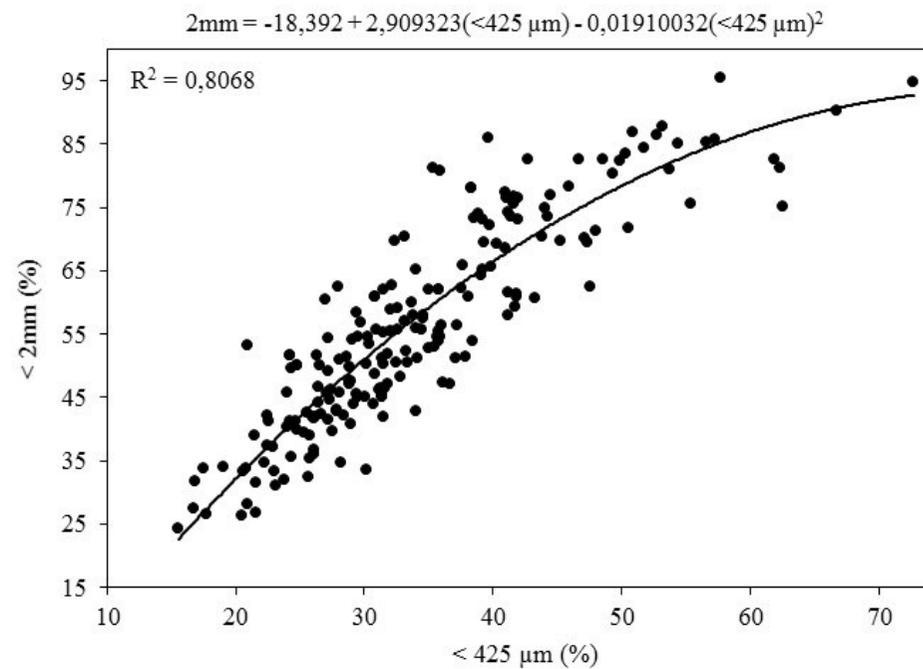


Figure 43. Nuage des points entre <2 mm et <425 μm et courbe ajustée

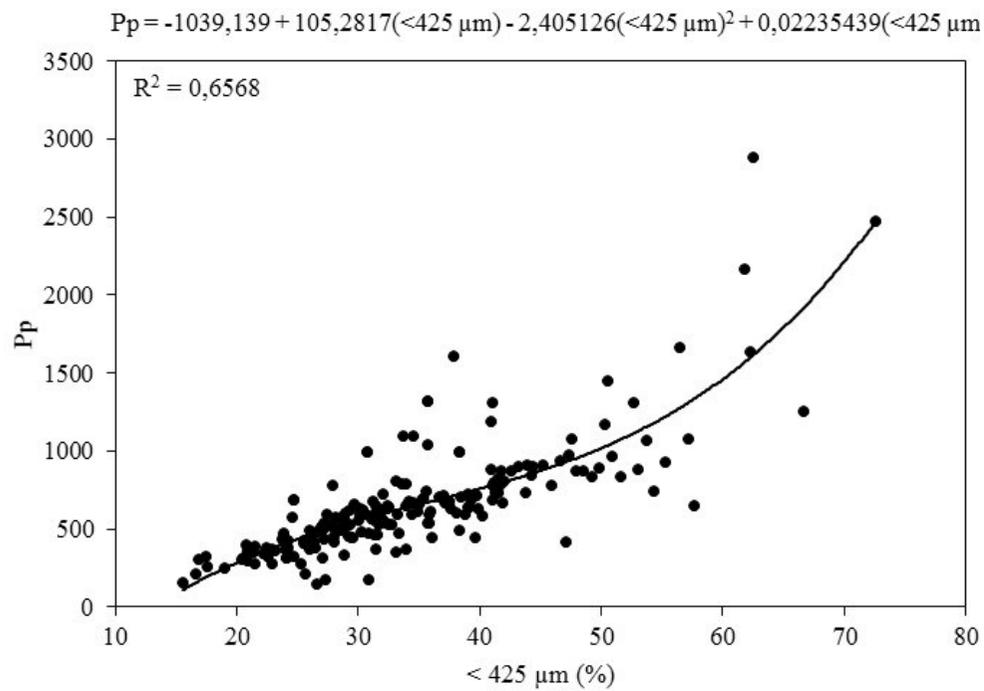


Figure 44. Nuage des points entre Pp et <425 μm et courbe ajustée

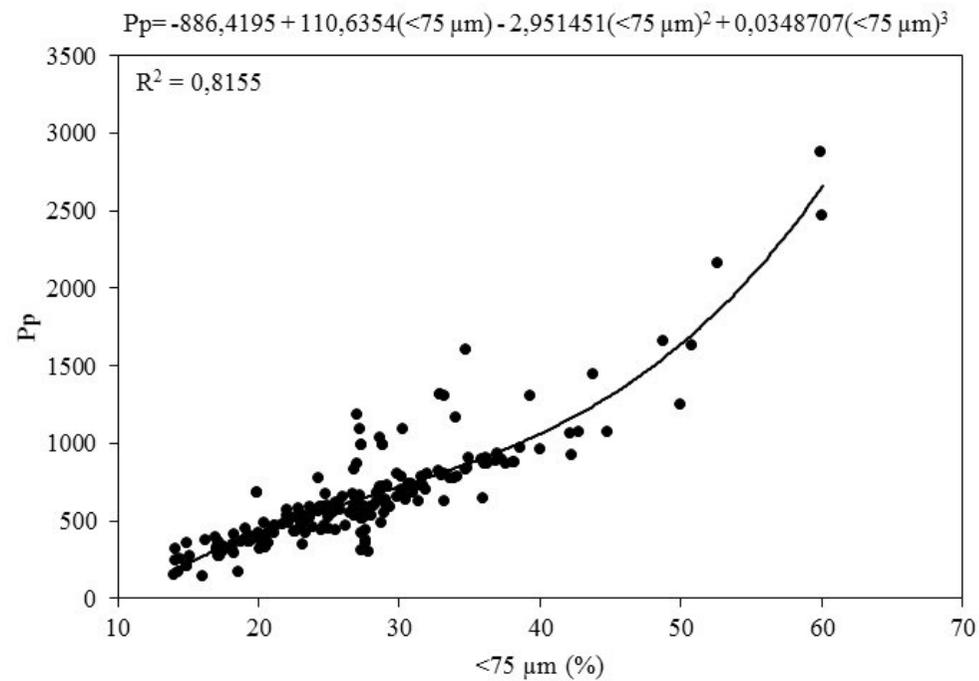


Figure 45. Nuage des points entre Pp et <75 μm et courbe ajustée

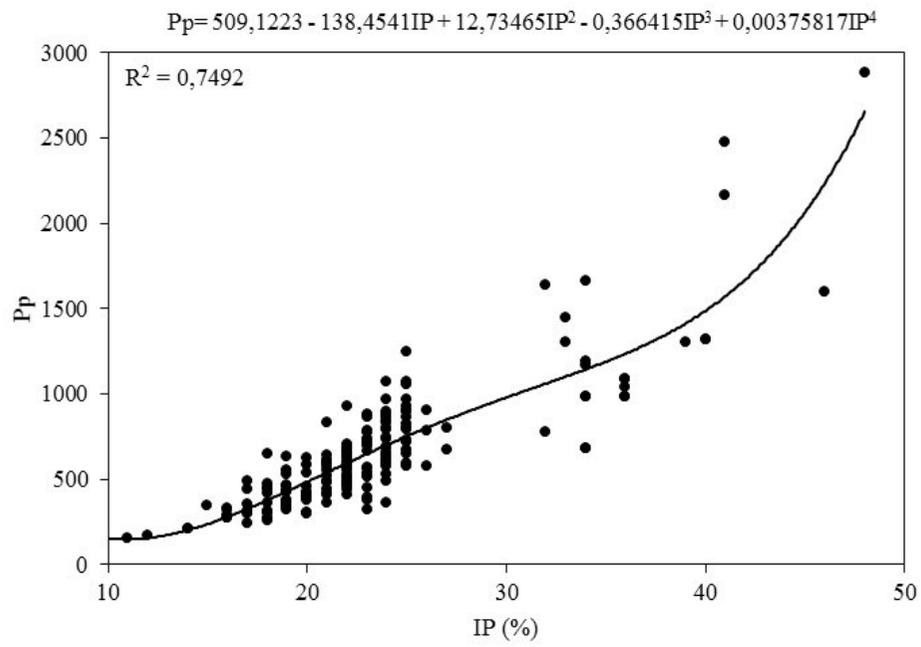


Figure 46. Nuage des points entre Pp et IP et courbe ajustée

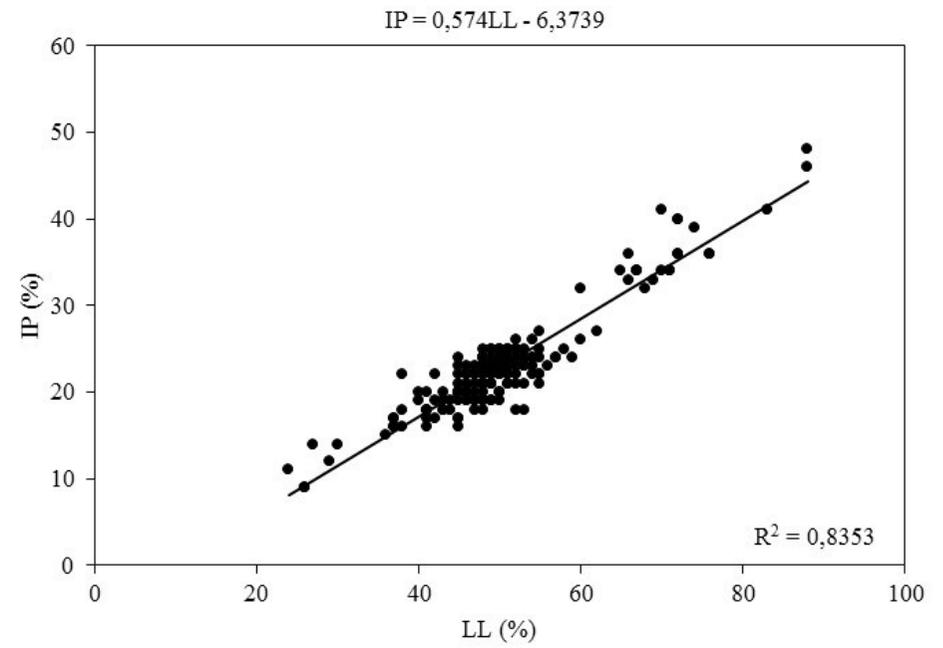


Figure 47. Nuage des points entre IP et LL et courbe ajustée

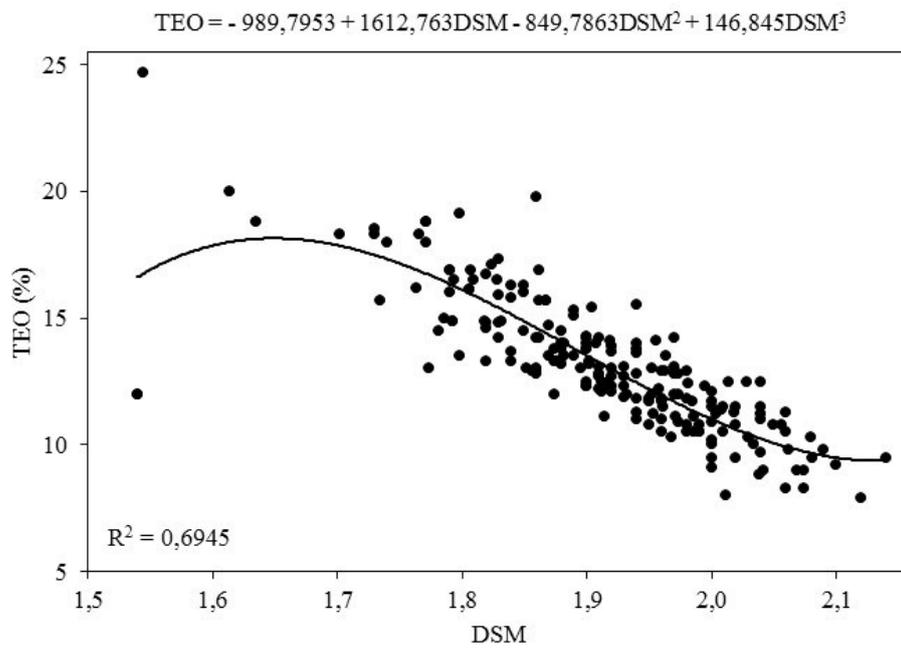


Figure 48. Nuage des points entre TEO et DSM et courbe ajustée

#### IV.2.2. Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) est utilisée ici dans le but de ressortir des assemblages et de chercher en fonction du milieu, savane humide ou savane sèche, des corrélations statistiquement significatives entre les différents paramètres géotechniques des graveleux latéritiques étudiés. Le premier plan factoriel explique environ 79 % de l'information contenue dans les données. Ce qui est un pourcentage important et intéressant.

La somme des cosinus carrés sur les 02 premiers axes factoriels F1 et F2, pour une observation donnée, donne une idée de la fidélité de la représentation dans le plan défini par F1 et F2, pour cette observation.

Il en ressort que les paramètres Pp et  $<75 \mu\text{m}$ , avec des  $\cos^2$  de 0,9 et 0,8 représentent le plus la réalité contrairement à  $\rho_s$  et TEO, avec des  $\cos^2$  de 0,4. Sur cette base, l'interprétation de  $\rho_s$  et TEO sera donc hasardeuse (Tab. 26)

Le plan factoriel (Fig. 49) illustre globalement 02 grands groupes d'individus : les graveleux latéritiques de savane sèche et ceux de savane humide. Le cercle de corrélation des variables (Fig. 50) montre que l'axe 2 oppose le groupe de paramètres Gm, DSM, CBR et  $\rho_s$ , au groupe Pp, Pm,  $<75 \mu\text{m}$ ,  $<425 \mu\text{m}$ , IP,  $<2 \text{ mm}$ ,  $\varepsilon_s$ , LL et TEO. On relève l'existence de 03 groupes de paramètres géotechniques, le groupe paramètres (granulométriques)  $<75 \mu\text{m}$ ,  $<425 \mu\text{m}$  et  $<2 \text{ mm}$ , le groupe des paramètres Pp, Pm, IP, LL,  $\varepsilon_s$  et TEO et le groupe des paramètres DSM, CBR, Gm et  $\rho_s$ .

Ces regroupements suggèrent l'existence de corrélations entre ces différents paramètres. La position du paramètre CBR, proche de Gm et  $\rho_s$  et, opposée au groupe des paramètres granulométriques, suppose l'existence de corrélations positives avec Gm et  $\rho_s$  et, négatives avec les paramètres granulométriques. Il apparaît une forte corrélation inverse entre le CBR et la teneur en squelette ( $r = -0,7$ ). D'après leur position sur le plan factoriel, il existe une corrélation positive entre DSM et CBR ( $r = 0,6$ ).

Les variables DSM et  $<75 \mu\text{m}$ , sont les plus proches de l'axe factoriel principal qui explique 66 % de la variance totale des individus. Ces variables jouent donc un rôle important dans la classification des graveleux latéritiques, en accord avec Fall *et al.* (1994) et Bohi (2008).

La position du groupe des paramètres granulométriques par rapport au groupe des paramètres Pp, Pm, IP, LL,  $\varepsilon_s$  et TEO, indique des corrélations positives entre les paramètres de ces 02 groupes. Les variables  $\varepsilon_s$ , LL, IP, Pp,  $<75 \mu\text{m}$ ,  $<425 \mu\text{m}$ ,  $<2 \text{ mm}$  et Gm sont proches du cercle de corrélation, donc bien expliquées et bien corrélées aux axes factoriels. Ce fait est en accord avec les résultats obtenus sur les sols latéritiques de Côte d'Ivoire concernant les paramètres  $<80 \mu\text{m}$ , Pp, IP et LL (Bohi, 2008).

Tableau 26. Cosinus carré des variables

	F1	F2	F3
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	<b>0,385</b>	0,187	0,154
< 2 mm	<b>0,672</b>	0,213	0,000
< 425 $\mu$ m	<b>0,762</b>	0,117	0,041
< 75 $\mu$ m	<b>0,814</b>	0,035	0,053
LL (%)	<b>0,548</b>	0,337	0,000
IP (%)	<b>0,670</b>	0,249	0,002
Gm	<b>0,715</b>	0,143	0,021
Pm	<b>0,802</b>	0,019	0,051
Pp	<b>0,904</b>	0,028	0,029
$\epsilon_s$	<b>0,640</b>	0,270	0,003
TEO (%)	<b>0,420</b>	0,125	0,143
DSM	<b>0,547</b>	0,000	0,323
CBR (%)	<b>0,523</b>	0,051	0,100

\* Les valeurs en gras correspondent pour chaque variable au facteur pour lequel le cosinus carré est le plus grand

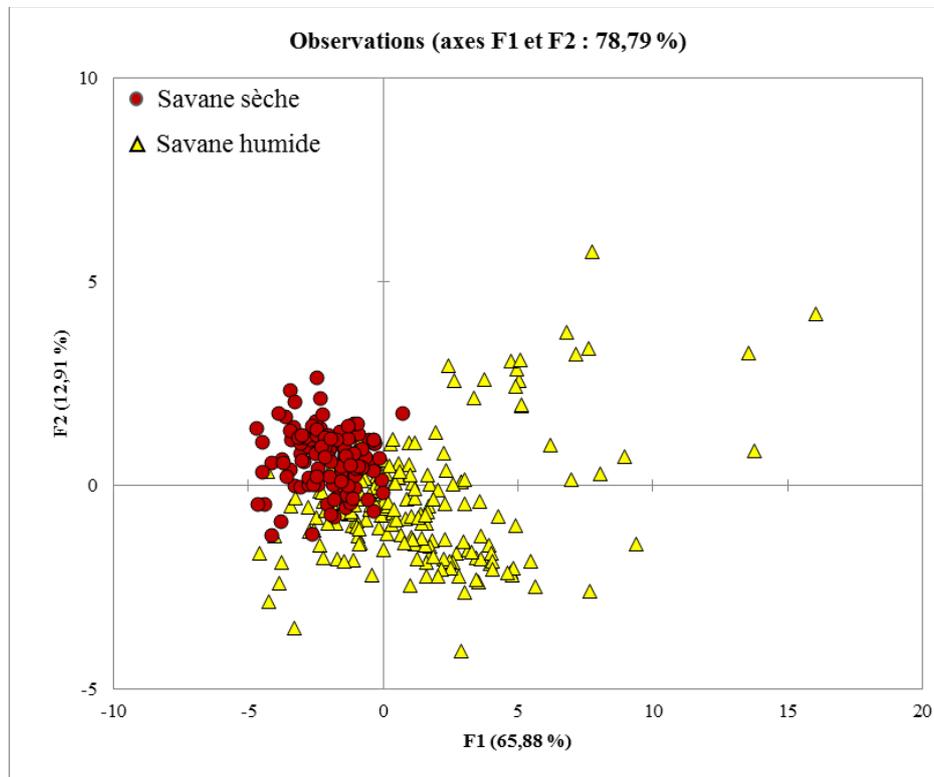


Figure 49. Nuage des individus issu de l'ACP

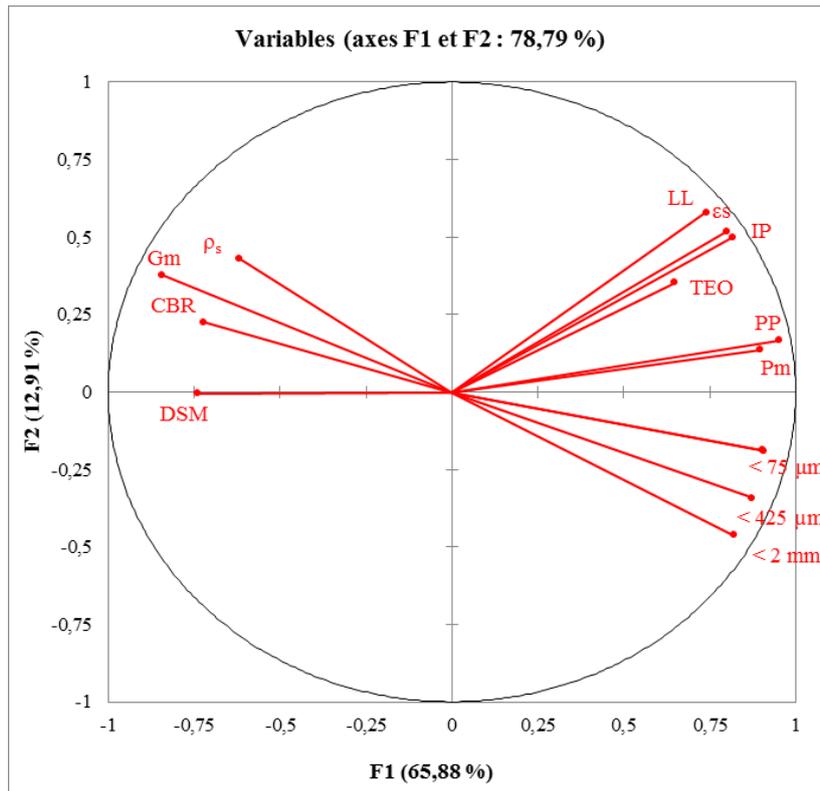


Figure 50. Cercle de corrélation des paramètres géotechniques

En général, comme l'illustre le biplot des individus et des variables (Fig. 51), les graveleux latéritiques de savane humide sont principalement caractérisés par les paramètres de granulométrie et de plasticité tandis que ceux de savane sèche sont caractérisés par les paramètres physiques et de compactage.

#### **IV. SYNTHÈSE DES DONNÉES GEOTECHNIQUES**

##### **V.1. Masse volumique des grains solides**

En savane humide, la valeur moyenne de la masse volumique des grains solides ( $\rho_s$ ) obtenue ( $2,63 \text{ g/cm}^3$ ) correspond à la borne inférieure définie par Charman (1988). La valeur de la masse volumique des grains solides des sols latéritiques en zone équatoriale est en général comprise entre  $2,60$  et  $3,20 \text{ g/cm}^3$  (Charman, 1988) ou, entre  $2,50$  et  $3,60 \text{ g/cm}^3$  (Mahalinga-Iyer et Williams, 1985). La valeur moyenne obtenue ( $2,63 \text{ g/cm}^3$ ) est similaire à celles obtenues dans d'autres régions de la zone équatoriale humide (Ogunsanwo, 1989 ; Adeyemi, 1995 ; Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Onana *et al.*, 2015 ; Otalvaro *et al.*, 2015) et, plus élevée que celle rencontrée au Sénégal ( $2,20 - 2,30 \text{ g/cm}^3$ ) par Fall *et al.* (2008) (Fig. 52). Les graveleux latéritiques de savane humide étudiés présentent donc des valeurs de masse volumique des grains solides typiques des sols latéritiques.

Les valeurs de masse volumique des grains solides de savane sèche sont en moyenne de  $2,81 \text{ g/cm}^3$ . Cette valeur moyenne est en accord avec Charman (1988), mais inférieure à celle des graveleux latéritiques sur gneiss migmatitiques ( $2,86 \text{ g/cm}^3$ ) en zone forestière de l'Est Cameroun (Nzabakurikiza *et al.*, 2017) et au Nigeria (Ola, 1980) (Fig. 52). Environ 97,5 % des échantillons analysés possèdent des valeurs de masse volumique des grains solides supérieures à  $2,58 \text{ g/cm}^3$ .

##### **V.2. Paramètres de plasticité**

En zone de savane humide, la plage des valeurs de limite de liquidité (LL) est plus large que celle obtenue par Hieng (2003) pour la zone de savane du Ntem-Sanaga au Cameroun (26 – 73 %). Par contre, les résultats obtenus dans la zone de savane du Mbam (Sikali et Djatal, 1987) sont totalement différents, 42 – 62 %, soit une moyenne de 52 % (Fig. 53). La valeur moyenne correspondante d'indice de plasticité IP est de 23 %. La position des échantillons sur le diagramme de plasticité de Casagrande montre que les matériaux de savane humide sont moyennement plastiques (Fig. 54).

Ces matériaux sont néanmoins plus plastiques que ceux du Burkina (Millogo *et al.*, 2008) et du Sénégal (Fall *et al.*, 2008) dont les valeurs de IP varient entre 15 % et 20 % (Fig. 54).

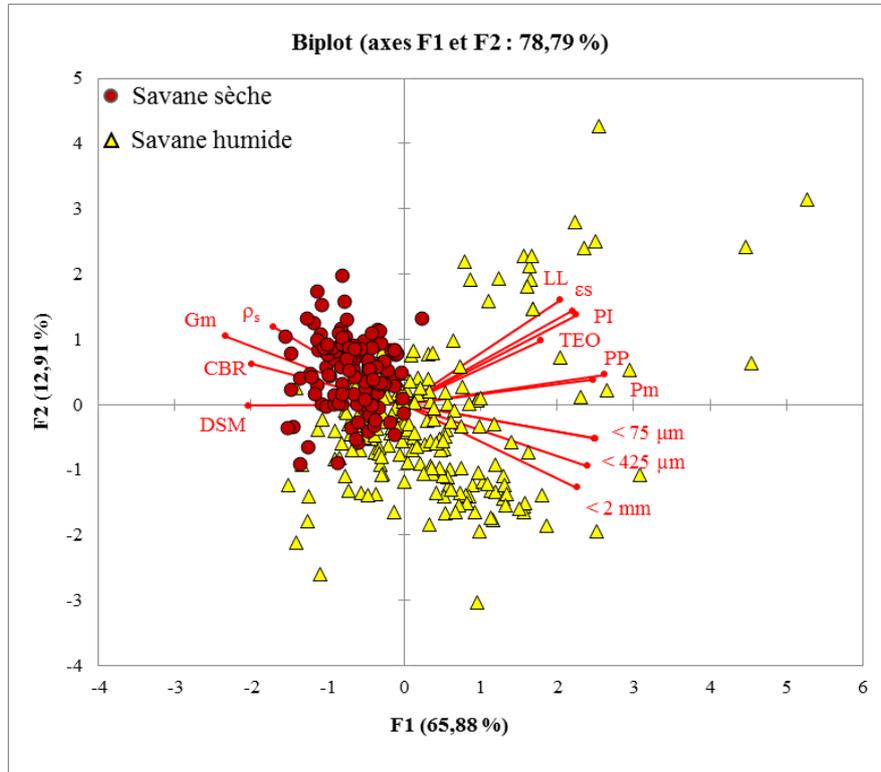


Figure 51. Biplot des variables et des individus des graveleux latéritiques de la zone Obala – Mbandjock

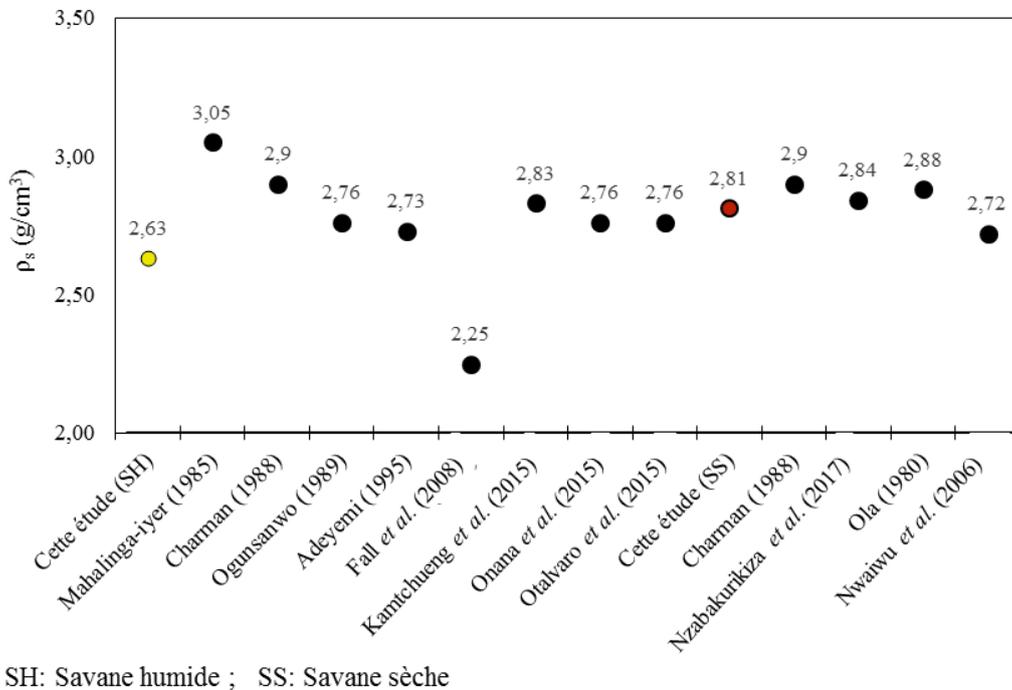
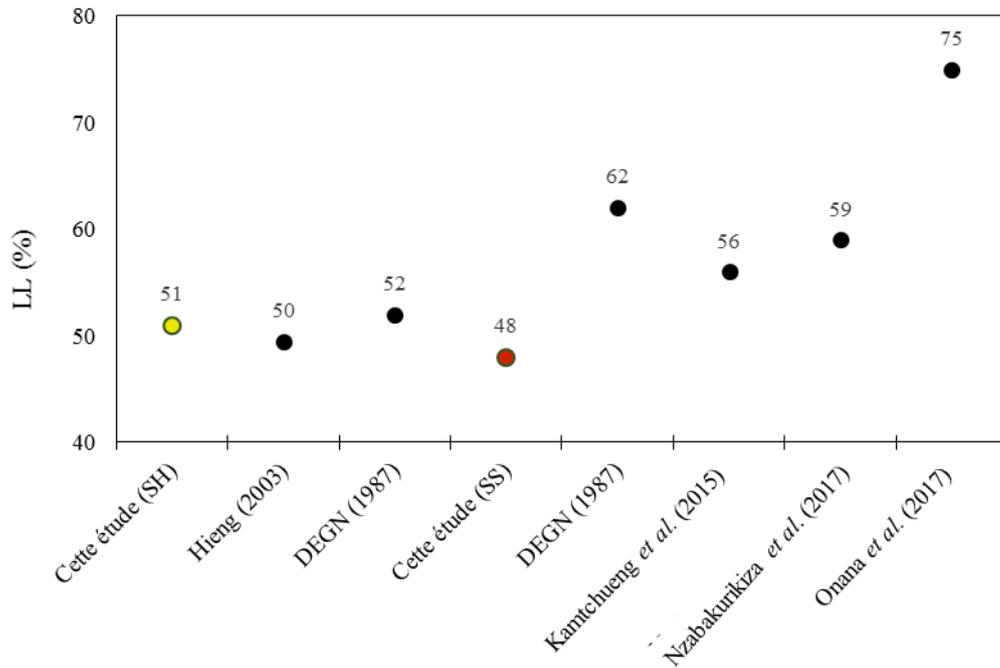


Figure 52. Comparaison des valeurs de masse volumique des grains solides



SH: Savane humide ; SS: Savane sèche

Figure 53. Comparaison des valeurs de limite de liquidité (LL)

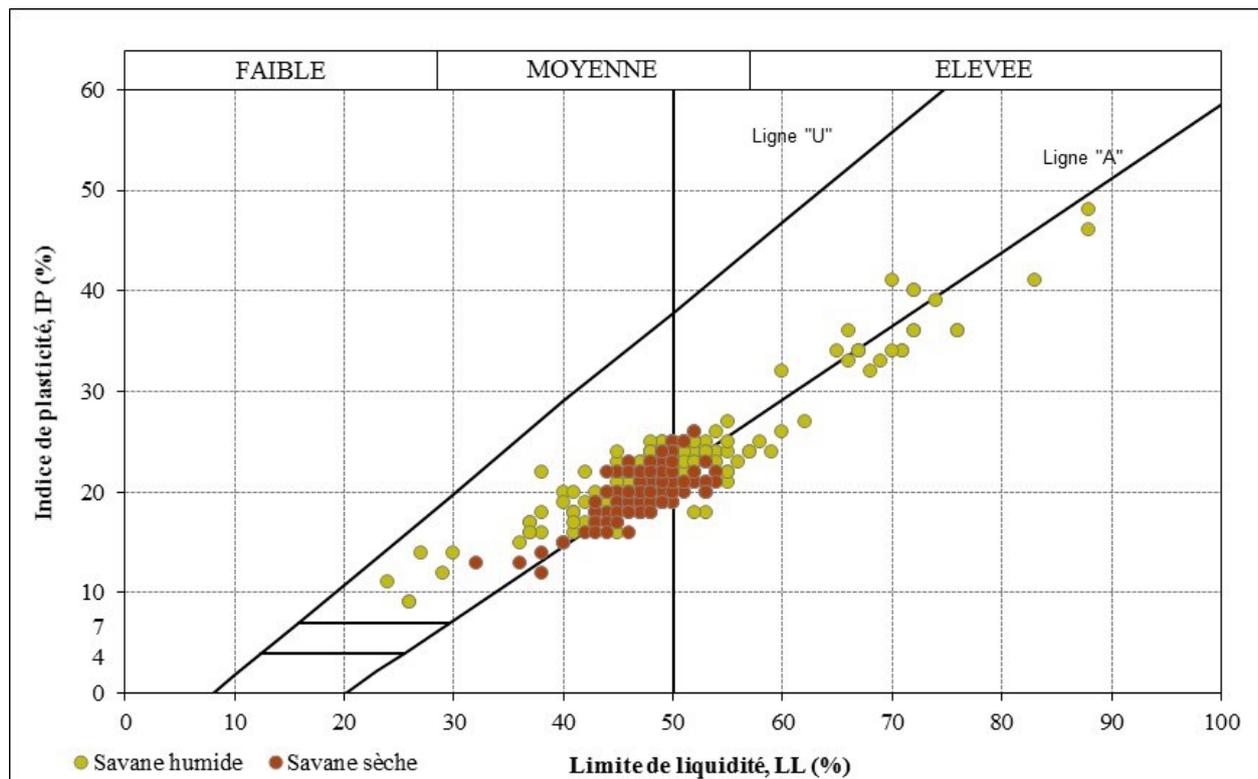


Figure 54. Position des mortiers des graveleux latéritiques dans le diagramme de plasticité de Casagrande

Ces matériaux sont néanmoins plus plastiques que ceux du Burkina (Millogo *et al.*, 2008) et du Sénégal (Fall *et al.*, 2008) dont les valeurs de IP varient entre 15 % et 20 % (Fig. 54). La valeur moyenne d'indice de plasticité obtenue (23 %) est égale à celle obtenue sur les graveleux latéritiques du Nigéria (Adeyemi et Wahab, 2008), mais supérieure à celle de 11 %, obtenue sur les matériaux du Burkina Faso (Millogo *et al.*, 2008) (Fig. 55).

En zone de savane sèche, les valeurs de LL sont de 48 % en moyenne et celles de IP de 20 %. La position des échantillons dans le diagramme de plasticité de Casagrande (Fig. 54) confirme la plasticité moyenne de ces matériaux. Les plages des valeurs de LL (42 – 89 %) et de IP (21 – 55 %) obtenues en zone forestière (DEGN, 1987 ; Kamtchueng *et al.*, 2015) sont supérieures à celle des résultats obtenus. Les valeurs de LL et IP sont cependant inférieures à celles de l'Est (59 % et 28 %) (Nzabakurikiza *et al.*, 2017) et du Sud (75 % et 37 %) (Onana *et al.*, 2017). Cependant, les valeurs de IP sont inférieures à celles obtenues en Côte d'Ivoire (22 %) (Bohi, 2008) (Fig. 55).

### **V.3. Paramètres granulométriques**

Dans la zone de savane humide, les teneurs en squelette, en mortier et en fines sont en accord avec Akpokodje (1986) qui indique les graveleux latéritiques sont caractérisés par des proportions élevées en graviers (35 – 90 %) et, faibles à appréciables en fines (5 – 40 %). La quantité moyenne des fines obtenue dans la zone Obala - NDjoré (27,6 %) est supérieure à celle obtenue au Burkina Faso (10,5 %) en zone de savane tropicale sèche (Millogo *et al.*, 2008).

Dans la zone de savane sèche, le pourcentage des fines, de 20,8 % en moyenne, est inférieur à celui obtenu en zone de savane humide. La valeur de ce paramètre est incluse dans l'intervalle 18,0 – 28,5 %, défini sur les graveleux latéritiques en zone forestière (Onana *et al.*, 2015 ; Kamtchueng *et al.*, 2015). Cependant, les graveleux latéritiques du Sénégal (Fall *et al.*, 2008) possèdent des teneurs modérées en squelette (16,0 à 54,0 %) et en fines (8,0 à 22,0 %).

### **V.4. Paramètres dérivés**

Quatre-vingt-dix-huit pourcent des valeurs de module de plasticité (Pm) en savane humide sont supérieures à 250. En zone de savane sèche, 99 % des échantillons possèdent des valeurs de Pm supérieures à 250. Les graveleux latéritiques de savane sèche présentent des valeurs de Pm plus faibles que ceux de savane humide. La valeur moyenne de 510 obtenue est inférieure à celles de 762 et 1182, obtenues respectivement à l'Est (Nzabakurikiza *et al.*, 2017) et au Sud (Onana *et al.*, 2017).

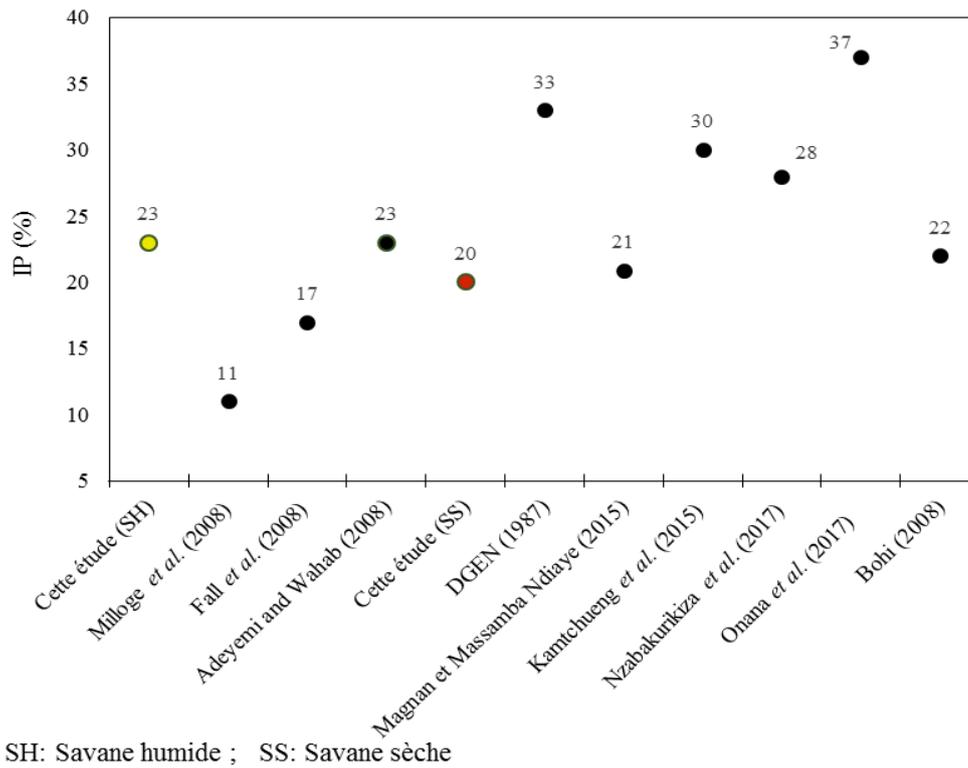


Figure 55. Comparaison des valeurs de l'indice de plasticité IP

Dans les deux zones, savane humide et savane sèche, les valeurs du produit de plasticité (Pp) et du potentiel de gonflement ( $\epsilon_s$ ) sont inférieures à celles des graveleux latéritiques de l'Est (Nzabakurikiza *et al.*, 2017) et du Sud (Onana *et al.*, 2017).

### V.5. Classification

Les matériaux de la zone de savane humide sont des graviers et des sables argileux appartenant à plusieurs classes dans la classification AASHTO, ce résultat est en accord avec Autret (1983). D'après la classification AASHTO, les matériaux étudiés dans la zone de savane sèche sont en majorité des graviers et des sables argileux ou limoneux de la classe A-2-7. Ce résultat est en accord avec les travaux réalisés en zone de plateau sud camerounais (DEGN, 1987 ; Onana *et al.*, 2015).

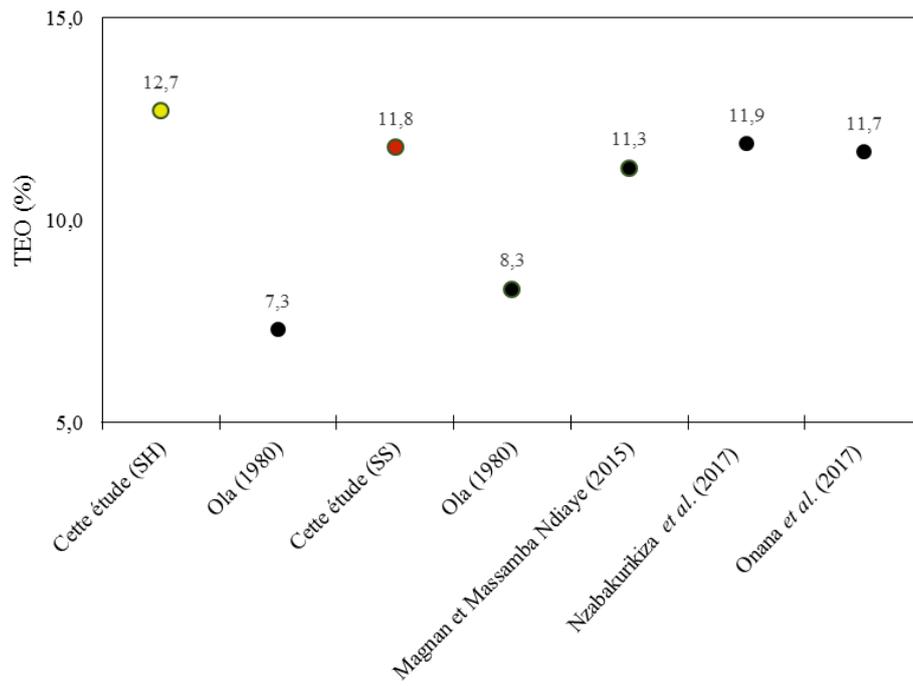
### V.6. Paramètres de compactage

Les valeurs de TEO des graveleux latéritiques des zones de savane humide et de savane sèche sont respectivement de 12,7 et 11,8 % en moyenne. Cette moyenne est similaire à celles obtenues à l'Est (11,9 %) (Nzabakurikiza *et al.*, 2017), au Sud (11,7 %) (Onana *et al.*, 2017) Cameroun (Fig. 56) et au Sénégal (11,3 %) (Magnan et Massamba Ndiaye, 2013). Quatre-vingt-dix-huit pourcent des matériaux de savane humide et 100 % des matériaux de savane sèche possèdent des teneurs en eau supérieures à 8 %. Dans les deux zones, les valeurs moyennes sont supérieures à celles obtenues au Nigéria (Ola, 1980) sur les graveleux latéritiques dérivés des gneiss migmatitiques (Fig. 56).

Les valeurs de DSM en savane humide (1,95) sont plus faibles que celles de savane sèche (2,06). Les moyennes en zone humide sont égales à celles obtenues en zones de savane, 1,99, au Nigeria (Ola, 1980) et, 2,00, au Sénégal (Magnan et Massamba Ndiaye, 2015). La moyenne en zone sèche est semblable à celles obtenues à l'Est (2,06) (Nzabakurikiza *et al.*, 2017) et au Sud (2,07) (Onana *et al.*, 2017) Cameroun (Fig. 57).

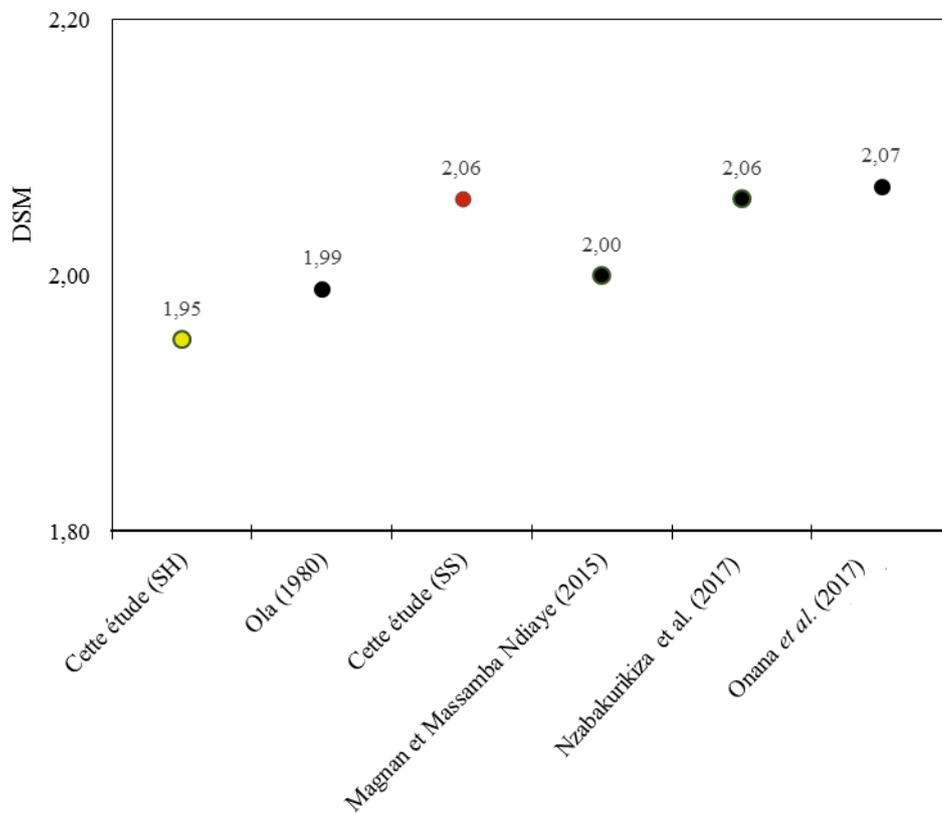
En savane humide, les valeurs de CBR (36 %) sont comparables à celles signalées au Togo ( $57 \pm 19$  %) et au Burkina Faso ( $49 \pm 19$  %) par Bagarre (1990), et inférieures à celles obtenues au Sénégal (60 à 84 %) par Fall *et al.* (2008) (Fig. 58). Ces valeurs de CBR sont également comparables à celles obtenues au Congo ( $39 \pm 24$ ), et en République Centrafricaine ( $44 \pm 15$  %), en zone de savane (Bagarre, 1990) (Fig. 58).

Des plages de correspondance entre les paramètres  $f \times IP$ , CBR, TEO et DSM existent pour les graveleux latéritiques du Cameroun (DEGN, 1987). La plage obtenue pour  $f \times IP$  ne montre pas de concordance avec les valeurs de CBR ( $< 30$  %) mais, s'intègre dans les plages de valeurs de DSM (1,9 – 2,2) et de TEO (8 – 12 %).



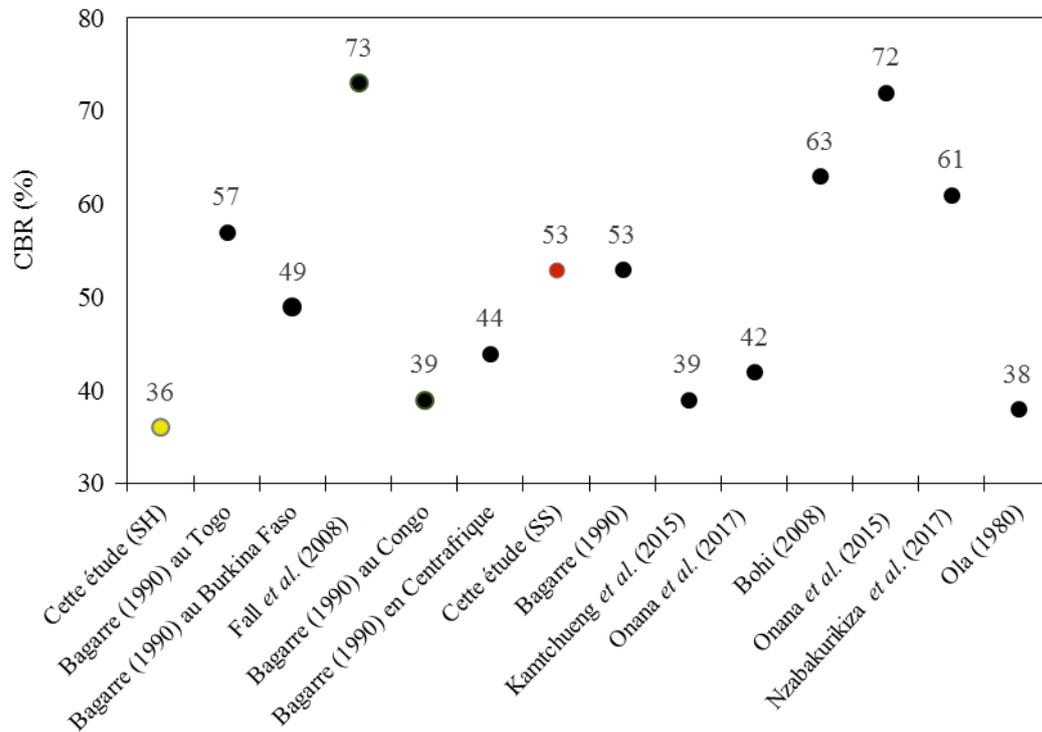
SH: Savane humide ; SS: Savane sèche

Figure 56. Comparaison des valeurs de teneur en eau optimale (TEO)



SH: Savane humide ; SS: Savane sèche

Figure 57. Comparaison des valeurs de densité sèche maximale (DSM)



SH: Savane humide ; SS: Savane sèche

Figure 58. Comparaison des valeurs de CBR

En zone de savane sèche, les valeurs de CBR à 95 % OPM (53 %), sont identiques à celles indiquées par Bagarre (1990) en zone forestière du Cameroun ( $53 \pm 17$ ) et au Sénégal (51 %) (Magnan et Massamba Ndiaye, 2015) (Fig. 58). Ces valeurs de CBR sont supérieures à celles signalées au centre Cameroun (19 à 39 %) (Kamtchueng et al., 2015), en Côte d'Ivoire (11 à 65 %) (Bohi, 2008) et, inférieures à celles (72 % en moyenne) obtenues à l'Est Cameroun (Onana et al., 2015) et au Congo ( $63 \pm 49$  %) par Bagarre (1990). Elles sont également supérieures à celles obtenues en savane (38 %) et en forêt (18 %) au Nigéria (Ola, 1980), sur les graveleux latéritiques développés sur gneiss migmatitiques (Fig. 58).

Les valeurs de Pp obtenues en zone de savane sèche (149 – 634) ne s'accordent pas avec les valeurs de CBR (15 à 40 %) mais, avec celles de DSM (2,00 – 2,25) et de TEO (7 – 10 %) connues (DEGN, 1987).

## CONCLUSION

Les gneiss dans la zone Obala - Batchenga se composent de quartz (45 %), feldspaths (15 %), amphibole (20 %), biotite (10 %), pyroxène (8 %), épidote (1 – 2 %), et de minéraux opaques (< 1%). Ces gneiss présentent des teneurs élevées en SiO<sub>2</sub>, modérées en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, FeO, Na<sub>2</sub>O et MgO . Les teneurs en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et K<sub>2</sub>O sont faibles. Les graveleux latéritiques dérivés des gneiss se localisent en zone de savane humide et en zone de savane sèche. Les graveleux latéritiques de savane humide sont moins épais (~ 0,40 m) que ceux de savane sèche (~1,10 m). Leur couleur est jaune brunâtre (10YR 6/6) à brun (7,5YR 5/8), tandis que ceux de savane sèche sont rouges (2,5YR 5/8). Les nodules sont centimétriques en savane humide alors qu'en savane sèche ils sont centimétriques à pluricentimétriques. Les graveleux latéritiques de savane humide et de savane sèche sont constitués en proportions variables de quartz, kaolinite, goethite, hématite, gibbsite et parfois de muscovite et d'anatase. Leur composition géochimique indique qu'ils sont majoritairement composés de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Sur le plan géotechnique, les gneiss dans la zone d'Obala - Mbandjock, présentent des valeurs de coefficient d'aplatissement moyennes pour toutes les classes. Les valeurs de masse volumique des grains solides, d'équivalent de sable, de résistance à l'usure et de CBR sont élevées, tandis que celles de résistance à la fragmentation sont moyennes à élevées. Les graveleux latéritiques de savane humide se caractérisent par les paramètres de granulométrie et de plasticité et, ceux de savane sèche, par les paramètres physiques et de compactage. Les graveleux latéritiques de savane humide sont moins denses que ceux de savane sèche. Ces graveleux latéritiques de savane humide, relativement plus plastiques, présentent des teneurs en squelette et en fines plus élevées. Ces matériaux de zone humide sont cependant moins portants que les graveleux

latéritiques de savane sèche. L'étude de la variabilité statistique des paramètres géotechniques montre une répartition des graveleux latéritiques en fonction des caractères hydriques. Les paramètres géotechniques sont plus dispersés en savane humide qu'en savane sèche. Des corrélations apparaissent entre les paramètres d'altération, la minéralogie et les paramètres géotechniques. La teneur en quartz est fortement négativement liée aux teneurs en hématite, goethite,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et LOI. Les valeurs de LOI sont positivement corrélées aux teneurs en hématite et goethite. Le squelette ( $<2 \mu\text{m}$ ) est fortement lié au mortier ( $<425 \mu\text{m}$ ) tandis que DSM est corrélé à TEO. Ces principaux faits d'observation et d'analyse sont discutés dans le prochain chapitre.

**CHAPITRE IV**  
**DISCUSSION**

## INTRODUCTION

Le présent chapitre discute les principaux faits d'observation et d'analyse, en quantifiant l'intensité de l'altération dans les graveleux latéritiques et, en mettant en parallèle les caractéristiques génétiques et géotechniques des matériaux étudiés par le biais de corrélations, dans le but d'établir des relations de causalité. Enfin, il précise l'intérêt de ces matériaux en construction routière.

### I. INTENSITE DE L'ALTERATION DANS LES GRAVELEUX LATÉRITIQUES

La qualité des eaux souterraines est primordiale. En effet, l'élimination sélective des alcalins, alcalino-terreux et Si, avec un enrichissement conséquent en Fe et ou Al, est obtenue grâce à une combinaison précise de Eh et pH (Giorgis *et al.*, 2014). Comme les latérites de Balkouin au Burkina Faso, les conditions de formation des graveleux latéritiques de la zone Obala-Mbandjock doivent être en dehors de la courbe d'isosolubilité, où les minéraux d'Al sont plus solubles que les minéraux de Fe ; considérant que le protolithe du substrat rocheux gneissique a un très faible rapport Fe/Al (Fe/Al = 0,14) comme celui du Burkina sur granodiorite (Fe/Al = 0,12). Les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock se forment en milieu faiblement acide (pH = 5,7) et à Eh moyen (Eh = 0,07), c'est-à-dire en milieu acide et réducteur (Fig. 38b). Ce résultat est en concordance avec ceux obtenus sur les sols ferrallitiques en zone de Plateau sud camerounais (Ekodeck, 1984 ; Vallerie, 1995 ; Youta, 1998), mais différent de celui obtenu sur les latérites du Burkina Faso qui se forment en milieu acide et oxydant (Giorgis *et al.*, 2014). Les valeurs de pH des graveleux latéritiques étudiés se situent entre 4,50 et 6,50, ce qui indique la nature acide des roches mères et l'intervention du phénomène de lixiviation (Afeez Adefemi, 2012). L'hydrolyse de la kaolinite dans les graveleux latéritiques de savane humide, avec un taux moindre de gibbsite est probablement favorisée par la diminution du pH. Alternativement, la forte concentration de SiO<sub>2</sub> dissous peut avoir été inhibée par la précipitation de la gibbsite, préférant plutôt l'élimination de Si et Al à des vitesses similaires (Meillon, 1978 in Giorgis *et al.*, 2014).

Associé à CIA, le diagramme A – CN – K (Nesbitt, 1992) de la figure 59 montre que les graveleux latéritiques suivent une évolution parallèle à A – K. Ceci correspond à une évacuation totale de Ca et Na. Cette évacuation est légèrement plus accentuée dans les matériaux de savane sèche. L'enrichissement en K est faible en savane humide et, presque inexistant en savane sèche. Cette évolution est semblable à celles rencontrées dans les graveleux latéritiques développés sur migmatites (Nzabakurikiza *et al.*, 2012), sur chloritoschistes (Onana *et al.*, 2016), sur charnockites (Onana *et al.*, 2017) au Cameroun mais, différente sur basaltes en Inde (Babechuk *et al.*, 2014).

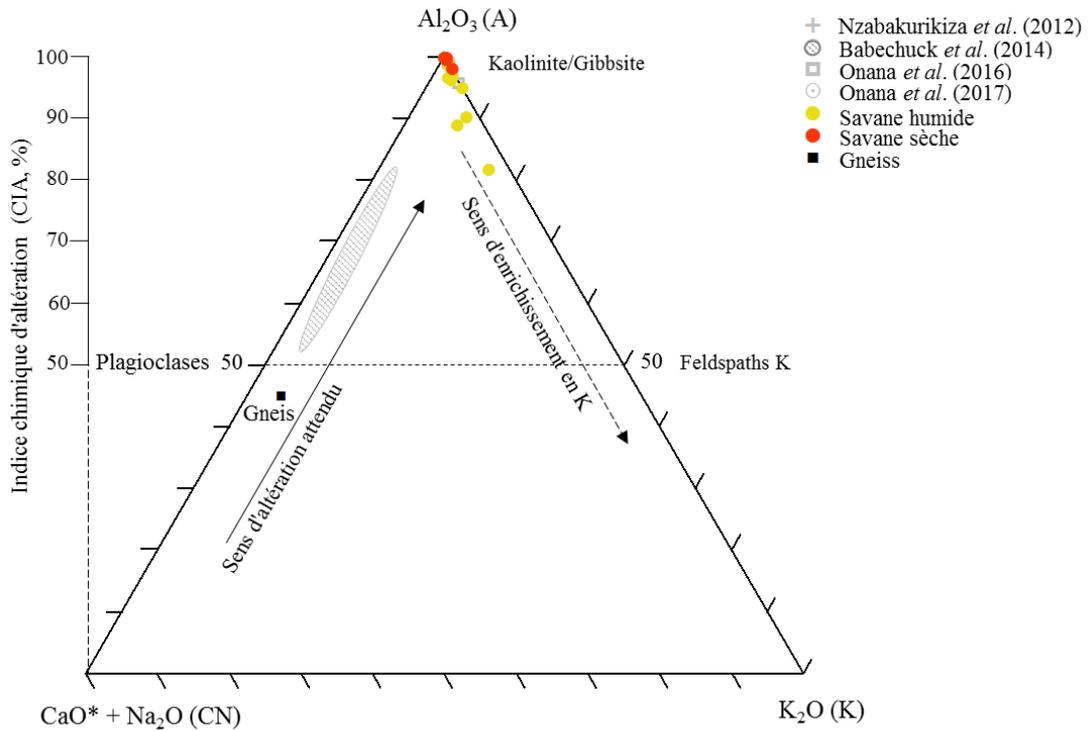


Figure 59. Position comparée des différents degrés d'altération des graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock et ceux des autres auteurs dans le diagramme molaire  $Al_2O_3 - CaO^* + Na_2O - K_2O$  (A - CN - K)

\*Les données des certains auteurs sont masquées par celles de la présente étude au niveau du sommet  $Al_2O_3$

Associés à MIA et IOL, le processus d'altération peut être également quantifié graphiquement dans les systèmes A – Fe – Mg – Ca – Na – K et S – A – F avec l'aide de 02 diagrammes ternaires (Fig. 60 et Fig. 61) selon Nesbitt et Young (1989), Nesbitt (1992) et Babechuk *et al.* (2014). Le diagramme A – L – F (Fig. 60) montre une diminution très importante des éléments labiles et une latéritisation globalement modérée à forte des graveleux latéritiques étudiés. Le diagramme SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Fe<sub>2</sub>O<sub>3(T)</sub> (SAF), permet de différencier les matériaux kaolinisés, latéritisés et bauxitisés (Schellmann, 1981, 1986). Ce diagramme SAF (Fig. 61) montre que les graveleux latéritiques de savane humide sont kaolinisés à modérément latéritisés alors que, ceux de savane sèche, sont modérément à fortement latéritisés. Cette évolution du processus de latéritisation est la même que celle rencontrée dans les migmatites (Nzabakurikiza *et al.*, 2012), charnockites (Onana *et al.*, 2017) et chloritoschistes (Onana *et al.*, 2016) en zone de Plateau sud camerounais. Les basaltes au Cameroun présentent les plus bas niveaux de latéritisation, tandis que ceux sur granodiorites de Burkina Faso (Giorgis *et al.*, 2014) et ceux sur roches carbonatées de Chine (Xiao Wei *et al.*, 2014) montrent des niveaux élevés de latéritisation.. Les graveleux latéritiques de savane sèche sont plus ferrugineux qu'alumineux tandis que, ceux de savane humide, présentent une évolution contraire. La position des graveleux latéritiques étudiés dans le diagramme AF – CNK – M (Fig. 62), montre que la dissolution des feldspaths (pertes en Ca, Na et K) est proportionnelle à celle des minéraux mafiques (perte en Mg). Ce fait est corroboré par les valeurs égales de CIA et MIA.

La teneur en matières volatiles d'un matériau, représentée par la perte au feu (LOI), est par définition proportionnelle au taux de minéraux hydratés, en plus des carbonates, du carbone organique, du soufre, moins les gains de masse provenant de l'oxydation des éléments pendant l'analyse par fluorescence X. La perte au feu est un paramètre utile pour évaluer le degré d'altération (Duzgoren-Aydin et Aydin, 2003), bien que la minéralogie contrôle en fin de compte le degré d'hydratation (Duzgoren-Aydin *et al.*, 2002).

Les diagrammes binaires et indices d'altération CIA, MIA<sub>(O)</sub> ou IOL, en fonction de LOI (Fig. 63 et 64), permettent de mieux appréhender les transformations minéralogiques dans les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock. Le diagramme binaire LOI - CIA (Fig. 63) montre une corrélation positive entre LOI et CIA ( $r = 0,72$ ) dans les gneiss et les graveleux latéritiques étudiés.

Les graveleux latéritiques de savane sèche présentent des teneurs en kaolinite (minéral plus hydraté que la gibbsite) élevées ; la goethite et l'hématite y sont également plus abondants. Ce cortège minéralogique est en relation avec LOI. Le processus prédominant dans ces graveleux latéritiques étudiés est la latéritisation. Cette latérisation est plus poussée dans les matériaux de savane sèche (Fig. 64).

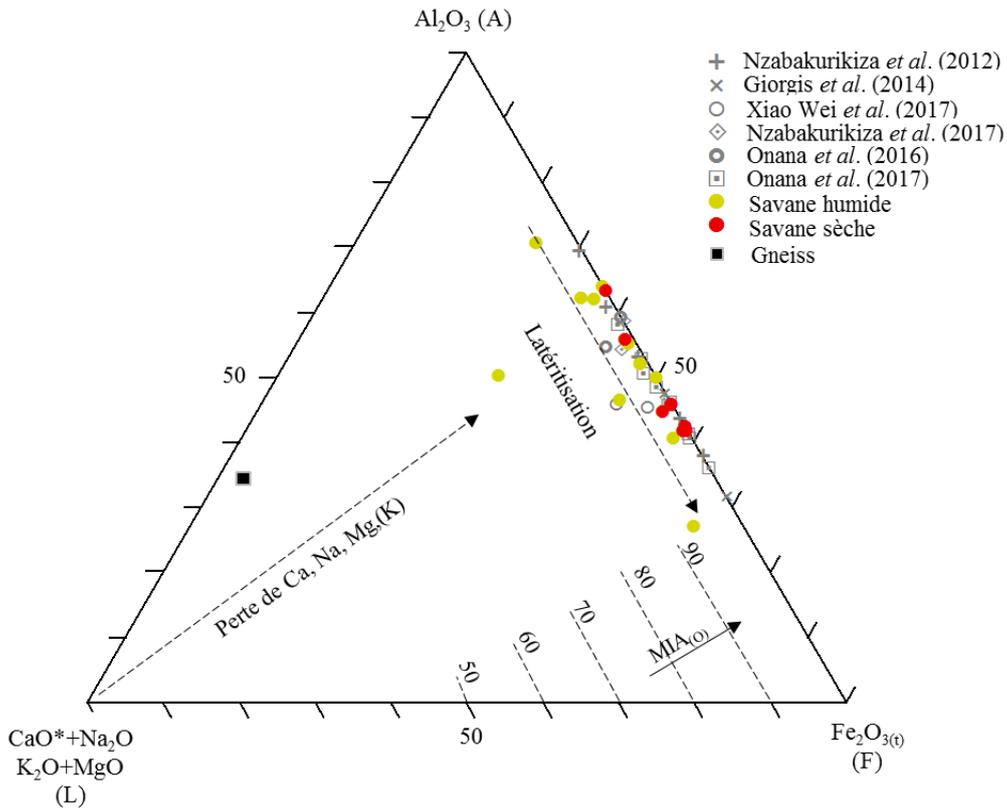


Figure 60. Position comparée des différents degrés d'altération des graveaux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock et ceux des autres auteurs dans le diagramme molaire A – L – F

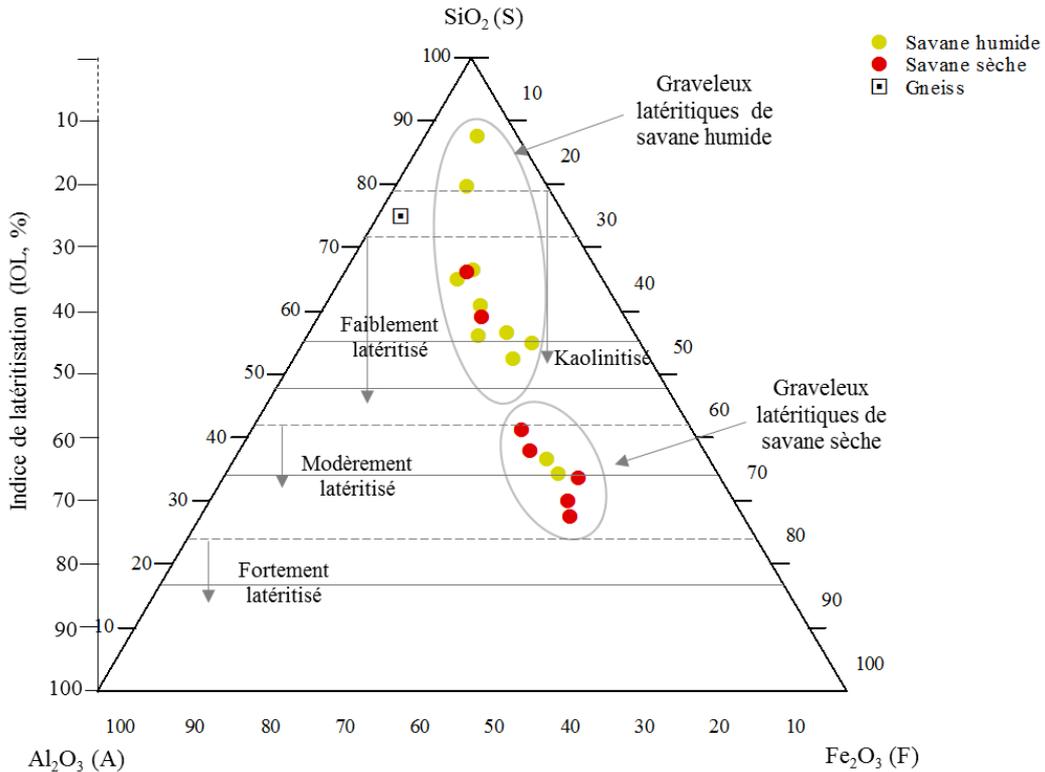


Figure 61. Illustration des différents degrés d'altération des graveaux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock dans le diagramme ternaire  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$  (SAF)

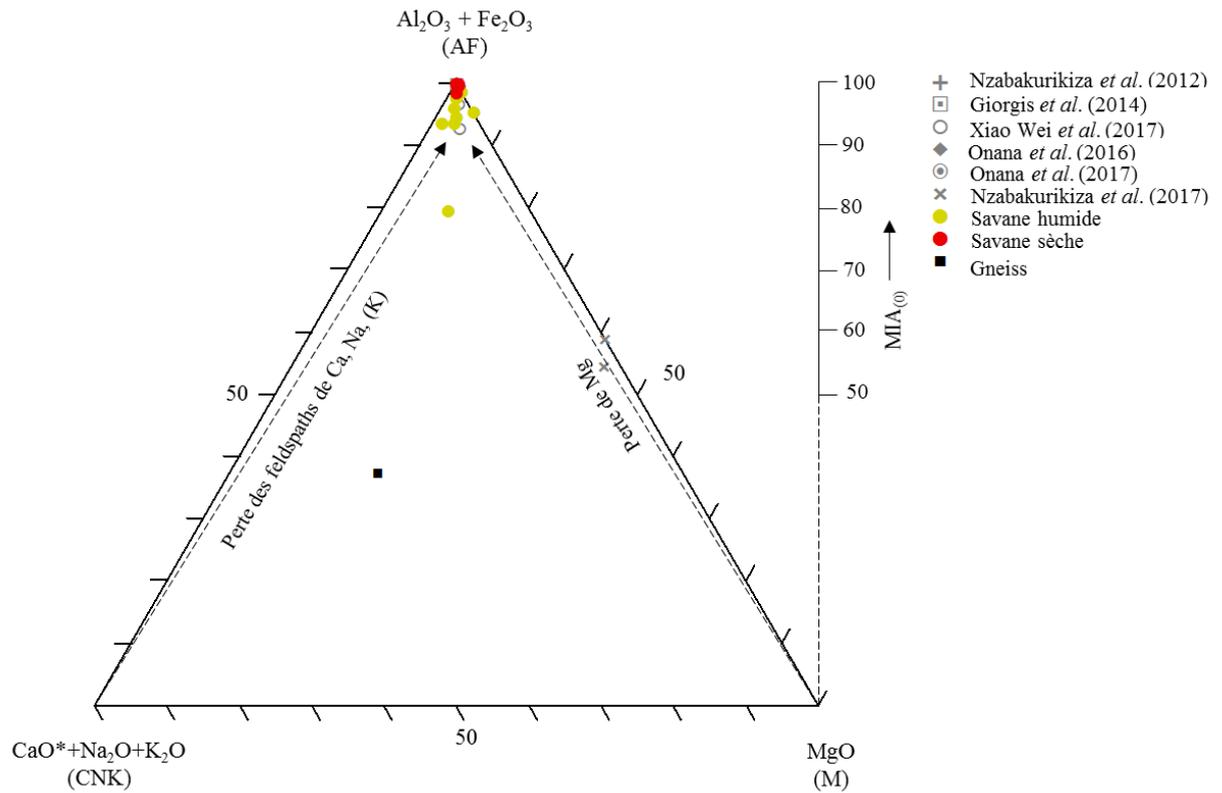


Figure 62. Illustration comparée des différents degrés d'altération des graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock dans le diagramme AF – CNK – M

\*Les données des certains auteurs sont masquées par celles de la présente étude au niveau du sommet  $Al_2O_3$

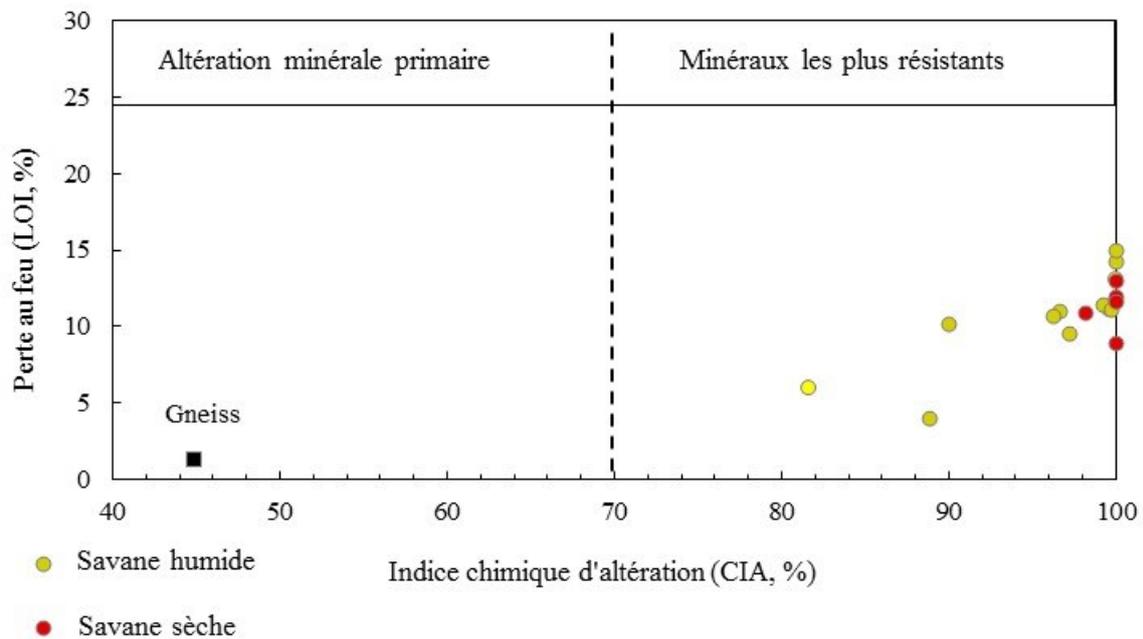


Figure 63. Covariation de la perte au feu (LOI) et de l'indice chimique d'altération (CIA) dans les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock

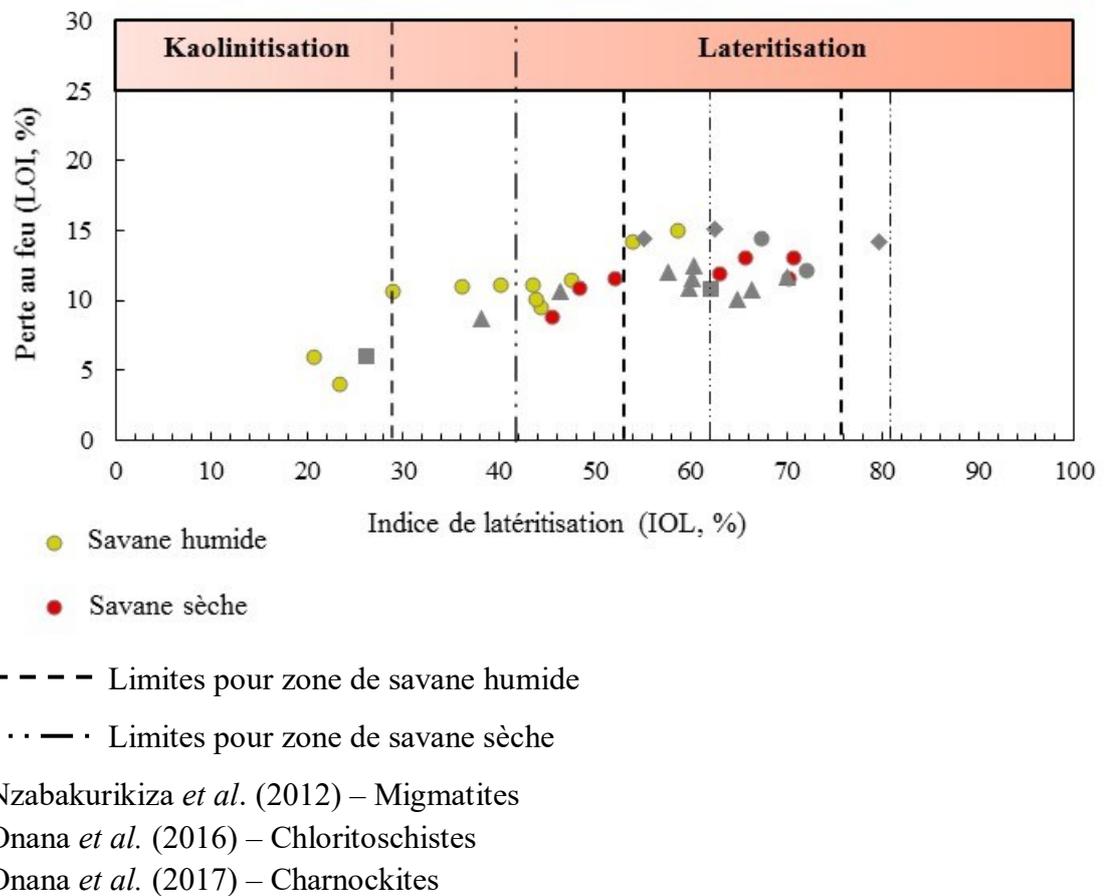


Figure 64. Covariation comparée perte au feu (LOI) – Indice de latérisation (IOL) dans les graveleux latéritiques de la zone Obala – Mbandjock

Des résultats similaires ont été obtenus sur les graveleux latéritiques développés sur migmatites, chloritoschistes et charnockites en Plateau sud camerounais (Nzabakurikiza *et al.*, 2012 ; Onana *et al.*, 2016) ; Onana *et al.*, 2017). Les graveleux latéritiques fortement latéritisés contiennent des quantités importantes de goethite et d'hématite, mais sont appauvris en quartz et kaolinite (Akpokodje et Hudec, 1994). Ce constat n'est pas vérifié dans les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock où, les teneurs en kaolinite sont en moyenne plus élevées en savane sèche où la latéritisation est plus intense.

Les diagrammes altérologiques triangulaires (Fig. 65 et 66) permettent de préciser certains faits. Le diagramme triangulaire L – I – C (Fig. 65) montre que les graveleux latéritiques sont sujets au duo lixiviation - induration ; la lixiviation prenant faiblement le pas sur l'induration. Ce fait concorde avec les résultats obtenus sur les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes (Onana, 2010 ; Ntouala, 2014) en zone de Plateau sud camerounais. L'évolution d'ensemble du milieu d'altération, que présente le diagramme A – I – C (Fig. 66) montre que le duo altération – induration prévaut dans les graveleux latéritiques étudiés ; l'altération prévalent sur l'induration. Ce fait concorde avec les résultats obtenus dans Plateau sud camerounais (Onana, 2010 ; Ntouala, 2014). Les diagrammes carrés des figures 67 et 68 traduisent le caractère modéré à franc de la ferrallitisation dans les graveleux de la zone Obala - Mbandjock. Les graveleux latéritiques étudiés sont fortement à très fortement ferrugineux (Fig. 67), ceux de savane sèche étant plus ferrugineux que ceux de la zone humide. Les graveleux latéritiques dans la zone humide sont faiblement alumineux et, ceux de savane sèche, moyennement alumineux (Fig. 67). Les points représentatifs de ces matériaux sont localisés dans les domaines de la monosiallisation et de l'allitisation, avec une prédominance de l'allitisation. Les libérations des oxyhydroxydes de fer sont à l'intérieur de leurs zones respectives de cuirassement potentiel. Ce fait est en rapport avec les cuirasses ferrugineuses observables sur le terrain dans la zone d'étude. La figure 68, qui caractérise l'évolution d'ensemble montre que l'altération est moyenne (< 50 %) dans les graveleux latéritiques de savane humide et, forte à très forte (50 – 85 %) dans les graveleux de savane sèche.

## II. TYPES DE GRAVELEUX LATÉRIQUES DANS LA ZONE D'ETUDE

Les types de graveleux latéritiques qui existent dans la zone d'Obala - Batchenga peuvent être déterminés par la méthode statistique de classification ascendante hiérarchique (CAH). L'idée en utilisant la CAH est de constituer des groupes « naturels » de manière à ce que les individus dans un même groupe se ressemblent, et les individus dans des groupes différents soient dissemblables. La méthode de dissimilarité utilisée est la distance de Bray et Curtis (1957).

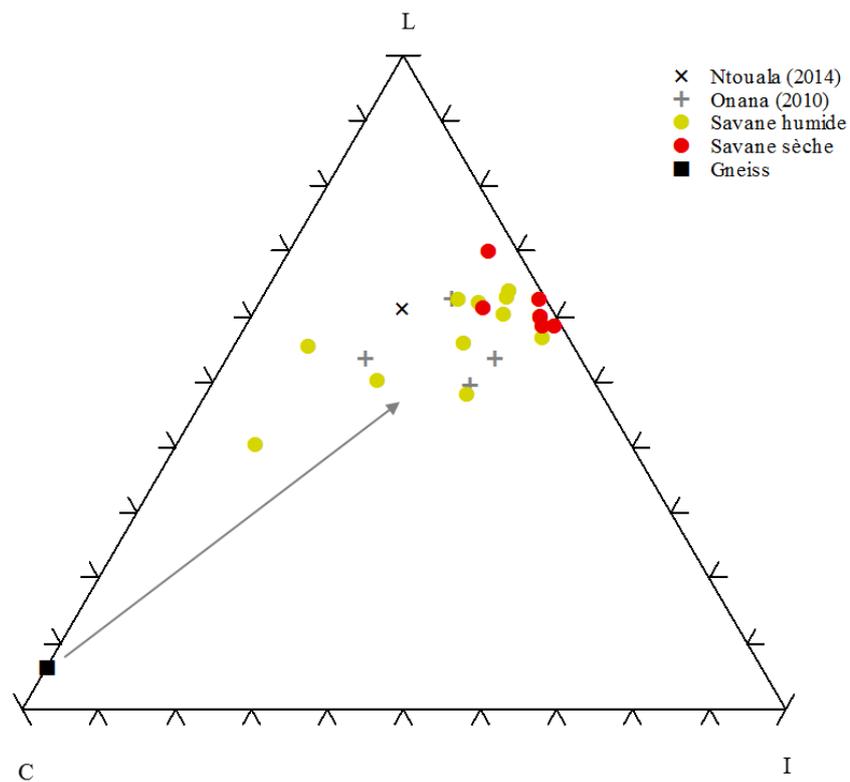


Figure 65. Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les graveleux latéritiques sur gneiss à amphibole et épidote, d'après le diagramme L–I–C d'Ekodeck et Kamgang (2002, 2011) ; L : Lixiviation ; I : Induration ; C : Confinement.

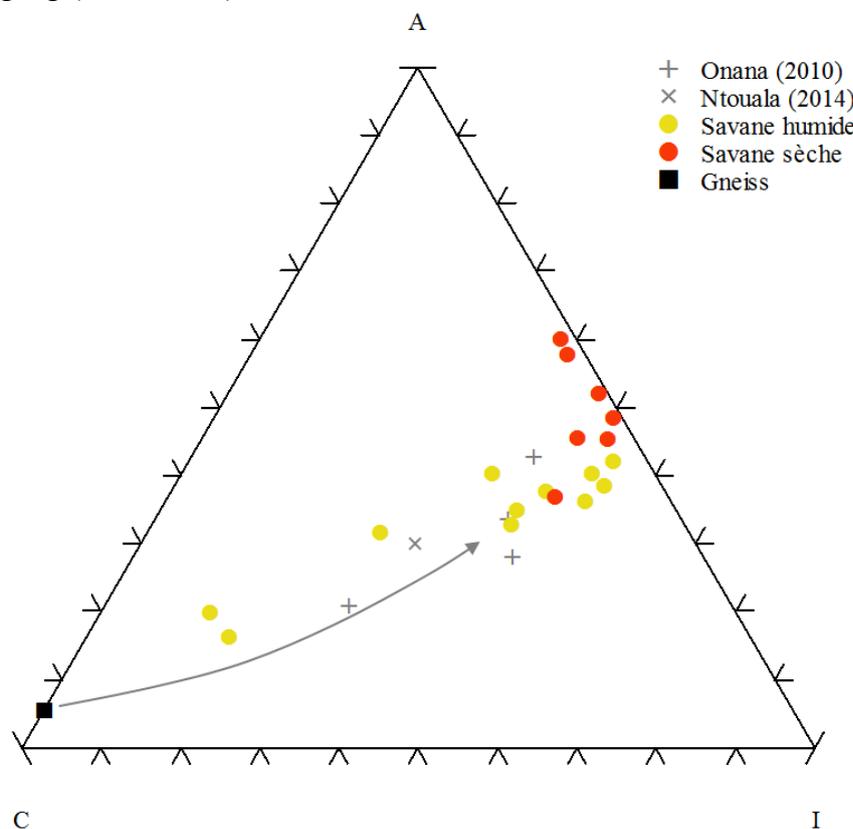


Figure 66. Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les graveleux latéritiques sur gneiss à amphibole et épidote d'après le diagramme A – I – C d'Ekodeck et Kamgang (2002, 2011) ; A : Altération ; I : Induration ; C : Confinement.

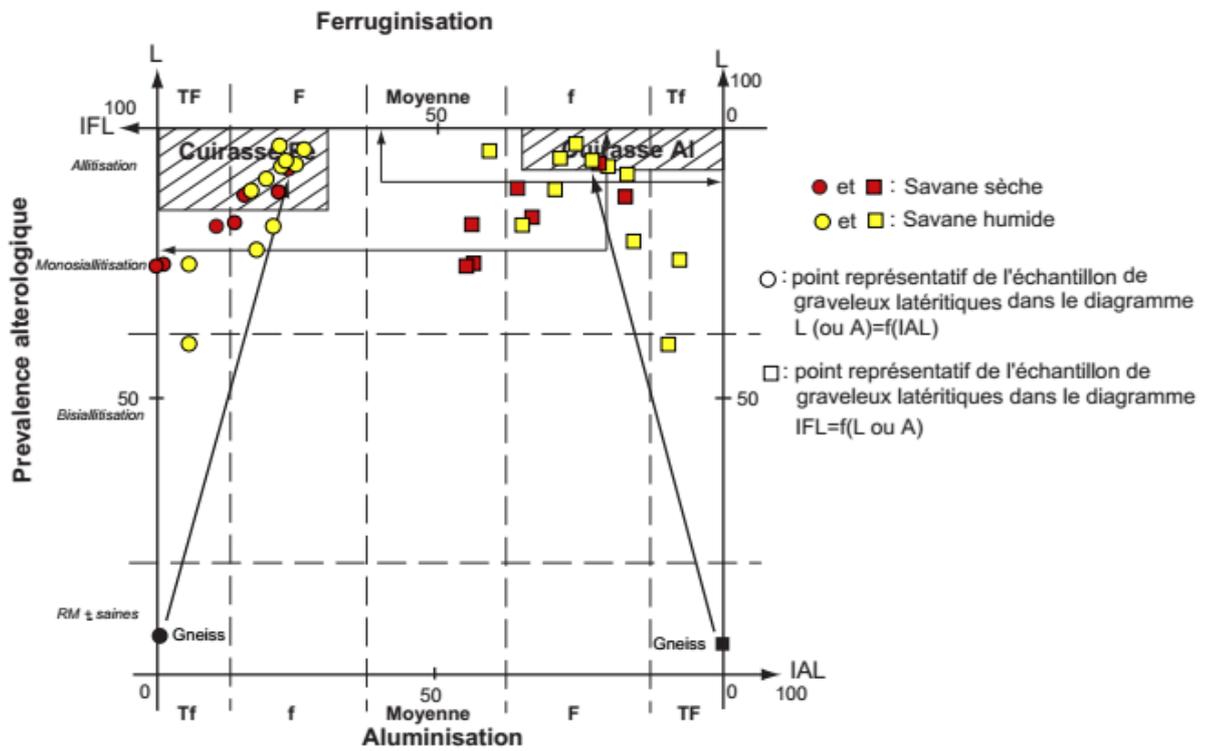


Figure 67. Caractérisation de l'importance des facteurs pédogénétiques dans les graveaux latéritiques sur gneiss à amphibole et épidote de la zone Obala - Mbandjock, d'après le diagramme carré d'Ekodeck et Kamgang (2002, 2011), en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; Lixiviation potentielle

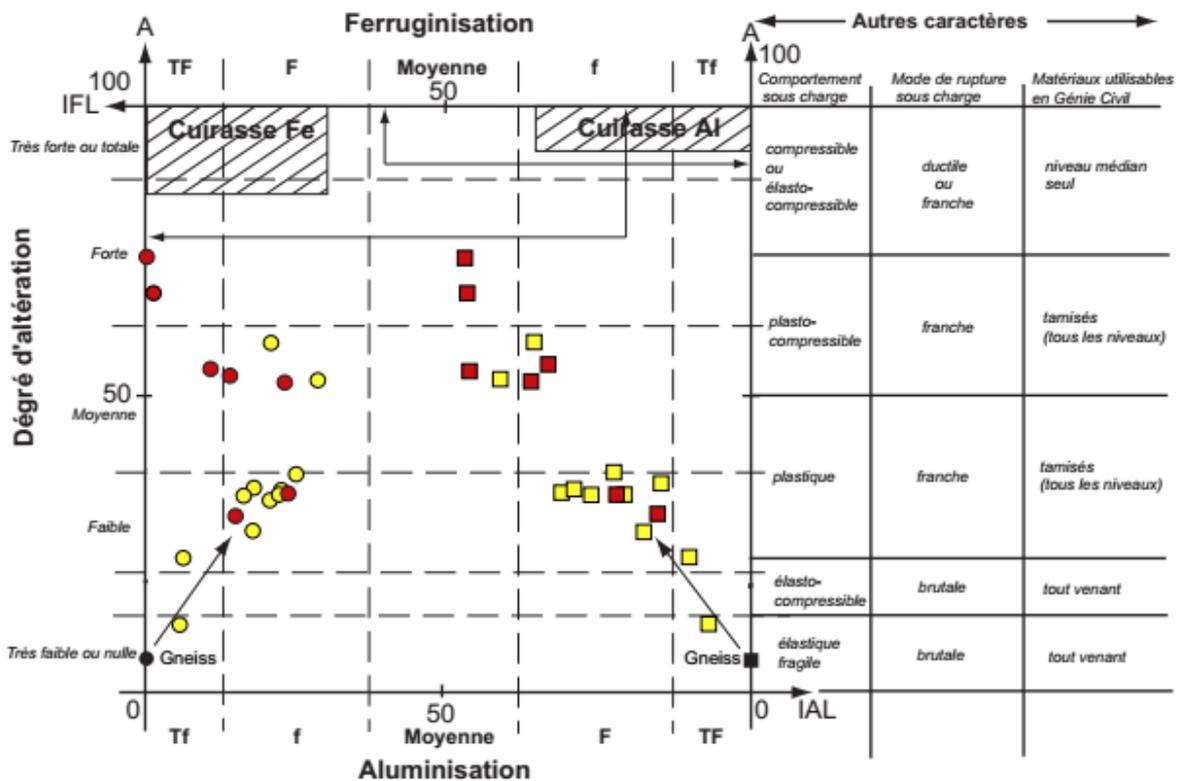


Figure 68. Caractérisation de l'importance de l'altération dans les graveaux latéritiques sur gneiss à amphibole et épidote de la zone Obala - Mbandjock, d'après le diagramme carré d'Ekodeck et Kamgang (2002, 2011), en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; Altération

et la méthode d'agrégation, celle de Ward (1963). Comme l'ACP, le dendrogramme (Fig. 69) fait également apparaître l'existence de 03 classes de graveleux latéritiques avec de caractéristiques géotechniques définies (Tab. 27).

La première classe comprend uniquement les individus de la savane (87 matériaux), la deuxième classe se compose de plus d'individus de savane sèche que ceux de savane humide (65 matériaux contre 40) et, la troisième classe comprend en majorité plus d'individus de la savane humide que de savane sèche (72 contre 57 matériaux).

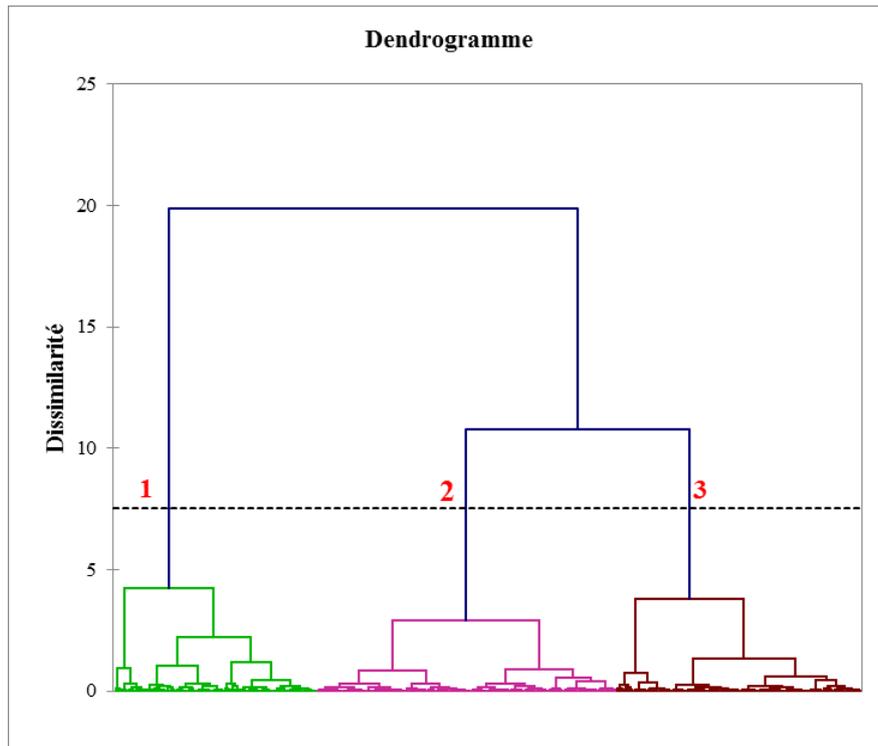
En général, le fait d'observer 02 classes avec à la fois les individus de savane sèche et de savane humide, laisse présumer la présence d'une zone de transition. C'est donc la troisième classe, celle qui présente le plus faible écart entre les deux populations, qui doit être considérée comme classe de la zone de transition potentiellement déterminable sur le terrain (Fig. 70). Une esquisse de carte géotechnique a été réalisée en partant de ce principe (Fig 71). Le diagramme des niveaux obtenu (Fig. 72) avec une courbe non rectiligne, confirme la bonne qualité de la classification réalisée.

### **III. LIENS ENTRE PARAMETRES PETROLOGIQUES ET PARAMETRES GEOTECHNIQUES**

Plusieurs travaux ont relevé la nécessité de la prise en compte des corrélations entre les paramètres génétiques et les caractéristiques géotechniques des graveleux latéritiques (Bagarre, 1990 ; Adeyemi, 1995 ; Nkoumou *et al.*, 2004 ; Millogo *et al.*, 2008; Nzabakurikiza *et al.*, 2012 ; Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Onana *et al.*, 2015 ; Onana *et al.*, 2017). L'altération influence les propriétés du sol ; par exemple la taille et la morphologie des particules, leur granularité, leur minéralogie, influencent son comportement mécanique (Rocchi et Coop, 2016).

#### **III.1. Corrélations entre paramètres géochimiques et propriétés géotechniques**

Il a été clairement démontré en géologie par l'altérologie interposée que le comportement géotechnique des matériaux et, celui des graveleux latéritiques en particulier, dépend de leur origine et de leur mode de formation (Ekodeck, 1984). Les données pétrologiques fournissent donc une bonne idée de la nature des matériaux sur les chantiers de construction de routes, ports, voies ferrées, pistes d'atterrissage et barrages. Ces données, lorsqu'elles sont quantifiées, peuvent être utilisées pour vérifier la validité des résultats des tests géotechniques (Ekodeck, 1984).



\*Les numéros des classes sont en rouges

1 : savane humide ; 2 : savane sèche ; 3 : savane mixte ou intermédiaire

Figure 69. Dendrogramme des graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock

Tableau 27. Principales caractéristiques des graveleux latéritiques par classes dans la zone d'Obala - Mbandjock

Classe	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	d < 2 mm (Squelette) %	d < 425 $\mu$ m (Mortier) %	d < 75 $\mu$ m (Fines) %	LL (%)	IP (%)	Gm	Pm	Pp	$\epsilon_s$	TEO (%)	DSM	CBR (%)
1	2,60	68,4	42,1	32,9	56	27	1,633	1104	915	0,019	14,1	1,9	31
2	2,77	33,8	23,1	18,9	45	19	2,229	412	345	0,008	11,1	2,1	51
3	2,71	44,0	29,3	24,0	48	22	2,017	632	511	0,011	12,1	2,0	44

d : diamètre

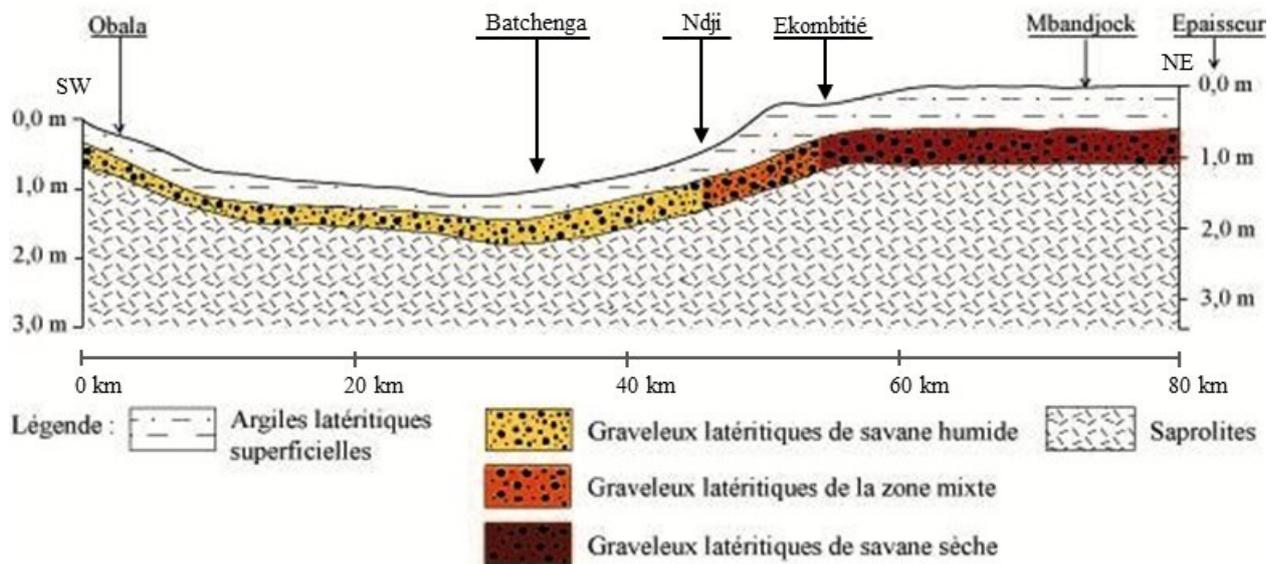


Figure 70. Typologie de graveleux latéritiques dans la zone Obala - Mbandjock

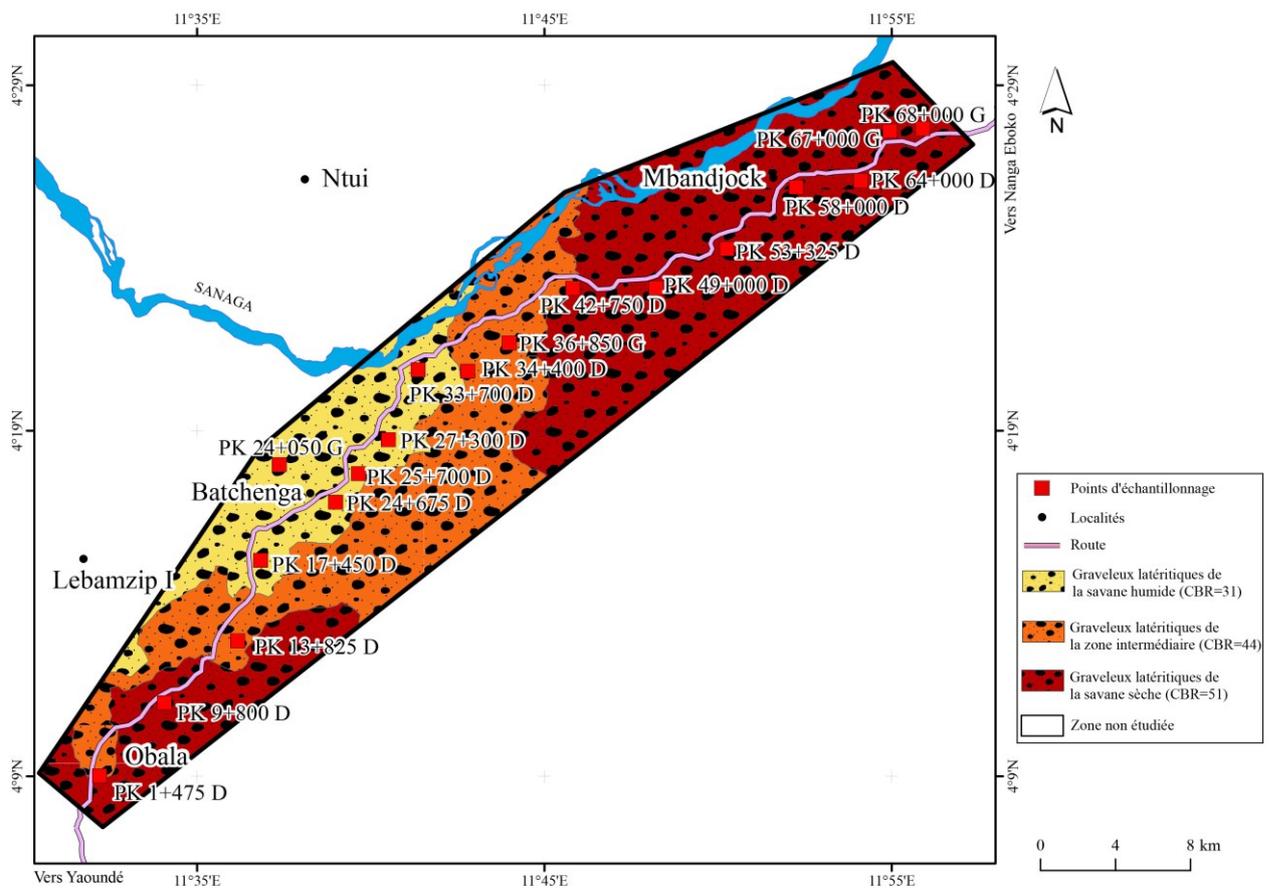


Figure 71. Esquisse de la carte géotechnique des graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock

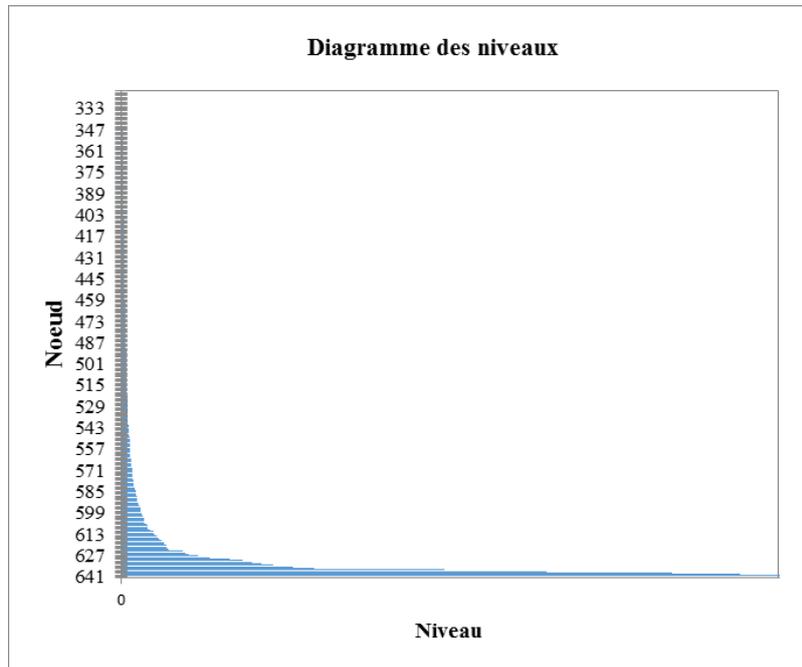


Figure 72. Diagramme des niveaux

Le tableau 28 présente la matrice de corrélation obtenue entre les données chimiques et les paramètres géotechniques. Il en ressort que la masse volumique des grains solides ( $\rho_s$ ) est positivement corrélée à  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,58),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,68) et au taux de sesquioxides ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,70$ ). Les graveleux latéritiques de savane sèche possèdent des valeurs de masse volumique des grains solides plus élevées (2,81 contre 2,63  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) et des teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  plus élevées (31,41 % contre 20,31 %) que ceux de savane humide. Ce constat est en accord avec les travaux qui ont démontré que la masse volumique des grains solides est positivement corrélée à la teneur en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et, pour certains, inversement corrélée à la teneur en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Fall *et al.*, 1997 ; Sunil et Krishnappa, 2012 ; Adebesei *et al.*, 2013 ; Ayodele et Falade, 2016). Cependant, les graveleux latéritiques étudiés font ressortir une corrélation positive entre la masse volumique des grains solides ( $\rho_s$ ) et la teneur en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,58), et une corrélation négative avec la teneur en  $\text{SiO}_2$  (-0,64). Les valeurs élevées de masse volumique des grains solides sont obtenues dans les particules grossières à cause de la concentration élevée en oxydes de fer dans les concrétions ou les pisolites (Fall *et al.*, 1997). Dans le même ordre d'idée, la masse volumique des grains solides dépend de la taille des particules ainsi que de la teneur en fer, en outre, plus la fraction d'argile et la concentration en alumine sont grandes, plus faible est ce paramètre (Ayodele et Falade, 2016). Les graveleux latéritiques de savane humide sont moins grossiers et ont des teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  plus faibles que ceux de la zone sèche ; ceci justifie les valeurs élevées de masse volumique des grains solides obtenues en savane sèche.

$\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sont tous les deux négativement corrélés aux paramètres granulométriques <2 mm (-0,68 et -0,67, respectivement), <425  $\mu\text{m}$  (-0,67 et -0,66, respectivement), <75  $\mu\text{m}$  (-0,58 et -0,50, respectivement) et sables (-0,72 et -0,64, respectivement).

Il en est de même pour la perte au feu (LOI) qui présente une relation inverse avec le mortier (<425  $\mu\text{m}$ ). Par contre, le taux de gravier est positivement corrélé à ces 02 paramètres (0,70 et 0,65, respectivement).

La densité sèche maximale (DSM) est positivement corrélée à  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,47) et à  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,49). Les teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  des latérites ont des conséquences sur les caractéristiques géotechniques, notamment la dureté (Ferreira et Correira, 1991 in Fall, 1993). L'oxyde  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  joue un rôle majeur dans le développement des graveleux latéritiques concrétionnaires et donc sur leurs propriétés physico-mécaniques (Akpokodje et Hudec, 1994). Plus l'enrichissement en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  est grand, plus la céméntation est grande et plus les valeurs de volumique des grains solides, densité apparente, résistance et durabilité sont élevées. Les graveleux latéritiques de savane sèche sont plus durs que ceux de savane humide.

Tableau 28. Matrice de corrélation entre composants chimiques et propriétés géotechniques dans les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock

Variables	$\gamma_s$	< 2 mm	< 425 $\mu\text{m}$	< 75 $\mu\text{m}$	Sables	Graviers	LL	PI	Gm	Pm	PP	$\varepsilon_s$	TEO	MDD	CBR	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
$\rho_s$	<b>1</b>																				
< 2 mm		<b>1,00</b>																			
< 425 $\mu\text{m}$			<b>1,00</b>																		
< 75 $\mu\text{m}$				<b>1,00</b>																	
Sables					<b>1,00</b>																
Graviers						<b>1,00</b>															
LL							<b>1,00</b>														
PI								<b>1,00</b>													
Gm									<b>1,00</b>												
Pm										<b>1,00</b>											
PP											<b>1,00</b>										
$\varepsilon_s$												<b>1,00</b>									
TEO													<b>1,00</b>								
MDD														<b>1,00</b>							
CBR															<b>1,00</b>						
SiO <sub>2</sub>	<b>-0,64</b>	<b>0,67</b>	<b>0,68</b>	<b>0,57</b>	<b>0,66</b>	<b>-0,66</b>	0,16	0,23	-0,48	0,34	0,36	0,19	0,18	-0,40	<b>-0,50</b>	<b>1,00</b>					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>0,58</b>	<b>-0,68</b>	<b>-0,66</b>	<b>-0,58</b>	<b>-0,72</b>	<b>0,70</b>	-0,18	-0,23	0,45	-0,31	-0,36	-0,18	-0,21	0,45	<b>0,54</b>		<b>1,00</b>				
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>0,68</b>	<b>-0,67</b>	<b>-0,67</b>	<b>-0,56</b>	<b>-0,64</b>	<b>0,65</b>	-0,17	-0,24	<b>0,51</b>	-0,36	-0,36	-0,22	-0,20	0,47	<b>0,51</b>			<b>1,00</b>			
LOI	0,39	-0,46	<b>-0,52</b>	-0,44	<b>-0,47</b>	<b>0,47</b>	-0,16	-0,17	0,24	-0,22	-0,27	-0,11	-0,13	0,19	0,33				<b>1,00</b>		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>0,70</b>	<b>-0,71</b>	<b>-0,71</b>	<b>-0,60</b>	<b>-0,70</b>	<b>0,71</b>	-0,18	-0,25	<b>0,53</b>	-0,37	-0,39	-0,22	-0,22	<b>0,49</b>	<b>0,55</b>						<b>1,00</b>

$N = 18 ; p\text{-value} = 5 \%$

\* Les valeurs en gras indiquent les corrélations significatives.

Le CBR est positivement corrélé à la teneur en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,54),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,51) et  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$  (0,55) et, négativement à  $\text{SiO}_2$  (-0,50). Le CBR baisse avec le taux de  $\text{SiO}_2$  (Nkoumou *et al.*, 2004). Par conséquent, il est donc plus élevé en savane sèche où, la teneur en  $\text{SiO}_2$  est plus faible.

Le module de classement Gm est lié à la teneur en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,51) et à celle de  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$  (0,53). Aucune relation significative n'a été établie entre les paramètres chimiques et les paramètres de plasticité.

Les matériaux avec des teneurs élevées en sesquioxydes ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) et, faibles en  $\text{SiO}_2$  se sont mal comportés en corps de chaussée par rapport à ceux qui avaient des teneurs élevées en  $\text{SiO}_2$  et, faibles en  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ . Il a été émis l'hypothèse de déterminer les teneurs en silicates ou en  $\text{SiO}_2$  à partir desquelles des graveleux latéritiques peuvent être utilisables ou non (Tockol, 1993). Les graveleux latéritiques de savane sèche étudiés présentent des teneurs élevées en sesquioxydes et, faibles en  $\text{SiO}_2$  par rapport à ceux de savane humide. Cependant, contrairement au constat de Tockol (1993), ce sont les graveleux de savane sèche qui possèdent les meilleures caractéristiques géotechniques.

L'induration, qui implique la précipitation de la goethite, est influencée par la composition et l'étendue de la cristallisation des composants dans le sol : plus la teneur en sesquioxydes est élevée, plus l'induration est importante. En d'autres termes, la dureté augmente à mesure que la teneur en fer augmente ; les latérites les plus dures sont aussi les moins hydratées (Podwojewski et Bourdon, 1996). Les graveleux latéritiques de savane sèche présentent des valeurs de LOI et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , relativement plus élevées que celles de savane sèche. Elles sont par conséquent plus indurées.

### **III.2. Corrélations entre paramètres d'altération chimique et paramètres géotechniques**

La masse volumique des grains solides (ou le poids volumique des grains solides) est un paramètre des sols, qui est étroitement lié à leur minéralogie (Oyediran et Durojaiye, 2011). Une relation positive a donc été établie entre les poids (ou masses) volumiques et le degré de latéritisation (Magnien, 1966 ; Gidigas, 1976). Le compactage des concrétions latéritiques affecte les caractéristiques du matériau (Cisse *et al.*, 2016). Ainsi, le degré d'émiettement, transformation du matériau lors du compactage, dépend du degré de latéritisation et des caractéristiques physiques des particules. Les relations entre paramètres d'altération chimique et propriétés géotechniques sont consignées dans les tableaux 29 et 30.

L'indice chimique d'altération CIA est positivement lié à la masse volumique des grains solides (0,52) et à la teneur en graviers (0,57) et, négativement aux paramètres granulométriques,

Tableau 29. Matrice de corrélation entre paramètres d'altération et propriétés géotechniques dans les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock

	$\rho_s$	< 2 mm	< 425 $\mu\text{m}$	< 75 $\mu\text{m}$	Sables	Graviers	LL	PI	Gm	Pm	PP	$\varepsilon_s$	TEO	MDD	CBR	CIA	MIA <sub>[0]</sub>	IOL	
$\rho_s$	<b>1,00</b>																		
<2 mm		<b>1,00</b>																	
<425 $\mu\text{m}$			<b>1,00</b>																
<75 $\mu\text{m}$				<b>1,00</b>															
Sables					<b>1,00</b>														
Graviers						<b>1,00</b>													
LL							<b>1,00</b>												
PI								<b>1,00</b>											
Gm									<b>1,00</b>										
Pm										<b>1,00</b>									
PP											<b>1,00</b>								
$\varepsilon_s$												<b>1,00</b>							
TEO													<b>1,00</b>						
MDD														<b>1,00</b>					
CBR															<b>1,00</b>				
CIA	<b>0,52</b>	<b>-0,56</b>	<b>-0,62</b>	<b>-0,57</b>	<b>-0,53</b>	<b>0,57</b>	-0,38	-0,38	0,36	-0,43	-0,45	-0,33	-0,41	<b>0,49</b>	0,38	<b>1,00</b>			
MIA <sub>[0]</sub>	0,42	<b>-0,50</b>	<b>-0,59</b>	<b>-0,50</b>	-0,46	<b>0,51</b>	-0,34	-0,31	0,33	-0,40	-0,38	-0,27	-0,42	0,46	0,27	<b>0,95</b>	<b>1,00</b>		
IOL	<b>0,73</b>	<b>-0,81</b>	<b>-0,83</b>	<b>-0,69</b>	<b>-0,77</b>	<b>0,81</b>	-0,28	-0,36	<b>0,66</b>	<b>-0,51</b>	<b>-0,49</b>	-0,34	-0,34	<b>0,58</b>	<b>0,62</b>	<b>0,72</b>	<b>0,73</b>	<b>1,00</b>	

$N = 18 ; p\text{-value} = 5 \%$

Tableau 30. Matrice de corrélation entre paramètres d'altération normatifs et propriétés géotechniques dans les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock

	$\rho_s$	<2 mm	<425 $\mu\text{m}$	< 75 $\mu\text{m}$	Sables	Graviers	LL	PI	Gm	Pm	PP	$\varepsilon_s$	TEO	MDD	CBR	DVRAR	IRLP	IRIP	IRCP	
$\rho_s$	<b>1,00</b>																			
<2 mm		<b>1,00</b>																		
<425 $\mu\text{m}$			<b>1,00</b>																	
<75 $\mu\text{m}$				<b>1,00</b>																
Sables					<b>1,00</b>															
Graviers						<b>1,00</b>														
LL							<b>1,00</b>													
PI								<b>1,00</b>												
Gm									<b>1,00</b>											
Pm										<b>1,00</b>										
PP											<b>1,00</b>									
$\varepsilon_s$												<b>1,00</b>								
TEO													<b>1,00</b>							
MDD														<b>1,00</b>						
CBR															<b>1,00</b>					
DVRAR	<b>0,72</b>	<b>-0,73</b>	<b>-0,73</b>	<b>-0,62</b>	<b>-0,71</b>	<b>0,72</b>	-0,15	-0,24	<b>0,58</b>	-0,38	-0,38	-0,22	-0,22	0,47	<b>0,57</b>	<b>1,00</b>				
IRLP	-0,15	0,07	-0,01	-0,05	0,03	-0,05	-0,27	-0,16	-0,25	-0,05	-0,11	-0,09	-0,18	0,05	-0,09	-0,08	<b>1,00</b>			
IRIP	0,37	-0,44	<b>-0,50</b>	-0,42	-0,45	0,44	-0,22	-0,21	0,21	-0,25	-0,29	-0,16	-0,16	0,24	0,30	0,69	0,57	<b>1,00</b>		
IRCP	<b>-0,58</b>	<b>0,62</b>	<b>0,62</b>	<b>0,60</b>	<b>0,62</b>	<b>-0,63</b>	0,40	0,40	-0,42	0,45	0,47	0,35	0,41	<b>-0,62</b>	-0,46	-0,57	-0,63	-0,73	<b>1,00</b>	

$N = 18 ; p\text{-value} = 5 \%$

squelette (-0,56), mortier (-0,62), fines (-0,57) et sables (-0,53). L'indice de latérisation IOL est positivement lié à  $\rho_s$  (0,73), à la teneur en graviers (0,81), à Gm (0,66), à DSM (0,58) et, fait rare, à CBR (0,62).

Les valeurs de CIA et IOL sont plus élevées en savane sèche qu'en savane humide. Les graveleux latéritiques de savane sèche, plus altérés et plus latéritisés présentent de meilleures caractéristiques géotechniques. Les valeurs de masse volumique des grains solides observées en savane sèche (2,81 g/cm<sup>3</sup>) et en savane humide (2,63 g/cm<sup>3</sup>) indiquent que les graveleux latéritiques étudiés ont subi un degré appréciable de latérisation et donc un enrichissement relatif en oxydes de fer ferrique ( $r_{IOL - \text{graviers}} = 0,81$  ;  $r_{IOL - \rho_s} = 0,73$ ) par rapport à aux oxydes d'aluminium.

Les valeurs de DVRAR sont positivement liées à celles de  $\rho_s$  (0,72), graviers (0,72), Gm (0,58) et CBR (0,57). Ce paramètre présente des corrélations négatives avec les paramètres granulométriques, <2 mm (-0,73), <425  $\mu\text{m}$  (-0,73), sables (-0,71) et <75  $\mu\text{m}$  (-0,60).

Les valeurs de IRCP présentent une corrélation positive avec le squelette (0,62), le mortier (0,62), les fines (0,60) et les sables (0,62) et, une corrélation négative avec  $\rho_s$  (-0,58), la teneur en graviers (-0,63) et DSM (-0,62).

Les valeurs de IRLP ne présentent aucune corrélation significative avec un paramètre géotechnique et celles de IRIP sont négativement liées au mortier (-0,50).

### III.3. Corrélations entre composition minéralogique et propriétés géotechniques

Le comportement géotechnique des sols est fonction de 02 principaux facteurs, la granularité et la composition minéralogique (Erguler, 2016). La matrice de corrélation (Tab. 31) montre que la masse volumique des grains solides est négativement corrélée à la teneur en quartz (-0,62).

Les roches mères riches en quartz donnent des graveleux latéritiques à masses volumiques des grains solides faibles (Adeyemi, 1995). Cependant, les gneiss dans la zone d'Obala - Mbandjock possèdent des proportions de quartz inférieures à celles des charnockites (Onana *et al.*, 2017) (30,0 % contre 43,8 %) mais, présentent des valeurs de masse volumique des grains solides similaires (2,78 et 2,80 g/cm<sup>3</sup>). La masse volumique des grains solides est également fortement corrélée à la teneur en hématite (0,72) et, modérément, à celle de goethite (0,48). Ceci est conforme aux phénomènes observés dans les graveleux latéritiques au Nigéria et au Sénégal (Ayodele et Falade, 2016 ; Fall *et al.*, 1997).

La teneur en fines est négativement corrélée à celles de kaolinite (-0,52) et de goethite (-0,56) et, positivement liée à la teneur en quartz (0,57). La densité sèche maximale est (-0,56)

Tableau 31. Matrice de corrélation entre données minéralogiques semi-quantitatives et paramètres géotechniques dans les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock

Variables	$\gamma_s$	<75 $\mu\text{m}$	LL	PI	TEO	MDD	CBR	Quartz	Kaolinite	Goethite	Hématite	Gibbsite	Muscovite
$\gamma_s$	<b>1,00</b>												
< 75 $\mu\text{m}$		<b>1,00</b>											
LL			<b>1,00</b>										
PI				<b>1,00</b>									
TEO					<b>1,00</b>								
MDD						<b>1,00</b>							
CBR							<b>1,00</b>						
Quartz	<b>-0,62</b>	<b>0,57</b>	0,14	0,20	0,17	-0,40	<b>-0,50</b>	<b>1,00</b>					
Kaolinite	<b>0,55</b>	<b>-0,52</b>	-0,35	-0,39	-0,32	<b>0,54</b>	0,42	-0,51	<b>1,00</b>				
Goethite	<b>0,72</b>	<b>-0,56</b>	-0,13	-0,23	-0,28	<b>0,58</b>	<b>0,54</b>	-0,77	0,44	<b>1,00</b>			
Hématite	0,48	-0,44	-0,16	-0,20	-0,09	0,27	0,36	-0,88	0,41	0,56	<b>1,00</b>		
Gibbsite	0,49	-0,47	-0,39	-0,41	-0,26	0,46	0,40	-0,43	0,96	0,28	0,44	<b>1,00</b>	
Muscovite	0,23	-0,40	-0,09	-0,10	-0,22	0,26	0,32	-0,63	0,29	0,24	0,44	0,22	<b>1,00</b>

$N = 18 ; p\text{-value} = 5 \%$

et, positivement liée à la teneur en quartz (0,57). La densité sèche maximale est positivement liée à la kaolinite (0,54) et à la goethite (0,58) (Tab. 31). Les valeurs de DSM, de kaolinite et de goethite sont plus élevées en savane sèche qu'en savane humide. La valeur de DSM (2,25) et la teneur en hématite (18,9 %) sont plus élevées en savane sèche qu'en savane humide (1,95 et 13,5 %, respectivement). Les valeurs de DSM augmentent donc avec les teneurs en hématite (Nkougou *et al.*, 2004). Les valeurs de CBR sont fortement positivement corrélées aux teneurs en goethite (0,54), faiblement à celles d'hématite et, fortement négativement corrélées à celles en quartz (-0,50) (Tab. 31). La valeur de CBR croît avec le taux d'hématite (Nkougou *et al.*, 2004). Les graveleux latéritiques de savane sèche ont des teneurs en hématite plus élevées que ceux de savane humide. Ils possèdent aussi des valeurs de CBR les plus élevées. L'hématite augmente les valeurs de CBR des graveleux latéritiques (Nkougou *et al.*, 2004). Ce résultat est en accord avec les travaux sur les graveleux latéritiques de l'Est Cameroun (Onana *et al.*, 2015) où néanmoins, les valeurs d'hématite (24 %), de DSM (2,78) et de CBR (72 %) sont plus élevées que celles obtenues dans la zone Obala - Mbandjock. La présence simultanée de kaolinite et de muscovite d'une part, et les teneurs en argiles d'autre part, ont un effet négatif sur les paramètres de compactage (Onana *et al.*, 2017). La muscovite est plus fréquente et ses teneurs, plus élevées en savane humide, qu'en savane sèche. Ceci explique également la médiocrité des propriétés géotechniques des graveleux de savane humide.

## **IV. INTERETS DES MATERIAUX EN CONSTRUCTION ROUTIERE**

### **IV.1. Gneiss**

Les granulats gneissiques de la classe granulaire 0/31,5 sont utilisables en couche de base d'après fuseau de spécification (DEGN, 1988) de la figure 72. Ils sont aussi utilisables en grave bitume puisqu'ils s'intègrent dans le fuseau de spécification pour grave bitume (CEBTP, 1984) (Fig. 73).

Les valeurs du coefficient d'aplatissement (CA) de ces granulats gneissiques sont inférieures à 20 % ; ce qui indique que leurs formes permettent leur utilisation en couches de chaussée. Les valeurs de l'équivalent de sable des gneiss dans la zone d'Obala - Mbandjock sont supérieures à 40 %, pour toutes les classes granulaires. Ces granulats sont donc tous utilisables en couches de chaussée (DEGN, 1988 ; CEBTP, 1984). Il en est de même de la valeur de MDE (11 %), obtenue pour les granulats 0/31,5, qui permet de recommander l'utilisation de ces matériaux en couche de base pour les trafics T1 à T3. Le coefficient de friabilité des sables (FS) dont la valeur moyenne est de 40 %, est inférieur à 60 %, valeur limite pour une utilisation en construction routière. Les valeurs limites recommandées de LA sont de

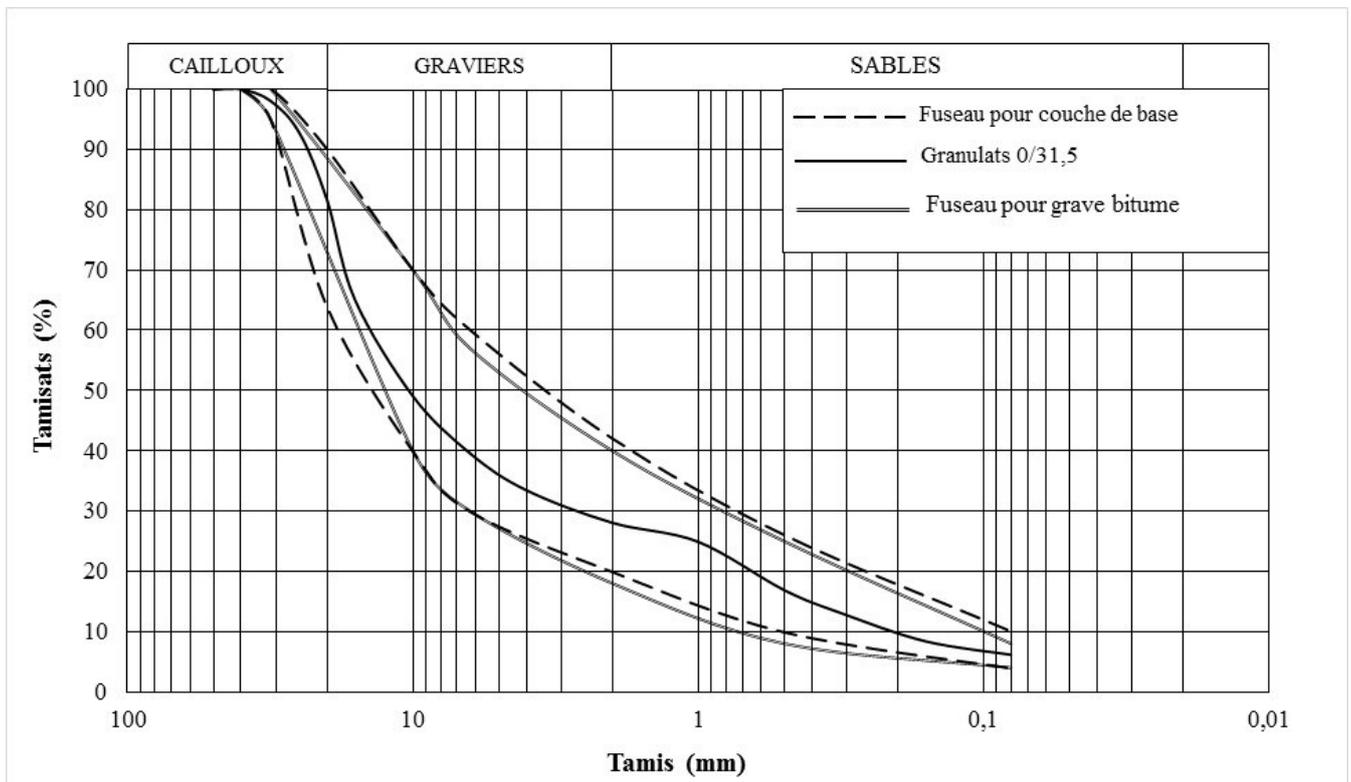


Figure 73. Courbes granulométriques de la fraction 0/31,5 des gneiss à amphibole et épidote de la zone Obala - Mbandjock à l'intérieur des fuseaux de spécification pour couche de base et grave bitume (CEBTP, 1984)

45 % pour les trafics T1/T3 (essieux de 8 à 10 tonnes), et 30 % pour les trafics T4/T5 (essieu de 13 tonnes) (CEBTP, 1984). Les valeurs de LA des gneiss dans la zone Obala - Mbandjock sont inférieures ou égales à 32 %. Ceci indique que ces granulats sont utilisables en couche de base et en couche de roulement pour les trafics T1 à T3 voire T4. Les valeurs de CBR (102 %) pour la classe 0/31,5 confirment que ces granulats gneissiques sont utilisables en couche de base pour les trafics T1 à T3. Sur le plan rhéologique, les gneiss de la zone d'Obala - Mbandjock ont un comportement élastique fragile et une rupture brutale sous charge et, peuvent être utilisés comme tout-venant de concassage, sur la couche de base ou sur la couche de roulement des routes revêtues, ainsi que pour les enduits superficiels et les bétons bitumineux (Cf. Fig. 68). Ces gneiss présentent un comportement identique à celui des migmatites de l'Est Cameroun (Nzabakurikiza *et al.*, 2012).

### III.2. Graveleux latéritiques de savane humide

Les graveleux latéritiques ont de mauvaises performances si leur valeur de masse volumique des grains solides est inférieure à  $2,58 \text{ g/cm}^3$  et des performances excellentes, si cette valeur est supérieure à  $2,85 \text{ g/cm}^3$  (Nwaiwu *et al.*, 2006). Soixante-dix-huit pourcent des matériaux étudiés présentent des valeurs de masse volumique des grains solides supérieures à  $2,58 \text{ g/cm}^3$  et, 0,5 % de valeurs supérieures à  $2,85 \text{ g/cm}^3$ . On peut donc prédire un comportement moyen de ces matériaux en construction routière. La position des courbes maximale, moyenne et minimale des graveleux latéritiques de savane humide dans les fuseaux de spécification du CEBTP (1984) montrent que ces matériaux sont utilisables en couche de fondation (Fig. 74). Pour une utilisation des graveleux latéritiques en construction routière, les spécifications de plasticité (CEBTP, 1984) stipulent que les valeurs de IP doivent être inférieures à 25 % pour les couches de fondation et, inférieures à 15 %, pour les couches de base.

La valeur moyenne de IP (23 %), proche de la limite 25 %, suggère la possibilité d'une utilisation des graveleux latéritiques de la zone de savane humide en couche de fondation (Tab. 32). Les valeurs du module de classement  $G_m$  sont supérieures à 1,5. Ces valeurs indiquent que les graveleux de la zone de savane humide sont utilisables en couche de fondation pour les routes à fort trafic et, dans une moindre mesure, en couche de base, pour les routes mineures ( $< 0,3 \times 10^6$  ESE, Essieux Standards Equivalents). Quarante-vingt-dix-huit pourcent des valeurs de  $P_m$  sont supérieures à 250, les graveleux latéritiques de savane humide satisfont pleinement aux critères d'utilisation en couche de base pour les routes rurales et les routes urbaines avec un trafic de  $0,3 - 1,0 \times 10^6$  ESE, ainsi que pour les couches

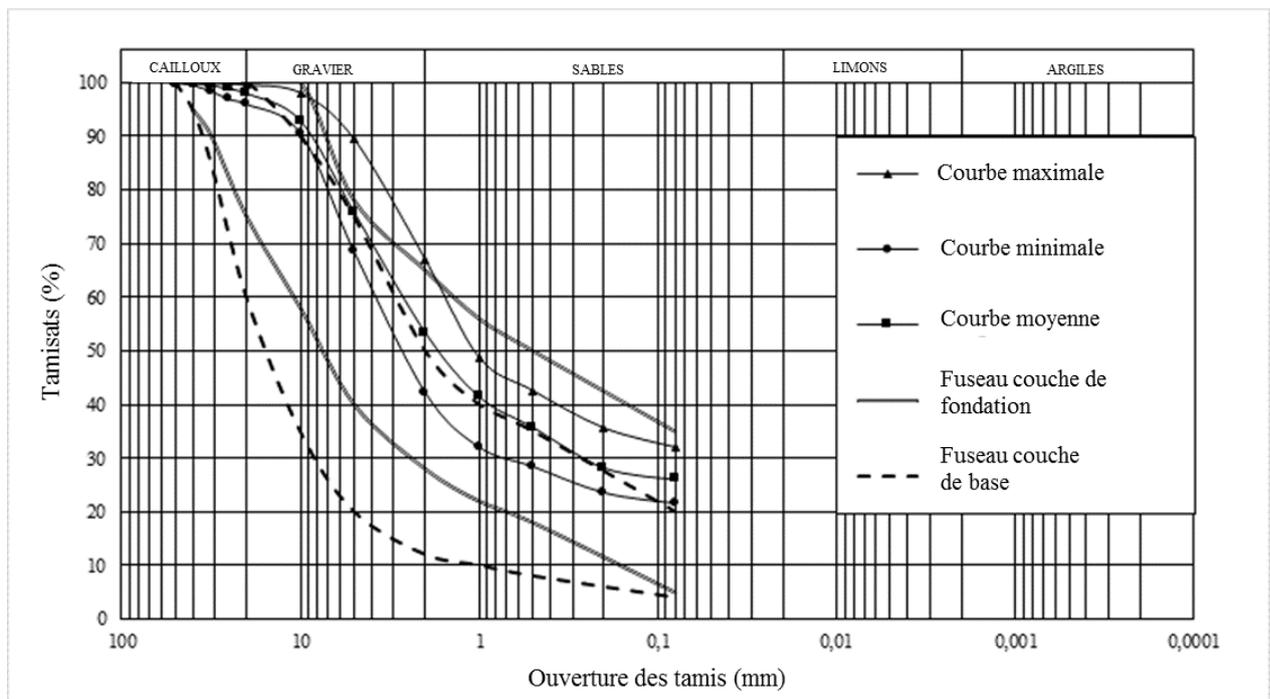


Figure 74. Gravelleux latéritiques de savane humide à l'intérieur des fuseaux de spécification pour couches de fondation et de base (CEBTP, 1984)

Tableau 32. Spécifications pour couches de base et couches de fondation (CEBTP, 1984)

Gravelleux latéritiques	Couche de base	Couche de fondation
Densité sèche maximale (DSM)	2,00 minimum	1,80 minimum
Indice de plasticité (IP) (%)	15 maximum	30 – 20
Fines (< 80 µm) (%)	20 maximum	35 – 30
CBR à 95% de DSM (%)	60 – 80	25 – 35

de fondation. Les valeurs du produit de plasticité  $P_p$  inférieures à 600, montrent que ces matériaux sont utilisables en couche de fondation pour les trafics T1, T2 et T3 ( $T1 < 5 \times 10^5 < T2 < 1,5 \times 10^6 < T3 < 4 \times 10^6 < T4 < 10^7 < T5 < 2 \times 10^7$  par essieux standards équivalents de 13 tonnes) selon Bagarre (1990). D'après le CEBTP (1984), les graveleux latéritiques doivent avoir une valeur de DSM supérieure ou égale à 1,90 et, une valeur de TEO inférieure ou égale à 15 %, pour une utilisation en couche de fondation. Les valeurs moyennes de TEO (12,7 %) et de DSM (1,95) obtenues confirment que les graveleux latéritiques de la zone de savane humide sont utilisables en couche de fondation. Les valeurs minimales de CBR à 95 % OPM admises pour les couches de fondation et les couches de base pour trafic T3 sont respectivement de 30 et 80 % (CEBTP, 1984). En zone de savane humide, 68 % des matériaux ont des valeurs de CBR supérieures à 30 %. Ces matériaux sont utilisables en couche de fondation. Selon les 7 classes de portance définies au Cameroun (DEGN, 1987), seulement 72 % des matériaux étudiés ont des valeurs de CBR supérieures ou égales à 30 %. Ces matériaux sont de classe S5 et donc utilisables en couche de fondation pour trafic T2/T3 (Tab. 32). Il en est de même pour la classification du CEBTP (1984) qui distingue 5 classes.

Tous ces paramètres montrent que les graveleux latéritiques de la zone de savane humide, entre Obala - Ndjoré, sont utilisables uniquement en couche de fondation pour trafic T1, T2 et T3.

Les valeurs de IRLP (86,6 %) et DVRAR (34,8 %) qui corroborent les données minéralogiques obtenues par DRX indiquent la présence de kaolinites (kaolinite), comme seul type d'argiles dans les graveleux latéritiques en savane humide. Ces minéraux ont un inconvénient potentiel pour les travaux du Génie civil, à cause de leur comportement plastique par imbibition d'eau. Les graveleux latéritiques de savane humide ont un comportement plastique et une rupture franche sous charge. Ce résultat est en accord avec les travaux sur les graveleux latéritiques développés sur migmatites à Batouri, Yokadouma et Bargué (Nzabakurikiza *et al.*, 2012) et sur chloritoschistes à Bengbis (Onana, 2010). *A contrario*, un comportement plastique à plasto-compressible avec une rupture franche sous charge a été observé avec les données sur les graveleux latéritiques développés sur charnockites à Ebolowa (Onana *et al.*, 2017).

### **IV.3. Graveleux latéritiques de savane mixte**

Les graveleux latéritiques de savane mixte présentent des valeurs de masse volumique des grains solides de  $2,71 \text{ g/cm}^3$ . Cette valeur est proche de  $2,85 \text{ g/cm}^3$ , valeur requise pour des performances moyenne à bonnes (Nwaiwu *et al.*, 2006). Les valeurs de LL et IP indiquent que ces matériaux sont moyennement plastiques. La valeur de IP (22 %), proche de 25 % valeur limite, suggère la possibilité de leur utilisation en couche de fondation (CEBTP, 1984). Les valeurs du

module de classement  $G_m$  (2,02), supérieures à 1,50 indiquent que les graveleux de la zone de savane mixte sont utilisables en couche de fondation pour les routes à fort trafic. Les valeurs de  $P_m$  (632), supérieures à 250, indiquent que ces graveleux latéritiques satisfont aux critères d'utilisation en couches de base pour les routes rurales ainsi que pour les couches de fondation. Les valeurs du  $P_p$  (511), inférieures à 600, indiquent que ces matériaux sont utilisables en couche de fondation pour les trafics faibles à moyens T1, T2 et T3 (Bagarre, 1990). Les valeurs de DSM (2,00) et de TEO (12,1 %) ainsi que celles de CBR (44 %), supérieures à 35 %, indiquent que ces matériaux sont de classe S5 et, utilisables en couche de fondation pour les trafics faibles à élevés T1 à T3 (CEBTP, 1984) et, en couche de base pour les trafics faibles T1 (DEGN, 1987) (Tab. 33).

#### **IV.4. Graveleux latéritiques de savane sèche**

Environ 37,7 % des matériaux en savane sèche présentent des valeurs de masse volumique des grains solides supérieures à  $2,85 \text{ g/cm}^3$ . Ces graveleux latéritiques possèdent donc des performances bonnes à excellentes. La localisation des courbes granulométriques maximale, moyenne et minimale de ces matériaux à l'intérieur des fuseaux de spécification (CEBTP, 1984) montre qu'ils sont utilisables pour la construction des couches de fondation et des couches de base (Fig. 75) pour trafics élevés. Les graveleux latéritiques de savane sèche sont moins plastiques ( $IP = 20 \%$ ) que ceux de savane humide ( $IP = 23 \%$ ). Ces graveleux latéritiques de savane sèche sont utilisables en couche de fondation. Ces matériaux présentent des valeurs de  $P_m$  plus faibles que ceux de savane humide, mais sont néanmoins utilisables d'après les critères définis (Charman, 1988).

Les valeurs de  $G_m$  des matériaux en savane sèche (2,21) sont supérieures à celles de savane humide (1,84) ; ils sont utilisables en couche de base (Nwaiwu *et al.*, 2006). Quarante-huit pourcent des échantillons ont des valeurs de  $P_p$  inférieures à 600. Ces matériaux sont donc utilisables en couche de fondation pour trafics T1 à T3 (Bagarre, 1990). Quarante-huit pourcent des valeurs de TEO et de DSM des graveleux latéritiques répondent aux spécifications du CEBTP (1984) pour une utilisation en couche de base (Tab. 32). Les paramètres géotechniques étudiés indiquent que les graveleux latéritiques de savane sèche peuvent être utilisés en couche de fondation pour trafics T2/T3 et, en couche de base pour faible trafics T2, après lithostabilisation par adjonction de 20 % de granulats 5/20 dont la valeur de LA est d'environ 60 % (DEGN, 1987 ; Bagarre, 1990 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017) (Tab. 33).

Tableau 33. Utilisation des graveleux latéritiques en fonction des valeurs de CBR (DEGN, 1987)

Classe de CBR	Utilisation en construction routière
S1 : $0 < \text{CBR} < 5$	Pas utilisable en construction routière
S2 : $5 < \text{CBR} < 10$	Remblai
S3 : $10 < \text{CBR} < 15$	Remblai et couche de forme
S4 : $15 < \text{CBR} < 30$	Couche de forme et couche de fondation pour trafic T1
S5 : $30 < \text{CBR} < 60$	Couche de fondation pour trafic T2/T3 et de base pour trafic T1
S6 : $60 < \text{CBR} < 120$	Couche de fondation pour T3/T4 et de base pour trafic T2
S7 : $\text{CBR} > 120$	Couche de base pour trafic T3

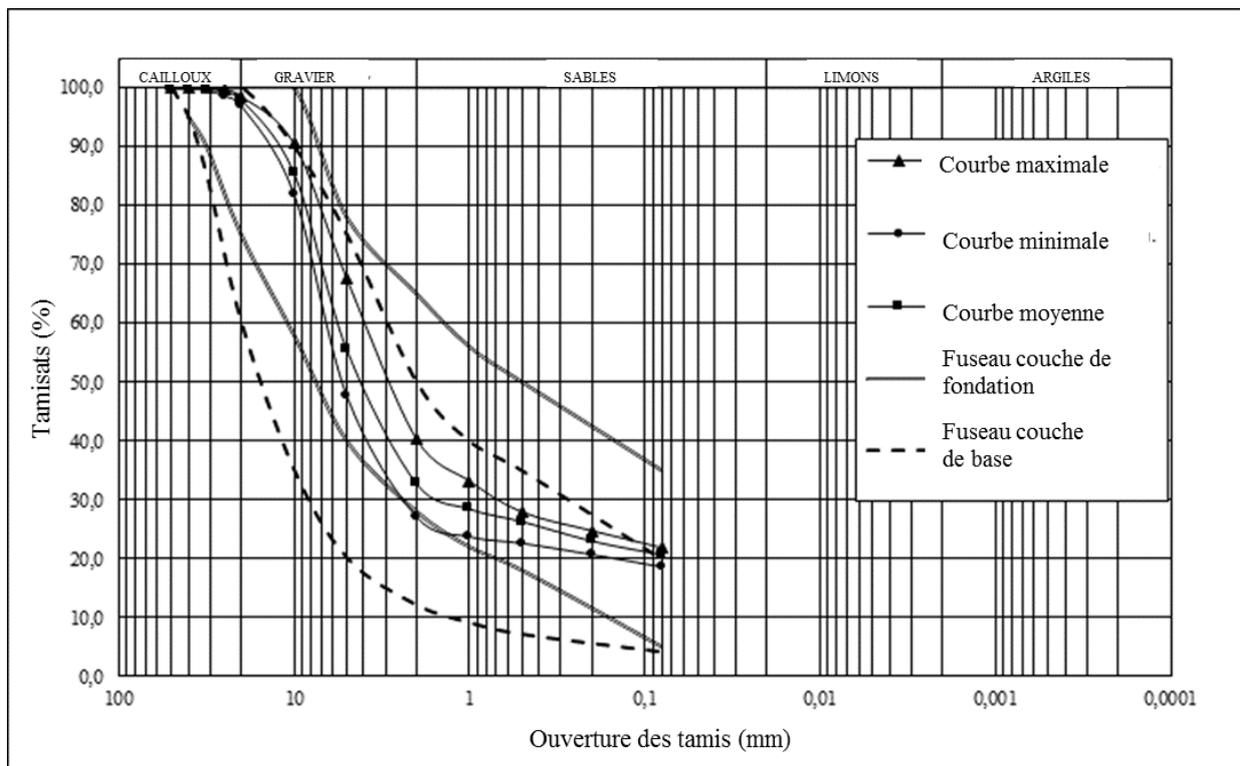


Figure 75. Graveleux latéritiques de savane sèche à l'intérieur des fuseaux de spécification pour couches de fondation et de base (CEBTP, 1984)

Les valeurs de IRLP (81,7 %) et DVRAR (55,6 %) des graveleux latéritiques de savane sèche indiquent la présence de kandites, notamment la kaolinite. Ces matériaux de savane sèche ont un comportement plasto-compressible et une rupture franche sous charge. Ce comportement mécanique est similaire à celui des graveleux latéritiques sur migmatites à Ngoura (Nzabakurikiza *et al.*, 2012) à l'Est Cameroun.

## CONCLUSION

Les graveleux latéritiques dans la zone Obala - Mbandjock se forment en milieu acide et réducteur. Les diagrammes ternaires de quantification de l'altération ont été exploités sur la base de l'hypothèse de l'existence de 02 types de graveleux latéritiques dans la zone d'étude, les graveleux latéritiques de savane humide et ceux de savane sèche. Les graveleux latéritiques de savane humide sont faiblement à modérément latéritisés. Ceux de savane sèche sont plus altérés et, modérément à fortement latéritisés. Le processus prédominant qui prévaut dans ces matériaux est la latéritisation. Les diagrammes altérologiques indiquent que la monosiallisation et l'allitisation sont les processus hydrolytiques dominants, avec une prédominance de l'allitisation. L'étude de la variabilité statistique des paramètres géotechniques fondée sur la même hypothèse, montre également une répartition des graveleux latéritiques en fonction des caractères hydriques. Des corrélations apparaissent entre les paramètres d'altération, la minéralogie et les paramètres géotechniques. Les valeurs de masse volumique des grains solides  $\rho_s$  sont positivement liées aux teneurs en sesquioxydes et, négativement à celles en  $\text{SiO}_2$ . Le CBR est corrélé positivement à  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et, négativement à  $\text{SiO}_2$ . L'indice de latéritisation est corrélé à DSM et, fait rare, à CBR. Les valeurs de DVRAR sont positivement liées à celles de  $\rho_s$ , et de CBR, celles de IRCP sont liées à DSM par une relation inverse. Les valeurs de CBR sont corrélées aux teneurs en hématite et goethite, par une relation positive et, aux teneurs en quartz, par une relation négative.

Il convient de relever que, l'étude de la variabilité statistique des matériaux examinés, essentiellement fondée sur les paramètres géotechniques, fait apparaître l'existence de 03 types de graveleux latéritiques à savoir, les graveleux latéritiques de savane humide, ceux de la zone intermédiaire et ceux de la savane sèche. Les granulats gneissiques présentent des caractéristiques physico - mécaniques (LA, MDE, CA, FS) et de compactage requises pour leur utilisation en construction routière. Les granulats 0/4 – 4/6,3 et 6,3/10 sont utilisables en béton bitumineux pour couche de roulement et, les granulats 0/31,5, en couche de base ou comme grave bitume. Les graveleux latéritiques de savane humide sont plus fins, de plasticité moyenne et présentent un comportement plastique et une rupture franche sous charge. Leur

valeur de CBR est proche de 30 %. Ils sont donc utilisables uniquement en couche de fondation pour trafics T1, T2 et T3. Les graveleux latéritiques de savane mixte présentent des caractéristiques intermédiaires. Ils sont de plasticité moyenne et, leur valeur de CBR, supérieure à 30 % indique qu'ils sont utilisables en couche de fondation pour trafics T1, T2 et T3 et, en couche de base pour trafic T1. Les graveleux latéritiques de savane sèche sont plus grossiers, moins plastiques avec un comportement plasto-compressible et une rupture franche sous charge. Leur valeur de CBR est supérieure à 50 %. Ces matériaux sont utilisables en couche de fondation pour trafics T1, T2 et T3 et, en couche de base pour faibles trafics T2, après lithostabilisation.

## **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

La zone Obala - Mbandjock est localisée dans le Plateau sud camerounais. Elle est située sur un plateau d'altitude moyenne 520 m, appartenant au bassin versant de la Sanaga. Cette zone est soumise à un climat équatorial de transition à 04 saisons dont la moyenne des précipitations est de 1400 mm/an et, celle des températures de 25°C, pour la période allant de 1984 à 2016. Les roches, de haut degré métamorphique de la nappe de Yaoundé, génèrent dans le secteur d'étude, des matériaux d'altération latéritique colonisés par un vaste ensemble de savanes peri-forestières. Afin d'étudier les roches et les graveleux latéritiques, les facteurs qui ont guidé le choix de la zone d'étude sont les caractères hydriques et la topographie. En effet, la zone d'étude s'étend de la savane humide à la savane sèche, localisées à des altitudes différentes. Le présent travail a donc eu pour but d'étudier la variabilité statistique des propriétés pétrologiques et géotechniques des graveleux latéritiques développés sous un même climat, une même végétation, un même substratum rocheux gneissique, mais sous des conditions hydriques différentes, en vue de leur utilisation en construction routière.

Les gneiss de la zone Obala-Mbandjock, d'aspect gris sombre à gris clair, présentent une texture granonématoblastique et se composent de quartz, biotite, amphibole, pyroxène, orthose, microcline et épidote. Leur altération, de type ferrallitique, génère des matériaux nodulaires constitués de graveleux latéritiques dont les caractéristiques dépendent du milieu. En zone de savane humide, les graveleux latéritiques sont peu épais (0,20 – 0,60 m) et de couleur brunâtre à jaunâtre, tandis qu'en zone de savane sèche, ces matériaux sont plus épais (0,30 – 1,00 m) et de couleur brunâtre à rougeâtre. Les graveleux latéritiques possèdent une matrice argilo-sableuse en savane humide et, argileuse en savane sèche. Quartz, muscovite et anatase sont prédominant dans les graveleux latéritiques de savane humide tandis que, kaolinite, goethite, hématite et gibbsite sont plus abondants en savane sèche. À SiO<sub>2</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> majoritaires dans les gneiss, s'ajoute Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dans les graveleux latéritiques comme oxydes dominants. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont plus abondants en savane sèche qu'en savane humide tandis que SiO<sub>2</sub> a une évolution contraire. Les graveleux latéritiques de savane humide sont silico - ferrugino - alumineux et ceux de savane sèche, ferrugino - silico - alumineux. Les diagrammes pH – Eh indiquent que les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock se forment en milieu acide réducteur. Les indices géochimiques CIA, MIA<sub>(O)</sub> et IOL, associés respectivement aux diagrammes A – CN – K, A – L – F et SAF montrent que les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock suivent une évolution parallèle à A – K, synonyme d'une lixiviation totale de Ca et Na, plus accentuée en savane sèche. La lixiviation de Ca et Na est concomitante à un enrichissement faible en K dans les graveleux de savane humide. La diminution des éléments labiles (Ca, Na, K et Mg) est très importante dans les graveleux latéritiques de la zone Obala -

Mbandjock. Cette diminution s'accompagne d'un phénomène de latéritisation modéré à fort. Le diagramme AF – CNK – M montre que les graveleux latéritiques étudiés en savane humide comme en savane sèche, l'hydrolyse des feldspaths (pertes en Ca, Na et K) est proportionnelle à celle des minéraux mafiques (pertes en Mg). Les graveleux latéritiques de savane humide sont kaolinisés à modérément latéritisés alors que, ceux de savane sèche sont modérément à fortement latéritisés. Les diagrammes altérologiques indiquent que une altération faible à moyenne dans les graveleux latéritiques étudiés. L'altération est faible à moyenne dans les graveleux latéritiques de savane humide et, moyenne, dans ceux de savane sèche. La ferruginisation, l'allitisation et la monosiallisation prévalent dans ces matériaux, avec une prévalence de la ferruginisation dans les matériaux de savane sèche. Le phénomène de ferrallitisation est donc modéré à franc dans les graveleux latéritiques de la zone Obala - Mbandjock. Les graveleux latéritiques de savane humide sont fortement ferrugineux et faiblement alumineux, tandis que ceux de savane sèche sont très fortement ferrugineux et moyennement alumineux. Ces résultats sont en concordance avec les cuirasses ferrugineuses observées dans la zone d'étude.

Sur le plan géotechnique, les gneiss de la zone Obala - Mbandjock présentent des caractéristiques de Los Angeles, Micro - Deval, coefficient d'aplatissement et CBR qui permettent leur utilisation en construction routière comme matériaux pour grave bitume, couche de base et couche de roulement pour trafics faibles à moyens T1 à T3. L'étude de la variabilité statistique des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques de la zone Obala – Mbandjock, établit que trois groupes de matériaux existent dans la zone d'étude à savoir, les graveleux latéritiques de savane humide, ceux de la zone mixte ou intermédiaire et, ceux de savane sèche. Les graveleux latéritiques de savane humide sont plus fins, plus plastiques et présentent des paramètres de portance plus faibles que ceux de savane sèche. Les paramètres géotechniques sont plus dispersés en savane humide qu'en savane sèche. Les graveleux latéritique de la zone mixte présentent des caractéristiques intermédiaires. Les corrélations obtenues par les analyses statistiques de régression, les analyses en composantes principales et la classification ascendante hiérarchique des paramètres pétrologiques confirment le regroupement des graveleux latéritiques en fonction du milieu. La masse volumique des grains solides et le CBR sont corrélés à la teneur en  $Al_2O_3$ , la teneur en  $Fe_2O_3$  et la teneur en hématite. Les corrélations déjà connues dans la littérature comme celles, IP – TEO et DSM – fines, n'apparaissent pas dans la zone d'Obala - Mbandjock. Il existe plutôt des relations TEO – DSM, Gm – fines, mortier – fines et, squelette – mortier. Les graveleux latéritiques de savane humide, entre Obala et Ndji, sont utilisables en couche de fondation pour trafics T1 à T3, tandis que

ceux de savane sèche, entre Ekombitié et Mbandjock, sont utilisables en couche de fondation pour trafics T1 à T3 et, de base pour trafics T2 après lithostabilisation. Les graveleux latéritiques de la zone mixte ou intermédiaire, entre Ndji et Ekombitié sont utilisables en couche de fondation pour trafics T1 à T3 et, de base pour trafic faible T1.

En guise de perspectives, une étude géochimique comparative des profils d'altération de savane sèche, de savane humide et de la zone intermédiaire, permettra de mieux comprendre les processus de formation des graveleux latéritiques étudiés. Il conviendrait également de réaliser des analyses sédimentométriques, d'évaluer l'argilosité et d'étudier la microstructure de ces matériaux qui, associés aux essais mécaniques, permettront de (1) mieux comprendre leur rhéologie et (2) déterminer la technique de stabilisation la mieux appropriée pour leur utilisation pour tous les types de trafic et, pour toutes les assises de chaussée. La diversité des corrélations obtenues sur les graveleux latéritiques et, la complexité de ces matériaux, confirment la nécessité de leur étude à l'échelle locale en vue de la réalisation d'une classification et d'une cartographie géotechnique des sols au Cameroun.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- Adebesi N. O., Adeyemi G. O., Oluwafemi O. S., Songca S. P., 2013. Important properties of clay content of lateritic soils for engineering project. *Journal of Geography and Geology* 5(2), 99–115.
- Adeyemi G. O., 1995. The influence of parent rock factor on some engineering index properties of the three residual lateritic soils in southwestern Nigeria. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 52(1), 3–8.
- Adeyemi G. O., Wahab K. A., 2008. Variability in the geotechnical properties of a lateritic soil from southwestern Nigeria. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 67, 579–584.
- Afeez Adefemi B., 2012. Regression analysis between properties of subgrade lateritic soil. *Leonardo Journal of Sciences* 21, 99–108.
- AFNOR NF P 94–054, 1991. Sols : reconnaissance et essais - détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau.
- AFNOR NF P 94–051, 1993. Sols : détermination des limites d'Atterberg : limite de liquidité à la coupelle – limite de plasticité au rouleau.
- AFNOR NF EN 1097–1, 1996. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats Partie 1 : Détermination de la résistance à l'usure (micro - Deval).
- AFNOR NF P 94–056, 1996. Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique. Méthode par tamisage à sec après lavage.
- AFNOR NF EN 933–1, 1997. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1 : Détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage.
- AFNOR NF EN 933–3, 1997. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 3 : Détermination de la forme des granulats - Coefficient d'aplatissement.
- AFNOR NF EN 933–8, 1997. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 8 : Évaluation des fines - Équivalent de sable.
- AFNOR NF P 94–078, 1997. Sols : reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.
- AFNOR NF EN 1097–2, 1998. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation.
- AFNOR NF EN 1097–7, 1999. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 7 : Détermination de la masse volumique réelle du filler – Méthode au pycnomètre.

- AFNOR NF EN 1097–6, 2001. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau.
- AFNOR NF EN 13286–47, 2004. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques. Partie 47 : méthode d'essai pour la détermination de l'indice portant Californien (CBR), de l'indice de portance immédiat (IPI) et du gonflement.
- AFNOR NF EN 13286–2, 2005. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques. Partie 2 : méthodes d'essai de détermination en laboratoire de la masse volumique de référence et de la teneur en eau - Compactage Proctor.
- AFNOR NF P94–093, 2014. Sols : reconnaissance et essais– Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié - Sols : reconnaissance et essais–Détermination des références de compactage d'un matériau Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié.
- Akaha C. T., Adunola O. O., 2016. Geotechnical and chemical evaluation of tropical red soils in a deltaic environment: implications for road construction. *International Journal of Geology, Earth and Environmental Sciences* 6(1), 19–29.
- Akpokodje E. G., 1986. The geotechnical properties of lateritic and non-lateritic soils of southeastern Nigeria and their evaluation for road construction. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 33(1), 115–121.
- Akpokodje E. G., Hudec P. P., 1994. The influence of petrology and fabric on the engineering properties of concretionary laterite gravel aggregates. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 27, 39–50.
- Anonyme, 2000. SETRA : Guide technique, réalisation des remblais et des couches de forme Fascicule I : Principes généraux. 2ème Ed., 85 p.
- Autret P., 1983. Latérites et graveleux latéritiques. Bulletin du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France), 38 p.
- Ayodele A. L., Falade F. A., 2016. Some geotechnical properties of selected sub-base materials for road construction. *Civil and Environmental Research* 8(8), 31–39.
- Babechuk M. G., Widdowson M., Kamber B. S., 2014. Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India. *Chemical Geology* 363, 56–75.
- Bagarre E., 1990. Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière. ISTED, 143 p.
- Bagnouls F., Gaussen H., 1957. Les climats biologiques et leur classification. *Annales de géographie* 335, 193–220.
- Bello A. A., Osinubi K. J., 2010. Attenuative capacity of compacted three reddish brown tropical soils. *Continental Journal Engineering Sciences* 5(2), 39–54.

- Biswal D. R., Sahoo U. C., Dash S. R., 2016. Characterization of granular lateritic soils as pavement material. *Transportation Geotechnics* 6, 108–122.
- Bilong P., 1992. Caractères des sols ferrallitiques à plinthite et à pétroplinthite développés sur roches acides dans la zone forestière du sud du Cameroun - Comparaison avec les sols développés sur roches basiques. *Cahiers Orstom, série Pédologie* 22(2), 203–224.
- Blotz L. R., Benson C. H., Boutwell G. P., 1998. Estimating optimum water content and maximum dry unit weight for compacted clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 124(9), 907–912.
- Bohi Z. P. B., 2008. Caractérisation des sols latéritiques utilisés en construction routière : le cas de la région de l'Agneby (côte d'Ivoire). Thèse Doct/Ph.D., ENPC - Paris, 123 p.
- Bourgeon G., Gunnel Y., 2005. La latérite de Buchanan. *Étude et Gestion des Sols* 12(2), 87–100.
- Bray J. B., Curtis J. T., 1957. An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin. *Ecological Monographs* 27, 325–49.
- CEBTP, 1984. Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. Ministère de la coopération de la République Française. 157 p.
- Charman J. H., 1988. Laterite in road pavements. London: CIRIA Special Publication 47, 71 p.
- Chessel D., Thioulouse J., Dufour A. B., 2004. Introduction à la classification hiérarchique. Fiche de Biostatistique-Stage 7, 56 p. Disponible à l'adresse Internet : <http://pbil.univlyon1.fr/R/stage/stage7.pdf>
- Cisse A., Lo P. G., Diaw E. B., Sene S., Diagne M., Gbaguidi I., Diop B. O., Mbodj M., Niang K., Diedhiou M. B., Sissoko G., 2016. Contribution to improving the quality of road base layers: concept of optimum maximum diameter and its application to the laterite of Sindia (Senegal). *Research Journal of Environmental and Earth Sciences* 8(1), 1–7.
- Cross W., Iddings J. P., Pirsson L. V., Washington H. S., 1903. quantitative classification of igneous rocks. Univ. of Chicago Press., 286 p.
- DEGN, 1987. Recommandation pour l'utilisation en corps de chaussée des graveleux latéritiques naturels. Bulletin du Ministère de l'équipement. Direction des études générales et de la normalisation, Cameroun, 16 p.
- DEGN, 1988. Directives pour la réalisation des assises de chaussée en grave concassée. Ministère de l'équipement. Direction des études générales et de la normalisation, Cameroun, 14 p.
- De Graft-Johnson J. W., Bhatia W. S., 1969. Engineering characteristics of the lateritic gravels of Ghana. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico, 13–43 pp.

- Duchaufour P., 2001. Introduction à la science du sol: sol, végétation, environnement. Dunod 6<sup>e</sup> Ed., Paris. 333 p.
- Duzgoren-Aydin N. S., Aydin A., 2003. Chemical heterogeneities of weathered igneous profiles: implications for chemical indices. *Environmental and Engineering Geosciences* 9, 363–377.
- Duzgoren-Aydin N. S., Aydin A., Malpas J., 2002. Re-assessment of chemical weathering indices: case study on pyroclastic rocks of Hong Kong. *Engineering Geology* 63, 99–119.
- Dzemua L. G., Mees F., Stoops G., Van Ranst E., 2011. Micromorphology, mineralogy and geochemistry of lateritic weathering over serpentinite in south-east Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 60(1), 38–48.
- Ekodeck G. E., 1984. L'altération des roches métamorphiques du Sud Cameroun et ses aspects géotechniques. Thèse Doct. D'état ès Sci. Nat. IRIGM. Univ. Scientif. Et Médic. Grenoble I France, 368 p.
- Ekodeck G. E., 1989. L'algorithme généralisé de restructuration normative altérologique et les diagrammes correspondants d'interprétation et de caractérisation. Doc. inéd. dact., 116 p.
- Ekodeck G. E., 1994. Un mode de caractérisation des sols résiduels compatibles avec les données de l'expérimentation géotechnique. Actes du 7<sup>e</sup> Congrès International de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur-Lisbonne (Portugal), 3457–3468 pp.
- Ekodeck G. E., Kamgang K. B. V., 2002. L'altérologie normative et ses applications : une expression particulière des roches aluminosilicatées du point de vue de leur évolution supergène. Press. Univ. Yaoundé (Cameroun), Collect. Connaissances, 231 p.
- Ekodeck G. E., Kamgang K. B., 2011. Normative alterology and advanced applications a particular facet of aluminosilicate-bearing rocks petrology, with regard to their supergene evolution. Press. Univ. Yaoundé (Cameroun), collect. Connaissances, 225 p.
- Erguler Z. A., 2016. A quantitative method of describing grain size distribution of soils and some examples for its applications. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 75, 807–819.
- Fall M., 1993. Identification et caractérisation mécanique des graveleux latéritiques du Sénégal : application au domaine routier. Thèse. Doct. INPL, 170 p.
- Fall M., Sarr M., 2007. Geotechnical characterization of expansive soils and their implications in ground movements in Dakar. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 66, 279–288.
- Fall M., Sawangsuriya A., Benson C. H., Edil T. B., Bosscher P. J., 2008. On the investigations of resilient modulus of residual tropical gravel lateritic soils from Senegal (West Africa). *Geotechnical and Geological Engineering* 26(1), 13–35.

- Fall M., Tisot J. P., Cissé I. K., 1994. Specification for road design using statistical data. An example of laterite or gravel lateritic soils from Senegal. *Bulletin of International Association of Engineering Geology* 50, 17–35.
- Fall M., Tisot J. P., Cisse I. K., 1997. Undrained behaviour of compacted gravel lateritic soils from Western Senegal under monotonic and cyclic triaxial loading. *Engineering Geology* 47(1-2), 71–87.
- Farooq K.; Khalid U., Mujtaba H., 2016. Prediction of compaction characteristics of fine-grained soils using consistency limits. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(4), 1319–1328.
- Gidigas M. D., 1976. Laterite soil engineering: pedogenesis and engineering principles. *Developments in Geotechnical Engineering*, Elsevier Ed., 9, 554 p.
- Gidigas M. D., 1983. Development of acceptance specifications for tropical gravel paving materials. *Engineering Geology* 19, 213–40.
- Giorgis I., Bonetto S., Giustetto R., Lawane A., Pantet A., Rossetti P., Thomassin J-H., Vinai R., 2014. The lateritic profile of Balkouin, Burkina Faso: Geochemistry, mineralogy and genesis. *Journal of African Earth Sciences* 90, 31–48.
- Hieng I. O., 2003. Etude des paramètres géotechniques des sols du Cameroun. Clé Ed., Yaoundé, 148 p.
- Kamgang Kabeyene B. V., Ekodeck G. E., Njilah I. K., 2001. Evolution géochimique des formations latéritiques dans l'écosystème péristre forestier du Sud-Est Cameroun: le site de Kandara. *African Journal of Science and Technology* 2(1), 19–32.
- Kamgang Kabeyene B. V., Ntoulala R. F. D., Onana V. L., Ndome Effoudou P. E., Ekodeck G. E., 2012. Supergene weathering of chlorite schists from Ayou (Cameroon) and their geotechnical applications. *Revue CAMES-Série A* 13(2), 263–269.
- Kamtchueng T. B., Onana V. L., Fantong W. Y., Akira U., Ntoulala R. F. D., Wongolo D. M. H., Ndongo B. G., Ngo'o Ze A., Kamgang K. B. V., Ondo J. M., 2015. Geotechnical, chemical and mineralogical evaluation of lateritic soils in humid tropical area (Mfou, Central-Cameroon): Implications for road construction. *International Journal of Geo-Engineering* 6(1), 1–21.
- Kassogue M., Herbert G., Massiera M., 2002. Contrôle de la qualité sur les matériaux dans les couches de chaussée (Revêtement exclu). 4e Conférence Spécialisée en Génie des transports de la Société Canadienne de Génie Civil, 10 pp.
- Legros J-P., 2013. Latérites et autres sols des régions intertropicales. Conférence n°4252, Séance académique du 09/12/2013, Bulletin n°44, 369–382 pp.
- Letouzey R., 1985. Notice de la carte phytogéographique du Cameroun aux 1/50 000 phases 3. Institut de la carte internationale de la végétation, 63–94 pp.

- Lyon Associates, Inc., 1971. Les sols latéritiques et d'autres sols difficiles d'Afrique. Études géotechniques pour USAID-Lyon Associates, Maryland USA-BRRI, Kumassi Ghana, 394 p
- Madu, R. M., 1975. Sand-laterite mixture for road construction (Alaboratory investigation). *Nigerian Journal of Technology* 1(1), 28–37.
- Madu R. M., 1980. The Performance of Laterite Stones as Concrete Aggregates and Road Chipping. *Materials and Structures* 13(6), 403–411.
- Magnan J-P., Massamba Ndiaye., 2015. Determination and assessment of deformation moduli of compacted lateritic gravels, using soaked CBR tests. *Transportation Geotechnics* 5, 50–58.
- Mahalinga-Iyer U., Williams D. J., 1985. Unsaturated strength behavior of compacted lateritic soils. *Géotechnique* 45(2), 317–20.
- Mahalinga-Iyer U., et Williams D. J., 1997. Properties and performance of lateritic soil in road pavements. *Engineering Geology* 46, 71–80.
- Maignien R., 1966. Compte rendu sur les latérites. Recherche sur les ressources naturelles, n°4, ORSTOM-UNESCO Paris Ed., 155 p.
- Manga Y. S., 207. Caractérisation géologique et géotechnique des graveleux latéritiques du secteur Nlobole - Ebanda, Centre - Cameroun. Mém. Master. Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 76 p.
- Massamba Ndiaye., 2013. Contribution à l'étude de sols latéritiques du Sénégal et du Brésil. Thèse Doct/Ph.D., Univ. Paris-Est, 149 p.
- Mazari M., Nazarian S., 2017. Mechanistic approach for construction quality management of compacted geomaterials. *Transportation Geotechnics* 13, 92–102
- Mesida E. A., 1987. The relationship between the geology and the lateritic engineering soils in the Northern environs of Akure, Nigeria. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 35(1), 65–69.
- Millogo Y., 2008. Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuse et latéritique du Burkina Faso améliorées aux liants hydrauliques : application au génie civil (bâtiment et route) Thèse Doct. Univ. Ouagadougou, 142 p.
- Millogo Y., Karfa T., Raguilnaba O., Kalsibiri 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 Building Materials* 22(2), 70–76.
- Mujtaba H., Farooq K., Sivakugan N., Das M.B., 2013. Correlation between gradational parameters and compaction characteristics of sandy soils. *International Journal of Geotechnical Engineering* 7(4), 395–401.

- Munsell Color, 2000. Charts. Macbeth Division of Kollmorge Corporation, 2441 Noth Calvert Street Baltimore, Maryland 21218.
- Mvondo H., 2003. Analyse structurale et pétrochimique des roches de la région de Yaoundé Nord; argument contribuant à la connaissance de l'évolution géotectonique de la chaîne Panafricaine du Cameroun. Thèse Doct/Ph.D., Univ. Yaounde I, 188 p.
- Nagaraj H. B., Reeshab B., Sravana M. V., Suresh M. R., 2015. Correlation of compaction characteristics of natural soils with modified plastic limit. *Transportation Geotechnics* 2, 65–77.
- Nagaraj H. B., Suresh M. R., 2018. Influence of clay mineralogy on the relationship of CBR of fine-grained soils with their index and engineering properties. *Transportation Geotechnics* 15, 29–38.
- Nandjip K. H. P., 2010. Contribution à l'étude pétrologique d'une isaltérite développée sur orthogneiss au SW de Yaoundé : recherche des indices de cérium dans les matériaux ferruginisés. Mém. D.E.A., Univ. Yaoundé I, 59 p.
- Ndjigui P-D., Bilong P., Bitom D., Dia A., 2008. Mobilization and redistribution of major and trace elements in two weathering profiles developed on serpentinites in the Lomié ultramafic complex, South-East Cameroun. *Journal of African Earth Sciences* 50, 305–328.
- Ndjigui P. D., Bilong P., Nyeck B., Eno Belinga S. M., Vicat J. P., Gerard M., 1998 : Les produits d'altération du gneiss à biotite et amphibolite dans la plaine côtière de Douala. *Annales de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, Série Sciences Naturelles et Vie* 34, 191–216.
- Nesbitt H. W., 1992. Diagenesis and metasomatism of weathering profiles, with emphasis on Precambrian paleosols. In : Martini, I.P., Chesworth, W. (Eds.), weathering, Soils & Paleosols. Elsevier Ed., Netherlands, 127–152 pp.
- Nesbitt H. W., Young G. M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299, 715–717.
- Nesbitt H. W., Young G. M., 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. *The Journal of Geology* 97(2), 129–147.
- Ngo'o Ze A., Onana V.L., Ndzié Mvindi A. T., Nyassa Ohandja H., Medjo Eko R., Ekodeck G. E., 2019. Variability of geotechnical parameters of lateritic gravels overlying contrasted metamorphic rocks in a tropical humid area (Cameroon): implications for road construction. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01488-0>.
- Nguegang Asaa P., 2008. L'agriculture urbaine et périurbaine à Yaoundé : analyse multifonctionnelle d'une activité montante en économie de survie. Thèse Doct. Univ. libre de Bruxelles, 161 p.

- Nguetnkam J. P., Yongue-Fouateu R., Bitom D., Volkoff B., 2006. Etude pétrologique d'une formation latéritique sur granites en milieu tropical forestier sud-camerounais (Afrique centrale), mise en évidence de son caractère polyphasé. *Etude et Gestion des sols* 13(2) : 89–102.
- Nkoumou A. J-F., Mouhamadou B. D., Fary D., Parisot J. C., Ndiane D., 2004. Etude corrélative entre propriétés géochimiques et caractéristiques géomécaniques des latérites. *Journal des Sciences et Technologies* 3, N° 1 et 2.
- Ntouala R. F. D., 2014. Produits d'altération des schistes et argiles alluviales de la série d'Ayos à Akok-Maka (Est-Cameroun) : minéralogie, géochimie et valorisation agropédologique et géotechnique. Thèse Doct./Ph.D., Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 210 p.
- Numbem Tchakounté J., Toteu S. F., Van Schmus W. R., Penaye, J., Deloule, E., Mvondo Ondo J., Bouyo Houketchang M., Ganwa A. A., White W. M., 2007. Evidence of Ca 1.6-Ga detrital Zircon in the Bafia Group (Cameroon): Implications for the chronostratigraphy of the Pan-African Belt Nord of the Congo Craton. *Comptes Rendus Géosciences* 339(2), 132–142.
- Nwaiwu C. M. O., Alkali I. B. K., Ahmed U. A., 2006. Properties of ironstone lateritic gravels in relation to gravel road pavement construction. *Geotechnical and Geological Engineering* 24(2), 283–284.
- Nyemb Bayamack J.F., Onana V.L., Ndzié Mvindi A. T., Ngo'o Ze A., Nyassa Ohandja H., Medjo Eko R., 2019. Assessment of the determination of Californian Bearing Ratio of laterites with contrasted geotechnical properties from simple physical parameters. *Transportation Geotechnics* 19, 84–95.
- Nzabakurikiza A., 2018. Caractérisation minéralogique, géochimique et géotechnique des granulats et des sols latéritiques nodulaires de l'Est et du Sud camerounais dans l'optique des travaux routiers. Thèse. Doct./Ph.D., Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 192 p.
- Nzabakurikiza A., Onana V. L., Likiby B., Ndome Effoudou P., Kamgang Kabeyene B. V., Ekodeck G. E., 2012. Chemical and mineralogical methods in the identification of laterite gravels over migmatites for engineering purposes. *Revue CAMES-Série A*, 13(2), 28–33.
- Nzabakurikiza A., Onana V.L., Ngo'o Ze A., Ndzié Mvindi A. T., Ekodeck G. E., 2017. Geological, geotechnical. and mechanical characterization of lateritic gravels from Eastern Cameroon for road construction purposes. *Bulletin of Engineering Geology and Environment* 76 (4), 1549–1562.
- Ogunsanwo O., 1989. Some geotechnical properties of two laterite soils compacted at different energies. *Engineering Geology* 26(3), 261–269.
- Ola S. A., 1980. Mechanical properties of concretionary laterites from rain forest and savannah zones of Nigeria. *Bulletin of International Association of Engineering Geology* 21(1), 21–26.

- Olinga J. B., 2003. Cadre géodynamique et évolution tectonométamorphique des ensembles cristallophylliens d'Awae et Ayos (Sud Cameroun). Thèse. Doct./Ph.D., Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 159 p.
- Olivry J. C., 1986. Fleuves et rivières du Cameroun. MESRES-ORSTOM 9<sup>e</sup> Ed., Paris, 733 p.
- Onana V. L., 2010. L'altération supergène des chloritoschistes de la série de Mbalmayo Bengbis (Sud – Cameroun) et ses implications géotechniques. Thèse. Doct./Ph.D., Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 246 p.
- Onana V. L., Ndome Effoudou P. E., Kamgang Kabeyene B. V., et Ekodeck G. E., 2007. Corrélations entre les paramètres altérologiques normatifs et caractéristiques physico-mécaniques des roches et des produits d'altération de la série de Mbalmayo-Bengbis (Sud Cameroun). Proceedings du 14<sup>ème</sup> Congrès Régional Africain de Mécanique des Sols et de la Géotechnique (CRA MSG)-Yaoundé (Cameroun) 26–28 novembre, 155-164 pp.
- Onana V. L., Ngo'o Ze A., Medjo Eko R., Ntouala R. F. D., Nanga Bineli M. T., Ngono Owoudou B., Ekodeck G. E., 2017. Geological identification, geotechnical and mechanical characterization of charnockite-derived lateritic gravels from Southern Cameroon for road construction purposes. *Transportation Geotechnics* 10, 35–46.
- Onana V. L., Ntouala R. F. D., Noa Tang S., Ndome E. E, Kamgang Kabeyene B. V., Ekodeck G.E., 2016. Major, trace and REE geochemistry in contrasted chlorite schist weathering profiles from southern Cameroon: Influence of the Nyong and Dja Rivers water table fluctuations in geochemical evolution processes. *Journal of African Earth Sciences* 124, 371–382.
- Onana V. L, Nzabakurikiza A, Ndome E. E, Likiby B., Kamgang K. B. V., Ekodeck G. E., 2015. Geotechnical, mechanical and geological characterization of lateritic gravels of Boumpial (Cameroon) used in road construction. *Journal of the Cameroon Academy of Sciences* 12(1), 45–54.
- Otalvaro I. F., Cordão N. M. P., Caicedo B., 2015. Compressibility and microstructure of compacted laterite. *Transportation Geotechnics* 5, 20–34.
- Oyediran I. A., Durojaiye H. F., 2011. Variability in the Geotechnical properties of some residual clay soils from southwestern Nigeria. *International Journal of Scientific & Engineering Research* 2(9), 1–6.
- Oyelami C. A., Van Rooy J. L., 2016. A review of the use of lateritic soils in the construction/development of sustainable housing in Africa: A geological perspective. *Journal of African Earth Sciences* 119, 226–237.
- Paige-Green P., Pinard M., Netterberg F. A., 2015. Review of specifications for lateritic materials for low volume roads. *Transportation Geotechnics* 5, 86–98.
- Podwojewski P., Bourdon E., 1996. Le processus d'induration des oxydisols goethitiques sur peridotites en Nouvelle-Calédonie: Un mode particulier d'induration de type plinthite. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 322(6), 453–459.

- Rocchi I., Coop M. R., 2016. Mechanisms of compression in well-graded saprolitic soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 75(4), 1727–1739.
- Rodrigues J. K. G., Reiffsteck P., Auriol J. C., Ndiaye M., 2010. Rationalisation de l'utilisation des sols latéritiques en corps de chaussée durable et de faible coût. 23<sup>èmes</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil. Session Ouvrages-Bitume, 11–22 pp.
- Santoir C., Bopda A., 1995. Atlas régional Sud - Cameroun. ORSTOM-MIRES Ed., Cameroun, 52 p.
- Santoir C., Villiers J. F., 1995. Atlas régional du Sud Cameroun. ORSTOM Ed., volume végétation, 4-5 pp.
- Seaton T. H., Lacey J. M., Pollard A. R., Sykes E. F., Woollorton F. L. D., 1938. Correspondence. Engineering problems associated with clay, with special reference to clay slips. *Journal of the Institution of Civil Engineering* 9(8), 523–527.
- Schellmann, W., 1981. Considerations on the definition and classification of laterites. Proceedings of the International Seminar on Lateritisation Processes, IGCP 129 and IAGC, Trivandrum, India. Oxford and IBH Publishing Company, New Delhi, 1–10 pp.
- Schellmann, W., 1986. A new definition of laterite. In: Banerji, P. K. (Ed.) Lateritisation Processes. Memoirs of the Geological Survey of India, 120, 1–7 pp.
- Sikali F., Djalal M. E., 1987. Utilisation des latérites en technique routière au Cameroun. In Séminaire Régional sur les latérites: Sols. Matériaux. Minerais. Douala (Cameroun), ORSTOM Ed., 277–288 pp.
- Slansky M., Lallemand A., Millot G., 1964. La sédimentation et l'altération latéritique des formations phosphatées du gisement de Taïba. Bulletin du Service de la Carte Géologique d'Alsace et de Lorraine, 311–324 pp.
- Sunil, B. M., Krishnappa, H., 2012. Effect of drying on the index properties of lateritic soils. *Geotechnical and Geological Engineering* 30, 869–879.
- Tockol I., 1993. Contribution à l'étude des graveleux latéritiques dans les pays du Sahel : cas des routes non revêtues. Thèse Doct. Univ. de Moncton, 171 p.
- Tockol I., Massiera M., Chiasson P. A., Maiga, M. S., 1994. Les graveleux latéritiques dans les pays du Sahel : Cas des routes non revêtues. 7<sup>ème</sup> Congrès International de AIGI, 3423–3431 pp.
- Vallerie M., 1995. Atlas régional du Sud Cameroun. ORSTOM Ed., Volume Pédologie, 6-7 pp.
- Varghese G., Nageshwar C., Shivashankar R. R., 2009. Effect of soil parameters on dynamic cone penetration indices of laterite sub-grade soils from India. *Geotechnical and Geological Engineering* 27(4), 585–593.

- Veysseyre R., 2014. Statistique et probabilités pour l'ingénieur. Aide-mémoire. DUNOD Ed., Paris, 390 p.
- Vijayakumar Raju N., Srimurali M., Nagendra Prasad K., 2014. Functional correlations between compaction characteristics, undrained shear strength and Atterberg limits. *Journal of Mechanical and Civil Engineering* 11(3), 109–115.
- Ward J. H., 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association* 58, 236–244.
- Weecksteen G., 1957. Carte géologique de reconnaissance du Cameroun au 1/500 000, feuille Douala - Est avec notice explicative. Mémoire Direction des Mines, Cameroun, 39 p.
- Whitney D. L., Evans B. D., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, 185–187.
- Xiao Wei, Hongbang J., Shijie W., Huashuo C., Changshun S., 2014. The formation of representative lateritic weathering covers in South Central Guangxi (Southern China). *Catena* 118, 55–72.
- Yato Katte V., Mfoyet Moupe S., Manefouet B., Wouatong A. S. L., Aleh Bezeng L., 2018. Correlation of California bearing ratio (CBR) value with soil properties of road subgrade Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, <https://doi.org/10.1007/S10706-018-0604-X>.
- Yongue Fouateu R., 1986. Contribution à l'étude pétrologique de l'altération et des faciès de cuirassement ferrugineux des gneiss migmatitiques de la région de Yaoundé. Thèse Doct. 3e cycle Univ. Yaoundé I, 214 p.
- Youta H., J., 1998. Arbres contre graminées : la lente invasion de la savane par la forêt au Centre - Cameroun. Thèse Doct. UFR de Géographie et aménagement. Univ. Paris-Sorbonne (Paris IV), 238 p.
- Yvon J., Baudracco J., Cases J. M., Weiss J., 1990. Elements of quantitative mineralogy in microanalysis of clays. Clay Materials, Structure, properties and application, Decarreau Ed., 475–489 pp.
- Zeynal A. E., 2016. A quantitative method of describing grain size distribution of soils and some examples for its applications. *Bulletin of Engineering Geology and Environment* 75, 807–819.

# **ANNEXES**

**ANNEXE I. DONNEES DE LA RECHERCHE BIBLIORAPHIQUE**

Tableau I.1. Données récapitulatives des paramètres géotechniques sur schistes.

Auteurs	dr	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	LL	LP	IP	TEO	DSM	CBR
Ekodeck (1984)	2,74	2,78						
Onana 2010			55		18	9,64	2,06	33
	2,85	2,85				9,71	2,19	49
	2,69	2,85						
	2,90	2,91	51					
<b>moyenne</b>	<b>2,80</b>	<b>2,85</b>	<b>53</b>	-	<b>18</b>	<b>9,7</b>	<b>2,13</b>	<b>41</b>
Minimum	2,69	2,69	40	-	10	9,6	2,06	33
Maximum	2,92	2,92	72	-	39	9,7	2,19	49

Tableau I.2. Données récapitulatives des travaux sur roches plutoniques

	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	LL	LP	IP	DSM	TEO
Onana <i>et al.</i> (2017)	2,80	69	34	2,18	8,6	43
	2,85	81	44	1,95	14,5	31
	2,83	57	26	2,17	10,2	52
	2,69	76	33	1,95	14,3	31
	2,87	65	31	2,20	9,8	58
	2,85	77	32	2,20	9,8	35
	2,75	73	38	2,14	10,4	68
	2,75	73	35	1,94	14,5	36
	2,79	95	55	2,01	12,8	31
	2,85	85	39	2,03	13,0	36
Nzabakurikiza <i>et al.</i> (2017)	2,80	61	27	2,04	12,2	54
	2,73	56	28	2,06	13,0	68
	2,81	61	30	2,05	12,0	47
	2,79	64	30	2,06	12,0	64
	2,90	53	22	2,18	10,0	69
	2,89	55	29	1,91	13,2	58
	2,90	63	30	2,09	11,0	68
	2,89	62	32	2,05	12,0	58
	2,88	61	30	2,08	12,0	59
	2,85	58	27	2,05	12,0	60
<b>Moyenne</b>	<b>2,83</b>	<b>67</b>	<b>32</b>	<b>2,07</b>	<b>11,8</b>	<b>53</b>
Minimum	2,69	53	21,7	1,91	8,6	31
Maximum	2,99	95	55	2,20	14,5	78

## **ANNEXE II. DONNEES PHYSIQUES ET MECANIQUES DE LA ROCHE**

Tableau II.1. Données de l'analyse granulométrique du 0/31,5

Analyse granulométrique N°1					Analyse granulométrique N°2				
Poids sec: 6498 g		Classe : 0/31,5			Poids sec : 6800 g		Classe : 0/31,5		
Module	Tamis	%tamisat cumulé	Poids tamisats. Cumulé	%refus cumulé	Module	Tamis	%tamisat cumulé	Poids tamisats. Cumulé	%refus cumulé
47	40	100	0	0	47	40	100	0	0
46	31,5	100	0	0	46	31,5	98,3	114	1,7
45	25	85	980	15	45	25	86,7	869	13,3
44	20	73,7	1710	26,3	44	20	72,6	1785	27,4
43	16	64,7	2294	35,3	43	16	62,3	2455	37,7
41	10	51,6	3147	48,4	41	10	47,7	3399	52,3
39	6,3	43	3707	57	39	6,3	38,5	4000	61,5
38	5	39,2	3953	60,8	38	5	35	4226	65
34	2	31,3	4466	68,7	34	2	26,5	4778	73,5
31	1	27,8	4696	72,2	31	1	23	5003	77
28	0,5	24,6	4900	75,4	28	0,5	20,5	5170	79,5
26	0,315	20,8	5150	79,2	26	0,315	18,1	5325	81,9
24	0,2	16,9	5401	83,1	24	0,2	14,6	5552	85,4
23	0,16	14	5593	86	23	0,16	12,2	5705	87,8
20	0,08	11	5789	89	20	0,08	8,3	5962	91,7

Tableau II.2. Données de l'analyse granulométrique du 6,3/10

Analyse granulométrique N° 1					Analyse granulométrique N°2				
Poids sec: 2218 g		Classe : 6,3/10			Poids sec : 2219 g		Classe : 6,3/10		
Module	Tamis	%tamisat cumulé	Poids tamisats. Cumulé	%refus cumulé	Module	Tamis	%tamisat cumulé	Poids tamisats. Cumulé	%refus cumulé
43	16	100	0	0	43	16	100	0	0
42	12,5	99,6	10	0,4	42	12,5	99,3	17	0,7
41	10	83,5	368	16,5	41	10	81,5	412	18,5
40	8	22,5	1720	77,5	40	8	18,9	1800	81,1
39	6,3	5,1	2106	94,9	39	6,3	3,5	2142	96,5
38	5	2,8	2157	97,2	38	5	2,2	2172	97,8
37	4	2,5	2164	97,5	37	4	1,9	2179	98,1
36	3,15	2,3	2168	97,7	36	3,15	1,7	2182	98,3
34	2	2,2	2171	97,8	34	2	1,6	2185	98,4
31	1	2	2174	98	31	1	1,5	2187	98,5
28	0,5	1,9	2176	98,1	28	0,5	1,4	2188	98,6
26	0,315	1,9	2178	98,1	26	0,315	1,4	2190	98,6
23	0,16	1,8	2180	98,2	23	0,16	1,3	2191	98,7
20	0,08	1,7	2182	98,3	20	0,08	1,3	2192	98,7

Tableau II.3. Données de l'analyse granulométrique du 4/6

Analyse granulométrique					Analyse granulométrique				
Poids sec : 2014 g		Classe : 4/6			Poids sec : 2011 g		Classe : 4/6		
Module	Tamis	%tamisat cumulé	Poids tamisats. Cumulé	%refus cumulé	Module	Tamis	%tamisat cumulé	Poids tamisats. Cumulé	%refus cumulé
43	16	100	0	0	43	16	100	0	0
41	10	100	0	0	41	10	100	0	0
40	8	100	2	0	40	8	100	2	0
39	6,3	95,2	97	4,8	39	6,3	94,2	118	5,8
38	5	54,8	912	45,2	38	5	53,8	931	46,2
37	4	16,3	1686	83,7	37	4	15,1	1708	84,9
36	3,15	6,8	1879	93,2	36	3,15	5,8	1896	94,2
34	2	1,8	1978	98,2	34	2	1,6	1980	98,4
30	0,8	0,8	1998	99,2	31	1	0,9	1994	99,1
28	0,5	0,7	2000	99,3	28	0,5	0,8	1996	99,2
26	0,315	0,6	2002	99,4	26	0,315	0,7	1998	99,3
23	0,16	0,4	2006	99,6	23	0,16	0,5	2001	99,5
20	0,08	0,3	2008	99,7	20	0,08	0,3	2005	99,7

Tableau II.4. Données de l'analyse granulométrique du 0/4

Analyse granulométrique N° 1					Analyse granulométrique N° 2				
Poids sec : 1974g		Classe : 0/4			Poids sec : 2106 g		Classe : 0/4		
Module	Tamis	%tamisat cumulé	Poids tamisats. Cumulé	%refus cumulé	Module	Tamis	%tamisat cumulé	Poids tamisats cumulés	%refus cumulé
40	8		0	0	40	8	100		0
39	6,3	100	0	0	39	6,3	100	0	0
38	5	99,6	8	0,4	38	5	99,3	15	0,7
37	4	99,3	14	0,7	37	4	98,1	42	1,9
35	2,5	87,7	243	12,3	35	2,5	84,3	331	15,7
34	2	79,7	401	20,3	34	2	81,2	398	18,8
32	1,25	68,6	620	31,4	32	1,25	70,7	619	29,3
31	1	63,4	723	36,6	31	1	63,3	775	36,7
29	0,63	59,9	793	40,1	29	0,63	56,7	912	43,3
28	0,5	55,2	886	44,8	28	0,5	52,9	992	47,1
26	0,315	47,9	1030	52,1	26	0,315	46,7	1123	53,3
23	0,16	32,4	1336	67,6	23	0,16	32,2	1428	67,8
20	0,08	18	1619	82	20	0,08	17,7	1735	82,3

Tableau II.5. Données de l'essai de masse volumique des particules solides

<b>Masse volumique des grains solides</b>								
	<b>Classe : 0/31,5</b>		<b>Classe : 6,3/10</b>		<b>Classe : 4/6,3</b>		<b>Classe : 0/4</b>	
DESIGNATION	N°1	N°2	N°1	N°2	N°1	N°2	N°1	N°2
poids pycnomètre+eau	980	1567,5	1566,23	825	823	1569	904,64	828,5
poids pycnomètre	228,4	365,4	360,5	253	248	364	229,04	248
poids eau	751,6	1202,1	1205,73	572	575	1205	675,6	580,5
Température	27	25	26,6	26,6	26	26	26	26
densité à T lue	996	997,044	996,621	996,621	996,733	996,733	996,733	996,733
volume du pycnomètre	0,755	1,206	1,21	0,574	0,577	1,209	0,678	0,583
poids pycnomètre+matériau	820	1490	1494,13	929	835	1571	1140,28	929
poids matériau	591,6	1124,6	1133,63	676	587	1207	911,24	681
poids total	1571,6	2692,1	2699,86	1501	1410	2776	1815,88	1509,5
poids pycnomètre+matériau+eau	1366,2	2301,4	2305,23	1266	1206	2356	1488,49	1266
poids d'eau déplacé	205,8	390,7	394,63	235	204	420	327,39	243,5
Température	25	25	26,6	27	25,8	25,8	27	27
densité à T lue	997,044	997,044	996,621	996,512	997,836	997,836	996,512	996,512
volume du matériau	0,207	0,392	0,396	0,236	0,205	0,421	0,329	0,245
poids spécifique	2,870	2,869	2,863	2,865	2,864	2,867	2,77	2,78
Moyenne	<b>2,869</b>		<b>2,864</b>		<b>2,866</b>		<b>2,775</b>	

Tableau II.6. Données de l'essai Micro-Deval pour 0/31,5 et 6,3/10

Essai micro-deval								
	Classe : 0/31,5				Classe : 6,3/10			
	Essai N° 1		Essai N° 2		Essai N° 1		Essai N° 2	
Poids des boules : 10000 g	MDE sec	MDE humide	MDE sec	MDE humide	MDE sec	MDE humide	MDE sec	MDE humide
Nature	0/31,5	0/31,5	0/31,5	0/31,5	concassé	concassé	concassé	concassé
Fraction	10/25	10/25	10/25	10/25	6,3/10	6,3/10	6,3/10	6,3/10
Prise d'essai	500	500	500	500	500	500	500	500
Poids de l'échantillon sec	442	445	450	445	440	437	435	437
Poids passants au tamis de 1,6	58	55	50	55	60	63	65	63
MDE	11,6	11,0	10,0	11,0	12,0	12,6	13,0	12,6
<b>Moyenne</b>	<b>11,3</b>		<b>10,5</b>		<b>12,3</b>		<b>12,8</b>	

Tableau II.7. Données de l'essai Micro-Deval pour 4/6,3 et 0/4

Essai micro-deval					Essai de friabilité			
	4/6,3				0/4			
	Essai N° 1		Essai N° 2		Essai N° 1		Essai N° 2	
Poids des boules : 10000 g	<b>MDE sec</b>	<b>MDE humide</b>	<b>MDE sec</b>	<b>MDE humide</b>	/	/	/	/
Nature	concassé	concassé	concassé	concassé	concassé	concassé	concassé	concassé
Fraction	4/6	4/6	4/6	4/6	0/4	0/4	0/4	0/4
Prise d'essai	500	500	500	500	500	500		
Poids de l'échantillon sec	382	381	385	384				
Poids passants au tamis de 1,6	118	119	115	116	204	200	198	196
MDE	23,6	23,8	23,0	23,2	40,8	40	39,6	39,2
<b>Moyenne</b>	<b>23,7</b>		<b>23,1</b>		<b>40,4</b>		<b>39,4</b>	

Tableau II.8. Données de l'essai Los Angeles pour 0/31,5 et 6,3/10

Essai Los Angeles								
	0/31,5				6,3/10			
	Essai N°1		Essai N°2		Essai N°1		Essai N°2	
	Nombre de boules : 11 Poids des boules : 4830 g		Nombre de boules : 11 Poids des boules : 4813 g		Nombre de boules : 11 Poids des boules : 4830		Nombre de boules : 11 Poids des boules : 4830	
	Non lavé	Lavé	Non lavé	Lavé	Non lavé	Lavé	Non lavé	Lavé
Nature	0/31,5	0/31,5	0/31,5	0/31,5	concassé	concassé	concassé	concassé
Fraction	10/25	10/25	10/25	10/25	6/10	6/10	6/10	6/10
Prise d'essai	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
Poids de l'échantillon sec	3735	3732	3722	3713	3700	3690	3670	3655
Poids passants au tamis de 1,6	1265	1268	1278	1287	1300	1310	1330	1345
LA	25,30	25,36	25,56	25,74	26	26,2	26,6	26,9
<b>Moyenne</b>	<b>25,3</b>		<b>25,6</b>		<b>26,1</b>		<b>26,7</b>	

Tableau II.9. Données de l'essai Los Angeles pour 4/6,3

<b>Essai Los Angeles</b>				
	<b>4/6,3</b>			
	<b>Essai N°1</b>		<b>Essai N°2</b>	
	Nombre de boules : 11 Poids des boules : 4830 g		Nombre de boules : 11 Poids des boules : 4813 g	
	<b>Non lavé</b>	<b>Lavé</b>	<b>Non lavé</b>	<b>Lavé</b>
Nature	concassé	concassé	concassé	concassé
Fraction	4/6	4/6	4/6	4/6
Prise d'essai	5000	5000	5000	5000
Poids de l'échantillon sec	3459	3449	3390	3380
Poids passants au tamis de 1,6	1541	1551	1610	1620
LA	30,82	31,02	32,2	32,4
<b>Moyenne</b>	<b>31</b>		<b>32,3</b>	

Tableau II.10. Données du coefficient d'aplatissement 0/31,5

Coefficient d'aplatissement							
M <sub>0</sub> =3000 g							
Classe 0/31,5				Classe 0/31,5			
Tamisage sur tamis		Tamisage sur grille		Tamisage sur tamis		Tamisage sur grille	
Classes granulométriques d/D (mm)	Mg (g)	Ecartement des grilles	Passants Me (g)	Classes granulométriques d/D (mm)	Mg (g)	Ecartement des grilles	Passants Me (g)
31,5 - 40		20		31,5 - 40		20	
25 - 31,5	152	16	50	25 - 31,5	238	16	51
20 - 25	300	12,5	70	20 - 25	613	12,5	75
16 - 20	745	10	90	16 - 20	696	10	86
12,5 - 16	997	8	105	12,5 - 16	925	8	114
10 - 12,5	885	6,3	102	10 - 12,5	499	6,3	67
8 - 10	425	5	85	8 - 10	425	5	59
6,3 - 8	402	4	70	6,3 - 8	318	4	48
5 - 6,3	158	3,15	53	5 - 6,3	268	3,15	30
4 - 5	139	2,5	39	4 - 5	150	2,5	39
M	4203	Me	664	M	4132	Me	569
CA= (Me/M) ×100	<b>15,8</b>			CA= (Me/M) ×100	<b>13,8</b>		

Tableau II.11. Données du coefficient d'aplatissement 6,3/10

<b>Coefficient d'aplatissement</b>							
<b>Classe 6,3/10</b>				<b>Classe 6,3/10</b>			
$M_0=3000$ g							
Tamisage sur tamis		Tamisage sur grille		Tamisage sur tamis		Tamisage sur grille	
Classes granulométriques d/D (mm)	Mg (g)	Ecartement des grilles	Passants Me (g)	Classes granulométriques d/D (mm)	Mg (g)	Ecartement des grilles	Passants Me (g)
31,5 - 40		20		31,5 - 40		20	
25 - 31,5		16		25 - 31,5		16	
20 - 25		12,5		20 - 25		12,5	
16 - 20		10		16 - 20		10	
12,5 - 16	20	8	2	12,5 - 16		8	
10 - 12,5	709	6,3	142	10 - 12,5	7,8	6,3	143,3
8 - 10	1658	5	302	8 - 10	733,3	5	324,4
6,3 - 8	520	4	100	6,3 - 8	1765	4	78,3
5 - 6,3	66	3,15	14	5 - 6,3	419,4	3,15	10
4 - 5	22	2,5	5	4 - 5	66	2,5	3
M	2995	Me	565	M	2991,5	Me	559
CA= (Me/M) ×100	<b>18,9</b>			CA= (Me/M) ×100	<b>18,7</b>		

Tableau II.12. Données du coefficient d'aplatissement 4/6

<b>Coefficient d'aplatissement</b>							
<b>Classe 4/6</b>				<b>Classe 4/6</b>			
$M_0=3000$ g							
Tamisage sur tamis		Tamisage sur grille		Tamisage sur tamis		Tamisage sur grille	
Classes granulométriques d/D (mm)	Mg (g)	Ecartement des grilles	Passants Me (g)	Classes granulométriques d/D (mm)	Mg (g)	Ecartement des grilles	Passants Me (g)
31,5 - 40		20		31,5 - 40		20	
25 - 31,5		16		25 - 31,5		16	
20 - 25		12,5		20 - 25		12,5	
16 - 20		10		16 - 20		10	
12,5 - 16		8		12,5 - 16		8	
10 - 12,5		6,3		10 - 12,5		6,3	
8 - 10	1	5	1	8 - 10	1	5	1
6,3 - 8	184	4	73	6,3 - 8	187	4	70
5 - 6,3	1405	3,15	323	5 - 6,3	1408	3,15	320
4 - 5	1291	2,5	303	4 - 5	1291	2,5	300
M	2881	Me	700	M	2887	Me	691
CA= (Me/M) ×100	<b>24,3 %</b>			CA= (Me/M) ×100	<b>23,9 %</b>		

Tableau II.13. Données de l'équivalent de sable pour 0/4, 4/6 et 0/31,5

<b>Equivalent de sable</b>									
	<b>0/4</b>			<b>0/31,5</b>			<b>4/6,3</b>		
	N°1	N°2	N°3	N°1	N°2	N°3	N°1	N°2	N°3
Mise échantillon au temps T0	11h 05	11h 10	11h 15	10h 07	10h 10	10h 13	10h 07	10h 10	10h 13
Agitation et lavage au temps T1=T0+10	11h 15	11h 20	11h 25	10h 17	10h 20	10h 23	10h 17	10h 20	10h 23
Début de défloculation	11h 17	11h 22	11h 27	10h 19	10h 22	10h 25	10h 19	10h 22	10h 25
Mesure au temps T3=T+20	11h 37	11h 42	11h 47	10h 39	10h 42	10h 45	10h 39	10h 42	10h 45
Hauteur totale H0	11,8	11,6	11,8	13,8	14	13,8	13,4	13,3	13,6
Hauteur du sable à vue H1	7,4	7,5	7,4	7,5	7,4	7,6	7	7,1	7,3
Hauteur du sable au piston H2	6,7	6,6	6,7	6,5	6,6	6,5	6,7	6,6	6,9
Equivalent de sable visuel (H1/H0)*100	62,8	64,7	62,8	54,4	52,9	52,1	52,2	52,3	53,7
Equivalent de sable au piston (H2/H0)*100	56,8	56,9	56,8	47,2	47,2	47,2	50	49,6	50,7
Moyenne ESV	63			54,1			52		
Moyenne ESP	57			47,2			50,1		
<b>ES</b>	<b>60</b>			<b>51</b>			<b>50,3</b>		

Tableau II.14. Données de l'essai Proctor Modifié N °1 sur 0/31,5

N° tare	D63	Y8	T6	55	TQ	251	17	ABO	TM	TQ
Masse totale humide	793	814,3	878,3	869,4	926,2	945,1	1004,4	885,7	678,3	664
Masse totale sèche	764,7	785,4	834,5	826,9	869	885,5	925,4	815,5	609,6	596,4
Masse tare	46,3	52,7	59,9	54,2	51,9	42,1	52,1	51,8	51,5	51,9
Masse eau	28,3	28,9	43,8	42,5	57,2	59,6	79	70,2	68,7	67,6
Masse matériau sec	718,4	732,7	774,6	772,7	817,1	843,4	873,3	763,7	558,1	544,5
Teneur en eau	3,9	3,9	5,7	5,5	7,0	7,1	9,0	9,2	12,3	12,4
Teneur en eau moyenne	3,9		5,6		7,0		9,1		12,4	
N° Moule	P18		P16		P7		P9		P0	
Masse totale Humide	9317		9582		9600		9470		9621	
Masse moule	4168		4168		4168		4168		4168	
Masse matériau humide	5149		5414		5432		5302		5453	
Volume du moule	2103		2103		2103		2103		2103	
Densité humide	2,448		2,574		2,583		2,521		2,593	
Densité sèche maximale	2,356		2,438		2,413		2,310		2,308	

Tableau II.15. Données de l'essai Proctor Modifié N°2 sur 0/31,5

N° tare	O15	AC2	O17	239	273	T6	244	AB1	TM	TQ
Masse totale humide	880	872,1	785,2	771,6	789,8	945,7	784,6	800,9	678,3	664
Masse totale sèche	862,5	854,7	757,3	743,8	747,8	894	729,4	745,5	609,6	596,4
Masse tare	54,8	50,8	52	43,7	38,4	59,9	34,4	53	51,5	51,9
Masse eau	17,5	17,4	27,9	27,8	42	51,7	55,2	55,4	68,7	67,6
Masse matériau sec	807,7	803,9	705,3	700,1	709,4	834,1	695	692,5	558,1	544,5
Teneur en eau	2,2	2,2	4,0	4,0	5,9	6,2	7,9	8,0	12,3	12,4
Teneur en eau moyenne	2,2		4,0		6,1		8,0		12,4	
N° Moule										
Masse totale Humide	9246		9412		9548		9467		9246	
Masse moule	4167		4167		4167		4167		4167	
Masse matériau humide	5079		5245		5381		5300		5079	
Volume du moule	2103		2103		2103		2103		2103	
Densité humide	2,415		2,494		2,559		2,520		2,415	
Densité sèche maximale	2,364		2,399		2,413		2,334		2,149	

Tableau II.16. Données de l'essai CBR N°1 sur 0/31,5

<b>Pesée</b>	<b>Moulage</b>			<b>Après immersion</b>		
N° Tare	298	AZ4				
Poids humide + tare	688,7	783,9				
Poids sec + tare	650,7	741,6				
Poids Tare	37,3	56,7				
Poids d'eau	38	42,3				
Poids matériau sec	613,4	684,9				
Teneur en eau %	6,2	6,2		6,7	7,8	9,1
Moyenne	6,2			7,9		
	<b>Moulage</b>			<b>Après immersion</b>		
	55	25	10	55	25	10
N° Moule	11	CE	P11			
Poids moule + Tare	11780	12210	11214	11793	12279	11350
Poids Moule	6197	6954	6287			
Poids humide	5583	5256	4927			
Volume moule	2159	2140	2122			
$\gamma_h$ (KN/m <sup>3</sup> )	2,586	2,456	2,322			
$\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> )	2,435	2,313	2,187			
Compacité %	99,8	94,8	89,6			
Gonflement		0,2				
Densité Proctor (OPM)						2,441
Teneur en eau à l'OPM (%)						6 %

Tableau II.17. Données de l'essai CBR N°2 sur 0/31,5

<b>Pesée</b>	<b>Moulage</b>			<b>Après immersion</b>		
N° Tare	290	AB11				
Poids humide + tare	700,1	822				
Poids sec + tare	663,4	781,8				
Poids Tare	42,6	53,1				
Poids d'eau	36,7	40,2				
Poids matériau sec	620,8	728,7				
Teneur en eau %	5,9	5,5		6,2	7,4	8,7
Moyenne	5,7			7,4		
	<b>Moulage</b>			<b>Après immersion</b>		
	55	25	10	55	25	10
N° Moule	CC	AC	C5			
Poids moule + Tare	12500	12720	12321	12530	12810	12471
Poids Moule	7024	7514	7347			
Poids humide	5476	5206	4974			
Volume moule	2140	2140	2159			
$\gamma_h$ (KN/m <sup>3</sup> )	2,559	2,433	2,304			
$\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> )	2,421	2,301	2,179			
Compacité %						
Gonflement		0,26				
Densité Proctor (OPM)						2,42
Teneur en eau à l'OPM (%)						5,6 %

Tableau II.18. Données N° 1 du poinçonnement du 0/31,5

Enfoncement (mm)	Poinçonnement					
	55		25		10	
	Lecture		Lecture		Lecture	
	Lue	Normale	Lue	Normale	Lue	Normale
0,2	8		5		2	
0,4	18		11		4	
0,6	25		18		8	
0,8	35		27		11	
1	48		35		15	
1,5	60		44		20	
2	76		52		24	
2,5	<b>89</b>	<b>149</b>	<b>58</b>	<b>98,1</b>	<b>27</b>	<b>47,3</b>
3,0	99		63		30	
3,5	105		68		33	
4	113		73		36	
4,5	121		78		40	
5	<b>128</b>	<b>142,7</b>	<b>82</b>	<b>99,8</b>	<b>43</b>	<b>49,3</b>
6	140		86		46	
7	150		93		52	
8						
9						
10						

Tableau II.19. Données N° 2 du poinçonnement du 0/31,5

Enfoncement (mm)	Poinçonnement					
	55		25		10	
	Lecture		Lecture		Lecture	
	Lue	Normale	Lue	Normale	Lue	Normale
0,2	8		5		2	
0,4	20		12		5	
0,6	30		18		8	
0,8	42		25		11	
1	53		32		14	
1,5	63		38		17	
2	78		47		20	
2,5	<b>92</b>	<b>153,9</b>	<b>59</b>	<b>99,8</b>	<b>26</b>	<b>45,6</b>
3,0	100		63		28	
3,5	107		68		31	
4	112		73		34	
4,5	120		78		36	
5	<b>126</b>	<b>140,5</b>	<b>82</b>	<b>92,1</b>	<b>38</b>	<b>43,8</b>
6	139		86		42	
7	148		93		45	
8						
9						
10						

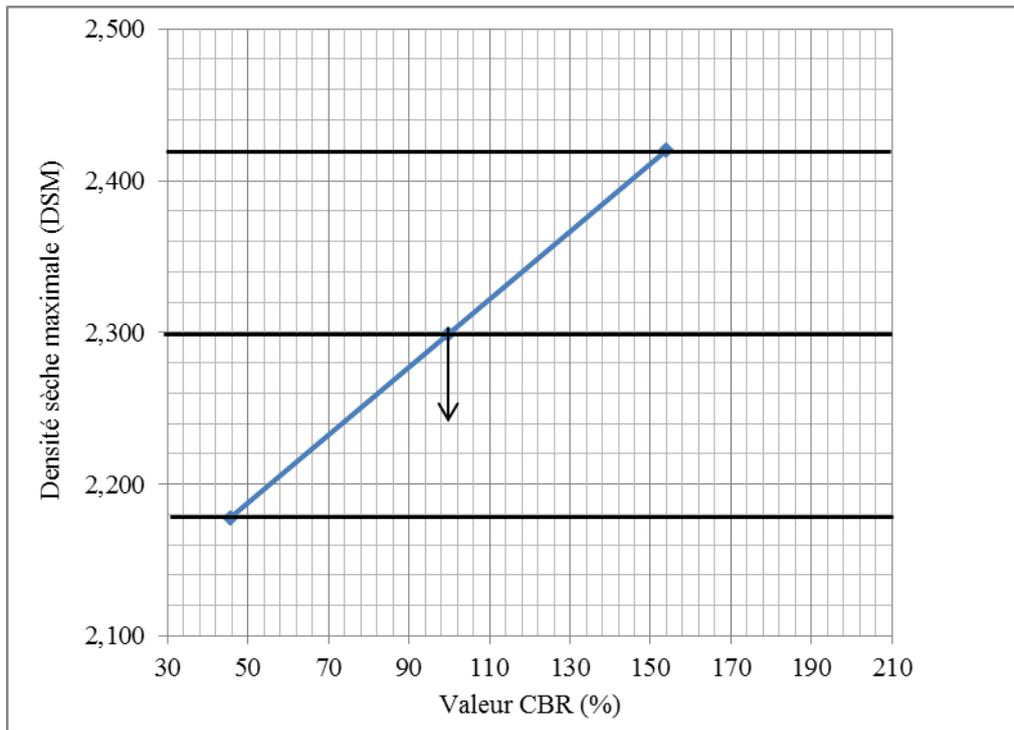


Figure II.1. Courbe de détermination du CBR pour échantillon de 0/315 n°1

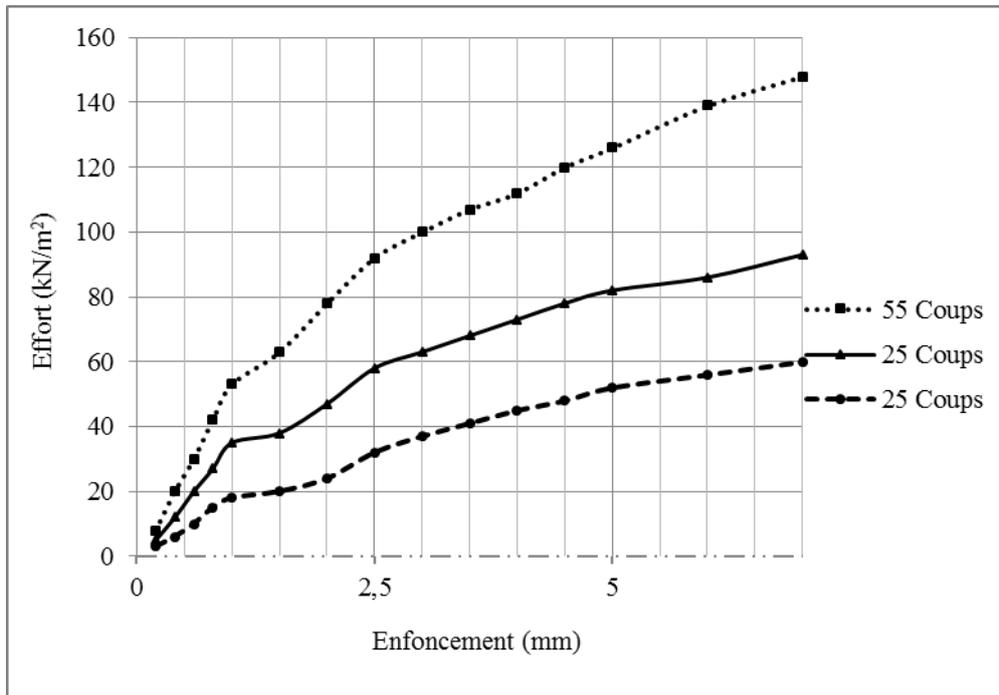


Figure II.2. Courbe effort - déformation pour échantillon de 0/315 n°1

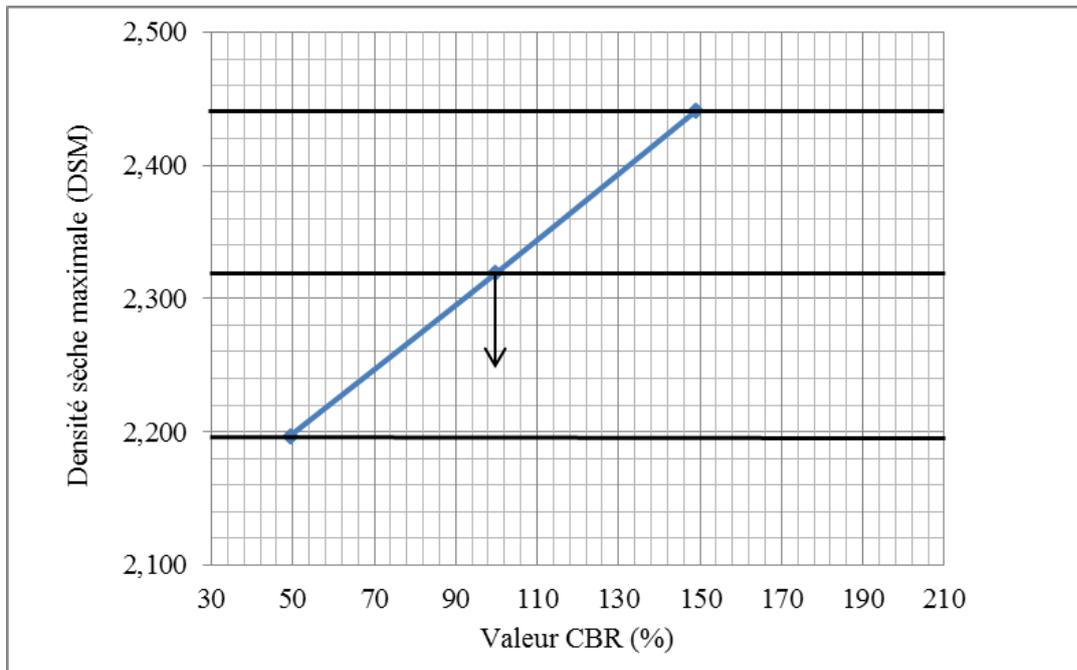


Figure II.3. Courbe de détermination du CBR pour échantillon de 0/315 n°2

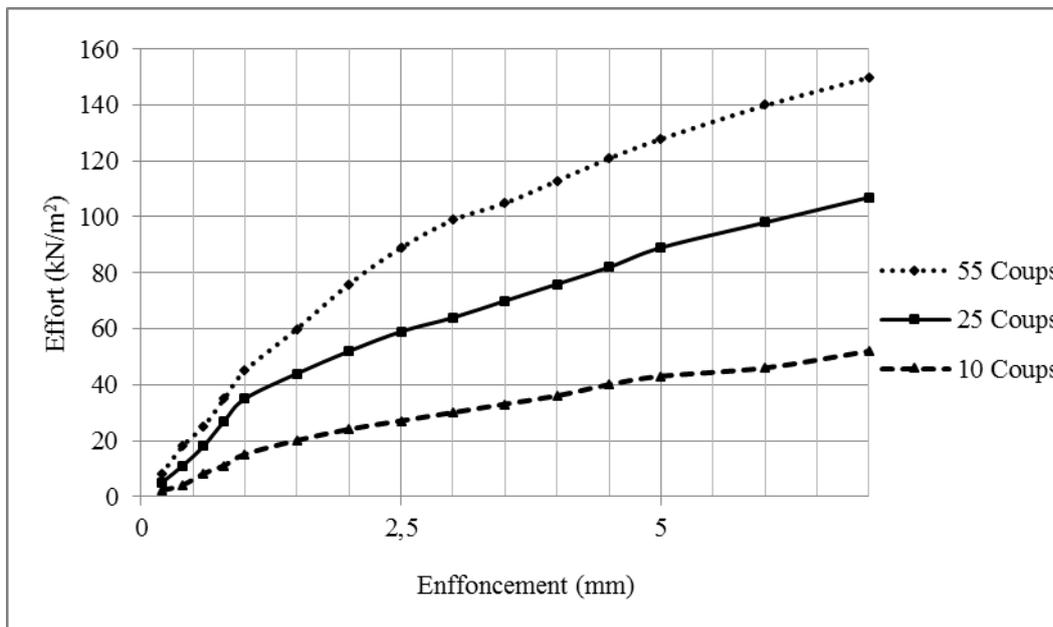


Figure II.2. Courbe effort - déformation pour échantillon de 0/315 n°2

**ANNEXE III. DONNEES GEOTECHNIQUES DES CARRIERES DE GRAVELEUX  
LATERITIQUES**

Tableau III.1. Données des carrières PK 1 + 475 et PK 9 + 800

	ECH	$\rho_s$	< 2 mm	< 425 $\mu\text{m}$	< 80 $\mu\text{m}$	< 75 $\mu\text{m}$	(LL) (%)	(PI) (%)	(Gm)	(Pm)	(Pp)	$\epsilon_s$	(TEO)	(DSM)	CBR
<b>PK 1+475</b>	1	2,604	85,1	54,4	30,7	30,7	51	24	1,948	1217	737	0,014	15,4	1,870	27
	2	2,699	61,0	41,8	32,0	32,0	52	25	1,760	684	800	0,015	13,5	1,948	34
	3	2,639	58,0	41,2	33,0	33,0	54	24	1,959	731	792	0,014	17,8	1,806	35
	4	2,605	54,7	35,9	23,1	23,1	45	23	1,795	403	531	0,012	11,8	1,940	57
	5	2,656	52,4	33,2	23,7	23,7	53	25	2,410	816	593	0,015	13,5	1,940	53
	6	2,622	53,9	35,8	28,0	28,0	46	19	2,356	345	532	0,008	12,6	1,970	35
	7	2,666	55,2	31,5	20,2	20,2	43	18	2,179	942	364	0,007	10,9	2,048	42
	8	2,671	36,8	26,1	20,4	20,4	54	24	1,605	1176	490	0,014	11,0	2,001	53
	9	2,647	44,0	30,7	24,4	24,4	53	24	1,969	1667	586	0,014	10,7	2,080	52
	10	2,682	43,1	27,8	27,3	27,3	51	22	2,127	411	513	0,011	12,4	1,896	52
	11	2,705	42,0	26,0	20,0	20,0	53	21	2,327	497	420	0,010	15,5	1,890	50
	12	2,688	51,3	37,1	30,8	30,8	56	23	1,603	627	708	0,012	14,4	1,858	55
	13	2,687	45,1	30,0	25,3	25,3	55	22	2,460	1094	557	0,011	14,3	1,870	50
	14	2,753	48,7	30,9	26,2	26,2	53	18	1,921	1152	472	0,007	19,3	1,900	42
	15	2,761	80,3	49,3	34,7	34,7	57	24	2,057	278	833	0,014	18,6	1,838	47
	16	2,635	45,1	31,4	27,4	27,4	55	21	2,097	622	575	0,010	12,8	1,916	45
	17	2,677	59,3	41,8	34,1	34,1	54	23	1,914	319	784	0,012	13,7	1,950	45
<b>PK 9+800</b>	18	2,720	50,3	30,2	24,7	24,7	57	24	1,948	725	593	0,014	15,8	1,890	45
	19	2,750	60,1	33,7	30,2	30,2	52	26	1,948	875	785	0,016	16,8	1,870	39
	20	2,690	51,0	28,1	25,0	25,0	43	18	1,948	505	450	0,007	10,7	1,994	42
	21	2,685	59,0	32,5	29,0	29,0	54	22	1,948	716	638	0,011	15,0	1,980	45
	22	2,801	27,4	16,7	14,9	14,9	27	14	1,948	234	209	0,004	11,0	2,080	41
	23	2,718	26,4	20,5	17,5	17,5	37	17	1,948	349	298	0,006	11,5	2,014	31
	24	2,740	35,3	25,7	21,1	21,1	50	20	1,948	515	422	0,009	11,9	2,022	36
	25	2,647	61,4	41,8	36,3	36,3	48	24	1,948	1003	871	0,014	17,8	1,770	28
	26	2,702	45,3	31,3	26,5	26,5	51	21	1,948	658	557	0,010	11,5	2,010	33
	27	2,745	35,7	24,3	27,3	27,3	40	20	1,948	486	418	0,009	13,5	1,980	46
	28	2,756	28,1	20,9	18,3	18,3	45	16	1,948	335	293	0,005	10,0	2,100	38
	29	2,691	60,7	43,2	35,8	35,8	49	25	1,948	1081	895	0,015	14,0	1,890	32
	30	2,774	24,4	15,6	14,0	14,0	24	11	1,948	171	154	0,002	10,8	2,058	45
	31	2,635	54,6	30,3	23,0	23,0	48	21	1,948	636	483	0,010	14,0	1,920	48
	32	2,600	45,7	28,1	20,5	20,5	45	20	1,948	561	410	0,009	16,6	1,864	45
	33	2,706	40,9	28,9	20,5	20,5	37	16	1,948	463	328	0,005	9,8	2,070	49
	34	2,68	50,5	33,4	24,7	24,7	48	19	1,948	634	469	0,008	11,0	2,040	48

Tableau III.2. Données des carrières PK 13 + 825 et PK 17 + 450

	ECH	$\rho_s$	< 2 mm	< 425 $\mu\text{m}$	< 80 $\mu\text{m}$	< 75 $\mu\text{m}$	(LL) (%)	(PI) (%)	(Gm)	(Pm)	(Pp)	$\epsilon_s$	(TEO)	(DSM)	CBR
<b>PK 13+825</b>	35	2,644	75,7	55,3	42,2	42,2	55	22	1,268	1217	928	0,011	13,0	1,838	39
	36	2,65	55,7	32,6	25,0	25,0	51	21	1,867	684	525	0,010	11,7	1,958	48
	37	2,684	51,9	31,8	24,3	24,3	51	23	1,920	731	559	0,012	9,0	2,040	31
	38	2,611	33,9	17,5	14,1	14,1	53	23	2,345	403	324	0,012	10,3	2,030	35
	39	2,715	56,0	34,0	26,9	26,9	55	24	1,831	816	646	0,014	14,8	1,930	30
	40	2,738	31,5	21,5	17,3	17,3	38	16	2,297	345	277	0,005	10,3	2,090	49
	41	2,606	77,3	40,9	38,1	38,1	49	23	1,437	942	876	0,012	13,8	1,940	36
	42	2,538	69,8	45,2	34,9	34,9	54	26	1,501	1176	907	0,016	15,8	1,880	35
	43	2,682	90,3	66,7	50,0	50,0	52	25	0,930	1667	1250	0,015	16,0	1,850	21
	44	2,758	33,4	20,6	27,3	27,3	41	20	2,187	411	310	0,009	9,0	2,180	36
	45	2,733	57,0	33,1	23,1	23,1	36	15	1,868	497	347	0,005	12,0	2,068	55
	46	2,653	51,3	31,3	23,0	23,0	43	20	1,944	627	460	0,009	11,0	2,060	54
	47	2,696	70,4	43,8	29,1	29,1	49	25	1,567	1094	728	0,015	10,3	2,096	54
	48	2,694	71,3	48,0	36,1	36,1	45	24	1,446	1152	866	0,014	11,3	2,020	50
	49	2,563	55,7	30,9	18,6	18,6	26	9	1,948	278	167	0,002	9,3	2,102	54
50	2,77	45,7	27,1	22,3	22,3	48	23	2,049	622	513	0,012	12,0	2,054	57	
51	2,785	26,5	17,7	14,4	14,4	38	18	2,414	319	259	0,007	9,8	2,120	61	
52	2,589	50,1	26,6	16,0	16,0	26	9	2,073	239	144	0,002	9,3	2,130	67	
<b>PK 17+450</b>	53	2,698	54,7	29,6	24,6	24,5	52	18	1,912	532	443	0,007	14,0	1,821	48
	54	2,687	53,3	21,0	15,0	14,9	48	24	2,109	503	360	0,014	12,2	1,970	35
	55	2,701	44,0	29,2	19,4	19,1	52	23	2,077	672	446	0,012	10,5	2,000	45
	56	2,57	51,6	24,2	17,2	17,0	41	18	2,071	436	310	0,007	11,5	1,580	50
	57	2,672	33,8	20,9	17,1	17,0	51	23	2,283	480	393	0,012	12,5	1,992	31
	58	2,699	41,6	26,1	17,4	17,2	46	21	2,151	548	365	0,010	10,0	2,050	37
	59	2,57	51,6	24,2	17,2	17,0	41	18	2,071	436	310	0,007	11,5	1,580	50
	60	2,668	41,2	22,6	17,6	17,5	47	18	2,187	407	317	0,007	10,0	2,000	43
	61	2,756	70,5	33,2	29,8	29,8	55	27	1,665	895	805	0,018	12,7	1,942	23
	62	2,798	31,8	16,9	27,3	27,8	45	20	2,235	556	302	0,009	11,6	2,040	55
	63	2,693	62,6	47,6	44,8	44,8	51	24	1,450	1075	1075	0,014	11,8	1,960	42
	64	2,682	46,3	31,2	25,4	25,4	46	22	1,971	686	559	0,011	11,8	1,970	32
	65	2,675	47,6	29,0	25,8	25,8	47	22	1,977	567	568	0,011	12,5	1,960	31

Tableau III.3. Données des carrières PK 24 + 050, PK 24 + 675 et PK 25 + 700

	ECH	$\rho_s$	< 2 mm	< 425 $\mu\text{m}$	< 80 $\mu\text{m}$	< 75 $\mu\text{m}$	(LL) (%)	(PI) (%)	(Gm)	(Pm)	(Pp)	$\epsilon_s$	(TEO)	(DSM)	CBR
<b>PK 24+050</b>	66	2,562	53,0	35,4	28,7	28,6	59	24	1,830	850	689	0,014	13,0	1,922	33
	67	2,56	69,2	40,3	23,1	22,9	58	25	1,677	1 006	578	0,015	17,8	1,742	32
	68	2,59	47,2	36,7	32,0	31,9	52	22	1,842	808	704	0,011	12,4	2,000	40
	69	2,618	64,3	39,1	28,9	28,9	48	25	1,677	978	723	0,015	10,8	2,100	45
	70	2,69	40,3	24,0	21,3	21,2	49	22	2,145	527	469	0,011	13,7	2,010	40
	71	2,622	45,6	29,4	25,6	25,5	50	24	1,995	705	614	0,014	13,6	1,996	38
	72	2,637	32,5	25,6	23,4	23,4	44	18	2,185	461	421	0,007	12,4	2,002	43
	73	2,708	31,1	23,2	20,8	20,7	45	17	2,250	394	354	0,006	12,0	2,080	45
	74	2,698	44,3	26,4	20,7	20,6	48	20	2,087	528	414	0,009	12,3	2,014	39
	75	2,616	49,8	28,9	27,3	27,5	47	22	1,939	636	519	0,011	12,3	1,980	35
<b>PK 24+675</b>	76	2,684	51,3	34,2	26,8	26,7	51	25	1,939	855	670	0,015	13,0	2,004	42
	77	2,561	69,4	47,3	38,8	38,6	52	25	1,446	1 184	970	0,015	17,5	1,780	35
	78	2,694	53,8	38,4	28,9	28,7	42	17	1,791	653	491	0,006	13,1	1,980	50
	79	2,668	47,1	28,8	22,2	22,1	51	24	2,020	691	533	0,014	12,6	2,010	33
	80	2,605	95,5	57,7	36,1	36,0	41	18	1,108	1039	650	0,007	11,2	2,025	47
	81	2,654	39,4	25,3	15,2	15,1	48	18	2,202	455	274	0,007	16,4	1,847	56
	82	2,652	39,0	25,7	15,0	14,9	30	14	2,204	360	210	0,004	8,7	2,140	44
	83	2,634	46,2	27,4	14,5	14,3	29	12	2,121	329	174	0,003	8,5	2,109	50
	84	2,716	47,2	31,8	22,8	22,6	46	23	1,984	731	524	0,012	11,8	2,035	43
	85	2,684	47,4	36,1	25,8	25,5	37	17	1,910	614	439	0,006	10,5	2,080	46
	86	2,654	70,1	47,1	18,8	18,3	38	22	1,645	1037	414	0,011	7,4	2,160	46
	87	2,615	86,0	39,6	27,3	27,6	46	22	1,468	872	440	0,011	8,3	2,078	43
	88	2,695	65,1	34,0	19,1	18,8	40	19	1,821	646	363	0,008	7,5	2,052	48
	89	2,656	45,2	29,5	21,0	20,9	45	21	2,044	620	441	0,010	8,6	2,040	45
	90	2,710	48,2	32,8	23,8	23,6	46	22	1,954	721	524	0,011	9,5	2,040	43
<b>PK 25+700</b>	91	2,431	75,1	62,5	60,0	60,0	88	48	1,024	3000	2880	0,064	19,5	1,654	13
	92	2,598	51,5	37,9	34,8	34,7	88	46	1,759	1742	1601	0,058	13,5	1,920	37
	93	2,356	81,3	62,3	51,1	50,8	60	32	1,056	1994	1635	0,026	15,3	1,880	21
	94	2,431	71,7	50,5	43,9	43,8	69	33	1,340	1667	1449	0,028	15,2	1,775	23
	95	2,550	41,2	24,6	22,1	22,0	60	26	2,122	640	575	0,016	14,6	1,930	15
	96	2,612	46,5	31,3	25,0	24,8	62	27	1,974	846	675	0,018	15,2	1,902	30
	97	2,42	62,0	35,8	32,9	32,9	72	40	1,693	1433	1316	0,043	18,3	1,812	22
	98	2,485	50,0	24,8	20,0	19,9	67	34	2,053	842	680	0,030	14,4	1,833	26
	99	2,440	61,0	30,8	27,4	27,4	72	36	1,809	1109	986	0,034	16,4	1,831	23
	100	2,483	58,0	33,7	27,3	27,2	76	36	1,811	1215	1091	0,034	15,2	1,908	26
	101	2,624	78,0	38,4	29,0	28,8	71	34	1,548	1304	986	0,030	15,6	1,846	36

Tableau III.4. Données de la carrière 27 + 300

	ECH	$\rho_s$	< 2 mm	< 425 $\mu\text{m}$	< 80 $\mu\text{m}$	< 75 $\mu\text{m}$	(LL) (%)	(PI) (%)	(Gm)	(Pm)	(Pp)	$e_s$	(TEO)	(DSM)	CBR
<b>PK 27+300</b>	102	0	62,0	35,8	32,9	32,9	72	40	1,693	1433	1316	0,043	18,3	1,812	22
	103	0	62,5	28,0	24,3	24,3	68	32	1,853	895	778	0,026	16,4	1,902	17
	104	0	50,0	24,8	20,0	19,9	67	34	2,053	842	680	0,030	14,4	1,833	26
	105	0	61,5	41,1	33,4	33,2	74	39	1,642	1604	1303	0,040	18,3	1,675	10
	106	0	61,0	30,8	27,4	27,4	72	36	1,809	1109	986	0,034	16,4	1,831	23
	107	0	82,6	61,8	52,8	52,6	83	41	1,030	2535	2165	0,045	24,2	1,585	11
	108	0	58,0	34,6	30,3	30,2	76	36	1,772	1244	1091	0,034	15,2	1,908	26
	109	0	78,0	38,4	29,0	28,8	71	34	1,548	1304	986	0,030	15,6	1,846	36
	110	0	83,6	50,3	34,4	34,0	65	34	1,320	1711	1170	0,030	14,3	1,859	46
	111	0	68,7	40,9	27,3	27,0	70	34	1,634	1392	1190	0,030	16,0	1,868	44
	112	0	55,5	35,8	28,8	28,7	66	36	1,801	1288	1037	0,034	12,2	1,960	50
	113	0	85,4	56,6	48,9	48,8	67	34	1,093	1923	1663	0,030	17,5	1,812	44
	114	0	41,2	24,2	16,4	16,3	51	23	2,183	557	377	0,012	9,0	2,121	50
	115	0	86,4	52,8	39,5	39,3	66	33	1,216	1742	1304	0,028	13,6	1,959	25
116	0	94,8	72,7	60,3	60,1	70	41	0,725	2979	2472	0,045	16,2	1,860	16	

Tableau III.5. Données de la carrière 33 + 000

	ECH	$\rho_s$	< 2 mm	< 425 $\mu\text{m}$	< 80 $\mu\text{m}$	< 75 $\mu\text{m}$	(LL) (%)	(PI) (%)	(Gm)	(Pm)	(Pp)	$\epsilon_s$	(TEO)	(DSM)	CBR
PK 33+000	117	2,56	75,5	41,6	31,7	31,7	50	23	1,948	725	729	0,012	11,7	1,998	30
	118	2,53	73,3	38,5	30,3	30,3	49	23	1,760	875	698	0,012	11,7	1,950	25
	119	2,517	76,4	42,0	33,4	33,4	50	24	1,959	505	802	0,014	13,7	1,900	23
	120	2,46	73,1	41,9	30,4	30,4	49	22	1,795	716	669	0,011	12,7	1,920	23
	121	2,487	82,5	46,7	37,2	37,2	52	25	2,410	234	930	0,015	12,8	1,880	20
	122	2,562	69,6	39,3	30,9	30,9	50	22	2,356	349	680	0,011	11,6	1,952	27
	123	2,522	73,5	44,3	35,0	35,0	51	24	2,179	515	840	0,014	12,8	1,860	19
	124	2,572	62,1	35,0	29,2	29,2	48	21	1,605	1003	613	0,010	13,4	1,960	27
	125	2,541	62,2	37,5	30,5	30,5	49	22	1,969	658	671	0,011	11,5	1,972	28
	126	2,539	82,7	42,7	27,3	27,3	50	25	2,127	486	865	0,015	13,3	1,914	24
	127	2,511	81,1	53,7	42,4	42,4	51	25	2,327	335	1060	0,015	14,1	1,860	19
	128	2,577	54,1	29,0	25,0	25,0	50	24	1,603	1081	600	0,014	10,4	2,040	37
	129	2,585	58,9	32,0	25,8	25,8	51	24	2,460	171	619	0,014	10,0	2,020	32
	130	2,493	51,5	28,7	24,7	24,7	48	23	1,921	636	568	0,012	12,8	1,914	24
	131	2,542	55,5	32,0	28,7	28,7	52	25	2,057	561	718	0,015	9,8	2,008	31
	132	2,566	75,0	44,0	36,3	36,2	51	25	1,448	1100	908	0,015	13,7	1,902	22
	133	2,558	76,8	41,6	32,9	32,8	50	25	1,488	1040	823	0,015	13,0	1,930	25
	134	2,578	42,2	22,5	19,6	19,5	47	19	2,158	428	372	0,008	10,6	2,026	33
	135	2,455	51,7	26,3	20,4	20,3	46	20	2,017	525	408	0,009	10,0	2,026	33
	136	2,551	58,4	29,4	23,7	23,6	48	22	1,886	647	521	0,011	10,4	2,014	30
	137	2,625	56,9	29,7	26,1	26,0	50	25	1,873	744	653	0,015	12,3	1,950	27
	138	2,603	76,9	44,4	37,4	37,3	52	24	1,414	1066	898	0,014	13,2	1,880	20
	139	2,56	60,5	27,0	23,2	23,1	50	22	1,893	594	510	0,011	11,4	1,970	27
	140	2,634	82,5	48,5	37,6	37,5	52	23	1,314	1116	865	0,012	10,8	1,980	31
141	2,592	84,3	51,7	27,3	26,8	49	21	1,372	1085	830	0,010	12,5	1,814	20	
142	2,611	62,0	31,5	27,4	27,4	45	22	1,791	693	603	0,011	12,5	1,936	22	
143	2,636	76,6	41,1	33,9	33,9	47	23	1,484	945	780	0,012	11,3	1,980	30	
144	2,646	50,6	32,5	27,1	27,1	48	24	1,898	779	650	0,014	9,2	2,080	24	
145	2,647	47,6	28,8	22,2	22,2	48	22	2,014	634	488	0,011	11,2	2,040	30	
146	2,595	65,8	37,7	33,2	33,2	43	19	1,633	716	632	0,008	13,3	1,940	32	

Tableau III.6. Données de la carrière 33 + 700

	ECH	$\rho_s$	< 2 mm	< 425 $\mu\text{m}$	< 80 $\mu\text{m}$	< 75 $\mu\text{m}$	(LL) (%)	(PI) (%)	(Gm)	(Pm)	(Pp)	$\epsilon_s$	(TEO)	(DSM)	CBR
PK 33+700	147	2,56	75,5	41,6	31,7	31,5	50	23	1,514	957	729	0,012	11,7	1,998	30
	148	2,53	73,3	38,5	30,3	30,2	49	23	1,580	886	698	0,012	11,7	1,950	25
	149	2,517	76,4	42,0	33,4	33,2	50	24	1,484	1008	802	0,014	13,7	1,900	23
	150	2,46	73,1	41,9	30,4	30,2	49	22	1,548	922	669	0,011	12,7	1,920	23
	151	2,487	82,5	46,7	37,2	37,0	52	25	1,338	1167	930	0,015	12,8	1,880	20
	152	2,562	69,6	39,3	30,9	30,7	50	22	1,603	865	680	0,011	11,6	1,952	27
	153	2,522	73,5	44,3	35,0	34,8	51	24	1,474	1063	840	0,014	12,8	1,860	19
	154	2,572	62,1	35,0	29,2	29,1	48	21	1,739	1063	613	0,010	13,4	1,960	27
	155	2,541	62,2	37,5	30,5	30,4	49	22	1,700	735	671	0,011	11,5	1,972	28
	156	2,539	82,7	42,7	27,3	27,0	50	25	1,476	825	865	0,015	13,3	1,914	24
	157	2,511	81,1	53,7	42,4	42,2	51	25	1,230	1067	1060	0,015	14,1	1,860	19
	158	2,577	54,1	29,0	25,0	24,9	50	24	1,919	1343	600	0,014	10,4	2,040	37
	159	2,585	58,9	32,0	25,8	25,7	51	24	1,834	697	619	0,014	10,0	2,020	32
	160	2,493	51,5	28,7	24,7	24,6	48	23	1,952	769	568	0,012	12,8	1,914	24
	161	2,542	55,5	32,0	28,7	28,6	52	25	1,838	659	718	0,015	9,8	2,008	31
	162	2,566	75,0	44,0	36,3	36,2	51	25	1,448	904	908	0,015	13,7	1,902	22
	163	2,558	76,8	41,6	32,9	32,8	50	25	1,488	819	823	0,015	13,0	1,930	25
	164	2,578	42,2	22,5	19,6	19,5	47	19	2,158	371	372	0,008	10,6	2,026	33
	165	2,455	51,7	26,3	20,4	20,3	46	20	2,017	406	408	0,009	10,0	2,026	33
	166	2,551	58,4	29,4	23,7	23,6	48	22	1,886	519	521	0,011	10,4	2,014	30
	167	2,625	56,9	29,7	26,1	26,0	50	25	1,873	651	653	0,015	12,3	1,950	27
	168	2,603	76,9	44,4	37,4	37,3	52	24	1,414	896	898	0,014	13,2	1,880	20
	169	2,56	60,5	27,0	23,2	23,1	50	22	1,893	509	510	0,011	11,4	1,970	27
	170	2,634	82,5	48,5	37,6	37,5	52	23	1,314	863	865	0,012	10,8	1,980	31
171	2,592	84,3	51,7	27,3	26,8	49	21	1,372	563	830	0,010	12,5	1,814	20	
172	2,611	62,0	31,5	27,4	27,4	45	22	1,791	602	603	0,011	12,5	1,936	22	
173	2,636	76,6	41,1	33,9	33,9	47	23	1,484	779	780	0,012	11,3	1,980	30	
174	2,646	50,6	32,5	27,1	27,1	48	24	1,899	650	650	0,014	9,2	2,080	24	
175	2,647	47,6	28,8	22,2	22,1	48	22	2,015	486	488	0,011	11,2	2,040	30	
176	2,595	65,8	37,7	33,2	33,2	43	19	1,633	630	632	0,008	13,3	1,940	32	

Tableau III.7. Données de la carrière 34 + 400

	ECH	$\rho_s$	< 2 mm	< 425 $\mu\text{m}$	< 80 $\mu\text{m}$	< 75 $\mu\text{m}$	(LL) (%)	(PI) (%)	(Gm)	(Pm)	(Pp)	$\epsilon_s$	(TEO)	(DSM)	CBR
<b>PK 34+400</b>	177	2,637	80,8	35,9	29,4	29,4	50	20	1,539	718	588	0,009	12,0	1,940	37
	178	2,593	81,3	35,3	28,5	28,5	48	24	1,549	847	684	0,014	13,7	1,940	35
	179	2,597	69,7	32,3	26,8	26,8	47	20	1,712	647	536	0,009	14,2	1,910	34
	180	2,633	62,8	32,1	29	29,0	50	19	1,761	610	551	0,008	12,6	1,950	46
	181	2,592	49,1	27,2	22,7	22,7	44	19	2,010	516	431	0,008	11,2	1,990	42
	182	2,666	65,7	39,9	31,4	31,4	45	20	1,631	797	628	0,009	14,4	1,872	44
	183	2,625	50,3	31,5	27,3	27,3	49	22	1,909	693	601	0,011	16,0	1,834	42
	184	2,684	55,8	34,4	28,1	28,0	49	21	1,818	723	590	0,010	15,5	1,830	23
	185	2,703	33,6	30,2	28,4	28,4	48	22	2,078	665	625	0,011	13,3	1,940	28
	186	2,629	57,5	34,6	27,3	27,2	49	23	1,807	796	665	0,012	13,0	1,910	27
	187	2,662	73,5	41,4	31,9	31,7	50	23	1,534	952	734	0,012	13,7	1,870	25
	188	2,642	74,1	38,9	27	26,8	51	22	1,602	856	594	0,011	11,3	1,990	33
	189	2,679	39,6	27,5	24,5	24,4	50	24	2,085	660	588	0,014	13,2	1,960	32
	190	2,688	36,0	26,1	21,2	21,1	48	22	2,168	575	466	0,011	11,8	1,940	29
	191	2,694	34,0	19,0	14,2	14,1	45	17	2,329	324	241	0,006	9,0	2,060	36
	192	2,953	34,6	22,3	17,6	17,5	49	19	2,256	423	334	0,008	12,3	2,010	34
	193	2,585	82,3	49,9	37,1	36,9	51	24	1,310	1197	890	0,014	14,5	1,826	22
	194	2,598	42,9	34,0	31,6	31,6	52	25	1,915	851	790	0,015	15,7	1,804	38
	195	2,654	44,6	27,3	23,2	23,1	48	23	2,050	627	534	0,012	13,5	1,922	45
	196	2,718	41,9	31,5	27,1	27,0	50	24	1,996	757	650	0,014	12,3	1,900	42
	197	2,787	26,7	21,5	19,1	19,1	46	20	2,327	431	382	0,009	12,4	2,020	47
	198	2,620	87,9	53,1	38,2	38,1	53	23	1,208	1222	879	0,012	18,0	1,770	25
	199	2,762	42,3	26,6	21,8	21,8	48	22	2,093	585	480	0,011	11,2	2,000	32
200	2,626	37,2	23,0	17,2	17,1	41	16	2,227	367	275	0,005	9,5	2,074	35	
201	2,704	37,4	22,5	27,3	27,7	46	19	2,124	428	355	0,008	10,7	2,044	32	
202	2,753	38,9	21,5	18,2	18,2	45	19	2,215	408	346	0,008	10,3	2,060	34	
203	2,700	54,5	35,7	30,9	30,9	50	24	1,789	856	742	0,014	13,3	1,920	32	

Tableau III.8. Données de la carrière 36 + 850

	ECH	$\rho_s$	< 2 mm	< 425 $\mu\text{m}$	< 80 $\mu\text{m}$	< 75 $\mu\text{m}$	(LL) (%)	(PI) (%)	(Gm)	(Pm)	(Pp)	$\epsilon_s$	(TEO)	(DSM)	CBR
PK 36+850	204	2,628	72,2	39,7	30,9	30,8	51	23	2,152	396	711	0,012	10,6	1,954	24
	205	2,554	86,9	50,9	40,2	40,0	53	24	1,980	601	965	0,014	12,5	1,892	17
	206	2,446	65,2	39,2	28,9	28,7	50	22	1,906	730	636	0,011	11,5	1,914	26
	207	2,579	61,0	38,1	28,4	28,3	49	21	2,110	456	596	0,010	12,4	1,900	26
	208	2,478	78,3	45,9	33,8	33,6	52	23	1,537	905	777	0,012	12,0	1,958	19
	209	2,493	85,8	57,2	43,0	42,8	55	25	2,090	462	1075	0,015	12,5	1,900	17
	210	2,683	42,0	26,2	19,9	19,9	46	20	1,784	756	398	0,009	10,6	2,012	49
	211	2,667	33,4	23,0	19,4	19,4	48	19	1,823	770	369	0,008	8,5	2,114	50
	212	2,607	42,2	28,4	23,3	23,3	47	21	1,760	818	489	0,010	11,6	1,960	54
	213	2,643	42,8	27,9	27,3	27,5	48	23	1,993	503	529	0,012	12,8	1,942	53
	214	2,614	34,8	28,2	24,0	23,9	49	24	2,125	537	576	0,014	12,2	1,950	46
	215	2,696	41,5	27,2	22,0	22,0	47	22	2,003	462	484	0,011	14,9	1,944	52
	216	2,714	31,9	23,8	22,5	22,5	47	19	1,573	822	428	0,008	12,0	1,952	55
	217	2,662	40,0	24,8	20,1	20,1	37	16	2,152	396	322	0,005	11,0	2,050	51
	218	2,764	46,5	31,6	24,0	23,9	49	19	1,980	601	456	0,008	13,3	1,980	42
	219	2,636	53,4	30,4	25,7	25,6	48	24	1,906	730	617	0,014	10,0	2,030	34
	220	2,642	45,8	24,0	19,3	19,2	42	19	2,110	456	367	0,008	10,0	2,030	35
	221	2,571	74,3	41,1	31,0	30,9	48	22	1,537	905	682	0,011	11,3	2,000	31
	222	2,608	49,7	24,3	17,1	17,0	48	19	2,090	462	325	0,008	7,8	2,100	39
	223	2,611	56,5	36,0	29,2	29,1	49	21	1,784	756	613	0,010	11,5	1,992	31
224	2,593	52,8	35,0	29,9	29,9	46	22	1,823	770	658	0,011	9,7	2,040	35	
225	2,599	56,4	37,2	30,4	30,4	42	22	1,760	818	669	0,011	10,5	1,980	27	
226	2,595	46,6	26,5	27,3	27,6	47	19	1,993	503	374	0,008	8,5	2,082	36	
227	2,576	42,6	25,5	19,4	19,4	48	21	2,125	537	407	0,010	10,3	2,020	32	
228	2,636	54,3	27,2	18,3	18,2	41	17	2,003	462	311	0,006	7,8	2,114	39	
229	2,507	73,1	39,1	30,5	30,4	52	21	1,573	822	641	0,010	10,3	1,990	28	

Tableau III.9. Données des carrières PK 42 + 750 et PK 49 + 000

	ECH	$\rho_s$	< 2 mm	< 425 $\mu\text{m}$	< 80 $\mu\text{m}$	< 75 $\mu\text{m}$	(LL) (%)	(PI) (%)	(Gm)	(Pm)	(Pp)	$\epsilon_s$	(TEO)	(DSM)	CBR
<b>PK 42+750</b>	1	2,675	43,4	26,7	20,4	20,4	44	18	2,095	481	367	0,007	11,3	2,076	60
	2	2,574	37,9	26,1	23,4	23,4	46	19	2,126	496	445	0,008	10,7	2,01	56
	3	2,748	35,1	21,2	18,0	18,0	32	13	2,257	276	234	0,003	9,5	2,12	60
	4	2,690	30,2	21,5	19,7	19,7	38	14	2,286	302	276	0,004	9,4	2,15	62
	5	2,665	49,0	32,6	23,9	23,9	49	24	1,945	784	574	0,014	11,5	2,03	56
	6	2,635	39,9	31,3	22,9	22,7	50	19	2,061	595	435	0,008	10,4	2,05	55
	7	2,570	48,9	28,4	24,1	24,0	54	22	1,986	626	530	0,011	11,4	1,99	47
	8	2,613	39,9	23,0	19,6	19,6	49	20	2,175	460	392	0,009	10,7	1,99	48
	9	2,620	44,5	27,7	20,9	20,7	47	18	2,070	499	376	0,007	9,6	2,06	56
	10	2,624	47,8	27,5	27,3	27,4	45	22	1,973	605	528	0,011	10,6	2,01	52
	11	2,736	32,5	20,7	16,2	16,1	42	16	2,307	331	259	0,005	11,3	1,96	60
	12	2,695	37,2	22,3	17,2	17,1	43	18	2,234	401	310	0,007	10,8	2,11	63
	13	2,701	40,0	28,3	21,9	21,7	50	19	2,099	538	416	0,008	12,4	2,01	54
	14	2,659	43,2	25,5	20,5	20,4	45	20	2,109	509	410	0,009	12,5	1,98	57
<b>PK 49+000</b>	15	2,852	29,3	22,7	19,0	18,9	46	19	2,291	431	361	0,008	11,2	2,15	59
	16	2,936	36,4	24,2	16,9	16,7	43	17	2,227	411	287	0,006	11,0	2,12	59
	17	2,881	33,0	25,9	23,7	23,6	47	19	2,175	492	450	0,008	14,3	1,99	46
	18	2,757	41,5	33,2	22,0	21,7	48	20	2,036	664	440	0,009	11,6	2,02	50
	19	2,737	40,6	30,6	22,0	21,8	47	19	2,070	582	418	0,008	11,2	2,00	52
	20	2,805	39,4	30,0	23,2	23,0	50	24	2,076	720	557	0,014	13,8	2,02	46
	21	2,818	27,8	23,0	18,9	18,8	45	19	2,304	437	359	0,008	11,0	2,12	54
	22	2,916	26,8	22,3	17,0	16,8	46	19	2,340	424	323	0,008	11,4	2,13	57
	23	2,829	25,8	21,2	17,0	16,9	45	18	2,361	381	306	0,007	9,8	2,15	61
	24	2,812	40,3	29,7	27,3	27,4	51	25	2,026	741	608	0,015	9,3	2,13	45
	25	2,684	39,5	29,8	20,9	20,7	51	21	2,101	625	439	0,010	11,3	1,99	53
	26	2,753	30,5	18,3	12,4	12,3	38	12	2,389	220	149	0,003	11,4	2,06	50
	27	2,865	27,0	21,2	17,9	17,8	36	13	2,340	276	233	0,003	9,1	2,16	64
	28	2,835	40,7	28,4	19,4	19,3	45	18	2,116	512	349	0,007	10,5	2,18	63
	29	2,678	37,2	26,6	20,9	20,8	46	16	2,153	426	334	0,005	13,0	1,95	53

Tableau III.10. Données des carrières PK 53 + 325 D

	ECH	$\rho_s$	< 2 mm	< 425 $\mu\text{m}$	< 80 $\mu\text{m}$	< 75 $\mu\text{m}$	(LL) (%)	(PI) (%)	(Gm)	(Pm)	(Pp)	$\epsilon_s$	(TEO)	(DSM)	CBR
<b>PK 53+325 D</b>	30	2,862	36,2	28,6	21,3	21,2	50	25	2,127	571	583	0,015	11,4	2,14	43
	31	2,834	33,4	30,1	23,3	23,1	49	21	2,106	752	416	0,010	11,4	2,10	53
	32	2,703	35,7	26,6	19,8	19,7	51	20	2,203	559	418	0,009	13,0	2,04	50
	33	2,872	28,4	25,4	20,9	20,9	49	22	2,181	507	363	0,011	10,5	2,14	45
	34	2,796	29,2	22,9	16,5	16,3	48	23	2,324	504	527	0,012	11,3	2,10	53
	35	2,660	33,8	25,4	22,9	22,8	48	22	2,226	583	484	0,011	16,7	1,84	53
	36	2,878	33,2	23,6	22,0	22,0	48	22	2,206	519	458	0,011	10,2	2,15	45
	37	2,877	25,1	26,5	20,8	20,6	48	19	2,197	583	346	0,008	12,7	2,14	60
	38	2,845	32,0	21,2	18,2	18,1	47	20	2,356	403	416	0,009	12,7	2,02	54
	39	2,800	28,9	23,8	27,3	27,6	49	19	2,166	477	357	0,008	9,8	2,14	45
	40	2,828	24,9	22,4	18,8	18,7	48	18	2,300	426	320	0,007	13,0	2,07	54
	41	2,828	24,9	20,2	17,8	17,7	49	21	2,372	363	500	0,010	11,5	2,04	46
	42	2,776	41,4	29,8	23,8	23,7	47	18	2,051	626	340	0,007	12,2	1,99	45
	43	2,736	27,0	22,6	18,9	18,8	48	21	2,316	407	456	0,010	15,2	1,91	52
	44	2,699	36,5	26,9	21,7	21,6	40	15	2,150	565	282	0,005	9,6	2,15	48
	45	2,784	36,8	27,3	18,8	18,6	50	21	2,173	409	491	0,010	13,2	1,93	60
	46	2,745	37,9	29,3	23,4	23,2	47	18	2,096	615	373	0,007	8,3	2,16	44
	47	2,797	27,8	22,6	20,7	20,7	43	17	2,289	407	326	0,006	11,4	2,00	57
	48	2,732	29,2	23,8	19,2	19,1	44	20	2,279	405	430	0,009	11,3	2,05	55
	49	2,736	35,8	25,8	21,5	21,4	48	20	2,170	516	454	0,009	11,8	2,02	50
50	2,716	41,2	28,9	27,3	27,5	48	20	2,024	578	454	0,009	11,8	2,02	44	

Tableau III.11. Données des carrières PK 58 + 000 et PK 64 + 000

	ECH	$\rho_s$	< 2 mm	< 425 $\mu\text{m}$	< 80 $\mu\text{m}$	< 75 $\mu\text{m}$	(LL) (%)	(PI) (%)	(Gm)	(Pm)	(Pp)	$\epsilon_s$	(TEO)	(DSM)	CBR
<b>PK 58+000</b>	51	2,700	35,0	22,7	17,3	17,2	46	18	2,251	409	311	0,007	11,3	2,01	47
	52	2,864	31,1	23,8	18,7	18,6	46	20	2,265	477	374	0,009	13,5	2,00	41
	53	2,870	31,3	26,0	22,7	22,6	47	21	2,201	546	477	0,010	12,6	2,03	40
	54	2,741	27,9	23,3	18,2	18,0	43	16	2,307	373	291	0,005	13,0	1,98	45
	55	2,759	37,7	31,4	25,3	25,1	53	21	2,058	659	531	0,010	12,4	2,02	43
	56	2,799	23,5	19,8	17,6	17,5	48	20	2,392	396	352	0,009	11,7	2,03	48
	57	2,810	37,4	29,5	23,0	22,8	47	22	2,103	649	506	0,011	11,6	2,03	45
	58	2,797	32,2	27,3	23,2	23,1	46	23	2,174	629	534	0,012	12,6	2,02	43
	59	2,819	33,5	27,8	24,3	24,2	49	23	2,145	640	559	0,012	11,7	2,02	48
	60	2,896	33,9	26,8	27,3	27,4	49	23	2,118	617	547	0,012	14,0	2,04	43
	61	2,811	28,5	24,5	22,9	22,9	46	22	2,241	540	504	0,011	12,7	2,01	47
	62	2,761	31,8	25,2	19,3	19,1	44	20	2,239	504	386	0,009	11,2	1,99	44
	63	2,735	38,5	29,7	22,8	22,6	49	23	2,092	683	524	0,012	11,0	2,03	49
	64	2,805	39,4	30,0	23,2	23,0	50	24	2,076	720	557	0,014	13,8	2,02	46
	65	2,802	36,5	27,7	23,0	22,9	49	24	2,129	665	552	0,014	13,8	1,95	45
	66	2,826	35,0	29,3	24,2	29,3	49	23	2,063	675	557	0,012	12,2	2,11	48
<b>PK 64+000</b>	67	2,735	38,5	29,7	22,8	22,6	49	23	2,092	683	524	0,012	11,0	2,03	49
	68	2,864	33,1	28,0	23,2	23,1	50	24	2,159	671	557	0,014	12,0	2,08	50
	69	2,809	31,7	25,2	23,0	22,9	48	21	2,202	529	483	0,010	16,5	1,92	52
	70	2,783	30,1	25,6	20,4	20,2	47	20	2,240	513	408	0,009	12,4	2,04	54
	71	2,771	46,0	30,0	23,7	23,5	48	23	2,004	690	545	0,012	14,3	1,92	54
	72	2,905	28,1	24,1	20,8	20,7	47	21	2,271	505	437	0,010	12,0	2,15	57
	73	2,811	29,6	24,0	20,4	20,3	47	20	2,261	481	408	0,009	11,6	2,14	56
	74	2,811	28,5	24,5	22,9	22,9	46	22	2,241	540	504	0,011	12,7	2,01	47
	75	2,903	31,6	22,6	18,2	18,1	49	20	2,277	452	364	0,009	10,3	2,18	55
	76	2,821	34,8	25,9	27,3	27,5	52	21	2,117	545	460	0,010	13,6	1,99	55
	77	2,887	23,0	19,4	16,4	16,3	40	15	2,413	291	246	0,005	12,0	2,06	60
	78	2,798	34,4	29,0	25,4	25,3	51	25	2,114	724	634	0,015	17,8	1,85	45

Tableau III.12. Données des carrières PK 67 + 000

	ECH	$\rho_s$	< 2 mm	< 425 $\mu\text{m}$	< 80 $\mu\text{m}$	< 75 $\mu\text{m}$	(LL) (%)	(PI) (%)	(Gm)	(Pm)	(Pp)	$\epsilon_s$	(TEO)	(DSM)	CBR
<b>PK 67+000</b>	79	2,934	26,3	22,6	20,6	20,5	51	21	2,305	475	433	0,010	11,4	2,08	57
	80	2,882	21,1	18,8	17,2	17,2	52	26	2,429	489	447	0,016	11,9	2,11	56
	81	2,888	25,6	19,2	15,6	15,5	48	20	2,397	383	312	0,009	11,8	2,11	52
	82	2,863	26,5	21,9	17,7	17,6	48	22	2,340	481	389	0,011	9,5	2,14	50
	83	2,961	33,3	19,0	16,4	16,3	52	21	2,314	398	344	0,010	10,0	2,23	64
	84	2,926	42,9	32,5	25,6	25,4	48	19	1,992	617	486	0,008	11,0	2,11	49
	85	2,943	34,0	25,0	18,9	18,7	44	17	2,223	424	321	0,006	9,4	2,21	57
	86	2,948	23,5	16,9	13,3	13,2	47	19	2,464	321	253	0,008	8,8	2,23	60
	87	2,844	33,5	28,4	23,4	23,3	44	22	2,148	626	515	0,011	11,0	2,10	50
	88	2,999	29,7	22,1	27,3	27,6	53	20	2,206	442	404	0,009	10,4	2,20	62
	89	2,915	29,0	23,5	20,2	20,1	54	21	2,274	493	424	0,010	10,5	2,19	56
	90	2,859	22,4	18,5	14,1	14,0	45	17	2,451	315	240	0,006	10,3	2,12	70
	91	2,972	21,4	18,2	15,9	15,9	53	21	2,445	383	334	0,010	12,0	2,11	60
	92	2,914	33,8	28,1	23,2	23,1	50	24	2,150	675	557	0,014	12,7	2,06	54
	93	2,911	25,5	22,0	19,6	19,5	50	20	2,330	439	392	0,009	12,5	2,06	47
	94	2,985	23,2	20,5	18,6	18,5	50	21	2,378	430	391	0,010	9,0	2,25	70
	95	2,882	24,7	23,2	20,7	20,6	49	19	2,315	440	393	0,008	11,4	2,18	65
	96	2,923	21,1	19,1	17,1	17,0	52	22	2,428	420	376	0,011	10,5	2,13	60
	97	2,845	25,4	17,4	13,5	13,4	47	20	2,438	347	270	0,009	11,0	2,00	52
	98	2,923	31,3	27,0	20,8	20,6	43	19	2,211	514	395	0,008	10,6	2,13	69
99	2,880	24,7	20,1	15,8	15,7	40	15	2,395	302	237	0,005	10,6	2,17	60	
100	2,996	26,6	23,3	21,2	21,1	48	19	2,290	442	403	0,008	10,7	2,19	58	

Tableau III.13. Données des carrières PK 68 + 000

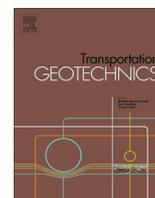
	ECH	$\rho_s$	< 2 mm	< 425 $\mu\text{m}$	< 80 $\mu\text{m}$	< 75 $\mu\text{m}$	(LL) (%)	(PI) (%)	(Gm)	(Pm)	(Pp)	$\epsilon_s$	(TEO)	(DSM)	CBR
<b>PK 68+000</b>	101	2,803	35,4	29,0	23,3	23,1	50	22	2,125	638	513	0,011	12,2	2,07	52
	102	2,773	29,5	23,9	20,4	20,3	46	20	2,262	479	408	0,009	12,3	2,02	46
	103	2,857	28,9	23,7	20,5	20,4	51	21	2,270	498	431	0,010	11,8	2,04	51
	104	2,889	35,5	27,0	22,0	21,9	53	20	2,156	540	440	0,009	14,2	2,01	48
	105	2,840	29,9	24,5	21,4	21,3	49	21	2,243	515	449	0,010	11,0	2,10	55
	106	2,852	32,9	25,0	20,2	20,1	53	20	2,220	500	404	0,009	12,2	2,10	58
	107	2,795	37,4	25,5	19,3	19,1	47	18	2,180	459	347	0,007	11,5	2,10	55
	108	2,857	30,3	23,5	20,7	20,6	48	20	2,256	470	414	0,009	12,0	2,06	54
	109	2,847	31,7	26,6	21,7	21,6	49	22	2,202	585	477	0,011	12,2	2,10	56
	110	2,972	25,1	21,2	19,9	19,9	53	23	2,338	488	458	0,012	11,5	2,08	54
	111	2,849	28,5	21,7	18,2	18,1	50	23	2,316	500	419	0,012	12,7	2,09	55
	112	2,947	43,2	30,0	23,6	23,4	46	18	2,034	539	425	0,007	16,0	1,93	45
	113	2,942	33,6	27,2	23,5	23,4	49	24	2,158	653	564	0,014	13,0	2,03	48
	114	2,915	30,1	25,7	23,0	22,9	48	23	2,213	591	529	0,012	13,3	2,02	50
	115	2,484	27,4	24,3	21,8	21,7	47	22	2,266	534	480	0,011	10,9	2,11	55
	116	2,775	34,3	27,8	22,1	21,9	50	22	2,160	611	486	0,011	11,3	2,07	53
	117	2,802	36,5	27,7	23,0	22,9	49	24	2,129	665	552	0,014	13,8	1,95	45
	118	2,775	23,3	18,1	15,8	15,7	44	16	2,428	290	253	0,005	12,0	2,05	54
	119	2,740	34,6	28,3	23,5	23,4	50	23	2,138	651	541	0,012	9,4	2,09	54
	120	2,926	32,7	26,5	22,9	22,8	48	22	2,180	583	505	0,011	11,3	2,14	58
121	2,907	27,0	21,6	18,3	18,2	49	19	2,332	409	348	0,008	11,6	2,08	57	
122	2,691	25,1	21,6	18,4	21,6	48	18	2,317	389	331	0,007	14,0	1,96	55	

**ANNEXE IV. DONNEES DES ANALYSES SEMI-QUANTITATIVES**

Tableau IV.1. Compositions minéralogiques des graveleux latéritiques par la méthode semi-quantitative des aires des pics

	Emprunt	Quartz	Kaolinite	Goethite	Hématite	Gibbsite	Muscovite	Anatase	Total
Savane humide	PK 1+475	25,4	19,7	18,4	5,6	8,5	22,4	-	100,0
	PK 9+800	8,9	25,3	21,5	6,4	16,4	16,5	5,0	100,0
	PK 13+825	18,7	29,8	21,5	4,3	21,4	-	4,3	100,0
	PK 17+400	6,3	27,8	18,0	6,8	13,0	22,2	5,2	99,3
	PK 24+050	16,7	29,3	23,2	6,4	20,4	-	3,9	99,9
	PK 24+675	16,0	30,0	19,3	7,3	21,7	-	5,7	100,0
	PK 25+700	15,0	24,0	17,8	6,0	16,0	17,5	3,7	100,0
	PK 27+300	16,2	21,9	17,1	4,4	19,3	17,6	3,5	100,0
	PK 33+700	20,3	20,9	17,8	3,1	18,3	16,9	2,6	99,9
	PK 34+700	16,1	28,0	23,2	6,5	21,0	-	4,1	98,9
	PK 36+850	14,7	33,1	21,1	5,6	18,9	-	6,6	100,0
	<b>Moyenne</b>	<b>15,8</b>	<b>26,3</b>	<b>19,9</b>	<b>5,7</b>	<b>17,7</b>	<b>18,9</b>	<b>4,1</b>	
Savane sèche	PK 42+750	14,7	23,4	18,0	6,0	17,5	15,6	4,8	100,0
	PK 49+000	12,5	25,0	16,1	7,0	17,8	14,2	7,4	100,0
	PK 53+325	11,7	28,8	25,2	9,2	16,8	-	7,5	99,2
	PK 58+000	20,2	27,3	18,7	8,0	21,6	-	3,9	99,7
	PK 64+000	12,3	28,8	22,6	13,3	17,0	-	6,0	100,0
	PK 67+000	13,4	33,3	21,8	12,0	13,5	-	5,8	99,8
	PK 68+000	14,7	30,5	19,0	13,5	17,2	-	5,1	100,0
		<b>Moyenne</b>	<b>14,2</b>	<b>28,2</b>	<b>20,2</b>	<b>9,9</b>	<b>17,3</b>	<b>16,2</b>	<b>5,8</b>

## **ANNEXE V. PUBLICATION**



# Influence of hydromorphic conditions in the variability of geotechnical parameters of gneiss-derived lateritic gravels in a savannah tropical humid area (Centre Cameroon), for road construction purposes



Aloys Thierry Ndzié Mvindi<sup>a,b,\*</sup>, Vincent Laurent Onana<sup>a</sup>, Arnaud Ngo'o Ze<sup>a</sup>, Hervé Nyassa Ohandja<sup>a</sup>, Georges Emmanuel Ekodeck<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Engineering Geology and Alterology Laboratory, Faculty of Science, University of Yaounde I, P.O. Box 812, Yaoundé, Cameroon

<sup>b</sup>National Civil Engineering Laboratory of Cameroon (LABOGENIE), P.O. Box 1094, Douala, Cameroon

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 28 February 2017

Revised 10 August 2017

Accepted 13 August 2017

Available online 26 August 2017

### Keywords:

Centre Cameroon

Savannah

Lateritic gravels

Water table

Geotechnical properties

Road construction

## ABSTRACT

The influence of the water table on the geotechnical properties of lateritic gravels found in a Savannah area in the Centre Cameroon used for road construction was studied. The descriptive statistical analyses show that the values of the geotechnical parameters are more dispersed in humid savannah area than in dry savannah area. The results of the Principal Component Analysis (PCA) and through Agglomerative Hierarchical Clustering (AHC) reveal the existence of three groups of materials, the lateritic gravels of a humid savannah (<75  $\mu\text{m}$  = 32.9%, PI = 27%, MDD = 1.9 g/cm<sup>3</sup>, CBR = 31%), intermediate lateritic gravels (<75  $\mu\text{m}$  = 24.0%, PI = 22%, MDD = 2.0 g/cm<sup>3</sup>, CBR = 44%) and lateritic gravels of dry savannah (<75  $\mu\text{m}$  = 18.9%, PI = 19%, MDD = 2.1 g/cm<sup>3</sup>, CBR = 51%). The lateritic gravels of humid savannah are characterised by the granulometry and plasticity parameters while those of the dry savannah are characterised by physical and compaction parameters. The lateritic materials of humid savannah are gravels and fine clayey sand, averagely plastic and used as sub-base layer while those of dry savannah are more coarse, less plastic and used as sub-base layer and as base layer after lithostabilisation.

© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

The lateritic gravels are mostly used for road construction and dams in the infrastructure development programme of tropical countries [49,31,36]. Their use is justified by their availability, abundance in these regions coupled with their low exploitation cost [49,50]. Their systematic use as construction materials has made them very scarce in some parts of Africa. Therefore, it becomes necessary to assess the resources available and to study the feasibility of extending the domain of acceptable properties for these soils or, to use other natural materials as substitute [14].

The laterites have been widely studied both pedologically and geologically. These studies brought scientist to a conclusion that the five factors that have a dominant influence on the formation of these soils are climate, vegetation, parent rock, topography and time [34,21,12,20,29]. The variable combination of these different factors necessarily produces materials with texture and variable chemo-mineralogical characteristics [47]. Thus, for a given

geographical area with the same climate, same bedrock, a uniform topography, same vegetation, and same age lateritic formations but, found at different topographical positions will have variable geotechnical and mechanical properties. Most of the works done on these materials most often take into account the climate and type of rock [40,36,44,41,45]. However, the heterogeneity of the geotechnical and mechanical characteristics of gravels have not yet been totally explained by these parameters. This made geotechnicians to study the relationships between the place of formation and the characteristics of lateritic gravels, in order to ease prospection of their deposit [35,22,38] and to predict their behaviour on the construction [12,22,36].

The relationships between the type of vegetation and laterites have been established regarding induration, the form of nodules, the content in coarse elements and drainage. Some scientific works [43,47,29] regarding the comparison 'forest laterites' – 'savannah laterites' have been done under different geological conditions (parent rock, geomorphology and climate). The DEGN [18] has characterised the laterites in Cameroon and has formulated the hypothesis of a distribution in terms of zones namely, forest zones, savannah zone, coastal zone, mountainous zone. Very few or almost no study exist on the influence of hydromorphic conditions

\* Corresponding author at: Engineering Geology and Alterology Laboratory, Faculty of Science, University of Yaounde I, P.O. Box 812, Yaoundé, Cameroon.

E-mail address: [aloysthierry@gmail.com](mailto:aloysthierry@gmail.com) (A.T. Ndzié Mvindi).

on the geotechnical behaviour of lateritic gravels. The present study aims at determining the influence of hydromorphic conditions in the variability of geotechnical properties of lateritic gravels from Obala-Mbandjock (Centre Cameroon) by using statistical analysis, for their use in road construction.

**2. Raw materials and experimental procedures**

The studied materials are lateritic gravels found between Obala and Mbandjock in the Centre Cameroon (Fig. 1). This average altitude area 500 m, stretches between 4°00'–4°30' North and 11°30'–12°00' East and belongs to the mobile Central Africa surface made up of gneiss and migmatites [39]. The humid savannah area stretches over 37 km between Obala-Ndjoré. The ferrallitic soils of this humid zone are less thick (1–1.5 m), and brownish yellow. The nodular level that corresponds to the lateritic gravels has a thickness ranging between 0.20 and 0.60 m. The centimetric nodules are sometimes mixed with quartz. Hardpan layers are constantly observed in this zone.

The dry savannah stretches between Ndjoré and Mbandjock, that is about 40 km. The soils of this region are ferrallitic, highly desaturated and red [48]. These soils are very thick (8–10 m). In the nodular level (0.30–1.90 m), lateritic gravels are red. Scattered millimetric ferruginous nodules are distinguished at the base. The proportion and size of the nodules increase with depth.

The studied materials are made up of muscovite, quartz, kaolinite, goethite, hematite, gibbsite, and anatase [21,37].

The studied lateritic gravels quarries are located along the Obala-Mbandjock highway, on a distance of 68 km. A total of 321 lateritic gravels samples have been collected during dry season, from March to June 2015 and from December 2015 to March 2016, that is 199 from the humid savannah zone and 122 for dry savannah zone.

Geotechnical and mechanical tests were carried out at the National Civil Engineering Laboratory of Cameroon (LABOGENIE). The determination of specific gravity of the materials are those prescribed by the NF P 94–054 [3] standards. The particle size distribution by dry sieving and sedimentation has been conducted according to NF P 94–56 [6] and NF P 94–057 [4] standards respectively. The liquid limit (LL) was measured by the method of the dish of Casagrande and the plasticity limit (PL) by the method of the roller. These measures were realized according to NF P 94–051 [5] standards. The Optimum Moisture Content (OMC) and the Maximum Dry Density (MDD) were determined according to NF P 94–093 [8] standard. The CBR test after 4 days of soaking was conducted according to NF P 94–078 [7] standards. The punching was conducted through a universal press type LaboTest coupled with a pressure gauge.

**2.2. Statistical analysis**

Statistical analyses were performed on the 321 representative samples of lateritic gravels on which 13 geotechnical variables were determined. Only average values are presented on the tables (Tables 1a and 1b). The 13 geotechnical variables studied are:

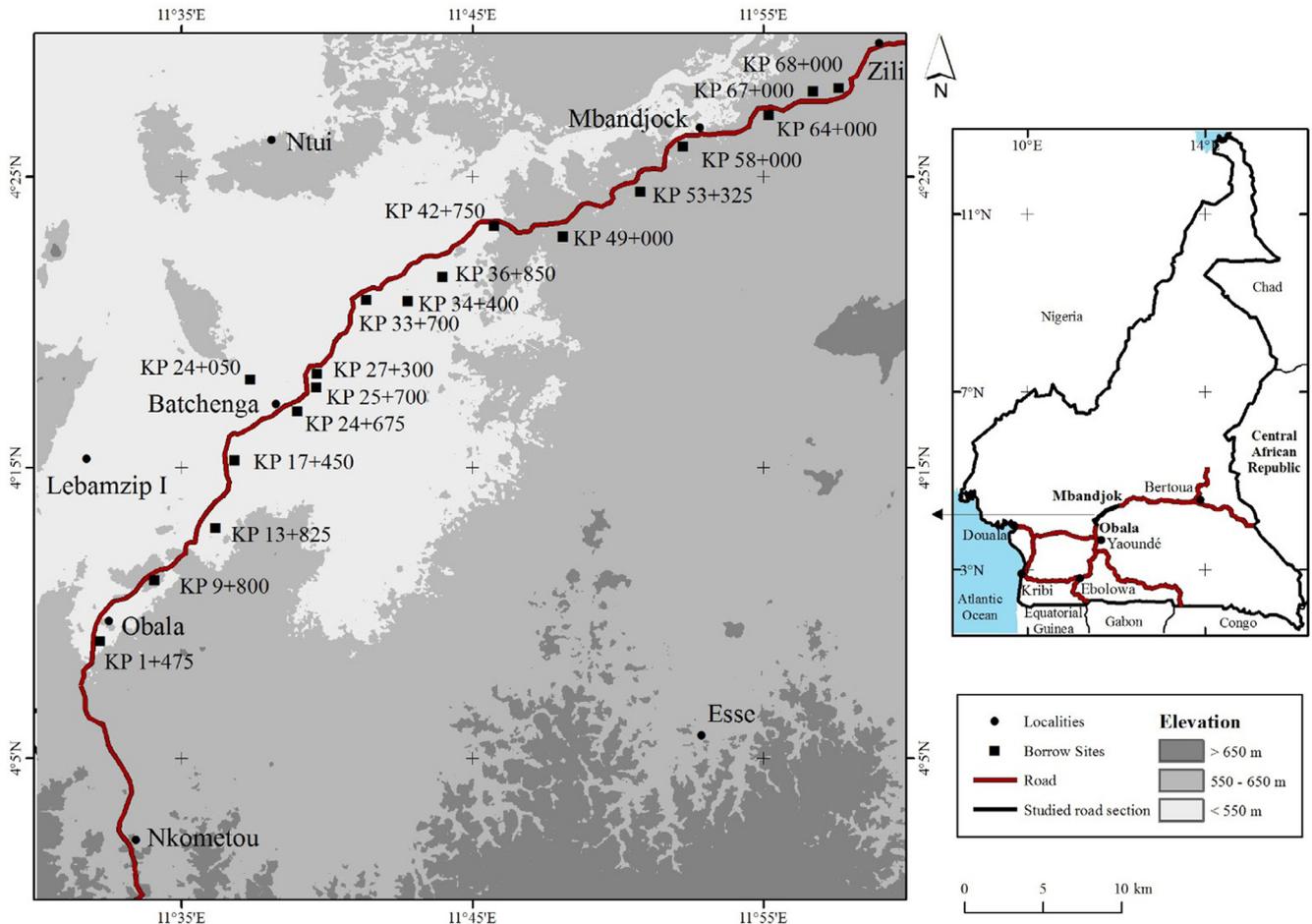


Fig. 1. Location map of the studied lateritic gravels.

**Table 1a**

Average values of the geotechnical characteristics in the humid savannah zone.

Location	Number of sample (N = 199)	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	<2 mm (Skeleton)	<425 $\mu$ m (Mortar)	<75 $\mu$ m (Fines)	Sand (%)	Gravel (%)	LL (%)	PI (%)	Gm	Pm	Pp	$\epsilon_s$	OMC (%)	MDD (g/cm <sup>3</sup> )	CBR (%)	AASHTO	USCS
1 + 475	17	2.670	53.9	35.6	27.1	27.7	45.5	52	22	2.029	764	605	0.011	14.0	1.925	46	A-2-7 (0)	GM
9 + 800	17	2.708	44.5	28.5	24.1	21.2	54.9	44	20	1.940	585	487	0.010	13.0	1.974	41	A-2-7 (0)	GC
13 + 825	18	2.673	55.8	34.7	26.8	29.9	45.9	45	20	1.827	734	560	0.010	11.6	2.021	45	A-2-7 (0)	GC
17 + 450	13	2.682	48.5	27.3	22.9	28.4	50.4	48	21	2.012	600	481	0.011	11.7	1.913	40	A-2-7 (0)	GC
24 + 050	12	2.629	49.8	32.5	26.4	25.3	47.7	50	22	1.900	744	594	0.012	13.4	1.969	39	A-2-7 (0)	GC
24 + 675	13	2.664	56.2	34.9	22.2	26.0	44.0	41	19	1.867	674	421	0.010	10.3	2.046	46	A-2-7 (0)	GC
25 + 700	11	2.494	61.5	39.3	33.8	32.1	38.3	71	36	1.653	1436	1261	0.034	15.7	1.845	25	A-2-7 (4)	GM
27 + 300	15	2.625	68.7	41.9	33.5	41.1	30.7	69	35	1.558	1504	1234	0.033	15.8	1.855	30	A-2-7 (4)	SM
33 + 000	30	2.562	66.7	37.4	29.7	40.6	32.0	49	23	1.872	699	700	0.012	11.9	1.954	27	A-2-7 (1)	SC
34 + 400	27	2.673	53.1	31.7	26.1	26.5	48.0	48	21	1.890	686	562	0.011	12.9	1.937	34	A-2-7 (0)	GC
36 + 850	26	2.608	54.2	33.0	26.3	28.6	45.7	48	21	1.910	632	557	0.010	11.0	1.992	36	A-2-7 (0)	GC

**Table 1b**

Average values of the geotechnical characteristics in the dry savannah zone.

Location	Number of sample (N = 122)	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	<2 mm (Skeleton)	<425 $\mu$ m (Mortar)	<75 $\mu$ m (Fines)	Sand (%)	Gravel (%)	LL (%)	PI (%)	Gm	Pm	Pp	$\epsilon_s$	OMC (%)	MDD (g/cm <sup>3</sup> )	CBR (%)	AASHTO	USCS
42 + 750	14	2.658	40.8	25.9	21.1	22.3	58.1	45	19	2.123	493	397	0.008	10.9	2.040	56	A-2-7 (0)	GC
49 + 000	15	2.811	34.4	25.8	19.8	19.0	63.2	46	19	2.200	489	374	0.008	11.3	2.080	54	A-2-7 (0)	GC
53 + 325	21	2.786	32.3	25.4	21.1	13.3	66.0	48	20	2.205	513	419	0.009	11.9	2.060	50	A-2-7 (0)	GM
58 + 000	16	2.800	33.3	26.6	22.1	15.5	65.4	48	21	2.178	574	473	0.011	12.4	2.020	45	A-2-7 (0)	GC
64 + 000	12	2.825	32.5	25.7	22.0	14.0	66.4	48	21	2.199	552	464	0.011	13.0	2.030	53	A-2-7 (0)	GC
67 + 000	22	2.918	27.5	22.1	18.9	11.1	71.1	49	20	2.315	448	378	0.009	10.8	2.140	58	A-2-7 (0)	GM
68 + 000	22	2.829	31.5	25.0	21.1	13.7	65.8	49	21	2.224	527	444	0.010	12.3	2.050	53	A-2-7 (0)	GM

Gm =  $[300 - (\% \leq 2 \text{ mm} + \% < 425 \mu\text{m} + \% < 75 \mu\text{m})]/100$ , Pm = PI  $\times$  percentage passing 425  $\mu$ m test sieve (Charman, 1988), Pp = PI  $\times$  percentage passing 75  $\mu$ m test sieve ([17,52]), swelling potential ( $\epsilon_s$ ) =  $1 \times 10^{-5} \text{PI}^{2.24}$ . [36]. LL: liquid limit; PI: plasticity index; Gm: grading modulus; Pm: plasticity modulus; OMC: optimum moisture content; MDD: maximum dry density

specific gravity ( $\gamma_s$ ), skeleton (<2 mm), mortar (<425  $\mu\text{m}$ ), fines (<75  $\mu\text{m}$ ), liquid limit (LL), plasticity Index (PI), grading modulus (Gm), plasticity modulus (Pm), plasticity product (Pp), swelling potential ( $\epsilon_s$ ), optimum moisture content (OMC), maximum dry density (MDD), Californian bearing ratio at 95% (CBR95).

The data collected were inserted in an Excel spreadsheet then exported towards the free software R 3.0.2. The correlation matrix helped to study the 13 important quantitative variables considered in pairs. A standardized Principal Component Analysis (PCA) was performed on 13 geotechnical quantitative variables, using the FactoMineR v1.25 of R and the software XLSTAT version 2014.5.03. To perform the Principal Component Analysis (ACP) and Agglomerative Hierarchical Clustering (AHC), the data of 122 samples of dry savannah lateritic gravels (122 lines and 16 columns) and those of 199 samples of humid savannah lateritic gravels (199 lines and 16 columns) were grouped in order to obtain a single set of data. After refinement of the base, a table of quantitative data of 321 samples of lateritic gravels and 13 geotechnical variables was obtained.

**3. Results and discussion**

**3.1. Physico-mechanical properties**

**3.1.1. Specific gravity**

The specific gravity values ( $\gamma_s$ ) of humid savannah lateritic gravels vary between 2.36 and 2.95 with an average of 2.63 (Table 2). This average value corresponds to the lower limit defined by Charman [17]. The specific gravity values of lateritic gravels in equatorial zone are generally ranging between 2.6 and 3.2 [17] or between 2.5 and 3.6 [33]. The average value obtained (2.7) is similar to those in humid equatorial zone [42,1,30,44,46] and, higher than those found in Senegal (2.2–2.3) [24] (Fig. 2). Therefore, the studied humid savannah lateritic gravels show the typical specific gravity values of lateritic soils.

The specific gravity values of dry savannah lateritic gravels vary between 2.48 and 3.00 with an average of 2.81 (Table 2). This average value is in accordance with the works of Charman [17], but lower than those of lateritic gravels on migmatitic gneiss (2.84 and 2.88) in forest zone of East Cameroun [41] and Nigeria [43] respectively (Fig. 2). About 97.5% of samples analysed have specific values higher than 2.58, the minimum value required for acceptable performances [40].

**3.1.2. Index properties**

**3.1.2.1. Particle grading characteristics.** The granulometric characteristics of lateritic gravels are important factors not only for their classification, but also for their compaction ability [9]. The most important fractions to characterise granularity of lateritic gravels are the skeleton (<2 mm), mortar (<425  $\mu\text{m}$ ), fines (<75  $\mu\text{m}$ ) and clays (<2  $\mu\text{m}$ ) [12].

In the humid savannah zone, the skeleton contents vary between 24.4% and 95.5% and those in mortar between 15.6% and 72.7%, while the percentage of fines ranges between 14.0% and 60.3%, with an average value of 27.2%. This granulometric distribution tally with the work of Akpokodje [10] that revealed that lateritic gravels are characterised by high proportions (35–90%) of gravel and low to appreciable proportions of fines (5–40%). The percentage of fines is an essential parameter in the classification of lateritic gravels [12]. The average value obtained in the Obala–NDjoré materials (27.6%) is higher than that obtained in Burkina Faso (10.5%) by Millogo et al. [36] in dry tropical savannah.

In the dry savannah zone, the skeleton content of the studied lateritic gravels vary between 21.1% and 49.0%, that in mortar between 6.9% and 33.2%. The percentage of fines, ranging between 12.3% and 29.3%, for an average of 20.8% (Table 2), is lower

**Table 2** Statistical summaries of variables of lateritic gravel in dry and humid savannah.

Zone	Statistics	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	<2 mm (Skeleton)	<425 $\mu\text{m}$ (Mortar)	<75 $\mu\text{m}$ (Fines)	Sand (%)	Gravel (%)	LL (%)	PI (%)	Gm	Pm	Pp	$\epsilon_s$	OMC (%)	MDD (g/cm <sup>3</sup> )	CBR (%)
Humid savannah	Minimum	2.36	24.4	15.6	14.0	21.2	30.7	24	9	0.73	171	144	0.002	7.4	1.58	10
	Average	2.63	56.2	34.2	27.2	29.8	43.9	51	23	1.84	797	656	0.014	12.7	1.95	36
	Maximum	2.95	95.5	72.7	60.1	41.1	54.9	88	48	2.46	3000	2880	0.064	24.2	2.18	67
	SD	0.08	16.2	10.2	8.1	6.1	7.4	10	6	0.31	427	363	0.009	2.6	0.01	11
	RSD (%)	3	29	30	30	21	17	19	25	17	0.17	54	55	67	21	5
Dry savannah	Minimum	2.48	21.1	16.9	12.3	11.1	58.1	32	12	1.95	220	149	0.003	8.3	1.84	40
	Average	2.81	32.7	25.0	20.8	15.6	65.1	48	20	2.21	510	420	0.009	11.8	2.06	53
	Maximum	3.00	49.0	33.2	29.3	22.3	71.1	54	26	2.46	784	634	0.016	17.8	2.25	70
	SD	0.10	6.3	3.69	3.3	3.8	3.9	4	3	0.12	118	97	0.003	1.6	0.08	6
	RSD (%)	3	19	15	16	24.6	6.0	8	13	5	0.23	23	28	14	4	4

SD = standard deviation; RSD = relative standard deviation.

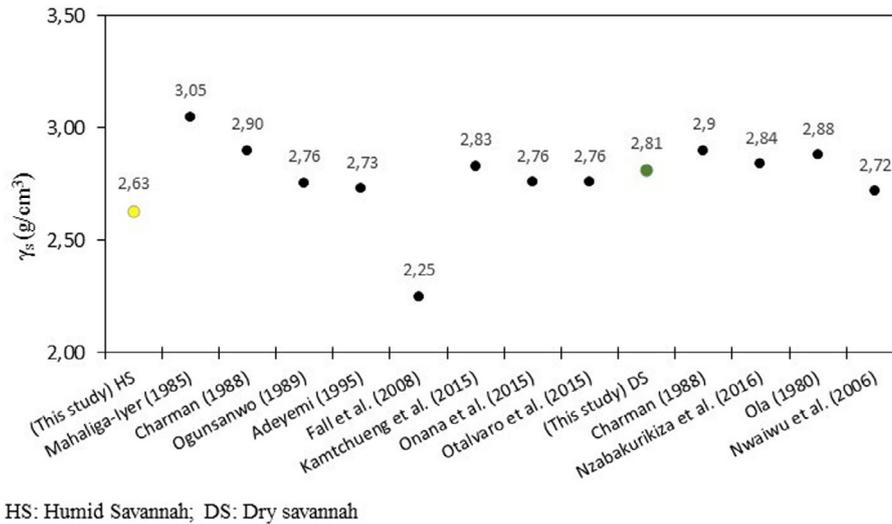


Fig. 2. Comparison of specific gravity ( $\gamma_s$ ) values with those of other authors previous works.

than that obtained in humid savannah zone. The value of this parameter is included in the interval of 18–28.5% defined by Onana et al. [44] and Kamtchueng et al. [30] on these lateritic gravels in forest zone.

3.1.2.2. *Plasticity characteristics.* The values of the liquid limit (LL) in humid savannah zone vary between 24% and 88%. The average value of this parameter is 51% (Table 2). This range of LL values is larger than that obtained by Hieng [28] for the Ntem-Sanaga savannah zone in Cameroon (26–73%). The obtained results in the Mbam savannah zone [18] in the Centre Cameroon are very different (42–62%), which is an average 52% (Fig. 3). The corresponding values of plasticity index (PI) vary between 9% and 48%, that is an average of 23% (Table 2). The position of samples on the plasticity diagram chart of Casagrande shows that the humid savannah materials are averagely plastic (Fig. 4). These materials are nevertheless more plastic than those in Burkina Faso [36] and Senegal [24] whose PI values vary between 15% and 20%. The average value of PI (23%) obtained is equal to that obtained on lateritic gravels in Nigeria [2], but higher than those of materials found in Burkina Faso (11%) [36] (Fig. 5).

In dry savannah zone, the liquid limit values vary between 32% and 54% for an average of 48% (Table 2). The plasticity index values vary between 12% and 26% that is an average of 20%. The position of samples on the plasticity diagram chart of Casagrande (Fig. 4) confirms the average plasticity of materials. The values range of liquid limit (42–89%) and plasticity index (21–55%) obtained by DEGN [18] and Kamtchueng et al. [30] in the forest zone are higher than the obtained results. The average plasticity parameters are lower than those of the East (59% and 28%) [41] and the South (75% and 37%) [45] of Cameroon. However, PI values are lower than that obtained by Bohi [14] in Côte d'Ivoire (22%) (Fig. 5).

3.1.2.3. *Derived parameters.* The studied derived parameters are grading modulus (Gm), plasticity product (Pp), plasticity modulus (Pm) and swelling potential ( $\epsilon_s$ ) (Table 2). Each of these derived parameters of plasticity properties represent the effective contribution of the plasticity of fines for the global performance of materials, which depends on the proportion of fines [17,13]. The limits of these parameters are not specified in most of the standards. Nevertheless, Charman [17] put forward some criteria for selecting

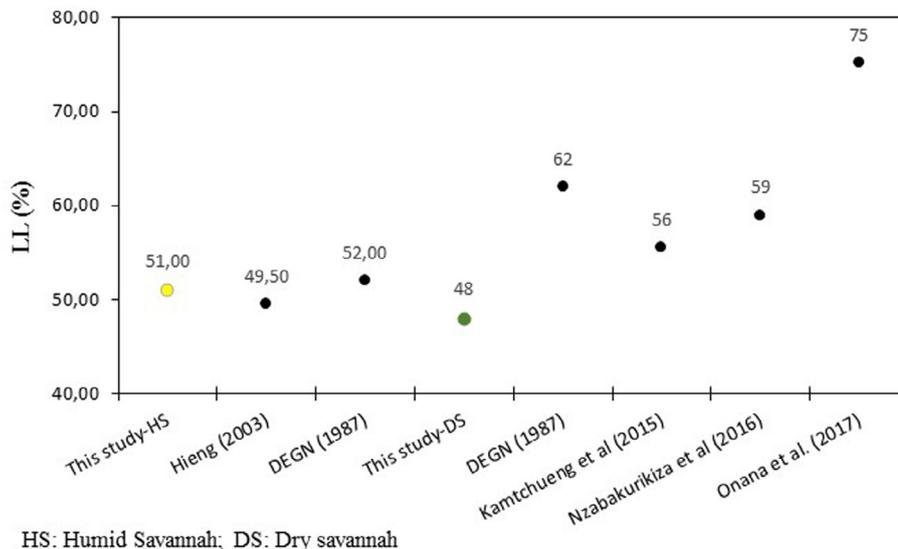


Fig. 3. Comparison of liquid limit (LL) values with those of other authors previous works.

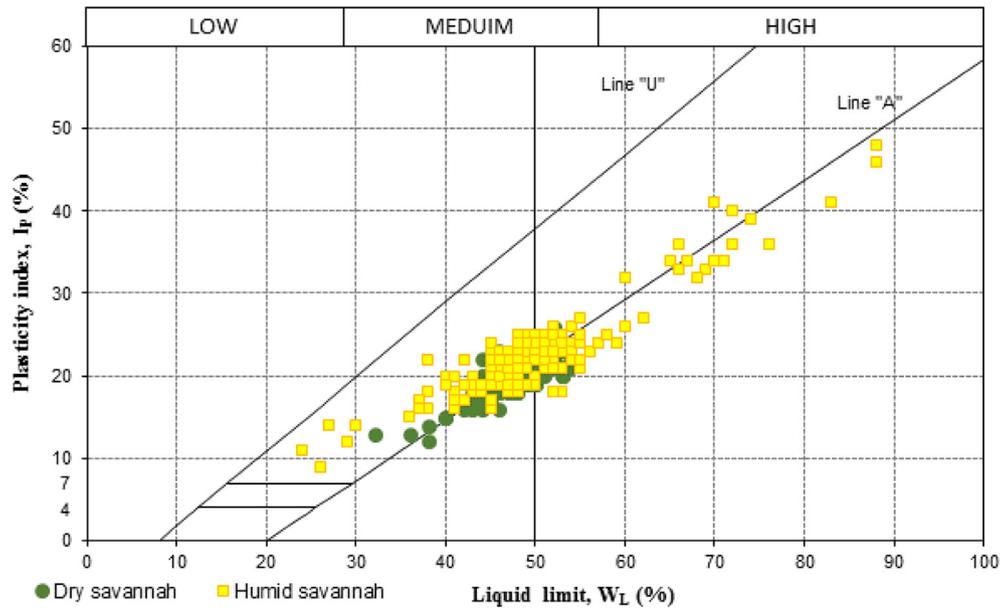
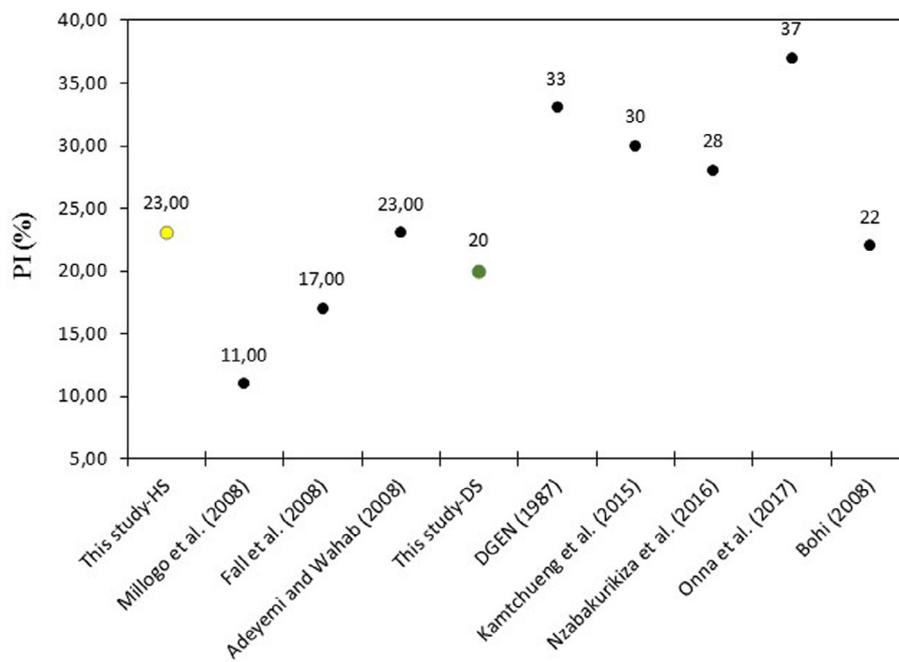


Fig. 4. Graphic representation of the sample in the Casagrande plasticity chart.



HS: Humid Savannah; DS: Dry savannah

Fig. 5. Comparison of Plasticity index (PI) values with those of other authors previous works.

materials for constructing sub-base and base layers of unpaved and paved roads under the tropics. The studied lateritic gravels were used for the construction of high traffic roads facilitating the exchange of goods between the urban area and East Cameroon and some border countries with high agricultural and industrial potential. Presently, there are about 1000 heavy load vehicles ( $>3 \times 10^6$  esa) daily.

In the humid savannah zone, the obtained values of the grading modulus (G<sub>m</sub>) vary between 0.73 and 2.46. The G<sub>m</sub> value for a material should be higher than 1.5, in order to be used as base layer of low traffic roads [40]. Seventy-seven percent of G<sub>m</sub> obtained values are higher than 1.5.

In the dry savannah zone, G<sub>m</sub> values vary between 1.95 and 2.46 (Table 2). These average values are higher than those obtained respectively in the forest zone of East (2.18) [41] and of South (2.04) [45] Cameroon.

For paved roads in semi-arid and arid climatic zones, the plasticity modulus (P<sub>m</sub>) value is expected to be greater than 250 for road bases of major rural and urban roads receiving  $1-3 \times 10^6$  esa traffic volumes. The values of plasticity modulus in the humid savannah vary from 171 to 3000 for an average value of 797. For unpaved lateritic roads in semi-arid and arid zones, these values of plasticity modulus really satisfy the recommended criteria for traffic conditions (vehicles/day) of up to 150 and above [17].

In the dry savannah zone, Pm values oscillate between 220 and 784 with an average of 510. This value is lower than that, 762 and 1182, obtained respectively in Eastern [41] and Southern [45] Cameroon. In this study, about 99% of samples have Pm values higher than 250.

The product  $P_p = \text{fines } (\leq 75 \mu\text{m}) \times PI$  is mostly used for the classification of lateritic gravels in tropical zone [27,16,18,12]. The  $P_p$  values of the humid savannah vary between 144 and 2880 with an average of 656. Seventy-two percent of samples studied have  $P_p$  values lower than 600.

In the dry savannah zone, the values of this parameter oscillate between 149 and 634 with an average of 420.

The values of swelling potential in humid savannah zone (0.002–0.064) and in dry savannah (0.003–0.016) indicate the low swelling potential [19] of the studied materials.

In both dry and humid savannah areas, the obtained  $P_p$  and  $\epsilon_s$  values are lower than those of Eastern [41] and Southern [45] Cameroon lateritic gravels.

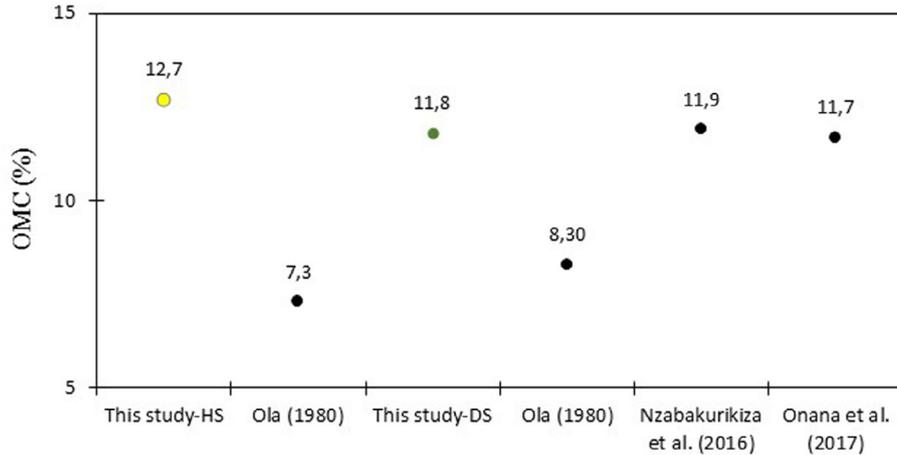
**3.1.2.4. Classification.** The materials of the humid savannah region are gravels and clayey sand belonging to several classes in the AASHTO classification. These lateritic gravels belong to classes

A–2–7 (80%), A–7–5 (9%), A–2–6 (6%), A–7–6 (4%) and A–2–4 (1%). This result is in accordance with works of Autret [11]. According to the USCS classification, the materials of humid savannah are at 66% of clayey gravels (GC), 32% of silty gravels (GM). The remaining 2% represent materials of the groups CH, MH and SC.

According to AASHTO classification, the dry savannah zone lateritic gravels are at 94% gravels and clayey or silty-sand of class A–2–7. Six percent of these materials are of class A–2–6. This result is in accordance with the works of DEGN [18], Nzabakurikiza et al. [41] and Onana et al. [45] in the forest zone of Cameroon. The USCS categorizes these materials as clayey gravels (GC) (53%), or silty gravels (GM) (47%). The GC materials have good workability as construction materials and are rated good for roadway surfacing [32].

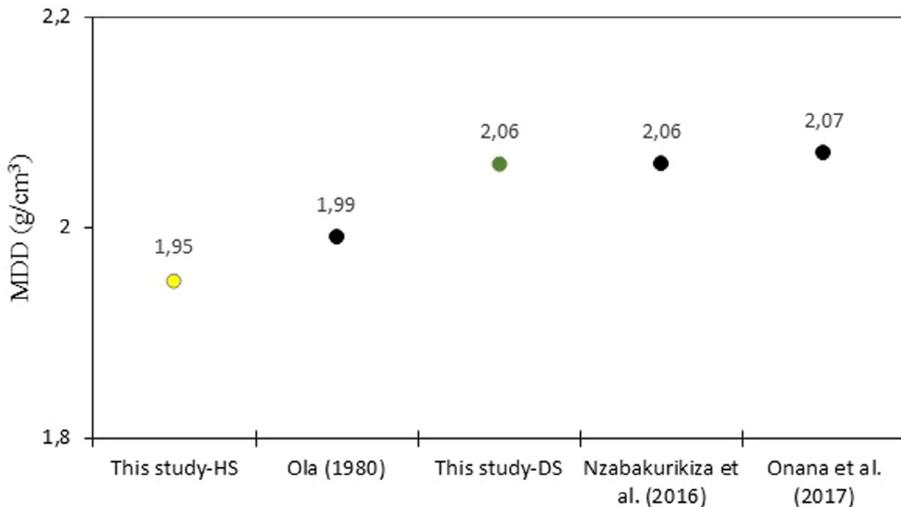
**3.1.3. Compaction characteristics**

The values of optimum moisture content (OMC) of the humid savannah zone lateritic gravels vary between 7.4 and 24.2%, that is average of 12.7% (Table 2). One sample has a OMC higher than 20% (24.2%). By eliminating this value, the maximal value will become 19.3%. OMC values of dry savannah lateritic gravels vary between 8.3 and 17.8%, that is an average of 11.8% (Table 2). This



HS: Humid Savannah; DS: Dry savannah

Fig. 6. Comparison of optimum moisture content (OMC) values with those of other authors previous works.



HS: Humid Savannah; DS: Dry savannah

Fig. 7. Comparison of maximum dry density (MDD) values with those of other authors.

average is similar to that obtained in East (11.9%) [41] and South (11.7%) [45] Cameroon (Fig. 6). OMC values higher than 8% indicate poor performance. In this study 98% of materials from humid savannah and 100% of materials from dry savannah have OMC values higher than 8%. This indicates performance ranging from poor to weak [25,26]. In humid and dry savannah, the average OMC values obtained are higher than those found in the same zones (7.8% and 8.3%) on migmatitic gneiss in Nigeria [43] (Fig. 6).

The values of maximum dry density (MDD) vary between 1.58 and 2.18 g/cm<sup>3</sup> for an average of 1.95 g/cm<sup>3</sup> (Table 2) in humid savannah zone while in dry savannah, these values oscillate between 1.84 g/cm<sup>3</sup> and 2.25 g/cm<sup>3</sup>, that is an average of 2.06 g/cm<sup>3</sup> (Table 2). This average is similar to the obtained values of East (2.06 g/cm<sup>3</sup>) [41] and South (2.07 g/cm<sup>3</sup>) [45] Cameroon (Fig. 7). These values are equal to those found in the Nigerian savannah zone (1.99 g/cm<sup>3</sup>) [43] (Fig. 7). According to the CEBTP [16], the

lateritic gravels must have a MDD value higher or equal to 1.90 g/cm<sup>3</sup> and an optimum moisture content lower or equal to 15%, in order to be used as sub-base layer. About 27% of humid savannah materials and, 98% of dry savannah materials have acceptable MDD values.

In humid savannah, the CBR at 95% of MDD are ranging between 10 and 67% that is an average of 36% (Table 2). The CBR values obtained are lower than those signalled in Togo (57 ± 19%) and in Burkina Faso (49 ± 19%) by Bagarre [12], in Senegal (60 to 84%) by Fall et al. [24]. These CBR values are identical to those obtained in Congo (39 ± 24), in Central African Republic (44 ± 15%) in savannah zone [12] (Fig. 8).

DEGN [18] established correspondence ranging between Pp, CBR, OMC and MDD for lateritic gravels in Cameroon. The range obtained for this parameter show no concordance with CBR values (<30%) but fit into the defined ranges of MDD (1.9–2.2 g/cm<sup>3</sup>) and OMC (8–12%) values.

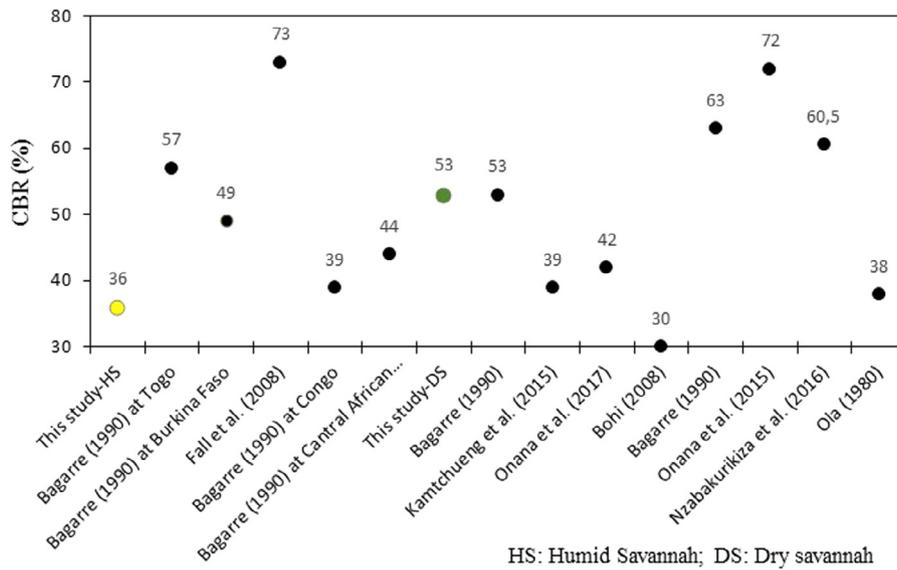


Fig. 8. Comparison of californian bearing ratio (CBR) values with those of other authors.

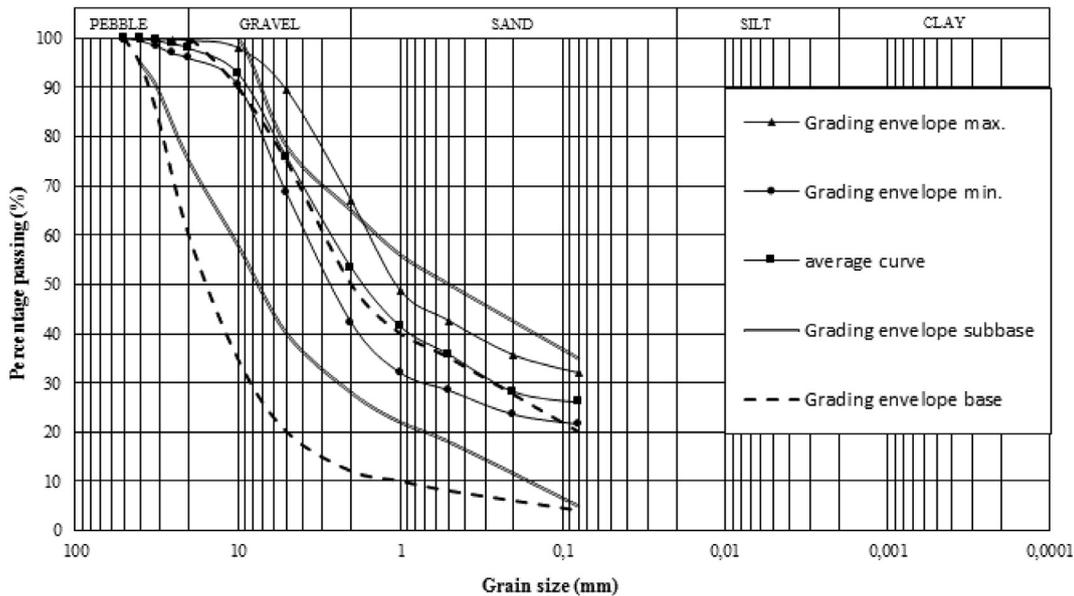


Fig. 9. Lateritic gravel of humid savannah inside the grading envelope of subbase and base CEBTP [16].

In dry savannah zone, the values of CBR at 95% of MDD range between 40 and 70 for an average of 53 (Table 2). The range of values of this parameter is identical to those indicated by Bagarre [12] in forest zone of Cameroon (53 ± 17). The CBR values are higher than those signalled in the central part of Cameroon (24–54) [30], in South Cameroon (31–68) [45], in Côte d'Ivoire (11–65) [14] and, lower than those obtained in Congo (63 ± 49) [12], and in East Cameroon (61–72) [44,41] (Fig. 8). Those CBR at 95% of MDD values are higher than those obtained in lateritic gravels developed on the same parent rock in savannah (38) and in forest zone (18) in Nigeria [43].

The Pp values obtained in dry savannah (149–634) do not correspond to CBR values (15–40) but with those of the defined MDD (2.00–2.25 g/cm<sup>3</sup>) and OMC (7–10%) [18].

### 3.2. Importance of the studied materials in road construction

#### 3.2.1. Lateritic gravels of humid savannah zone

Nwaiwu et al. [40] indicate that the lateritic gravels are of poor performance if their specific gravity values are lower than 2.58 and of excellent performance if higher than 2.85. About 78.4% of the studied materials in humid savannah have specific gravity values higher than 2.58, and 0.5% of the studied materials have a specific gravity higher than 2.85. Therefore, these materials may be average for road construction. The maximal, average and minimal position of curves in the specification envelop of CEBTP [16] shows that these materials can be used as sub-base layer (Fig. 9). The plasticity specifications [16] state that PI values must be between 20 and 30% for sub-base layers, and lower than 15% for base layers. The average PI value (23%) that is closer to the limit suggests the possibility to use the materials of the humid savannah zone as sub-base layer (Table 3). The Gm values (>1.5) indicate that the humid savannah zone lateritic gravels can be used as sub-base layer for high traffic roads and to a lesser extent, as base layer, for minor roads (<0.3 × 10<sup>6</sup> esa). Ninety-eight percent of Pm values are greater than 250, these soils completely satisfy the criteria for minor road-bases, major rural and urban road-bases with a traffic of 0.3–1.0 × 10<sup>6</sup> esa, as well as all sub-bases. Plasticity product values (<600) show that these materials are usable as sub-base layer for T1, T2 and T3 traffic (T1 < 5 × 10<sup>5</sup> < T2 < 1.5 × 10<sup>6</sup> < T3 < 4 ×

**Table 3**  
Specifications for base and sub-base layer according to CEBTP [16].

Lateritic gravel	Base layer	Sub-base layer
Maximum dry density (MDD) (g/cm <sup>3</sup> )	2.00 minimum	1.80 minimum
Plasticity Index (PI) (%)	15 maximum	30–20
Fines (<80 μm) (%)	20 maximum	35–30
CBR at 95% of MDD (%)	60–80	25–35

**Table 4**  
Use of lateritic gravels according to CBR values [18].

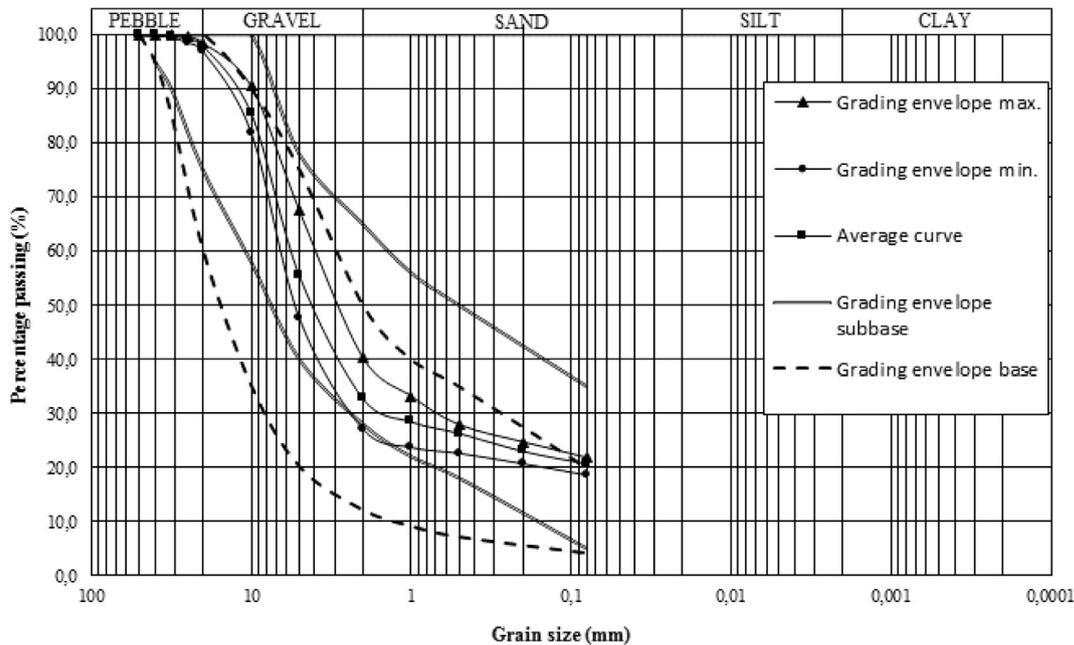
Class of CBR	Use in road construction
S1 : 0 < CBR < 5	Not suitable for road construction
S2 : 5 < CBR < 10	Fill
S3 : 10 < CBR < 15	Fill and top of fill
S4 : 15 < CBR < 30	Top of fill and sub-base for T1 traffic
S5 : 30 < CBR < 60	Sub-base for T2/T3 traffic and base for T1 traffic
S6 : 60 < CBR < 120	Sub-base for T3/T4 traffic and base for T2 traffic
S7 : CBR > 120	Base for T3 traffic

10<sup>6</sup> < T4 < 10<sup>7</sup> < T5 < 2 × 10<sup>7</sup> in 13T equivalent axles) according to Bagarre [12]. The OMC and MDD values confirm that the lateritic gravels of humid savannah are usable as sub-base layer materials. The minimal CBR at 95% of MDD values accepted for sub-base and base layers for T3 traffic are respectively 30 and 80 [16]. In humid savannah, 68% of materials have CBR values higher or equal to 30. On the basis of the CBR at 95% of MDD average value, these materials are of S5 class and are therefore usable as sub-base layer for T2/T3 traffic (Table 4).

All these parameters show that lateritic gravels of humid savannah area can be used only as sub-base layer for T1, T2 and T3 traffic.

#### 3.2.2. Lateritic gravels of dry savannah zone

About 37.7% of the studied dry savannah materials show specific gravity values higher than 2.85. The dry savannah lateritic gravels have road constructions performance varying from good to excellent. The position of maximal, average and minimal granulometric curves of these materials within the specification envelop [16] shows that they can be used for construction of sub-base



**Fig. 10.** Lateritic gravel of dry savannah inside the grading envelope of subbase and base CEBTP [16].

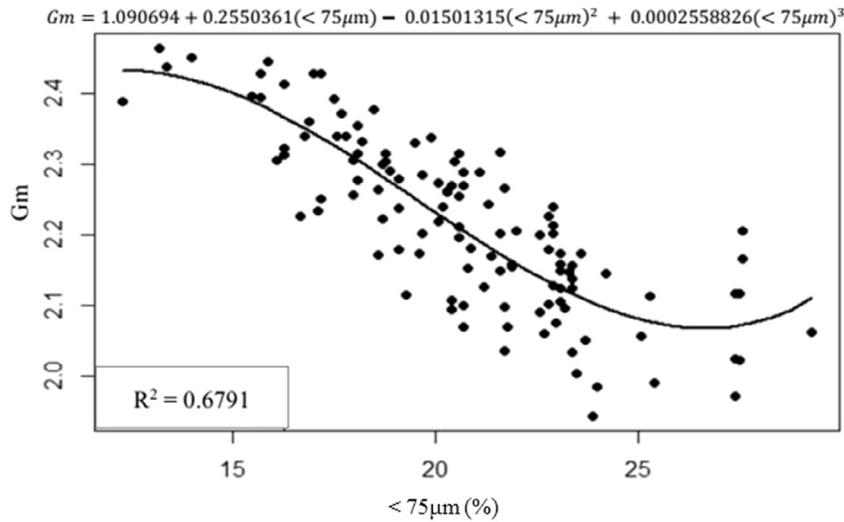


Fig. 11. Scatter plot between Gm and <75 µm and adjusted curve.

and base layers (Fig. 10) for high traffic roads. The lateritic gravels of dry savannah zone are less plastic (of PI = 20%) as compared to the plasticity of those of the humid savannah (of PI = 23%). These materials can be used as base layer [40]. The lateritic gravels of dry savannah have Pm values lower than those of the humid savannah, but are nonetheless usable as base on the criteria put forward. Ninety-eight percent of samples have Pp values lower than 600. Therefore, these materials can be used as sub-base layer for T1 to T3 traffic [12]. The OMC and MDD values indicate that the lateritic gravels of the Centre Cameroon are usable as sub-base layer materials (Table 3).

The studied geotechnical parameters indicate that lateritic gravels of dry savannah zone can be used as sub-base layer, and base layer for low volume traffic T1/T2 after lithostabilisation [12,18] (Table 4). Onana et al. [44] show that lateritic gravels developed on gneisses from eastern Cameroon can be used for base course if treated physically by mixing with rock fragment of gneiss having a Los Angeles index less than 60%, this requires a proportion of 20 wt.% of the 5/20 fraction and 80 wt.% of raw material. Thus, the studied dry savannah lateritic gravels can be used as base layer after this type of lithostabilisation (Table 4).

### 3.3. Statistical analysis

#### 3.3.1. Descriptive analysis

The comparison of the average values of parameters and their variation helped to highlight some observations (Table 2).

The specific gravity values are higher in dry savannah than humid savannah.

The lateritic gravels of humid savannah have a skeleton content (<2 mm) higher than those of dry zone. It is same for mortar (<425 µm), fines (<75 µm), liquid limit (LL) and plasticity index (PI) values. The lateritic gravels of humid savannah are more fine and plastic than those of dry savannah. This can be explained by the good drainage in dry savannah zone [50].

Among these derived parameters, only Gm values are higher in dry savannah than in humid savannah. Contrary phenomenon can be observed for values of plasticity modulus Pm, plasticity product Pp and those of swelling potential εs, that are higher in humid savannah than in dry savannah.

The values of OMC are higher in humid savannah while those of MDD and CBR are higher in dry savannah.

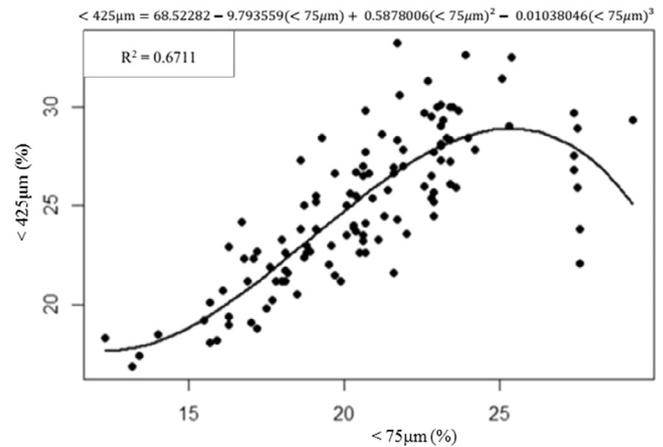


Fig. 12. Scatter plot between <425 µm and <75 µm and adjusted curve.

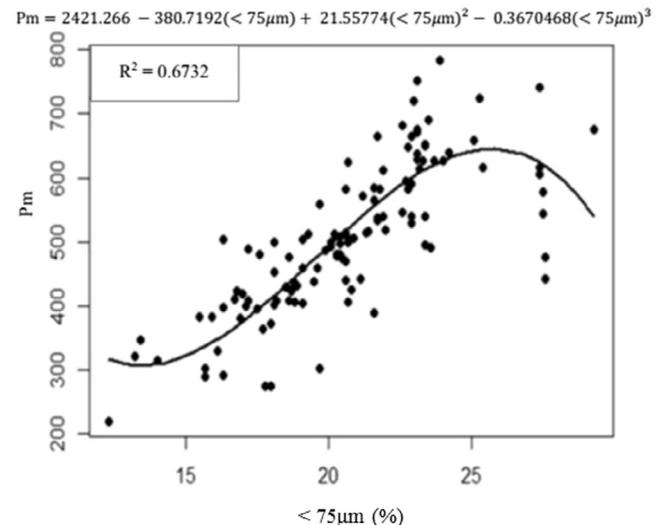


Fig. 13. Scatter plot between Pm and <75 µm and adjusted curve.

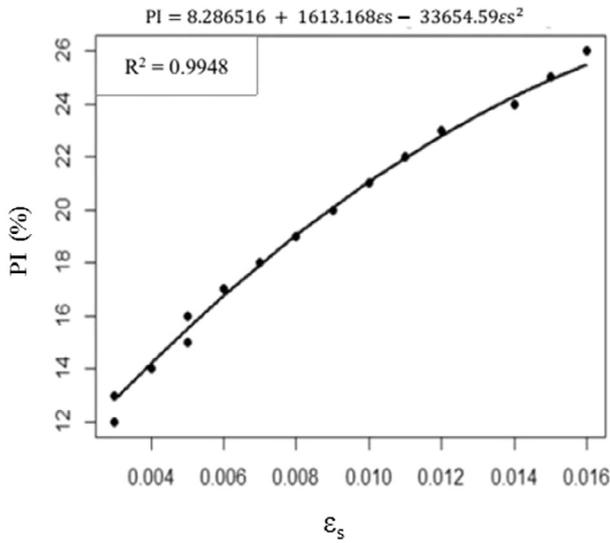


Fig. 14. Scatter plot between PI and  $\varepsilon_s$  and adjusted curve.

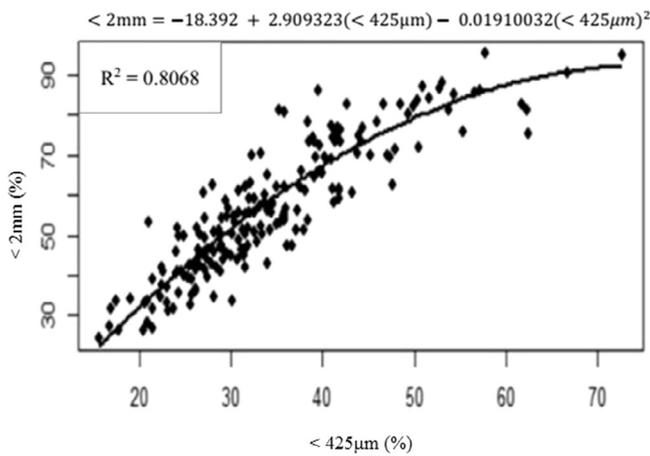


Fig. 15. Scatter plot between <2 mm and <0.425  $\mu m$  and adjusted curve.

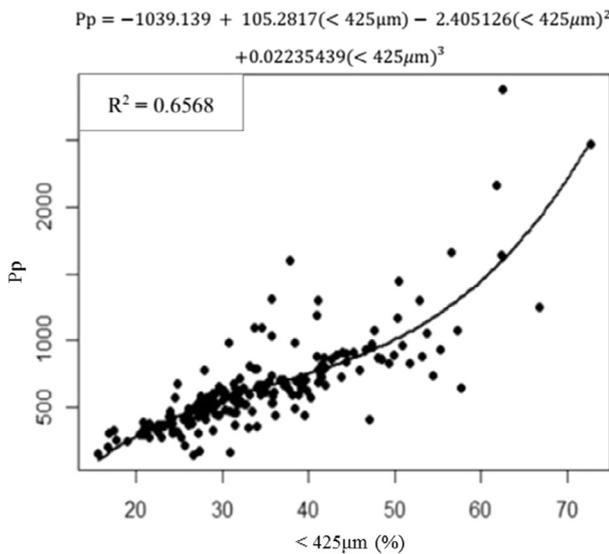


Fig. 16. Scatter plot between Pp and <425  $\mu m$  and adjusted curve.

The comparison of relative standard deviation (RSD) values of various parameters of the studied lateritic gravels (Table 2) shows that they are more dispersed in humid savannah except for the specific gravity ( $\gamma_s$ ) that has the same dispersion in both areas.

3.3.2. Regression analysis

In dry savannah, Gm values are related to those of the mortar (<425  $\mu m$ ) in a linear relation and to those of fines (<75  $\mu m$ ) following a polynomial relation of order 3 (Fig. 11). The values of mortar (<425  $\mu m$ ) are linked to those of fines (<75  $\mu m$ ) according to a polynomial relation of order 3 (Fig. 12). The plasticity modulus (Pm) is respectively linked to mortar (<425  $\mu m$ ) and to plasticity product (Pp) following a linear relation and to fines (<75  $\mu m$ ) following a polynomial relation of order 3 (Fig. 13). The plasticity product (Pp) is linked to the swelling potential ( $\varepsilon_s$ ) and the plasticity index (PI) following linear relations. PI is linked to  $\varepsilon_s$  following a polynomial relation of order 2 (Fig. 14):

In humid savannah zone, the skeleton (<2 mm) is linked to the mortar (<425  $\mu m$ ) following a polynomial relation of order 2 (Fig. 15). The mortar (<425  $\mu m$ ) is linked to the fines (<75  $\mu m$ ) following a linear relation. The plasticity product (Pp) is respectively linked to  $\varepsilon_s$  following a linear relation, to <425  $\mu m$  and <75  $\mu m$  following a polynomial relation of order 3 (Figs. 16 and 17) and, to PI following a polynomial relation of order 4 (Figs. 18 and 19). The plasticity index (PI) is linked to the liquidity limit (LL) following

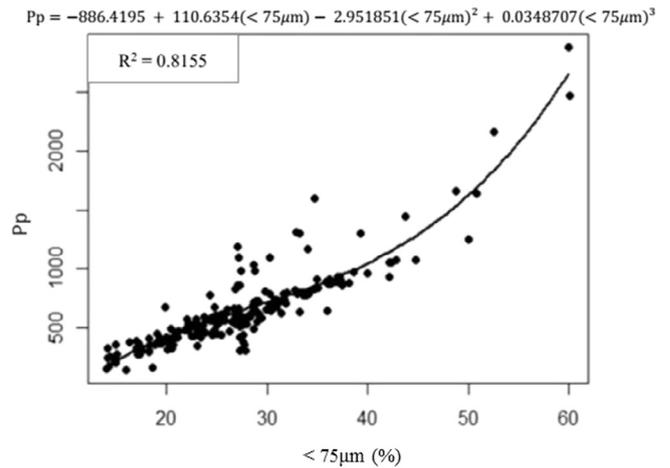


Fig. 17. Scatter plot between Pp and <75  $\mu m$  and adjusted curve.

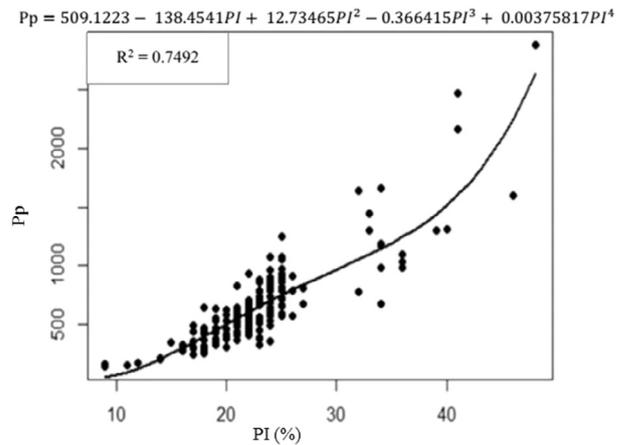


Fig. 18. Scatter plot between Pp and PI and adjusted curve.

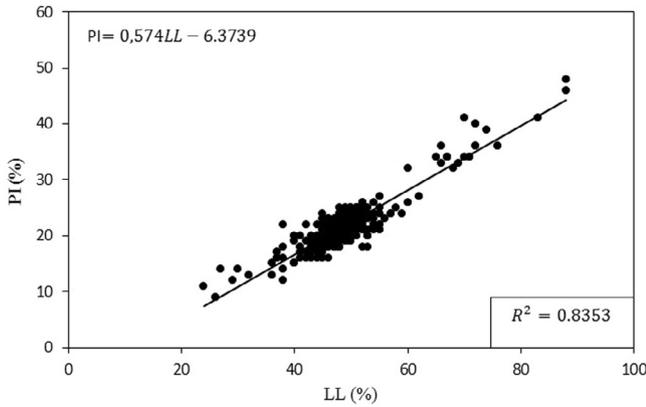


Fig. 19. Scatter plot between PI and LL and adjusted curve.

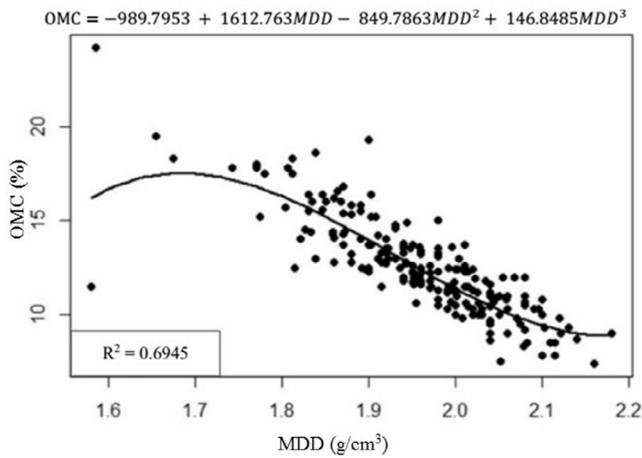


Fig. 20. Scatter plot between OMC and MDD and adjusted curve.

a linear relation (Fig. 20). The values of OMC are linked to those of MDD following a polynomial relation of order 3 (Fig. 20).

In total, the grading modulus (Gm) is linked to fines (<75 μm) following a polynomial relation of order 3 in dry savannah and, linear relation in humid savannah. The plasticity modulus Pm is linearly linked to Gm only in dry savannah zone. Mortar values (<425 μm) is a function of fines (<75 μm) according to polynomial relations of order 3 in dry savannah, and order 1 in humid savannah.

In dry savannah zone, Pm values are linearly linked to those of mortar (<425 μm), Pp, PI, and εs. This relation is polynomial of order 3 between Pm values and those of fines (<75 μm). While, in swamped savannah, Pm values are not linked to any of the parameters mortar (<425 μm), Pp, PI, and εs.

The Pp parameter is linked to the mortar (<425 μm) according to a polynomial relation of order 3 in humid savannah and to LL, according to a polynomial relation of order 2 in dry savannah. This Pp parameter is linked to the fine fraction (<75 μm) according to a polynomial relation of order 3 in humid savannah while in dry savannah, the relation is polynomial, but of order 2. The plasticity index (PI) is linked to εs following polynomial relations of order 2 in dry savannah and to LL with a linear relation in humid savannah.

3.3.3. Principal Component Analysis (PCA)

The first factorial plan accounts for 79% of the information in the data. This in effect is an important percentage.

The sum of the squared cosines on the first factorial axis F1 and F2, for a given observation, gives an idea of the faithful presenta-

Table 5  
Cosine square of variables.

	F1	F2	F3
γs (g/cm <sup>3</sup> )	<b>0.385</b>	0.187	0.154
<2 mm (%)	<b>0.672</b>	0.213	0.000
<425 μm (%)	<b>0.762</b>	0.117	0.041
<75 μm (%)	<b>0.814</b>	0.035	0.053
LL (%)	<b>0.548</b>	0.337	0.000
PI (%)	<b>0.670</b>	0.249	0.002
Gm	<b>0.715</b>	0.143	0.021
Pm	<b>0.802</b>	0.019	0.051
Pp	<b>0.904</b>	0.028	0.029
εs	<b>0.640</b>	0.270	0.003
OMC (%)	<b>0.420</b>	0.125	0.143
MDD (g/cm <sup>3</sup> )	<b>0.547</b>	0.000	0.323
CBR (%)	<b>0.523</b>	0.051	0.100

Values in bold correspond for each variable to the factor for which the squared cosine is the largest.

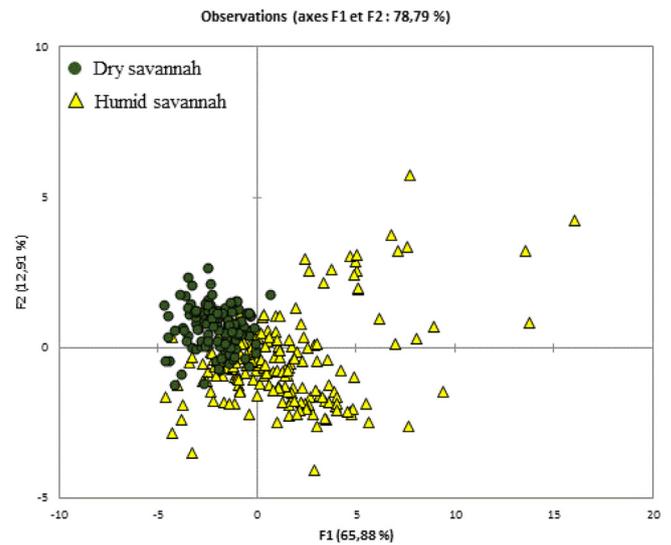


Fig. 21. Plotting of studied lateritic gravels.

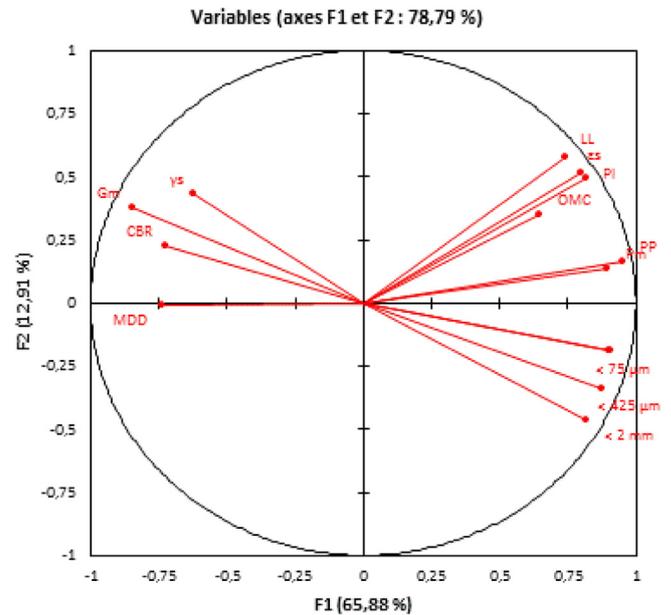


Fig. 22. ACP data of the geotechnical variables of the studied lateritic gravels.

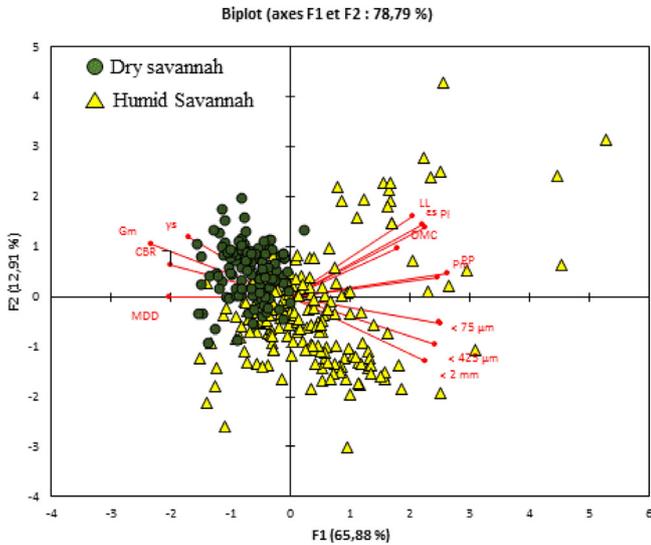


Fig. 23. Biplot of the variables of lateritic gravels samples.

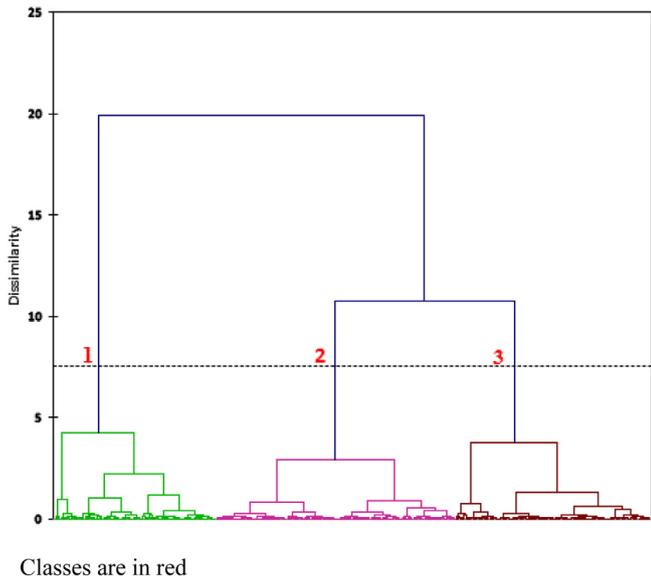


Fig. 24. Dendrogram of the studied lateritic gravels samples.

tion in the plan defined by F1 and F2, for this observation. It is revealed that these Pp and fines (<75 μm) parameters, with cos<sup>2</sup> of 0.9 and 0.8 show the reality contrary to γs and OMC with cos<sup>2</sup> of 0.4. On the basis of this, the interpretation of γs and OMC will therefore be risky (Table 5).

The cloud of individuals (Fig. 21) shows that axis 1 opposes the lateritic gravels of dry savannah to that of humid savannah. The factorial plan therefore presents two groups of materials: the lateritic gravels of dry savannah and those of humid savannah. This distribution may also be split up into three groups: a first group

essentially made up of materials of the dry savannah, a second group made up of the majority of materials of humid savannah, and a third group belonging to the transition zone of dry savannah – humid savannah.

The correlation circle of variables (Fig. 22) shows that axis 1 opposes the group of Gm, MDD, CBR and γs parameters, the group of parameters Pp, Pm, <75 μm, <425 μm, PI, <2 mm, εs, LL and OMC. As for the cloud of individuals, there is the existence of three geotechnical parameters, the grading parameters <75 μm, <425 μm and <2 mm, the group of parameters Pp, Pm, PI, LL, εs and OMC and the group of parameters MDD, CBR, Gm and γs. These groups suggest the existence of correlations between these various parameters. The position of CBR parameter closer to the parameters Gm and γs and opposed to grading parameters suggests the existence of positive correlation with Gm and γs and, negative with grading parameters. There is an inverse correlation between CBR and skeleton (R = -0.7). According to their position on the factorial plan, there is a relative positive correlation between MDD and CBR (R = 0.6). The MDD variables and fines (<75 μm), are the variables closest to main factorial axis that account for 66% and the total variance of individuals. Therefore, these variables have an important role in the classification of lateritic gravels [23,14]. The position of the group of grading parameters in relation to the group of parameters Pp, Pm, PI, LL, εs and OMC indicate the positive correlations between the parameters of these two groups. The variables εs, LL, PI, Pp, <75 μm, <425 μm, <2 mm and Gm are close to the correlation circle, thus well explained and correlated to the factorial axis. This fact is in accordance with results obtained by Bohi [14] on the lateritic soils of Côte d'Ivoire concerning the parameters <80 μm, Pp, PI, and LL.

The biplot of individuals and variables (Fig. 23) shows that the lateritic gravels of humid savannah are mainly characterised by the grading parameters and plasticity while those of dry savannah, and transition zone of dry savannah – humid savannah are characterised by physical and compaction parameters.

3.3.4. Agglomerative Hierarchical Clustering (AHC)

The principle is to build up 'natural' groups so that individuals in this same group be similar, and individuals in various groups be dissimilar. The dissimilarity method used is the Bray & Curtis distance [15] and the agglomeration method, that of Ward [51]. The dendrogram (Fig. 24) confirms the existence of three classes of lateritic gravels with defined geotechnical characteristics (Table 6). A first class made up only of items of the savannah (87 items), a second class with more materials of dry savannah than those of humid savannah (65 samples against 40) and, a third class with more materials of humid savannah than those of dry savannah (72 against 57 samples). The fact of having two classes of materials of dry savannah and humid savannah confirm that there is a transition zone. The third class, displaying the lowest gap between the two materials, should be considered as the class of transition zone (Fig. 25). The diagram of levels obtained (Fig. 26) with a straight curve, confirm the good quality of the classification realised.

Table 6  
Main characteristics of lateritic gravels based classes (Centroid of classes).

Classe	γs	<2 mm (Skeleton)	<425 μm (Mortar)	<75 μm (Fines)	LL (%)	PI (%)	Gm	Pm	PP	εs	OMC (%)	MDD (g/cm <sup>3</sup> )	CBR (%)
1	2.601	68.4	42.1	32.9	56	27	1.633	1104	915	0.019	14.1	1.9	31
2	2.773	33.8	23.1	18.9	45	19	2.229	412	345	0.008	11.1	2.1	51
3	2.712	44.0	29.3	24.0	48	22	2.017	632	511	0.011	12.1	2.0	44

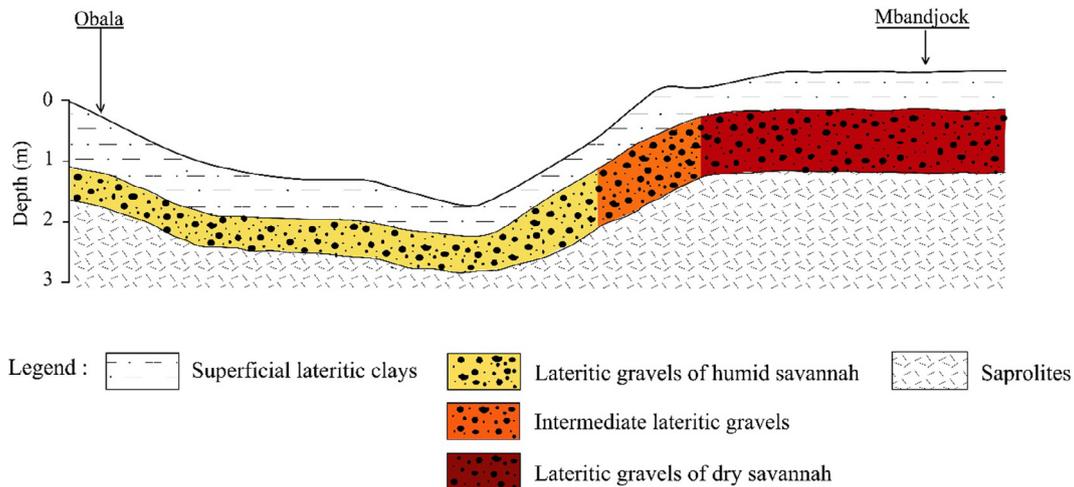


Fig. 25. Types of lateritic gravels in the studied area.

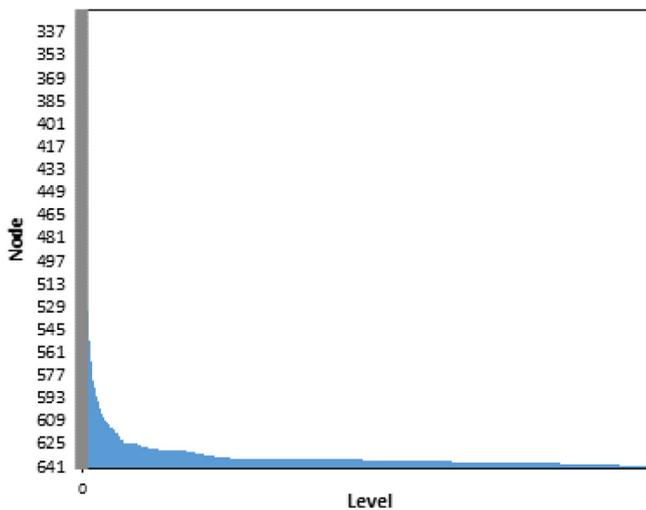


Fig. 26. Levels chart.

#### 4. Conclusions

The present study deals with the characteristics of lateritic gravels found under two types of hydromorphic conditions, the humid savannah and the dry savannah. The conclusions that can be drawn from this study are summarized as follows:

1. the lateritic gravels of humid savannah are brownish yellow materials with 0.20–0.60 m thick made up of centimetric nodules mixed with quartz while those of dry savannah (0.30–1.90 m) are red with scattered millimetric ferruginous nodules,
2. the lateritic gravels of humid savannah are more fine, more plastic and have a low bearing capacity in relation to those of dry savannah,
3. the geotechnical parameters are (1) more dispersed in humid savannah than in dry savannah, (2) three groups of materials are found: lateritic gravels of dry savannah, humid savannah and the intermediate zone, (3) well-known relationships like PI vs. OMC, PL vs. OMC, and MDD vs. fines are not observed in these materials,
4. the lateritic gravels of humid savannah may be used as sub-base layer while those of dry savannah are usable as both sub-base layer and base layer after lithostabilisation.

#### References

- [1] Adeyemi GO. The influence of parent rock factor on some engineering index properties of the three residual lateritic soils in southwestern Nigeria. *Bull Int Assoc Eng Geol* 1995;52:3–8.
- [2] Adeyemi GO, Wahab KA. Variability in the geotechnical properties of a lateritic soil from southwestern Nigeria. *Bull Eng Geol Environ* 2008;67:579–84.
- [3] AFNOR. NF P 94–054. Sols: reconnaissance et essais – détermination de la masse volumique des particules solides des sols – méthode du pycnomètre à eau; 1991.
- [4] AFNOR. NF P 94–057. Sols: reconnaissance et essais. Analyse granulométrique. Méthode par sédimentation; 1992.
- [5] AFNOR. NF P 94–051. Sols: détermination des limites d'Atterberg: limite de liquidité à la coupelle – limite de plasticité au rouleau; 1993.
- [6] AFNOR. NF P 94–056. Sols: reconnaissance et essais. Analyse granulométrique. Méthode par tamisage à sec après lavage; 1996.
- [7] AFNOR. NF P 94–078. Sols: reconnaissance et essais – Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat – Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR; 1997.
- [8] AFNOR. NF P94–093. Sols: reconnaissance et essais– Détermination des références de compactage d'un matériau– Essai Proctor Normal– Essai Proctor modifié– Sols: reconnaissance et essais– Détermination des références de compactage d'un matériau–Essai Proctor Normal – Essai Proctor modifié; 2014.
- [9] Akaha CT, Adunola OO. Geotechnical and chemical evaluation of tropical red soils in a deltaic environment: implications for road construction. *Int J Geo Earth Environ Sci* 2016;6(1):19–29.
- [10] Akpokodje EG. The geotechnical properties of lateritic and non-lateritic soils of southeastern Nigeria and their evaluation for road construction. *Bull Int Assoc Eng Geol* 1986;33(1):115–21.
- [11] Autret P. Latérites et graveleux latéritiques. *Bulletin du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France)*; 1983. p 38.
- [12] Bagarre E. Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière. *ISTED*; 1990. p 143.
- [13] Bello AA, Osinubi KJ. Attenuative capacity of compacted three reddish brown tropical soils. *Cont J Eng Sci* 2010;5(2):39–54.
- [14] Bohi ZPB. Caractérisation des sols latéritiques utilisés en construction routière: le cas de la région de l'Agneby (côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat de l'ENPC Paris; 2008. 123 p.
- [15] Bray JB, Curtis JT. An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin. *Ecol Monogr* 1957;27:325–49.
- [16] CEBTP. Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. Ministère de la coopération de la république française; 1984. p. 155.
- [17] Charman JH. Laterite in road pavements. London construction industry research and information association special publication 47. London: CIRIA; 1988. p. 71.
- [18] DEGN. Recommandation pour l'utilisation en corps de chaussées de graveleux latéritiques naturels. Recommandation 30.004-R. République du Cameroun, Ministère de l'équipement; 1987.
- [19] Djedid A, Bekkouche A, Aissa Mamoune AM. Identification et prévision du gonflement de quelques sols de la région de Tlemcen (Algérie). *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* 2001;233:67–75.
- [20] Duhaufour P. Introduction à la science du sol: Sol, végétation, environnement, Dunod 6e éd., Paris, 2001. p. 331.
- [21] Ekodeck GE. L'altération des roches métamorphiques du Sud Cameroun et ses aspects géotechniques [Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles]. Université de Grenoble I; 1984. p. 392.

- [22] Fall M. Identification et caractérisation mécanique des graveleux latéritiques du Sénégal: application au domaine routier. [Thèse de l'INLP], 1993. p. 179.
- [23] Fall M, Tisot JP, Cissé IK. Specification for road design using statistical data. An example of laterite or gravel lateritic soils from Senegal. *Bull Int Assoc Eng Geol* 1994;50:17–35.
- [24] Fall M, Sawangsurija A, Benson CH, Edil TB, Bosscher PJ. On the investigations of resilient modulus of residual tropical gravel lateritic soils from Senegal (West Africa). *Geotech Geol Eng* 2008;26(1):109–11.
- [25] Gidigasu MD, Bani SK. Geotechnical characteristics of troublesome laterite materials. In: Proceedings of 8th international conference on soil mechanics and foundation engineering (Moscow), vol. 2; 1973. p. 89–96.
- [26] Gidigasu MD. Degree of weathering in the identification of laterite materials for engineering purposes: a review. *Eng Geol* 1974;8:213–66.
- [27] Gidigasu MD. Development of acceptance specifications for tropical gravel paving materials. *Eng Geol* 1983;19:213–40.
- [28] Hieng IO. Etude des paramètres géotechniques des sols du Cameroun. Ed. Clé; 2003.
- [29] Kamgang Kabeyene BV, Ekodeck GE, Njilah IK. Evolution géochimique des formations latéritiques dans l'écosystème périforestier du Sud-Est Cameroun: le site de Kandara. *Afr J Sci Tech – Sci Eng Ser* 2001;2(1):19–32.
- [30] Kamtchueng TB, Onana VL, Fantong WY, Ueda A, Ntoulala RFD, Wongolo MHD, et al. Geotechnical, chemical and mineralogical evaluation of lateritic soils in humid tropical area (Mfou, Central-Cameroon): implications for road construction. *Int J Geo-Eng* 2015;6(1):1–21.
- [31] Kassogue M, Herbert G, Massiera M. Contrôle de la qualité sur les matériaux dans les couches de chaussée (Revêtement exclu). 4ème Conférence Spécialisée en Génie des transports de la Société Canadienne de Génie Civil; 2002. p. 10.
- [32] Lambe TW, Whitman RV. Soil mechanics, S.I. Version. New York: John Wiley and Sons; 1979.
- [33] Mahalinga-lyer U, Williams DJ. Unsaturated strength behavior of compacted lateritic soils. *Géotechnique* 1985;45(2):317–20.
- [34] Maignien R. Review of research on laterites. *Natural resources research*, IV. Paris: UNESCO; 1966, p. 1–148.
- [35] Mesida EA. The relationship between the geology and the lateritic engineering soils in the Northern environs of Akure, Nigeria. *Bull Int Assoc Eng Geol* 1987;35:65–9.
- [36] Millogo Y, Karfa T, Raguilnaba O, Kalsibiri K, Blanchart P, Thomassin JH. Geotechnical, mechanical, chemical and mineralogical characterization of lateritic gravels of Sapouy (Burkina Faso) used in road construction. *Constr Build Mater* 2008;22:70–6.
- [37] Ndzié Mvindi AT. Chemical, mineralogical and geotechnical Characterization of lateritic gravels from Batchenga (Centre Cameroon) for road construction purposes. Master Thesis. *Fac Sci Univ Yde* 1; 2011. p. 80.
- [38] Nkoumou AJF, Mouhamadou BD, Fary D, Parisot JC, Ndiane D. Etude corrélative entre propriétés géochimiques et les caractéristiques géomécaniques des latérites. *J Sci Technol* 2004;3(1 et 2).
- [39] Numbem TJ, Toteu SF, Van Schmus WR, Penaye J, Deloule E, Mvondo OJ, et al. Evidence of ca 1.6-Ga detrital zircon in the Bafia Group (Cameroon): Implications for the chronostratigraphy of the Pan-African Belt Nord of the Congo Craton. *Comp Ren Géosci* 2007;339(2):132–42.
- [40] Nwaiwu CMO, Alkali IBK, Ahmed UA. Properties of ironstone lateritic gravels in relation to gravel road pavement construction. *Geotech Geol Eng* 2006;24:283–4.
- [41] Nzabakurikiza A, Onana VL, Ngo'o Ze A, Ndzie Mvindi AT, Ekodeck GE. Géologique, géotechnique, et mécanique de caractérisation de latérites de gravels du Cameroun pour des constructions routières. *Bull Eng Geol Environ* 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s10064-016-0979-y>.
- [42] Ogunsanwo O. Some geotechnical properties of two laterite soils compacted at different energies. *Eng Geol* 1989;26:261–9.
- [43] Ola SA. Mechanical properties of concretionary laterites from rain forest and savannah zones of Nigeria. *Bull Int Assoc Eng Geol* 1980;21:21–6.
- [44] Onana VL, Nzabakurikiza A, Ndome EE, Likiby B, Kamgang KBV, Ekodeck GE. Geotechnical, mechanical and geological characterization of lateritic gravels of Boumpial (Cameroon) used in road construction. *J Camer Acad Sci* 2015;1:45–54.
- [45] Onana VL, Ngo'o Ze A, Medjo Eko R, Ntoulala RFD, Nanga Bineli MT, Ngono Owoudou B, et al. Geological identification, geotechnical and mechanical characterization of charnockite-derived lateritic gravels from Southern Cameroon for road construction purposes. *Transp Geotech* 2017;10:35–46.
- [46] Otalvaro IF, Cordão NMP, Caicedo B. Compressibility and microstructure of compacted laterite. *Transp Geotech* 2015;5:20–34.
- [47] Santoir C, Villiers JF. Atlas régional du Sud Cameroun. Vol. Végétation, ORSTOM éd.; 1995.
- [48] Vallerie M. Atlas régional du Sud Cameroun. Vol. Pédologie. ed. ORSTOM; 1995.
- [49] Sikali F, Djalal ME. Utilisation des latérites en technique routière au Cameroun. In: Séminaire Régional sur les Latérites: Sols, Matériaux, Minerais, Douala (Cameroun); session 1 et 3. ed. ORSTOM; 1987. p. 277–88.
- [50] Tockol I. Contribution à l'étude des graveleux latéritiques dans les pays du Sahel: cas des routes non revêtues. [Thèse de M.Sc.A (Génie civil)]. Ecole de génie; 1993. p. 207.
- [51] Ward JH. Hierarchical grouping to optimize and objective function. *J Am Stat Assoc* 1963;58:236–44.
- [52] Paige-Green P, Pinard M, Netterberg F. A review of specifications for lateritic materials for low volume roads. *Transp Geotech* 2015;5:86–98.