

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

*Paix – Travail – Patrie*

\*\*\*\*\*

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE DES SCIENCES DE  
LA TERRE

\*\*\*\*\*

CENTRE DE RECHERCHE

ET FORMATION DOCTORALE EN

SCIENCES, TECHNOLOGIES

ET GEOSCIENCES

Laboratoire de Géosciences des

Formations Superficielles et Applications



REPUBLIC OF CAMEROUN

*Peace – Work – Fatherland*

\*\*\*\*\*

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

DEPARTMENT OF OF ERATH  
SCIENCES

\*\*\*\*\*

POSTGRADUATE SCHOOL  
IN SCIENCES, TECHNOLOGY  
AND GEOSCIENCES

Laboratory of Geosciences of  
Superficial Formations and

Applications

**CARACTERISATION MINERALOGIQUE,  
GEOCHIMIQUE, GEOTECHNIQUE ET STABILISATION A  
LA CHAUX DES GRAVELEUX LATERITIQUES DE LA  
ZONE D'AKONOLINGA (SUD - CAMEROUN)**

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

Par : **Arnaud Ngo'o Ze**  
Master en Sciences de la Terre

Sous la direction de  
**MEDJO EKO Robert**  
Professeur, Université de Yaoundé I  
**ONANA Vincent Laurent**  
Maître de Conférences, Université de Yaoundé I

Année Académique : 2020



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

**ATTESTATION DE CORRECTION DE THESE DE DOCTORAT/Ph.D**

\*\*\*\*\*

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

Nom et Prénoms du candidat : NGO'O ZE ARNAUD

Matricule : 03R239

Titre de la thèse :

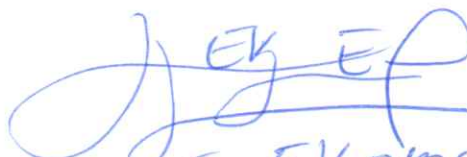
“Caractérisation minéralogique, géochimique, géotechnique et stabilisation à la chaux des graveleux latéritiques de la zone d’Akonolinga (Sud – Cameroun)”

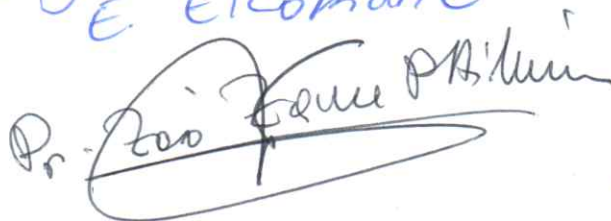
Date de soutenance : Vendredi, le 05 juin 2020.

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

  
E. Elkomane

  
Pr. Zoa Fouu

  
Robert MEDJO EKO

  
V. L. DNANA

Le Président

  
G. E. EKODECK

*A Dieu Tout Puissant ;*

*A mes chers parents Rémy Ze Mekia<sup>†</sup> et Honorine Mindzié ;*

*A mon frère Gallus Mekia Me-Gona<sup>†</sup>.*

*« Rien au monde ne peut remplacer la persévérance. Ni le talent : quoi de plus banal que l'échec des hommes de talent ? Ni le génie : le monde regorge de ratés fort érudits. Seules la persévérance et la détermination sont toutes puissantes. La devise « Accroche-toi » a déjà résolu et résoudra encore bien des problèmes pour la race humaine. »*

*John Calvin Coolidge, (1872 – 1933),*

*Homme d'État américain, 30<sup>ème</sup> Président des États-Unis.*

## AVANT-PROPOS

La thèse présentée réouvre un pan de voile sur la stabilisation des matériaux routiers par adjonction de chaux. Ce travail s'inscrit dans l'esprit du Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et Altérologie (LGIA) de l'Université de Yaoundé I au sein duquel il a été mené et, qui vise à caractériser les matériaux du Cameroun en vue de leur valorisation en géotechnique. L'insuffisance de matériel adéquat, voire son absence m'a poussé à me tourner vers des organismes externes : le Laboratoire National de Génie Civil (LABOGENIE), l'Institut de Recherches Géologiques et Minières (IRGM) et, le Laboratoire de Géosciences (Geo labs) du Canada. Au moment où s'achève la rédaction de cette thèse, il est à noter que ce travail n'aurait été possible sans le concours d'un bon nombre d'acteurs. Il convient alors d'exprimer ma gratitude à tous ceux qui ont œuvré à son aboutissement.

Je remercie le Professeur Georges Emmanuel Ekodeck, qui est pour moi un modèle. Je lui dis merci pour les enseignements reçus et pour tous les ouvrages mis à notre disposition depuis notre entrée en cycle de recherche.

Mes remerciement vont également à l'endroit du Professeur Robert Medjo Eko, qui malgré ses multiples occupations a bien voulu codiriger ce travail que j'avais amorcé en cycle de Master.

Je remercie de tout cœur le Professeur Vincent Laurent Onana, que j'ai rencontré en première année du cycle de licence. Il m'a tenu la main au cours de mes travaux de Master et a bien voulu poursuivre jusqu'en thèse. Merci d'avoir toujours été là pour moi lors de la recherche des Laboratoires d'analyses minéralogiques et géochimiques. Ses conseils tant sur le plan académique que sur le plan social m'ont aidé à trouver ma voie dans ce milieu. Il n'a pas hésité un seul instant à m'ouvrir les portes de son domicile. J'ai d'ailleurs été hébergé chez lui pendant toute la période de rédaction de cette thèse. Je lui dois beaucoup et j'espère que cette thèse sera à la hauteur de ses attentes.

J'ai une pensée pour le Professeur Paul-Désiré Ndjigui, Chef du Département des Sciences de la Terre, qui chaque semaine ne cessait de me demander l'état d'avancement de mes travaux et m'exhortait à redoubler d'ardeur au travail.

Je remercie le Professeur Jean Paul Nzenti, qui s'adressant à ma famille le jour de ma soutenance de Master disait « Si vous voulez un Docteur, il faut mettre la main dans la poche ». Il a par ces mots motivé ma famille à me soutenir dans ce projet.

Du fond de mon cœur, je dis merci au Professeur Emile Ekomane pour ses conseils et sa sollicitude à mon égard tout au long de mon cursus académique. Ma reconnaissance va également

au Docteur Roger Firmin Donald Ntoulala, mon compagnon de terrain. Je lui dis merci pour toute sa disponibilité et pour les moments agréables passés au laboratoire depuis le cycle de Master.

J'adresse mes remerciements à ma « grande sœur », le Docteur Sylvie Désirée Noa Tang, l'épouse du Professeur Onana, pour son hospitalité et sa protection pendant mon séjour à Ebang. Je lui dis merci pour ses conseils si précieux tant sur le plan académique que social.

Ma gratitude va également à l'endroit de tous les enseignants du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I. Un merci particulier va aux Professeurs Véronique Kamgang Kabeyene Beyala, Dieudonné Bitom, Pierre Kamgang, Rose Yongue née Fouateu, Monique Abossolo née Angue, Jules Rémy Ndam Ngoupayou, Joseph Mvondo Ondo, Joseph Quentin Yene Atangana et au Docteur Gaston Lienou<sup>†</sup>, pour toutes les connaissances reçues.

Je dis merci à Monsieur Bekolo Minkoumou. Je n'avais jamais eu un entretien avec toi jusqu'au jour où j'étais venu te rendre visite au Ministère des Travaux Publics alors que j'étais en cycle de Master. J'étais alors ressorti de ton bureau avec une lettre de recommandation qui m'aura permis de réaliser mes travaux de recherche sans fournir beaucoup d'efforts financiers. Après avoir pris une inscription en thèse, j'étais revenu te voir et à la sortie de ton bureau, j'éprouvais également un sentiment de satisfaction. Merci pour ton appui depuis mon inscription en cycle de recherche.

Je veux témoigner ici ma gratitude à l'endroit de mon oncle Valentin Tenga Mekéa. Ton apport financier dans ce travail m'a permis non seulement de financer les interminables campagnes de terrain, mais également de régler la facture des analyses minéralogiques et géochimiques. Merci d'avoir rendu possible ce rêve devenu réalité.

Ma gratitude va à l'endroit de Monsieur René Jacques Ngolo, pour son aide multiforme. Ses conseils ont été pour moi une source de motivation.

A mon frère, ami et camarade Dr Aloys Thierry Ndzié Mvindi merci d'avoir toujours été là lorsque j'avais besoin de tes services. Je te dis merci pour m'avoir motivé à choisir l'option Géotechnique alors que j'hésitais entre trois options. Nos discussions parfois vives mais constructives, m'ont permis de remettre en question certains points de vue. Tes conseils oh combien précieux m'ont boosté le moral malgré l'attente, très longue, de la parution d'un article pour la finalisation de ce travail.

Je témoigne toute ma gratitude à mon ami et « camarade d'armes » Salomon Bertrant Bissé, pour les bons moments passés ensemble.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de mes camarades de promotion, Dr Zakari Mfonka, Dr Jules Mbanga Nyobe, Hervé Nyassa Ohandja, Plastini Florentin Ngami, Herman Ghislain Kenmogne, pour tous les moments partagés ensemble pendant la préparation de ce travail. Je

remercie mes cadets sur le plan académique, Joël Fabrice Nyemb Bayamack, Yves Robert Bikoy, Yannick Wabo Talla, Marie Thérèse Nnanga Bineli, Calixte Edzimbi Mbarga, Juliette Ulriche Awoumou, Elise Colette Ngo Mapuna, Pauline Totancine Ngo Bilong, Paola Raissa Ongboye Bassanack, pour tous les moments passés au Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et Altérologie et, pour les nombreux services qu'ils ont bien voulu me rendre. Puissent-ils trouver dans l'achèvement de ce travail, les motivations dont ils ont besoin pour aller jusqu'au bout de la rédaction de leurs thèses de Doctorat/Ph.D. Je dis merci à mon cadet académique Christophe Enock Embom pour le volet cartographie de ce travail.

Je m'en serai difficilement sorti sans l'aide et le soutien de ma famille. J'ai une pensée pour mon père Remy Ze Mekia<sup>†</sup>, qui de son vivant a toujours été très rigoureux envers moi. Aujourd'hui je bénéficie des bienfaits de cette attitude. Je remercie ma tendre mère Mme veuve Ze née Honorine Mindzié qui, par les efforts qu'elle consent pour mon éducation ne cesse de m'encourager.

A mes oncles Daniel Henry Sinclair Mbang, Emanuel Mbiti Alinda, mes tantes Molline Edandi, Salomé Akono, Julienne Abang (Bouquet), ma nourrice Thérèse Engoung Veuve Mezama ; mes grands-mères Julienne Abang<sup>†</sup> et Marie Louise Medjo, je vous dis humblement merci pour tous les sacrifices, pour moi, consentis.

Je remercie mes frères et sœurs Gallus<sup>†</sup>, Brice, Achille, Jacques, Aristide, Georges, Eugénie, Laurence, Edevige, Blanche, Annelise, ainsi que ma fille Inès Claude, ceux-là qui me donnent le sourire quand tout va mal. Merci pour votre soutien surtout moral mais qui m'a permis de cheminer dans un esprit serein et une ambiance relativement agréable pendant toutes ces années.

Je ne saurais oublier la famille Mezama qui m'a accueilli et encadré comme un fils. J'ai ainsi une pensée pour Thérèse Nkou Mezama, Claire Abada, Bernadette Mvongo Mezama, Christine Nkoumou, Marguerite Mbakoa<sup>†</sup> et Virginie Mvongo ; merci pour tout ce que vous faites pour moi, je vous serai toujours reconnaissant.

Ma gratitude va aussi à Marthe Falonne Ingom, pour toute sa bienveillance et sa sympathie à mon endroit. Tu as été là pour moi dans les moments de la rédaction de ce travail. Reçois toute ma reconnaissance pour ton aide et surtout pour tous ces bons moments que tu as su m'accorder jusqu'ici.

A tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail et dont les noms ne sont pas mentionnés, que ces personnes trouvent en ces mots, l'expression de ma profonde gratitude.

*Andom-Sso - Akonolinga*

*Arnaud Ngo'o Ze*

# TABLE DES MATIERES

<b>DEDICACE</b> .....	<b>i</b>
<b>CITATION</b> .....	<b>ii</b>
<b>AVANT-PROPOS</b> .....	<b>iii</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	<b>vi</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS, ACRONYMES ET SIGLES</b> .....	<b>xi</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>xiv</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>xvii</b>
<b>RESUME</b> .....	<b>xix</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xx</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I. GENERALITES</b> .....	<b>5</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>6</b>
<b>I. MILIEU NATUREL</b> .....	<b>6</b>
I.1. Localisation géographique .....	6
I.2. Climat.....	6
I.3. Végétation .....	6
I.4. Géomorphologie .....	9
I.4.1. Orographie .....	9
I.4.2. Hydrographie .....	9
I.5. Géographie humaine et économique.....	9
I.6. Géologie .....	11
I.6.1. Socle .....	11
I.6.2. Sols.....	11
<b>II. TRAVAUX ANTERIEURS COMPLEMENTAIRES</b> .....	<b>13</b>
II.1. Graveleux latéritiques .....	13
II.1.1. Définition et Généralités .....	13
II.1.2. Caractéristiques minéralogiques, géochimiques et microstructurales .....	13
II.1.3. Paramètres géotechniques .....	15
II.1.3.1. Paramètres physiques.....	15
II.1.3.1.1. Poids volumique des grains solides .....	15
II.1.3.1.2. Paramètres granulométriques .....	17
II.1.3.1.3. Paramètres de plasticité : limites d'Atterberg et indice de plasticité .....	17



II.1.3.1.4. Valeurs de bleu de méthylène.....	21
II.1.3.1.5. Paramètres dérivés .....	21
II.1.3.2. Caractéristiques de compactage.....	23
II.1.3.2.1. Caractéristiques Proctor .....	23
II.1.3.2.2. Californian bearing ratio .....	25
II.1.3.3. Caractéristiques mécaniques .....	26
II.1.3.3.1. Résistance à la compression simple .....	26
II.1.3.3.2. Résistance à la traction indirecte .....	26
II.1.4. Utilisation des graveleux latéritiques en construction routière .....	26
II.1.4.1. Classification des graveleux latéritiques.....	26
II.4.2. Spécification des graveleux latéritiques en construction routière .....	27
<b>III. STABILISATION DES MATERIAUX ROUTIERS .....</b>	<b>28</b>
III.1. Définition et but .....	28
III.2. Techniques de stabilisation.....	31
III.2.1. Stabilisation mécanique .....	31
III.2.2. Stabilisation physique .....	31
III.2.3. Stabilisation chimique .....	32
III.3. Stabilisation à la chaux .....	32
III.3.1. Effets immédiats.....	34
III.3.2. Effets à long terme .....	34
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>34</b>
<b>CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES.....</b>	<b>36</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>37</b>
<b>I. ENQUETES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>37</b>
<b>II. METHODES D'ACQUISITION DES DONNEES D'ANALYSES EXPERIMENTALES</b>	<b>37</b>
II.1. Méthodes d'acquisition des données de terrain.....	37
II.1.1. Localisation des points de prélèvement et matériels .....	37
II.1.2. Echantillonnage .....	37
II.1.3. Identification des échantillons.....	40
II.2. Méthodes d'acquisition des données de laboratoire .....	40
II.2.1. Analyses pétrologiques .....	40
II.2.1.1. Analyses minéralogiques .....	40
II.2.1.2. Analyses géochimiques.....	41
II.2.2. Microstructure .....	41

II.2.3. Travaux géotechniques .....	42
II.2.3.1. Propriétés physiques .....	42
II.2.3.1.1. Poids volumique des grains solides .....	42
II.2.3.1.2. Limites d'Atterberg.....	42
II.2.3.1.3. Valeur de bleu de méthylène .....	42
II.2.3.1.4. Analyses granulométriques .....	44
II.2.3.1.5. Caractéristiques de compactage.....	44
II.2.3.2. Essais mécaniques.....	44
II.2.3.2.1. Compression simple.....	44
II.2.3.2.2. Traction indirecte ou essai brésilien .....	45
<b>III. METHODES D'EXPLOITATION DES DONNEES D'ANALYSES EXPERIMENTALES</b> .....	<b>45</b>
III.1. Méthodes d'exploitation des données minéralogiques.....	45
III.2. Méthodes d'exploitation des données géochimiques .....	46
III.2.1. Indices et diagrammes géochimiques .....	46
III.2.2. Restructuration normative altérologique .....	47
III.3. Méthodes d'exploitation des données géotechniques .....	49
III.3.1. Comparaison des résultats aux spécifications .....	49
III.3.2. Classification.....	49
III.3.3. Paramètres dérivés.....	50
III.3.4. Aptitude au traitement à la chaux.....	50
III.4. Méthodes d'analyses statistiques des données .....	52
III.4.1. Coefficient de variation .....	52
III.4.2. Analyses de régressions.....	52
III.4.3. Analyse en composantes principales .....	53
III.4.4. Classification hiérarchique ascendante.....	55
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>55</b>
<b>CHAPITRE III. RESULTATS.....</b>	<b>57</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>58</b>
<b>I. LOCALISATION DES POINTS DE PRELEVEMENTS .....</b>	<b>58</b>
<b>II. CARACTERISATION PETROLOGIQUE DES GRAVELEUX LATERITIQUES.....</b>	<b>58</b>
II.1. Pétrographie .....	58
II.1.1. Pétrographie macroscopique .....	58
I.1.2. Pétrographie microscopique .....	63

I.2. Minéralogie.....	63
I.3. Géochimie .....	68
<b>II. CARACTERISATION GEOTECHNIQUE DES GRAVELEUX LATERITIQUES .....</b>	<b>73</b>
II.1. Poids volumique des grains solides .....	73
II.2. Granularité.....	73
II.3. Caractéristiques de plasticité.....	75
II.4. Valeur du bleu de méthylène.....	75
II.5. Paramètres dérivés .....	75
II.6. Classification.....	78
II.7. Paramètres de compactage .....	78
<b>III. VARIABILITE DES PROPRIETES GEOCHIMIQUES ET GEOTECHNIQUES.....</b>	<b>81</b>
III.1. Coefficient de variation .....	81
III.1.1. Paramètres minéralogiques .....	81
III.1.2. Paramètres géochimiques .....	83
III.1.3. Paramètres géotechniques.....	83
III.2. Analyses de régression .....	86
III.2.1. Relations entre paramètres géochimiques.....	86
III.2.2. Relations entre paramètres géotechniques .....	88
III.3. Analyses en composantes principales .....	90
III.3.1. Paramètres minéralogiques .....	90
III.3.2. Paramètres géochimiques .....	90
III.3.3. Paramètres géotechniques.....	95
<b>IV. STABILISATION A LA CHAUX DES GRAVELEUX LATERITIQUES .....</b>	<b>98</b>
IV.1. Aptitude au traitement à la chaux .....	98
IV.2. Microscopie électronique à balayage.....	98
IV.3. Paramètres d'identification.....	102
IV.4. Paramètres de compactage.....	102
IV.5. Caractéristiques mécaniques.....	104
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>107</b>
<b>CHAPITRE IV. DISCUSSION .....</b>	<b>108</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>109</b>
<b>I. INTENSITE DE L'ALTERATION DANS LES GRAVELEUX LATERITIQUES SUR CHLORITOSCHISTES ET SUR MICASCHISTES .....</b>	<b>109</b>
<b>II. VARIABILITE STATISTIQUE.....</b>	<b>117</b>

II.1. Types de graveleux latéritiques dans la zone d'Akonolinga.....	117
II.2. Coefficient de variation des paramètres minéralogiques, géochimiques et géotechniques ...	121
II.3. Relations entre paramètres minéralogiques et géotechniques.....	125
II.4. Relations entre paramètres géochimiques et géotechniques .....	128
<b>IV. INTERETS DES MATERIAUX EN CONSTRUCTION ROUTIERE .....</b>	<b>131</b>
IV.1. Graveleux latéritiques naturels .....	131
IV.2. Graveleux latéritiques stabilisés à la chaux .....	135
IV.2.1. Evolution de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité .....	135
IV.2.2. Evolution des paramètres de compactage.....	137
IV.2.3. Evolution des caractéristiques mécaniques .....	138
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>139</b>
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>141</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>144</b>
<b>ANNEXES</b>	

## LISTE DES ABREVIATIONS, ACRONYMES ET SIGLES

A : Aire totale du diffractogramme

AASHTO : *American Association of State Highway and Transportation Officials*

Ac : Activité des colloïdes de Skempton

Acb : Activité de bleu de la fraction argileuse

ACP : Analyse en composantes principales

AFNOR : Association française de normalisation

Ap : Aire du pic p

CBR : *Californian Bearing Ratio*

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

CHA : Classification hiérarchique ascendante

CIA : *Chemical index of alteration*

CV : Coefficient de variation

DEGN : Direction des Etudes Générales et de la Normalisation

DRX : Diffraction des rayons X

DSM : Densité sèche maximale

DVAR : Degré virtuel d'altération de la roche

DVRAR : Degré virtuel relatif d'altération de la roche

GL : graveleux latéritiques

GL-C : graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes

GL-C : graveleux latéritiques dérivés des micaschistes

Gm : module de classement

GPS : *global positioning system*

HRB : *Highway Research Board*

IAL : Indice d'alumine libre

ICP : Indice de confinement potentiel

ICP-MS : inductively coupled plasma mass spectrometry

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.  
IRIP : Indice Relatif d'Induration Potentielle  
IRLP : Indice Relatif de Lixiviation Potentielle  
ISTED : Institut des Sciences et des Techniques et de l'Environnement pour le Développement  
LABOGENIE : Laboratoire national de Génie civil.  
LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées  
LL : Limite de liquidité  
LOI : *loss on ignition*  
LP : Limite de plasticité  
Max. : valeur maximale  
MDD : Maximum dry density  
MEB : microscope électronique à balayage  
MIA : Mafic Index of Alteration  
Min. : valeur minimale  
Moy. : valeur moyenne  
N : nombre d'échantillons  
NF : Norme Française  
OPM : Optimum Proctor Modifié  
PI : Plasticity Index  
Pi : proportion du minéral i  
Pm : module de plasticité  
Pp : produit de plasticité  
PPFAL : prédominance potentielle des oxyhydroxydes de fer et d'aluminium libres  
R'c : résistance à la compression à l'eau  
R't : résistance à la traction à l'eau  
ra : rapport altérologique  
Rc : résistance à la compression simple  
Rc : résistance à la compression simple  
Rit : résistance à la traction indirecte  
Rt : résistance à la traction  
S/R : rapport silice / sesquioxyde  
SAF : silice alumine fer  
SETRA : Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements.

TE – OPM : teneur en eau à l'optimum Proctor modifié

USCS : *unified soil classification system*

VBS : valeur au bleu de méthylène

$\varepsilon_s$  : potentiel de gonflement

$\sigma$  : Ecart type

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Carte de localisation de la zone d'étude (d'après la carte topographique de la zone d'Akonolinga, feuille NA-33-XIX au 1/50 000, INC - Cameroun).....	7
Figure 2. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson appliqué aux données météorologiques de la station d'Akonolinga pour la période allant de 1978 à 2018 .....	8
Figure 3. Carte géomorphologique de la zone d'Akonolinga (d'après la carte topographique de la zone d'Akonolinga, feuille NA-33-XIX au 1/50 000, INC - Cameroun) .....	10
Figure 4. Carte géologique de la zone d'Akonolinga (d'après la carte géologique de reconnaissance du Cameroun au 1 /500 000, feuille d'Abong-Mbang Ouest (Gazel et Guiraudie, 1965, modifiée).....	12
Figure 5. Talus routier dans la localité de Koundou .....	38
Figure 6. Carrière de graveleux latéritiques dans la localité de Nlobolé .....	39
Figure 7. Représentation de projections typiques de variables dans un plan factoriel (De Lagarde, 1995).....	54
Figure 8. Dendrogramme de la classification hiérarchique ascendante (Ndzie Mvindi <i>et al.</i> , 2017)	56
Figure 9. Localisation des points d'échantillonnage sur la carte géomorphologique de la zone d'Akonolinga (d'après la carte topographique de la zone d'Akonolinga, feuille NA-33-XIX au 1/50 000, INC - Cameroun) .....	59
Figure 10. Localisation des points d'échantillonnage sur la carte géologique de la zone d'Akonolinga (d'après la carte géologique de reconnaissance du Cameroun au 1 /500 000, feuille d'Abong-Mbang Ouest (Gazel et Guiraudie, 1965, modifiée)) .....	60
Figure 11. Aspect macroscopique des graveleux latéritiques sur chloritoschistes de la zone d'Akonolinga .....	62
Figure 12. Aspect macroscopique des graveleux latéritiques sur micaschistes de la zone d'Akonolinga .....	64
Figure 13. Microphotographies des graveleux latéritiques sur Chloritoschistes (a, b, c et d) et sur micaschistes (e, f, g et h) dans la zone d'Akonolinga .....	65
Figure 14. Diffractogramme des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga .....	66
Figure 15. Position comparée des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga dans le diagramme géochimique $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3(t)$ .....	71
Figure 16. Cercles de corrélations F1 – F2 et F1 – F3 des paramètres minéralogiques des graveleux latéritiques du secteur d'Akonolinga.....	91



Figure 17. Cercle de corrélations des paramètres géochimiques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga .....	93
Figure 18. Biplot des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga en fonction des paramètres géochimiques .....	96
Figure 19. Cercle de corrélations des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga .....	96
Figure 20. Microstructure après ajout de 2 % de chaux aux graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes de la zone d'Akonolinga .....	100
Figure 21. Microstructure des mélanges après ajout de 2 % de chaux aux graveleux latéritiques développés sur micaschistes de la zone d'Akonolinga .....	101
Figure 22. Covariation de la perte au feu (LOI) et de l'indice d'altération chimique (CIA) dans les graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga (d'après le diagramme de Babechuk <i>et al.</i> , 2014).....	110
Figure 23. Covariation comparée perte au feu (LOI) – Indice de latéritisation (IOL) dans les graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga avec ceux des autres auteurs (d'après le diagramme de Babechuk <i>et al.</i> , 2014).....	113
Figure 24. Position comparée des différents degrés d'altération des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga et ceux des autres auteurs dans le diagramme molaire $Al_2O_3 - CaO^* + Na_2O - K_2O$ (A – CN – K) (Nesbitt et Young, 1989) .....	114
Figure 25. Position comparée des différents degrés d'altération des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga et ceux des autres auteurs dans le diagramme molaire A- L-F (d'après Babechuk <i>et al.</i> , 2014).....	115
Figure 26. Illustration comparée des différents degrés d'altération des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga dans le diagramme AF-CNK-M (d'après Schellmann, 1986).....	115
Figure 27. Illustration des différents degrés d'altération dans le diagramme ternaire $SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3$ (SAF) (d'après Babechuk <i>et al.</i> , 2014) .....	116
Figure 28. Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les graveleux latéritiques sur chloritoschistes et sur micaschistes de la zone d'Akonolinga (d'après Ekodeck et Kamgang, 2002).....	118
Figure 29. Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les graveleux latéritiques sur sur chloritoschistes et sur micaschistes de la zone d'Akonolinga (d'après Ekodeck et Kamgang, 2002).....	119

Figure 30. Evolution des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga du point de vue lixiviation et libération des oxyhydroxydes d'aluminium (IAL) et de fer ferrique (IFL) (d'après Ekodeck et Kamgang, 2002).....	120
Figure 31. Caractérisation de l'importance de l'altération dans les graveleux latéritiques sur chloritoschistes et sur micaschistes de la zone d'Akonolinga, en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; Altération (d'après Ekodeck et Kamgang, 2002).....	120
Figure 32. Dendrogramme des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga en fonction des paramètres géotechniques.....	122
Figure 33. Diagramme des niveaux des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga .....	122
Figure 34. Nuage de points des individus des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga .....	123
Figure 35. Biplot des variables géotechniques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga .....	123
Figure 36. Position des courbes granulométriques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga dans le fuseau de spécification pour couches de base (CEBTP, 1984).....	132
Figure 37. Esquisse de carte géotechnique des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga .....	136

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Données météorologiques de la station d'Akonolinga pour la période allant de 1978 à 2018 .....	8
Tableau 2. Données récapitulatives des valeurs de poids volumique des grains solides des graveleux latéritiques par type de roche en zone de Plateau sud camerounais .....	16
Tableau 3. Données récapitulatives des données granulométriques des graveleux latéritiques par type de roche .....	18
Tableau 4. Données récapitulatives des données des paramètres des limites d'Atterberg des graveleux latéritiques par type de roche .....	19
Tableau 5. Données récapitulatives des paramètres dérivés des graveleux latéritiques par type de roche .....	22
Tableau 6. Données récapitulatives des données de compactage des graveleux latéritiques par type de roche .....	24
Tableau 7. Spécification des graveleux latéritiques en couche de base et couche de fondation .....	29
Tableau 8. Caractéristiques du matériau susceptible d'être traité à la chaux .....	30
Tableau 9. Guide de sélection de la méthode de stabilisation .....	33
Tableau 10. Classification des sols selon les valeurs de bleu de méthylène .....	43
Tableau 11. Paramètres de la classification CEBTP – ISTD .....	51
Tableau 12. Géolocalisation des points de prélèvement .....	61
Tableau 13. Composition minéralogique semi-quantitatives (%) des graveleux latéritiques dans la zone d'Akonolinga .....	67
Tableau 14. Données d'analyses chimiques des éléments majeurs et indices chimiques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga .....	70
Tableau 15. Paramètres altérologiques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga .....	72
Tableau 16. Paramètres géotechniques d'identification des graveleux latéritiques dans la zone d'Akonolinga .....	74
Tableau 17. Valeurs au bleu de méthylène (VBS) des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga .....	76
Tableau 18. Valeurs des paramètres dérivés des graveleux latéritiques dans la zone d'Akonolinga .....	77
Tableau 19. Classification des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga .....	79
Tableau 20. Caractéristiques de compactage des graveleux latéritiques dans la zone d'Akonolinga .....	80
Tableau 21. Données récapitulatives des paramètres minéralogiques .....	82
Tableau 22. Données récapitulatives des paramètres géochimiques .....	84

Tableau 23. Données récapitulatives des paramètres géotechniques.....	85
Tableau 24. Données récapitulatives des relations entre paramètres géochimiques .....	87
Tableau 25. Données récapitulatives des relations entre paramètres géotechniques.....	89
Tableau 26. Cosinus carrés des paramètres minéralogiques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga.....	92
Tableau 27. Matrice de corrélations de Pearson (1905) des paramètres minéralogiques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga.....	92
Tableau 28. Cosinus carrés des paramètres géochimiques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga.....	93
Tableau 29. Matrice de corrélation de Pearson (1905) des paramètres géochimiques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga .....	94
Tableau 30. Cosinus carré des variables géotechniques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga.....	97
Tableau 31. Aptitude au traitement des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga.....	99
Tableau 32. Valeurs de limite de liquidité et indices de plasticité des mélanges graveleux latéritiques-chaux dans la zone d'Akonolinga .....	103
Tableau 33. Paramètres Proctor des mélanges graveleux latéritiques-chaux dans la zone d'Akonolinga.....	103
Tableau 34. Données CBR des mélanges graveleux latéritiques-chaux dans la zone d'Akonolinga .....	105
Tableau 35. Données de résistance à la compression des mélanges graveleux latéritiques-chaux dans la zone d'Akonolinga.....	106
Tableau 36. Données de résistance à la traction des mélanges graveleux latéritiques-chaux dans la zone d'Akonolinga .....	106
Tableau 37. Matrice de corrélations de Pearson (1905) entre paramètres minéralogiques et géochimiques.....	111
Tableau 38. Matrice de corrélation de Pearson (1905) des relations entre paramètres minéralogiques et géotechniques des graveleux latéritiques sur chloritoschistes de la zone d'Akonolinga .....	127
Tableau 39. Matrice de corrélation de Pearson (1905) des relations entre paramètres minéralogiques et géotechniques des graveleux latéritiques micaschistes de la zone d'Akonolinga .....	129
Tableau 40. Données récapitulatives des relations entre paramètres géochimiques et géotechniques .....	130

## RESUME

Le présent travail a pour but d'évaluer l'influence du degré de métamorphisme des roches mères sur les propriétés géotechniques des graveleux latéritiques et, d'étudier le comportement de ces matériaux, après adjonction de chaux, en vue de leur utilisation en construction routière. Après une description macroscopique détaillée des matériaux, les échantillons prélevés ont été l'objet d'études pétrologiques et géotechniques. La minéralogie a été déterminée par microscopie optique et par diffractométrie des rayons X. Les concentrations en éléments majeurs ont été obtenues par fluorescence X et, le dosage du fer ferreux FeO, par titrimétrie. Les études géotechniques ont porté sur les essais d'identification et de compactage. Les essais mécaniques ont été réalisés uniquement sur les mélanges graveleux latéritiques - chaux. Les résultats obtenus montrent que les graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes (GL-C), roches de faible degré de métamorphisme, sont plus épais et plus quartzeux que ceux dérivés des micaschistes (GL-M), roches de degré de métamorphisme moyen. Les principaux minéraux rencontrés dans les graveleux latéritiques GL-C et GL-M sont le quartz, la kaolinite, l'hématite, la goethite et la muscovite. La teneur en quartz est plus élevée dans les graveleux latéritiques GL-C que dans les matériaux GL-M. Les matériaux GL-C et GL-M sont kaolinisés, cependant, les matériaux GL-C présentent un degré de latéritisation moyen, alors que ceux dérivés des micaschistes GL-M sont faiblement à modérément latéritisés. Le comportement des paramètres géochimiques et géotechniques est différent dans les deux types de graveleux latéritiques étudiés. Dans les graveleux latéritiques GL-C, le paramètre indice portant californien (CBR) est lié à l'indice relatif de lixiviation potentielle par une relation linéaire inverse. La portance CBR diminue donc avec l'augmentation de la lixiviation. Les nuances mises en évidence dans l'évolution pédogénétique des graveleux latéritiques GL-C et GL-M, sont confirmées par l'analyse statistique par classification hiérarchique ascendante. Les graveleux latéritiques GL-C, sont principalement caractérisés par les paramètres de granulométrie et de plasticité (squelette = 48,27 %, mortier = 36,31 %, fines = 27,63 %, indice de plasticité (IP) = 29 %, module de classement (Gm) = 1,88, densité sèche maximale (DSM) = 2,00, CBR = 44 %), tandis que, les graveleux latéritiques GL-M se caractérisent par les paramètres physiques et de compactage (squelette = 34,82 %, mortier = 25,45 %, fines = 17,90 %, IP = 18 %, Gm = 2,22, DSM = 2,13, CBR = 65 %). Les graveleux latéritiques GL-M sont utilisables en couche de fondation pour tout type de trafic et, en couche de base, pour les trafics faibles T1 et T2, alors que les graveleux latéritiques GL-C sont aptes uniquement à une utilisation comme matière première pour couche de fondation, pour tout type de trafic. Les graveleux latéritiques GL-C, plus altérés, exigent plus de chaux (> 6 %), pour une utilisation en couche de base, comparativement aux matériaux GL-M (2 – 4 %). Plus le degré de métamorphisme de la roche parentale est élevée, plus les graveleux latéritiques générés sont aptes comme matériaux de corps de chaussée.

**Mots-clés** : Roches schisteuses, Graveleux latéritiques, Pétrologie, Propriétés géotechniques, Variabilité statistique, Construction routière

## ABSTRACT

The purpose of this work is to evaluate the influence of metamorphism degree of schistose rocks on the geotechnical properties of lateritic gravels, and to study the behavior of these materials after lime addition, for road construction purposes. After a detailed macroscopic description of the studied materials, samples were run for petrological and geotechnical analyses. The mineralogy was determined by optical microscopy and X-ray diffraction. The major element concentrations were obtained by X-ray fluorescence and, FeO concentrations, by titrimetry. Geotechnical analyses focused on identification and compaction tests. The mechanical tests were carried out only on lime-lateritic gravel mixtures. The results obtained show that lateritic gravels developed on low metamorphism degree rocks (chlorite schists) are thicker and more quartzose than those derived from average metamorphism degree rocks (mica schists). The chlorite schists and mica schist-derived lateritic gravels are made up of quartz, kaolinite, hematite, goethite and muscovite. Quartz content is higher in chlorite schists derived lateritic gravels than those from mica schists. Those materials are kaolinitized, however, chlorite schist-derived lateritic gravels present an average degree of lateritisation, while mica schist-derived ones are slightly to moderately lateritized. The behavior of geochemical parameters and geotechnical parameters is different in the studied lateritic gravels. In chlorite schist-derived lateritic gravels, the Californian bearing ratio parameter (CBR), is related to relative lixiviation potential index by an inverse linear relation. The CBR index therefore decreases with the increase of the leaching in these materials. The nuances highlighted in the pedogenetic evolution of the low and average metamorphism rock-derived lateritic gravels are confirmed by the statistical Agglomerative Hierarchical Clustering analysis. Chlorite schist-derived lateritic gravels are mainly characterized by granulometric and plasticity parameters (skeleton = 48.27%, mortar = 36.31%, fines = 27.63%, plasticity index (PI) = 29%, grading modulus (G<sub>m</sub>) = 1.88, maximum dry density (MDD) = 2.00 Mg/m<sup>3</sup>, CBR = 44%), while those developed on mica schists are characterized by physical and compaction parameters (skeleton = 34.82%, mortar = 25.45%, fines = 17.90%, PI = 18%, G<sub>m</sub> = 2.22, MDD = 2.13 g/cm<sup>3</sup>, CBR = 65%). The mica schist-derived lateritic gravels are usable as subbases for any type of traffic and as bases for low volume traffic, while, those developed on chlorite schists can be used as subbases for any type of traffic. Chlorite schist-derived lateritic gravels, more weathered, require more lime (> 6 wt.%) for bases compared with mica schist-derived lateritic gravels (2 – 4 wt.%). The higher the degree of metamorphism of the parental rock, the better the geotechnical proprieties of the lateritic gravels generated.

**Keywords:** Schistose rock, Lateritic gravels, Petrology, Geotechnical properties, Statistical variability, Road construction

---

# **INTRODUCTION GENERALE**

---

La formation des sols latéritiques est fortement conditionnée par les facteurs climatiques qui règnent sous les tropiques, d'où le nom générique de 'latérites' donné par les scientifiques et, surtout les ingénieurs, aux matériaux formés sous ces latitudes. Mais, la formation des latérites et, notamment, celle des graveleux latéritiques, est conditionnée, en plus du climat, par des facteurs variables, au nombre de quatre. Ces facteurs sont la roche mère, la topographie, la végétation et le temps, c'est-à-dire la durée du phénomène de latéritisation (Ekodeck, 1984 ; Duchaufour, 2001 ; Kamgang *et al.*, 2001). Les combinaisons de ces facteurs variables donnent naissance, à l'intérieur même de la zone intertropicale, à des graveleux latéritiques très hétérogènes, aux textures, compositions chimico-minéralogiques, et caractéristiques géotechniques et mécaniques variables (Gidigas, 1991 ; Santoir et Villiers, 1995). Par exemple, des graveleux latéritiques, choisis sur la base de leurs propriétés géotechniques, ne sont aptes à une utilisation en corps de chaussée, tandis que d'autres graveleux latéritiques présentent de bonnes qualités. Des travaux géotechniques ont été effectués sur ces matériaux en zone intertropicale humide, en prenant en compte le climat, la roche parentale et l'influence des conditions hydriques qui, généralement, influencent le type de végétation (Ekodeck, 1984 ; Bagarre, 1990 ; Meissa, 1993 ; Tockol, 1993 ; Tockol *et al.*, 1994 ; Millogo *et al.*, 2008 ; Onana, 2010 ; Onana *et al.*, 2015 ; Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017 ; Ndzié Mvindi *et al.*, 2017). Ces travaux ont montré que ces matériaux sont relativement différents et, qu'il existe, des relations intimes entre leurs caractéristiques minéralogiques et géochimiques et donc génétiques, et leurs propriétés géotechniques et mécaniques. Ces études confirment en réalité le fait qu'il faut bien maîtriser les conditions de genèse et d'évolution des matériaux (Gidigas, 1991), afin d'optimiser leur utilisation en construction routière. Dans le Monde, les roches métamorphiques ou roches cristallophyliennes représentent 27,4 %, contre 64,7 % pour les roches cristallines et 7,9 % pour les roches sédimentaires (Dercourt et Paquet, 1999). Les formations géologiques observables dans la zone d'étude sont des roches métamorphiques (Olinga *et al.*, 2010). Au Cameroun, ces formations, assez répandues, couvrent environ 25 à 30 % de la surface du territoire national et sont représentées par les séries d'Ayos, de Mbalmayo - Bengbis, de Yaoundé, de Yokadouma, du Lom, et de Poli (Vicat, 1998). La zone d'étude appartient aux séries de Mbalmayo - Bengbis (Nédelec *et al.*, 1986) et d'Ayos (Olinga, 2003 ; Olinga *et al.*, 2010). On y observe principalement des roches métamorphiques de faible degré, les chloritoschistes, et celles de degré moyen, les micaschistes. En général, les roches de nature schisteuse présentent un comportement mécanique complexe (Ekodeck, 1984 ; Onana, 2010). Ce comportement délicat provient de la richesse de ces roches en minéraux phylliteux (micas, chlorite), caractérisés par leur aptitude à être débités plus ou moins facilement en feuillets (Nédelec *et al.*, 1986 ; Adeyemi, 1995). Les directions de ces débits sont des plans



privilegiés de rupture lors de sollicitations mécaniques diverses (Ekodeck, 1984). Ces roches, *a priori* donc, présentent plus de risques de rupture sous charge que les autres types de formations. Cependant, au-delà de leur stabilité reconnue mauvaise, on dispose de données parcellaires (Onana *et al.*, 2009), qualitatives et/ou quantitatives sur la nature et l'intensité des problèmes que ces matériaux posent. Les sols latéritiques et notamment, les graveleux latéritiques, qui se développent sur ces roches de nature schisteuse, ont des propriétés géotechniques qui restent mal connues à l'image de celles de leurs roches mères (Onana, 2010). Cependant, la plupart des études scientifiques réalisées sur les graveleux latéritiques en zone intertropicale se sont focalisées sur ceux dérivés de roches mères magmatiques et gneissiques (Millogo *et al.*, 2008 ; Onana *et al.*, 2015 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017 ; Ndzié Mvindi *et al.*, 2017). Très peu d'études se sont intéressées aux graveleux latéritiques dérivés de roches métamorphiques de degrés de métamorphisme différents, et donc, sous l'influence du degré de métamorphisme des roches parentales sur les paramètres géotechniques et mécaniques des graveleux latéritiques (Ngo'o Ze *et al.*, 2019). Or, de nombreuses études géochimiques récentes (Chetelat *et al.*, 2013 ; Guo *et al.*, 2018) suggèrent le contrôle de la nature lithologique sur la valeur des indices d'altération des matériaux, et donc sur leurs propriétés géomécaniques. D'où la nécessité d'une caractérisation détaillée de ces matériaux, prenant en compte plusieurs approches scientifiques, afin d'aboutir à leur classification exacte et, à leur connaissance géotechnique fine. C'est la raison pour laquelle, certains chercheurs ont suggéré d'associer des études minéralogiques et géochimiques, aux essais géotechniques classiques (Tokol, 1993 ; Mahalinga-Iyer et Williams, 1997 ; Millogo *et al.*, 2008). Dès lors, le choix d'un géomatériau utilisé en construction routière doit se faire sur la base de la connaissance simultanée de ses propriétés pétrologiques et de ces paramètres géotechniques (Millogo *et al.*, 2008 ; Onana *et al.*, 2015 ; Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017) d'une part. D'autre part, à l'état naturel, les graveleux latéritiques présentent parfois des limites en tant que matériaux d'assises de chaussée, plasticité élevée et rareté des matériaux à valeurs d'indice portant Californien (CBR) supérieures à 80 % (Nkoumou *et al.*, 2004). Ces matériaux posent donc des problèmes tant du point de vue de la portance que de la durabilité et des quantités disponibles (Millogo, 2008). Compte tenu de la croissance du trafic dans les pays en développement, les techniques de construction routière évoluent vers des formules d'amélioration et, notamment, les techniques de stabilisation des matériaux naturels, en vue de leur utilisation dans la construction des chaussées à trafic élevé (Tokol, 1993 ; Ali *et al.*, 2016). Dans la technique de stabilisation adoptée, l'efficacité du traitement du matériau dépend non seulement de la qualité et de la quantité d'adjuvant, mais aussi de la composition minéralogique et géochimique du matériau naturel (Frempong, 1995). De nombreux travaux ont été effectués sur la stabilisation des graveleux

latéritiques développés sur roches mères diverses (Frempong, 1995 ; Millogo *et al.*, 2012 ; Amadi et Okeiyi, 2017) en zone tropicale. Bien que les graveleux latéritiques du Sud Cameroun aient été l'objet d'études concernant leurs caractéristiques minéralogiques, géochimiques et géotechniques, peu de travaux scientifiques ont été consacrés à la stabilisation et, à l'effet de l'ajout de la chaux sur la microstructure des graveleux latéritiques (Millogo *et al.*, 2012). La présente étude a donc pour but d'une part, d'évaluer l'influence du degré de métamorphisme des roches sur les propriétés géotechniques des graveleux latéritiques et, d'autre part, d'expliquer le comportement de ces matériaux, après adjonction de chaux, en vue de leur utilisation en construction routière.

Les objectifs spécifiques de l'étude sont :

- caractériser les graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes et des micaschistes sur le plan pétrologique ;
- déterminer les propriétés géotechniques de ces graveleux latéritiques ;
- évaluer l'influence du degré de métamorphisme sur les propriétés pétrologiques et les paramètres géotechniques des graveleux latéritiques étudiés ;
- déterminer les propriétés géotechniques des graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes et des micaschistes après adjonction de chaux ;
- proposer des formulations pour les mélanges graveleux latéritiques - chaux.

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

- le premier chapitre, 'Généralités', porte sur le cadre naturel de l'étude et les travaux antérieurs complémentaires ;
- le deuxième chapitre, 'Matériels et méthodes', après la revue de la littérature effectuée au chapitre I, présente les travaux réalisés sur le terrain et en laboratoire et, s'achève par la présentation des modes d'exploitation des résultats ;
- le troisième chapitre, 'Résultats', présente les principaux faits d'observation et d'analyse pétrologique et géotechnique des graveleux latéritiques naturels et ceux stabilisés à la chaux ;
- le quatrième chapitre, 'Discussion', précise l'intensité du phénomène d'altération dans les graveleux latéritiques, établit des liens entre paramètres génétiques et paramètres géotechniques. Il précise en outre les types de matériaux étudiés, ainsi que leur intérêt en construction routière avant et, après stabilisation à la chaux.

Enfin, la conclusion générale fait ressortir les principaux résultats obtenus au cours de ce travail, ainsi que les principales perspectives.

# CHAPITRE I.

---

## **GENERALITES**

---

## **INTRODUCTION**

Le présent chapitre définit le cadre géographique et présente les données climatologiques, hydrographiques et phytogéographiques de la zone d'Akonolinga. Il s'achève par une revue de la littérature sur les graveleux latéritiques et les données sur la stabilisation des géomatériaux routiers à la chaux.

## **I. MILIEU NATUREL**

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

La zone d'Akonolinga est située dans le Plateau sud camerounais. Elle s'étend entre 3°30' et 4°00' de latitude Nord, et entre 12°00' et 12°30' de longitude Est (Fig. 1). Sur le plan administratif, la zone d'étude est située dans la Région du Centre, Département du Nyong et Mfoumou.

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

Le climat de la zone d'étude peut être caractérisé par les relevés météorologiques de la station du Nyong et Mfoumou à Akonolinga. Cette station se localise à 671 m d'altitude et a pour coordonnées 3° 46' N et 12° 14' E. Pour la période allant de 1978 à 2018, la moyenne des précipitations est de 1518,2 mm (Tab. 1). La température moyenne est de 25° C avec un maximum en février. Le mois de juillet est considéré comme étant le plus humide. La zone étudiée est soumise à un climat équatorial de transition à quatre saisons inégalement réparties sur toute l'année (Ndam *et al.*, 1998). Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957) établi à partir des données pluviométriques et thermiques permet de distinguer quatre saisons dans l'année (Fig. 2) :

- une grande saison sèche de décembre à février ;
- une petite saison de pluies de mars à juin ;
- une petite saison sèche de juillet à août ;
- une grande saison de pluies de septembre à novembre.

### **I.3. Végétation**

La végétation de la zone d'Akonolinga appartient au grand domaine de la forêt humide semi-caducifoliée (Letouzey, 1985 ; Santoir et Villiers, 1995 ; Vallerie, 1995). C'est une forêt semi-décidue à *Sterculiacées* et *Ulmacées* à faciès de dégradation prononcée. Elle présente des recrus forestiers. Sur le plan vertical, elle peut être subdivisée en trois grands ensembles :

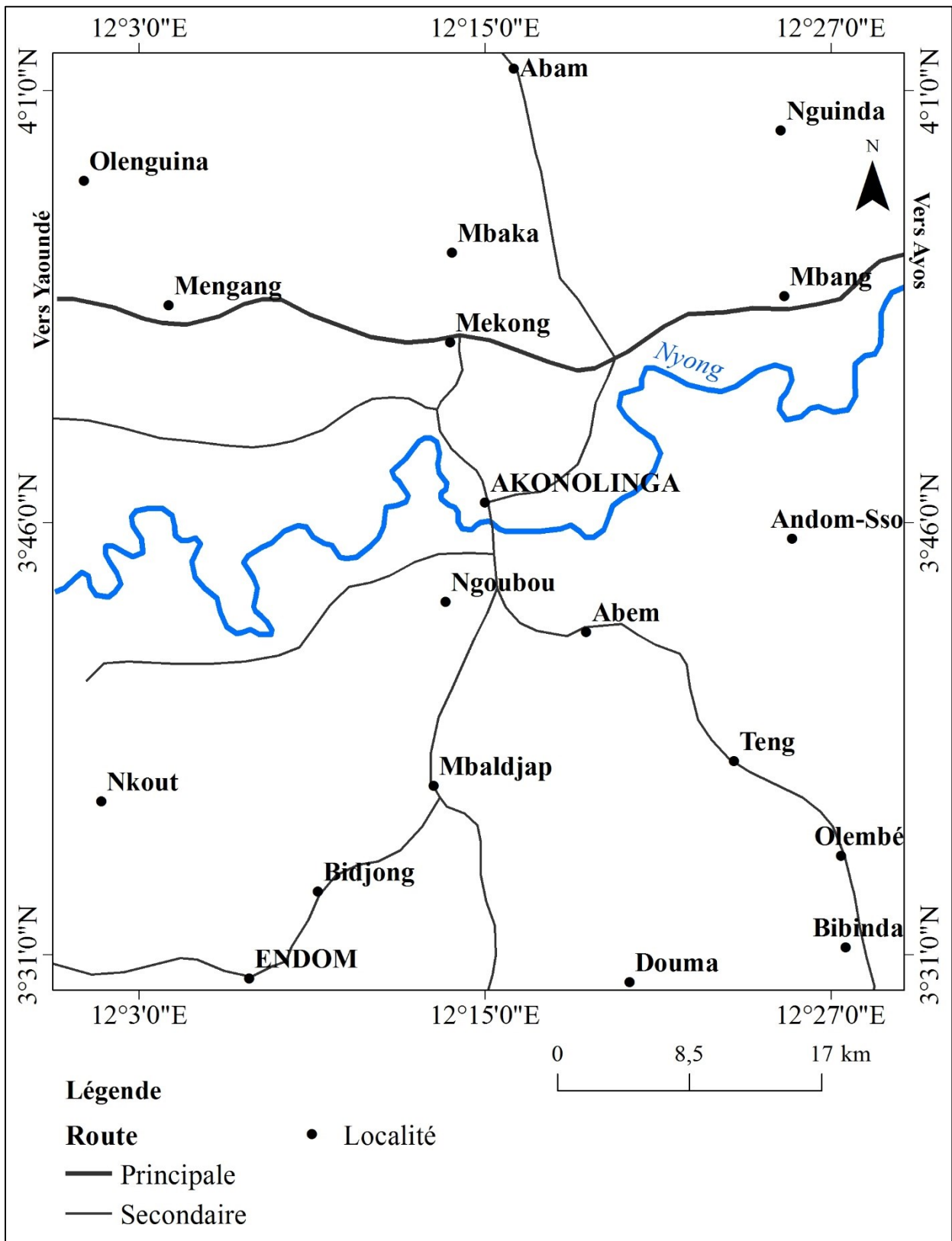
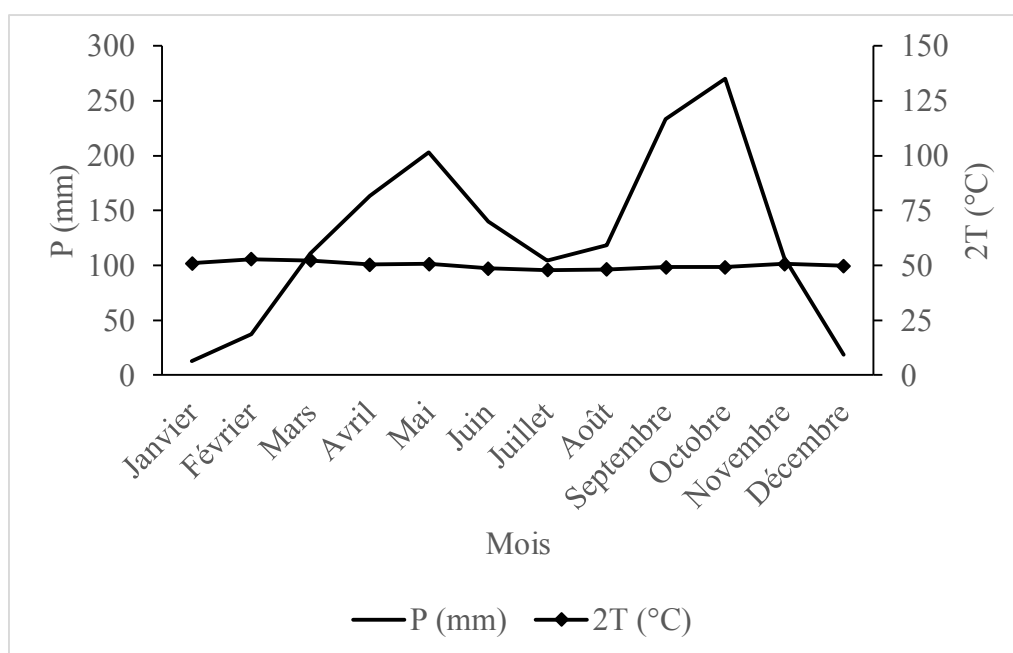


Figure 1. Carte de localisation de la zone d'étude (d'après la carte topographique de la zone d'Akonolinga, feuille NA-33-XIX au 1/50 000, INC - Cameroun)

Tableau 1. Données météorologiques de la station d'Akonolinga pour la période allant de 1978 à 2018

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total	Moy.
P (mm)	12,7	37,5	110,6	163,2	202,8	140,1	104,1	118,4	233,1	269,9	107,4	18,4	1518,2	-
T (°C)	25,5	26,4	26,1	25,2	25,3	24,31	23,9	24,1	24,6	24,6	25,3	24,9	-	25,0

*P* : précipitations moyennes, *T* : températures moyennes



*P* : précipitations moyennes, *T* : températures moyennes

Figure 2. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson appliqué aux données météorologiques de la station d'Akonolinga pour la période allant de 1978 à 2018

- des îlots de savane arbustive intra-forestière à *Imperata cylindrica*, localisés sur des interfluves à cuirasses ferrugineuses massives ou fragmentées ;
- une forêt marécageuse dans les bas-fonds mal drainés ou le long des cours d'eau, constituée essentiellement de raphiales et de fougères ;
- une forêt secondaire riche en *Ulmacées* et *Sterculiacées*, qui se développe sur les versants des collines.

## **I.4. Géomorphologie**

### **I.4.1. Orographie**

La zone d'Akonolinga, fait partie du Plateau sud camerounais. Il s'agit d'une vaste surface mollement ondulée, dont l'altitude moyenne est comprise entre 600 et 900 mètres (Fig. 3). Le modelé de la région d'Akonolinga est constitué de deux grands ensembles, les collines largement ondulées à vallées larges et, la plaine, faiblement ondulée, à vallées très larges (Vallerie, 1995).

### **I.4.2. Hydrographie**

La zone d'Akonolinga se localise dans le bassin du Nyong qui en est le cours d'eau principal. Le réseau hydrographique est de type dendritique à tendance rectangulaire (Fig. 3). Le cours du Nyong est caractérisé dans cette zone par un relief mou et des pentes très faibles. Ses eaux sont gonflées par celles de ses affluents : le Mfoumou en rive droite, le Yi, le Lala et le Yanga, en rive gauche (Olivry, 1986). Le Nyong, dans la zone d'étude, coule au sein d'une vaste zone marécageuse, où son lit est envahi par une végétation de graminées aquatiques.

## **I.5. Géographie humaine et économique**

Les populations de la zone d'Akonolinga appartiennent au grand groupe des Bantou. Les groupes ethniques rencontrés sont les Sso, les Yengono, les Yebekolo, les Maka, les Yelinda et les Omvang. Ces populations cultivent principalement du cacao (*Theobroma cacao*), café (*Coffea*), palmier à huile (*Elaeis guineensis*) et pratiquent une agriculture vivrière faite de manioc (*Manihot esculenta*), banane plantain (*Musa paradisiaca*), d'arachide (*Arachis hypogaea*) et de concombre (*Cucumis sativus*). Les produits de cette agriculture ont deux principales destinées : la consommation familiale et le petit commerce. Aux côtés de ces agriculteurs, on retrouve également des pêcheurs, des chasseurs et des éleveurs traditionnels de petit bétail (chèvres *Capra aegagrus hircus*, moutons *Ovis aries* et porcs *Sus scrofa*

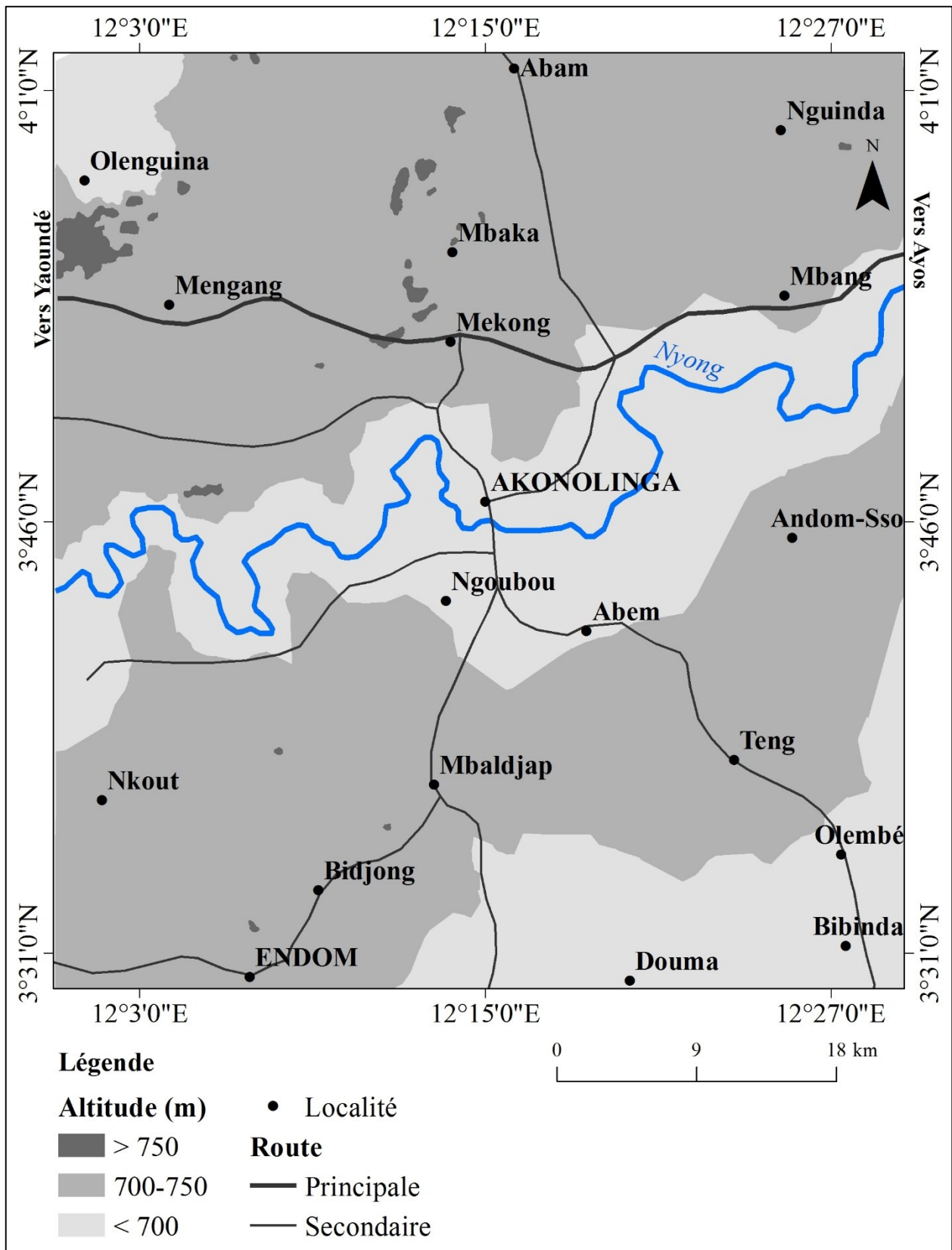


Figure 3. Carte géomorphologique de la zone d'Akonolinga (d'après la carte topographique de la zone d'Akonolinga, feuille NA-33-XIX au 1/50 000, INC - Cameroun)



*domesticus*) et d'animaux de la basse-cour. Les populations proches des rives du Nyong pratiquent principalement la pêche.

## **I.6. Géologie**

### **I.6.1. Socle**

Les roches identifiables dans la zone d'Akonolinga sont métamorphiques (Fig. 4). Il s'agit notamment des schistes, des micaschistes grénatifères migmatisés à deux micas, des gneiss migmatitiques et des gneiss à biotite, amphiboles et pyroxènes. Le substratum de la zone d'Akonolinga appartient à la série d'Ayos. Les formations de cette série sont datées du précambrien (Gazel et Guiraudie, 1965). Les affleurements sont constitués par des lits de calcschistes, de micaschistes à deux micas, de schistes à muscovite et de chloritoschistes alternant fréquemment avec des lits millimétriques voire des bancs de quartzites (Regnault, 1986 ; Bessoles et Trompette, 1980 ; Olinga, 2003 ; Olinga *et al.*, 2010). Deux principaux groupes lithologiques sont observables :

- les ensembles migmatitiques comportant les gneiss à grenat et disthène et, les micaschistes à grenat et deux micas ;
- les ensembles schisto-quartziques renfermant des chloritoschistes à reliques de grenat, biotite et, des quartzites à muscovite et chlorite.

### **I.6.2. Sols**

Les études réalisées en zone de Plateau sud camerounais permettent de dénombrer deux types de sols dans la zone d'étude (Vallerie, 1995 ; Santoir et Villiers, 1995). Il s'agit des sols ferrallitiques et des sols hydromorphes. Les sols ferrallitiques rencontrés sont désaturés et fortement désaturés typiques rouges. Les sols fortement désaturés en bases sont rencontrés sur les pénéplaines tandis que les sols faiblement désaturés en bases apparaissent dans les bas-fonds marécageux (Ekodeck, 1984). Ces deux groupes sont séparés par des sols de transition moyennement désaturés en bases. Les sols rencontrés dans la zone d'étude sont de type ferrallitique. Ce sont les plus abondants. Ils représentent 80 % des sols de la surface de la zone forestière humide. Ils se développent sur roches mères diverses et sont constitués essentiellement de l'assemblage minéralogique kaolinite, hématite, goethite et gibbsite. Ces sols ferrallitiques sont de deux types, les sols ferrallitiques jaunes et les sols ferrallitiques rouges. Les sols ferrallitiques jaunes sont issus de l'altération des roches métamorphiques leucocrates et les sols ferrallitiques rouges, de celle des roches métamorphiques mélanocrates.

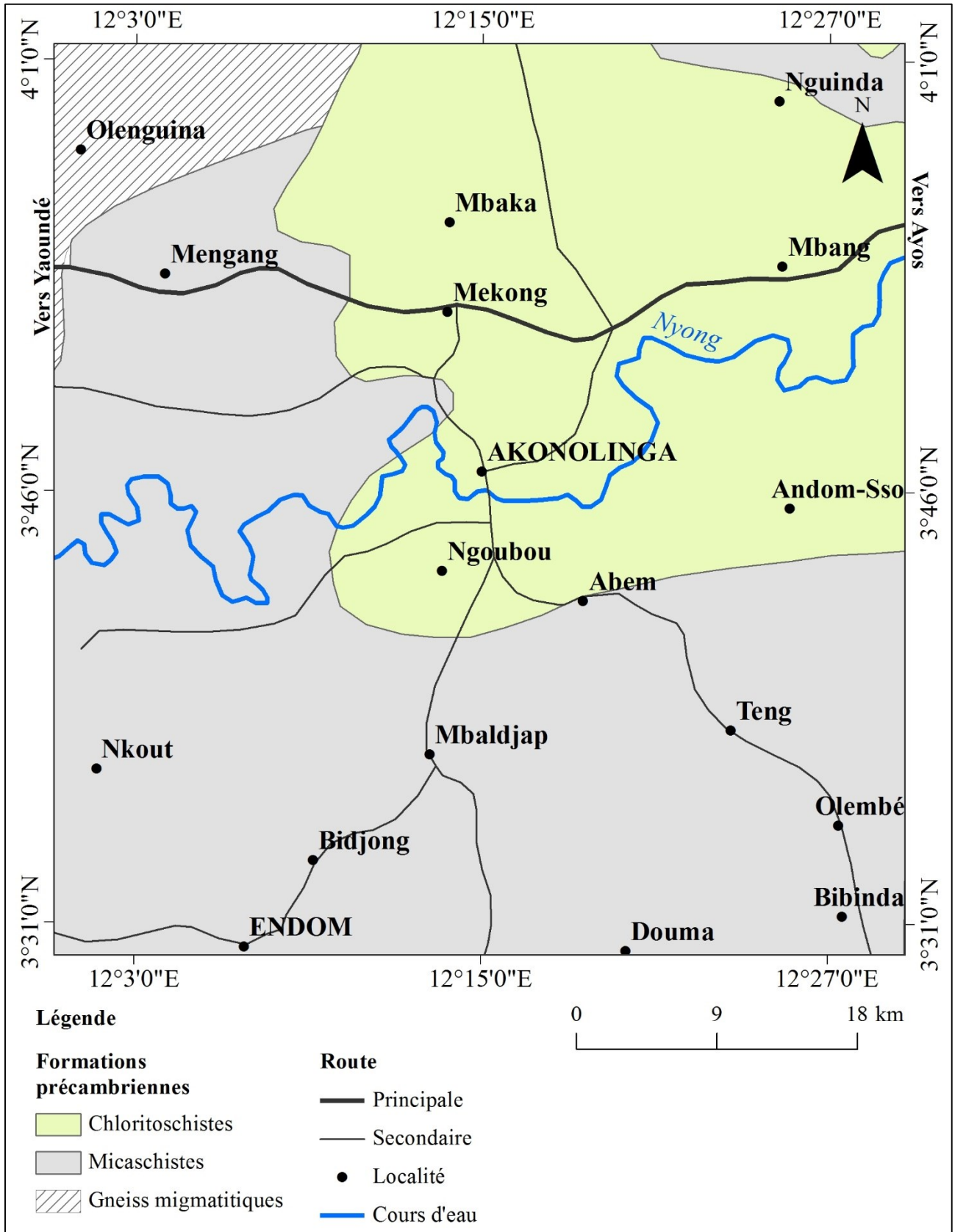


Figure 4. Carte géologique de la zone d'Akonolinga (d'après la carte géologique de reconnaissance du Cameroun au 1 /500 000, feuille d'Abong-Mbang Ouest (Gazel et Guiraudie, 1965, modifiée)

Les sols hydromorphes sont caractérisés par la présence temporaire ou permanente d'un excès d'eau dans une partie ou dans la totalité des horizons (Ekodeck, 1984). La texture de ces sols est le plus souvent sableuse, limono-argileuse, sablo-argileuse et sablo-argileuse. Elle devient argilo-sableuse en profondeur (Vallerie, 1995).

## **II. TRAVAUX ANTERIEURS COMPLEMENTAIRES**

### **II.1. Graveleux latéritiques**

#### **II.1.1. Définition et Généralités**

Du point de vue de l'ingénieur routier, les graveleux latéritiques se définissent comme étant des sols meubles formés en milieu tropical, composés d'une fraction granulaire constituée de pisolites ou de nodules ferrugineux emballés dans une matrice fine limono-argileuse (Autret, 1983 ; Bagarre, 1990). Du point de vue géotechnique, ce sont des sols meubles de granulométrie 0/20 ou 0/40 mm, comportant 10 % à 35 % de fines et un « squelette » (refus sur le tamis de 2 mm) de 20 % à 60 % (Bagarre, 1990).

Au Cameroun, les sols latéritiques couvrent environ 70 % de la superficie du pays (DEGN, 1987 ; Sikali et Djalal, 1987). Les propriétés de ces matériaux sont fonction de la roche, de la topographie, de la végétation, du climat et de la durée du phénomène de latéritisation. Ces matériaux se rencontrent essentiellement dans l'horizon B des coupes pédologiques, à mi-pente ou aux ruptures de pente des interfluves (DEGN, 1987 ; Sikali et Djalal, 1987 ; Bagarre, 1990). La formation de ces matériaux nécessite :

- un climat tropical contrasté avec alternance de saisons sèches et humides ;
- un plateau ou une surface topographique faiblement inclinée, non soumise à une érosion mécanique importante ;
- une composition minéralogique et géochimique de la roche parentale, pouvant fournir les constituants latéritiques (fer et alumine) ;
- une texture poreuse permettant l'entrée des eaux de percolation, de telle sorte que les conditions de l'action des agents chimiques soient les meilleures ;
- un bon drainage favorisant le lessivage chimique.

#### **II.1.2. Caractéristiques minéralogiques, géochimiques et microstructurales**

Les graveleux latéritiques développés sur roches cristallophylliennes ont été l'objet de plusieurs travaux permettant de comprendre leur processus de formation (Ekodeck, 1984 ; Bitom, 1988 ; Onana, 2010). Plusieurs travaux permettent non seulement d'obtenir leurs caractéristiques minéralogiques et géochimiques, mais également de corrélérer ces

caractéristiques aux paramètres géotechniques. Ces travaux ont été réalisés sur gneiss (Ekodeck, 1984), sur amphibolites (Ekodeck, 1984 ; Bayiga *et al.*, 2011), sur migmatites (Ekodeck, 1984 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2012), sur quartzites micacés, sur chloritoschistes (Ekodeck, 1984 ; Onana, 2010 ; Ntoulala, 2014) et sur micaschistes (Kamtchueng *et al.*, 2015). Les graveleux latéritiques développés sur migmatites sont constitués de quartz, kaolinite, goethite, gibbsite et illite (Ekodeck, 1984, Onana *et al.*, 2015). Les graveleux latéritiques développés sur roches métamorphiques présentent un cortège minéralogique constitué majoritairement de quartz, kaolinite, goethite et hématite. La gibbsite et l'illite sont présentes en proportions modérées. La muscovite est présente dans les matériaux développés sur quartzites micacés, sur chloritoschistes (Onana, 2010) et sur micaschistes (Kamtchueng *et al.*, 2015). La goethite et l'hématite sont présentes en quantités modérées. Les proportions de quartz et surtout de kaolinite sont majoritaires. Les graveleux latéritiques sur gneiss présentent les teneurs en kaolinite les plus élevées, tandis que ceux développés sur quartzites micacés ont les teneurs en quartz les plus élevées et, les teneurs en kaolinite les plus faibles. Les cortèges minéralogiques montrent que les graveleux latéritiques développés sur roches plutoniques dans le Sud Cameroun sont majoritairement composés de quartz, kaolinite, hématite et gibbsite (Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017). A ces minéraux, s'ajoutent la goethite et l'ilménite.

Les graveleux latéritiques sont généralement caractérisés par une forte teneur en oxydes et hydroxydes de fer et/ou d'alumine qui peut atteindre 80 % dans le matériau du fait de la ferrallitisation (Ekodeck, 1984 ; Bagarre, 1990). Le fer se présente sous forme de goethite  $\alpha$  ( $\text{Fe}_2\text{O}(\text{OH})$ ) ou d'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) et, l'alumine est contenue dans la gibbsite  $\gamma$  ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), la boehmite ou le diaspre ( $\text{AlO}(\text{OH})$ ). En général,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sont les oxydes majoritaires dans ces matériaux. Ces trois oxydes représentent 76,00 % à 92,40% du poids des oxydes. Les valeurs de perte au feu varient entre 15,00 % dans les graveleux latéritiques développés sur migmatites (Nzabakurikiza *et al.*, 2012) et 6,00 % dans ceux développés sur chloritoschistes (Onana, 2010). Les graveleux latéritiques développés sur migmatites à l'Est Cameroun présentent des teneurs élevées en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (31,56 – 44,18 %) et, modérées en  $\text{SiO}_2$  (16,54 – 26,44 %) et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (17,12 – 23,22 %) (Nzabakurikiza *et al.*, 2012). Les autres oxydes sont présents en très faibles quantités ou en traces. Les matériaux développés sur chloritoschistes à Ayos (Ntoulala, 2014), Akonolinga, à Mbalmayo (Onana, 2010) et, sur quartzites micacés à Sa'a présentent les teneurs en  $\text{SiO}_2$  les plus élevées, variant entre 52,33 et 70,99 %. Les teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sont plus élevées sur les graveleux latéritiques sur migmatites de l'Est Cameroun (21,50 – 27,26 %) (Nzabakurikiza *et al.*, 2012), sur

chloritoschistes à Akonolinga (28,35 %) et sur amphibolites à Eséka (24,09 %) (Bayiga *et al.*, 2011). Les teneurs en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> des graveleux latéritiques sur roches métamorphiques sont comprises entre 15,29 et 43,24 %. Les concentrations les plus élevées se rencontrent dans les graveleux latéritiques dérivés des migmatites de l'Est (Nzabakurikiza *et al.*, 2017). La valeur de perte au feu dans ces matériaux est toujours supérieure à 8 %. Les autres oxydes sont présents, en faibles quantités ou à l'état de traces. De façon générale, ces matériaux sont silico - ferrugino - alumineux. L'évolution géochimique globale de ces matériaux montre que le processus hydrolytique dominant qui prévaut en leur sein est la monosiallisation.

La microstructure des graveleux latéritiques compactés montre généralement une large phase granulaire emballée dans une matrice argileuse (Nzabakurikiza *et al.*, 2017). La phase granulaire est constituée de nodules ferrugineux et des fragments de quartz (Bagarre, 1990).

### **II.1.3. Paramètres géotechniques**

#### **II.1.3.1. Paramètres physiques**

##### **II.1.3.1.1. Poids volumique des grains solides**

Les graveleux latéritiques présentent les valeurs de poids volumique des grains solides les plus élevées. La variation des valeurs de ce paramètre est fonction de la roche parentale (Tab. 2). Les graveleux latéritiques développés sur roches métamorphiques présentent des valeurs de poids volumique des grains solides qui varient entre 2,44 et 2,90 gf/cm<sup>3</sup> pour les graveleux latéritiques sur gneiss. Les valeurs de ce paramètre varient entre 2,69 – 3,05 gf/cm<sup>3</sup> pour les matériaux sur micaschistes (Kamtchueng *et al.*, 2015). Les moyennes respectives de ce paramètre sont de 2,77 gf/cm<sup>3</sup> et 2,83 gf/cm<sup>3</sup>.

Les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes possèdent des valeurs de poids volumique des grains solides comprises entre 2,69 et 2,92 gf/cm<sup>3</sup>, soit une valeur moyenne de 2,82 gf/cm<sup>3</sup> (Onana, 2010). Les graveleux latéritiques développés sur quartzites micacés présentent une valeur moyenne de poids volumique des grains solides de 2,84 gf/cm<sup>3</sup>. Les graveleux latéritiques dérivés des roches plutoniques présentent des valeurs de poids volumique des grains solides variant entre 2,69 et 2,99 gf/cm<sup>3</sup>, soit une valeur moyenne de 2,84 gf/cm<sup>3</sup> (Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017).

Dans le Plateau sud camerounais, les valeurs de poids volumique des grains solides des graveleux latéritiques sont comprises entre 2,44 et 3,05 gf/cm<sup>3</sup>, soit une valeur moyenne de 2,82 gf/cm<sup>3</sup> (Tab. 2).

Tableau 2. Données récapitulatives des valeurs de poids volumique des grains solides des graveleux latéritiques par type de roche en zone de Plateau sud camerounais

Substratum	Paramètres statistiques	Poids volumique des grains solides (gf/cm <sup>3</sup> )
Gneiss	N	<b>19</b>
	<b>Moy.</b>	<b>2,77</b>
	Min.	2,44
	Max.	2,90
Micaschistes	N	<b>42</b>
	<b>Moy.</b>	<b>2,83</b>
	Min.	2,69
	Max.	3,05
Chloritoschistes	N	<b>32</b>
	<b>Moy.</b>	<b>2,82</b>
	Min.	2,69
	Max.	2,92
Quartzites	N	3
	<b>Moy.</b>	<b>2,83</b>
	Min.	2,72
	Max.	2,94
Granites et gabbro doléritiques	N	<b>27</b>
	<b>Moy.</b>	<b>2,84</b>
	Min.	2,69
	Max.	2,99

*N : nombre d'échantillons ; Min. : valeur minimale ; Moy. : valeur moyenne ; Max. : valeur maximale*

### **II.1.3.1.2. Paramètres granulométriques**

Les paramètres granulométriques varient parfois en fonction des zones d'étude. Cependant, dans le Plateau sud camerounais, la majorité des études réalisées sur les graveleux latéritiques issus de roches mères diverses montrent que leurs textures sont graveleuses, gravelo-sableuses ou gravelo-argileuses (Ekodeck, 1984). Les paramètres granulométriques des graveleux latéritiques les plus utilisés en géotechnique routière sont les fines, le mortier et le squelette (Bagarre, 1990 ; Ndzié Mvindi *et al.*, 2017 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017). Dans les graveleux latéritiques développés sur gneiss, les valeurs de teneur en fines varient entre 18,90 et 35,00 %, soit une valeur moyenne de 26,50 % (Ndzié Mvindi *et al.*, 2017). Les valeurs de teneur en mortier des matériaux développés sur gneiss sont comprises entre 22,10 et 46,94 % (Tab. 3). La valeur moyenne de ce paramètre est de 32,77 %. La valeur moyenne de teneur en squelette des matériaux sur gneiss est de 44,69 %. Les valeurs de ce paramètre varient entre 27,50 et 68,70 % (Ndzié Mvindi *et al.*, 2017). Pour les graveleux latéritiques sur micaschistes, les valeurs de teneur en fines oscillent entre 15,50 et 28,30 %, pour une teneur moyenne de 20,45 % (Kamtchueng *et al.*, 2015). Les teneurs en mortier des graveleux latéritiques sur micaschistes sont comprises entre 15,80 et 43,01 %, soit une valeur moyenne de 28,16 % (Tab. 3). Les valeurs de teneur en squelette des graveleux latéritiques sur micaschistes varient entre 19,40 et 60,80 %, pour une valeur moyenne de 36,67 %.

Les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes présentent une valeur moyenne de teneur en fines de 24,26 %, pour des valeurs comprises entre 13,20 et 33,40 %. Les valeurs des teneurs en mortier varient entre 16,14 et 51,70 %, pour une valeur moyenne de 32,93 %. La teneur en squelette moyenne des graveleux latéritiques sur chloritoschistes est de 47,35 % (Tab. 3). Les valeurs de ce paramètre varient entre 27,40 et 71,00 %. Les graveleux latéritiques développés sur granites présentent des valeurs de teneur en fines oscillant entre 13,60 et 44,10 %, pour une valeur moyenne de 25,73 % (Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017). Celles en mortier sont comprises entre 14,30 et 50,67 %, pour une valeur moyenne de 29,24 % (Tab. 3).

Les valeurs de teneur en squelette des graveleux latéritiques sur granites varient entre 15,10 et 59,80 %, soit une valeur moyenne de 34,05 % (Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017).

### **II.1.3.1.3. Paramètres de plasticité : limites d'Atterberg et indice de plasticité**

Les valeurs des paramètres de plasticité sont présentées dans le tableau 4. Pour les graveleux latéritiques développés sur roches métamorphiques, les valeurs de limite de

Tableau 3. Données récapitulatives des données granulométriques des graveleux latéritiques par type de roche

Substratum	Paramètres statistiques	Squelette ( $\Phi$ <2 mm), %	Mortier ( $\Phi$ < 0,425 mm), %	Fines ( $\Phi$ <80 $\mu$ m), %	Argiles ( $\Phi$ <2 $\mu$ m), %
Gneiss	N	19	19	19	19
	<b>Moy.</b>	<b>44,69</b>	<b>32,77</b>	<b>26,50</b>	<b>22,28</b>
	Min.	27,50	22,10	18,90	11,00
	Max.	68,70	46,94	35,00	31,70
Micaschistes	N	42	42	22	22
	<b>Moy.</b>	<b>36,67</b>	<b>28,16</b>	<b>20,45</b>	<b>16,35</b>
	Min.	19,40	15,80	15,50	12,10
	Max.	60,80	43,01	28,30	22,20
Chloritoschistes	N	24	24	24	24
	<b>Moy.</b>	<b>47,35</b>	<b>32,93</b>	<b>24,26</b>	<b>15,77</b>
	Min.	27,40	16,14	13,20	10,20
	Max.	71,00	51,70	33,40	26,30
Granites et gabbro doléritiques	N	24	24	24	24
	<b>Moy.</b>	<b>34,05</b>	<b>29,24</b>	<b>25,73</b>	<b>13,71</b>
	Min.	15,10	14,30	13,60	7,00
	Max.	59,80	50,67	44,10	34,70

*N : nombre d'échantillons ; Min. : valeur minimale ; Moy. : valeur moyenne ; Max. : valeur maximale*



Tableau 4. Données récapitulatives des données des paramètres des limites d'Atterberg des graveleux latéritiques par type de roche

Substratum	Paramètres statistiques	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Gneiss	N	19	19	19
	<b>Moy.</b>	<b>69</b>	<b>40</b>	<b>29</b>
	Min.	46	24	20
	Max.	86	51	39
Micaschistes	N	41	41	41
	<b>Moy.</b>	<b>54</b>	<b>32</b>	<b>22</b>
	Min.	45	23	11
	Max.	71	39	37
Chloritochistes	N	26	25	25
	<b>Moy.</b>	<b>62</b>	<b>35</b>	<b>28</b>
	Min.	40	29	11
	Max.	72	52	39
Quartzites	N	3	3	3
	<b>Moy.</b>	<b>65</b>	<b>33</b>	<b>32</b>
	Min.	63	32	31
	Max.	68	36	32
Granites et gabbro doléritiques	N	60	60	60
	<b>Moy.</b>	<b>67</b>	<b>37</b>	<b>30</b>
	Min.	44	26	14
	Max.	95	62	55

*N* : nombre d'échantillons ; *Min.* : valeur minimale ; *Moy.* : valeur moyenne ; *Max.* : valeur maximale ; *LL* : limite de liquidité ; *LP* : limite de plasticité ; *IP* : indice de plasticité

liquidité (LL) varient entre 46 et 86 % pour les matériaux sur gneiss, entre 45 et 71 % pour les matériaux sur micaschistes (Kamtchueng *et al.*, 2015). Les moyennes respectives de ce paramètre sont de 69 % et 54 %. Pour les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes, les valeurs de LL sont comprises entre 40 et 72 % pour une valeur moyenne de 62 % (Ekodeck, 1984). Pour les graveleux latéritiques développés sur quartzites micacés, les valeurs de ce paramètre varient entre 63 – 68 % pour une valeur moyenne de 65 %. Sur roches plutoniques, les graveleux latéritiques présentent des valeurs de limite de liquidité comprises entre 44 et 95 % pour une valeur moyenne de 67 % (Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017 ; Katte *et al.*, 2018). Les valeurs les plus élevées ont été obtenues sur des matériaux développés sur granites dans la région de Djoum au Sud Cameroun.

Les graveleux latéritiques développés sur roches métamorphiques présentent des valeurs de limite de plasticité (LP) variant d'un substratum à un autre. Les valeurs de ce paramètre varient entre 24 et 51 % pour les graveleux latéritiques sur gneiss et entre 23 et 39 % pour les matériaux sur micaschistes. Les moyennes respectives de ce paramètre sont de 40 % et 32 %. Pour les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes, les valeurs de LP sont comprises entre 29 et 52 % pour une valeur moyenne de 35 %. Pour les graveleux latéritiques sur quartzites micacés, les valeurs de LP varient entre 32 et 36 % pour une valeur moyenne de 33 %. Les graveleux latéritiques développés sur roches plutoniques présentent des valeurs de limite de plasticité variant entre 26 et 62 % pour une valeur moyenne de 37 % (Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017 ; Katte *et al.*, 2018). Dans le Plateau sud camerounais, les valeurs de ce paramètre sont comprises entre 23 et 51 % pour une moyenne de 34 %.

L'indice de plasticité (IP) présente le même comportement que les limites de liquidité et de plasticité. Pour les matériaux développés sur roches métamorphiques, les valeurs de IP varient entre 20 % et 39% pour les graveleux latéritiques sur gneiss et entre 11 % et 37 % pour les matériaux sur micaschistes. Les moyennes respectives de ce paramètre sont de 29 % et 22 % (Tab. 4). Pour les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes, les valeurs de IP sont comprises entre 11 % et 39 % pour une valeur moyenne de 28 %. Les graveleux latéritiques développés sur quartzites micacés présentent une valeur moyenne de IP de 32 %. Sur roches plutoniques, les valeurs d'indice de plasticité des graveleux latéritiques varient entre 14 % et 55 % pour une valeur moyenne de 30 % (Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017 ; Katte *et al.*, 2018). Dans le Plateau sud camerounais, les valeurs de cet indice sont comprises entre 11 % et 55 % pour une moyenne de 30 %.

Des corrélations existent entre LL et IP, pour les matériaux latéritiques développés sur roches métamorphiques diverses du Sud Cameroun (Ekodeck, 1984 ; Hieng, 2003). Dans le niveau gravillonnaire, IP est lié à LL, par la relation suivante :

$$IP = 0,61LL - 8,80 ; N = 15 ; r = 0,90 \quad (1)$$

#### **II.1.3.1.4. Valeurs de bleu de méthylène**

Les travaux effectués dans le Plateau sud camerounais montrent que les graveleux latéritiques développés sur gneiss présentent des valeurs au bleu de méthylène (VBS) inférieures à 2,00 g/100g, soit 1,80 g/100g dans la zone de Matomb et 1,30 g/100g à l'Est Cameroun (Onana *et al.*, 2015). Les graveleux latéritiques sur chloritoschistes dans la zone de Bengbis présentent des valeurs de VBS variant entre 2,60 et 5,70 g/100g pour une moyenne 4,37 g/100g. Dans la zone d'Ayos, les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes présentent des valeurs de VBS comprises entre 0,77 et 0,82 g/100g. Les graveleux latéritiques développés sur micaschistes dans la zone d'Akonolinga présentent des valeurs de VBS variant entre 0,55 – 4,50 g/100g pour une valeur moyenne de 3,23 g/100g.

Les graveleux latéritiques développés sur granites au Sud Cameroun présentent des valeurs de VBS comprises entre 3,75 et 8,50 g/100g pour une valeur moyenne de 6,05 g/100g (Onana *et al.*, 2017). Dans la zone de l'Est Cameroun, sur granites, ces matériaux présentent des valeurs de VBS très faibles variant entre 0,11 et 0,14 g/100g (Nzabakurikiza *et al.*, 2017), pour une moyenne de 0,12 g/100g. Ces valeurs indiquent que la matrice de ces matériaux est limono-argileuse à très argileuse.

#### **II.1.3.1.5. Paramètres dérivés**

Les paramètres dérivés servent à quantifier l'influence de la plasticité des fines sur la performance générale du matériau, qui dépend de la proportion et de la nature de celles-ci (Charman, 1988 ; Bello et Osinubi, 2010). Les paramètres dérivés habituellement déterminés dans ces matériaux sont le module de classement (Gm), l'activité des colloïdes de Skempton (Ac), le module de plasticité (Pm), le produit de plasticité (Pp) et le potentiel de gonflement ( $\epsilon_s$ ) (Nwaiwu *et al.*, 2006 ; Ndzié Mvindi *et al.*, 2017 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017). Les valeurs de ces paramètres sont fonction de la roche parentale (Tab. 5). Pour les graveleux latéritiques développés sur gneiss, les valeurs de Gm varient entre 1,56 – 2,32 pour une valeur moyenne de 1,97 (Ndzié Mvindi *et al.*, 2017). L'activité des colloïdes de Skempton (Ac) des matériaux développés sur gneiss présente des valeurs comprises entre 0,70 et 1,88. La valeur moyenne de ce paramètre est de 1,24. La valeur moyenne du module de

Tableau 5. Données récapitulatives des paramètres dérivés des graveleux latéritiques par type de roche

Substratum	Paramètres statistiques	Gm	Pm	Pp	Ac	Es
Gneiss	N	31	31	31	31	31
	<b>Moy.</b>	<b>1,97</b>	<b>834</b>	<b>667</b>	<b>1,24</b>	<b>0,015</b>
	Min.	1,56	448	374	0,70	0,008
	Max.	2,32	1690	1261	1,88	0,034
	N	22	22	22	22	22
Micaschistes	<b>Moy.</b>	<b>2,17</b>	<b>450</b>	<b>336</b>	<b>0,88</b>	<b>0,005</b>
	Min.	1,77	264	202	0,54	0,002
	Max.	2,49	599	506	1,20	0,020
	N	14	14	14	14	14
Chloritoschistes	<b>Moy.</b>	<b>2,33</b>	<b>1151</b>	<b>706</b>	<b>1,23</b>	<b>0,014</b>
	Min.	2,26	387	214	0,92	0,002
	Max.	2,40	2016	1213	1,53	0,030
	N	20	20	20	20	20
Granites et gabbro doléritiques	<b>Moy.</b>	<b>2,11</b>	<b>972</b>	<b>854</b>	<b>2,89</b>	<b>0,021</b>
	Min.	1,46	458	396	1,13	0,004
	Max.	2,57	2226	1940	3,94	0,048

*N* : nombre d'échantillons ; *Min.* : valeur minimale ; *Moy.* : valeur moyenne ; *Max.* : valeur maximale ; *Gm* : module de classement ; *Ac* : activité des colloïdes de Skempton ; *Pm* : module de plasticité ; *Pp* : produit de plasticité ;  $\epsilon_s$  : potentiel degonflement

plasticité ( $P_m$ ) des matériaux sur gneiss est de 834. Les valeurs de ce paramètre varient entre 448 et 1690. Les valeurs du produit de plasticité ( $P_p$ ) varient entre 374 – 1261 pour une valeur moyenne de 667 (Ndzié Mvindi *et al.*, 2017). Les valeurs du potentiel de gonflement ( $\epsilon_s$ ) des graveleux latéritiques sur gneiss sont faibles et varient entre 0,008 et 0,034. Pour les graveleux latéritiques sur micaschistes, les valeurs de  $G_m$  oscillent entre 1,77 et 2,49 pour une valeur moyenne de 2,17. L'activité des colloïdes de Skempton des matériaux sur micaschistes présente des valeurs comprises entre 0,54 et 1,20 pour une valeur moyenne de 0,88. La valeur moyenne du module de plasticité ( $P_m$ ) des matériaux sur micaschistes est de 450. Les valeurs de ce paramètre varient entre 264 et 599. Les valeurs du produit de plasticité ( $P_p$ ) des graveleux latéritiques sur micaschistes varient entre 202 et 506 pour une valeur moyenne de 336. Les valeurs du potentiel de gonflement ( $\epsilon_s$ ) restent faibles et varient entre 0,002 et 0,020. Les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes présentent une valeur moyenne de  $G_m$  de 2,33 pour des valeurs comprises entre 2,26 et 2,40. Les valeurs de l'activité des colloïdes de Skempton varient entre 0,92 et 1,53 pour une valeur moyenne de 1,23.

Le module de plasticité ( $P_m$ ) des matériaux sur chloritoschistes présente une valeur moyenne de 1151. Les valeurs de ce paramètre varient entre 387 et 2016. Les valeurs du produit de plasticité ( $P_p$ ) des graveleux latéritiques sur chloritoschistes varient entre 214 et 1213 pour une valeur moyenne de 706. Les valeurs du potentiel de gonflement ( $\epsilon_s$ ) sont faibles et varient entre 0,002 et 0,030. Les graveleux latéritiques développés sur granites présentent des valeurs de  $G_m$  variant entre 1,46 et 2,57 pour une valeur moyenne de 2,11 (Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017). L'activité des colloïdes de Skempton ( $A_c$ ) présente des valeurs comprises entre 1,13 et 3,94. La valeur moyenne de ce paramètre est de 2,89. La valeur moyenne du module de plasticité ( $P_m$ ) des matériaux sur granites est de 972. Les valeurs de ce paramètre varient entre 458 et 2226. Les valeurs du produit de plasticité ( $P_p$ ) varient entre 396 et 1940 pour une valeur moyenne de 854. Les valeurs du potentiel de gonflement ( $\epsilon_s$ ) des graveleux latéritiques développés sur granites sont faibles et varient entre 0,004 et 0,048 (Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017).

## **II.1.3.2. Caractéristiques de compactage**

### **II.1.3.2.1. Caractéristiques Proctor**

L'essai Proctor modifié est destiné aux sols graveleux et aux couches de chaussées (CEBTP, 1984). Les paramètres Proctor à l'énergie modifiée des graveleux latéritiques du Plateau Sud camerounais varient en fonction de la roche parentale (Tab. 6). Pour les graveleux latéritiques développés sur roches métamorphiques, les matériaux sur gneiss

Tableau 6. Données récapitulatives des données de compactage des graveleux latéritiques par type de roche

Type de roche	Paramètres statistiques	TE – OPM (%)	DSM	CBR (%)
Gneiss	N	<b>19</b>	<b>19</b>	<b>19</b>
	<b>Moy.</b>	<b>13,83</b>	<b>2,00</b>	<b>47</b>
	Min.	9,50	1,75	26
	Max.	24,00	2,30	88
Micaschistes	N	<b>34</b>	<b>34</b>	<b>34</b>
	<b>Moy.</b>	<b>11,30</b>	<b>2,11</b>	<b>51</b>
	Min.	8,00	1,91	21
	Max.	15,50	2,27	84
Chloritoschistes	N	<b>26</b>	<b>26</b>	<b>26</b>
	<b>Moy.</b>	<b>11,93</b>	<b>2,08</b>	<b>47</b>
	Min.	7,20	1,84	23
	Max.	18,00	2,34	88
Quartzites	N	3	3	3
	<b>Moy.</b>	<b>16,20</b>	<b>1,91</b>	<b>49</b>
	Min.	11,00	1,67	33
	Max.	25,30	2,10	62
Granites et gabbro doléritiques	N	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>
	<b>Moy.</b>	<b>12,04</b>	<b>2,09</b>	<b>43</b>
	Min.	8,60	1,91	14
	Max.	16,50	2,33	78

*N* : nombre d'échantillons ; *Min.* : valeur minimale ; *Moy.* : valeur moyenne ; *Max.* : valeur maximale ;  
*TE – OPM* : teneur en eau à l'optimum Proctor modifié ; *DSM* : densité sèche maximale ; *CBR* :  
*California bearing ratio*

présentent des valeurs de densité sèche maximale (DSM) variant entre 1,75 et 2,30 pour une valeur moyenne de 2,00. Les graveleux latéritiques développés sur micaschistes présentent des valeurs de DSM comprises entre 1,91 et 2,27 pour une valeur moyenne de 2,11 (Kamtchueng *et al.*, 2015). Pour les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes, les valeurs de DSM sont comprises entre 1,84 et 2,34, soit une valeur moyenne de 2,08 (Ekodeck, 1984 ; Onana, 2010). Pour les graveleux latéritiques développés sur quartzites micacés, les valeurs de ce paramètre varient 1,67 et 2,10 soit une valeur moyenne de 1,91. Sur roches plutoniques, les graveleux latéritiques présentent des valeurs de DSM variant entre 1,91 et 2,33, soit une valeur moyenne de 2,09 (Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017 ; Katte *et al.*, 2018). De l'ensemble des résultats obtenus, il apparaît que les valeurs de DSM des graveleux latéritiques en zone de Plateau sud camerounais sont comprises entre 1,67 et 2,34.

Dans les graveleux latéritiques développés sur roches métamorphiques, les valeurs de teneur en eau à l'optimum Proctor modifié (TE – OPM) des matériaux sur gneiss varient entre 9,50 % et 24,00 % soit une valeur moyenne de 13,83 % (Ndzié Mvindi *et al.*, 2017). Dans les graveleux latéritiques développés sur micaschistes, les valeurs de TE – OPM varient entre 8,00 % et 15,50 % pour une valeur moyenne de 11,30 % (Kamtchueng *et al.*, 2015). Les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes possèdent des valeurs de TE – OPM comprises entre 7,20 % et 18,00 %, soit une valeur moyenne de 11,93 % (Ekodeck, 1984 ; Onana, 2010). Dans les graveleux latéritiques développés sur quartzites micacés les valeurs de ce paramètre varient 11,00 % et 25,30 %, soit une valeur moyenne de 16,20 %.

Les graveleux latéritiques développés sur roches plutoniques présentent des valeurs de TE – OPM variant entre 8,60 % et 16,50 %. La valeur moyenne de ce paramètre est de 12,04 % (Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017 ; Katte *et al.*, 2018). Les valeurs de TE – OPM en zone de Plateau sud camerounais varient entre 7,20 % et 25,30 %. Les valeurs moyennes de ces paramètres dans le domaine du sud Cameroun sont de 2,09 pour DSM et de 12,24 % pour TE – OPM.

#### **II.1.3.2.2. Californian bearing ratio**

Les résultats de l'essai CBR à 95 % OPM présentent les mêmes tendances que ceux de l'essai Proctor modifié (Tab. 6).

Pour les graveleux latéritiques développés sur roches métamorphiques, les valeurs de la portance CBR des matériaux sur gneiss varient entre 26 % et 88 % pour une valeur moyenne de 47 % (Ndzié Mvindi *et al.*, 2017). Sur micaschistes, les graveleux latéritiques présentent des valeurs CBR variant entre 21 % et 84 % (Tab. 6) pour une valeur moyenne de

51 % (Kamtchueng *et al.*, 2015). Pour les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes, les valeurs de la portance CBR sont comprises entre 23 et 88% pour une valeur moyenne de 47 % (Ekodeck, 1984 ; Onana, 2010 ; Ngo'o Ze *et al.*, 2019). Pour les graveleux latéritiques développés sur quartzites micacés, les valeurs de ce paramètre varient 33 % et 62 % pour une valeur moyenne de 49 %.

Les valeurs CBR des graveleux latéritiques sur roches plutoniques varient entre 14 % et 78 % pour une valeur moyenne de 43% (Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017 ; Katte *et al.*, 2018).

Dans les sols ferrallitiques, les graveleux latéritiques présentent les valeurs de CBR les plus élevées, comprises entre 21 % et 88 %, soit 47 % en moyenne. Ces matériaux sont naturellement les mieux adaptés aux travaux du génie civil.

### **II.1.3.3. Caractéristiques mécaniques**

#### **II.1.3.3.1. Résistance à la compression simple**

Les graveleux latéritiques du Cameroun présentent des valeurs de résistance à la compression ( $R_c$ ) inférieures à 0,60 MPa à 94 % OPM (Bagarre, 1990). Les graveleux latéritiques en zone de Plateau Sud camerounais possèdent des valeurs de  $R_c$  comprises entre 0,14 et 0,204 MPa, soit une moyenne de 0,94 MPa (Ekodeck, 1984 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017).

#### **II.1.3.3.2. Résistance à la traction indirecte**

Les graveleux latéritiques du Cameroun présentent une résistance à la traction indirecte ( $R_{ti}$ ) inférieure à 0,20 MPa à 94 % OPM (Bagarre, 1990). Dans le Plateau Sud camerounais, les valeurs de ce paramètre sont comprises entre 0,05 et 0,17 MPa, soit une moyenne de 0,10 MPa (Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017).

### **II.1.4. Utilisation des graveleux latéritiques en construction routière**

#### **II.1.4.1. Classification des graveleux latéritiques**

La classification géotechnique des graveleux latéritiques vise à aboutir à leur différenciation en vue de leur utilisation en technique routière. On distingue plusieurs types de classifications (Bagarre, 1990).

Selon 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 appartiennent aux classes A-2-4 à A2-7, tandis



que les sols les plus argileux (passant à 0,080 mm >35 %) sont de classes A-7-5 et A7-6. Il existe des sols de classes A5 et A6. Cette classification est fondée sur la granularité et sur les valeurs des limites de liquidité et de plasticité des sols fins (Peltier, 1959 in CEBTP, 1984). La classification, surtout celle des sols silteux et des sols argileux n'est complète que si on ajoute au numéro du groupe de sol un indice de groupe (I<sub>g</sub>). Cet indice, placé entre parenthèses à la suite du numéro du groupe fournit des précisions supplémentaires sur la performance du sol comme matériau d'infrastructure routière. Il se calcule comme suit :

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

avec :

F = nombre entier exprimant le pourcentage passant le tamis de 80 μm ;

LL = limite de liquidité, % ;

IP = indice de plasticité, %.

Pour les sols classés A-2-6 et A-2-7, seul le second terme de la formule est utilisé. La valeur de l'indice de groupe doit être arrondie à l'unité près. Si la valeur obtenue est négative, ou si l'on n'a pas pu déterminer la limite de liquidité, la valeur de l'indice est ramenée à zéro (0). Un indice de 0 équivaut à une bonne performance et un indice de 20 ou plus à une performance très mauvaise.

La classification du Centre d'Expertise du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP) et l'Institut des Sciences et Techniques de l'Équipement et de l'Environnement pour le Développement (ISTED) tient compte de bon nombre de paramètres tels que : le pourcentage des fines (f), l'indice de plasticité (IP), le produit f x IP, la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale de compactage (Tab. 7). Les graveleux GL1 sont de bons matériaux de couche de fondation et en couche de base après traitement car les CBR > 80 ne sont pas fréquents. Les graveleux GL2 sont des matériaux intermédiaires qui ne pourront que rarement être utilisés en couche de fondation tandis que GL3 sied bien aux remblais et couche de forme. Ces trois classes conviennent aux routes non revêtues.

#### **II.4.2. Spécification des graveleux latéritiques en construction routière**

Il existe de nombreuses normes d'utilisation des graveleux latéritiques en technique routière. Il s'agit généralement de règles empiriques valables aussi bien pour les routes revêtues que non revêtues (Meissa, 1993). Les graveleux latéritiques sont généralement utilisés à différents niveaux du corps d'une chaussée qu'elle soit revêtue ou non (Sikali et Djalal, 1987 ; Bagarre, 1990 ; Bohi, 2008). Ces matériaux sont utilisés en couche de fondation

pour tout type de trafic. Pour une utilisation en couche de fondation des chaussées de trafic T4 et T5, une amélioration mécanique ou chimique est nécessaire (DEGN, 1987 ; Sikali et Djalal, 1987). Pour une utilisation de ces matériaux en couche de base, une valeur de CBR supérieure à 80 % est exigée pour les trafics élevés, et une valeur de 60 % au moins pour les trafics T1 (CEBTP, 1984). Les caractéristiques recommandées pour le choix de ces matériaux sont présentées dans le tableau 7. L'indice CBR en est la caractéristique essentielle (DEGN, 1987). Ces matériaux lorsqu'ils ne présentent pas des caractéristiques suffisantes, peuvent subir des traitements par des produits tels que le ciment ou la chaux. Les caractéristiques du matériau susceptible d'être traité à la chaux sont présentées dans le tableau 8 (CEBTP, 1984). Pour une couche de fondation, le matériau traité à la chaux doit avoir une valeur CBR supérieure à 60 après sept jours de cure, 100 pour un traitement au ciment. Pour une utilisation en couche de base, la valeur du CBR après sept jours de cure doit être supérieure à 160 (CEBTP, 1984). La valeur de IP du matériau susceptible d'être traité doit être inférieure à 30 % et supérieure ou égale à 10 % pour un traitement à la chaux.

La méthode de traitement à la chaux est généralement utilisée dans le cas des trafics importants pour rigidifier la couche de fondation dans le cas où une couche de base en grave ciment ou en grave bitume est prévue; le but étant d'éviter un trop grand écart de module entre les deux couches (Bagarre, 1990). Le pourcentage pour une étude avec la chaux se situe entre 4 et 7 %. Des études effectuées au Kenya pour une couche de fondation ont été positives avec une teneur en chaux comprise entre 5 % et 6 %. Pour CEBTP (1984), un graveleux latéritique stabilisé au ciment, pour une utilisation en couche de base doit satisfaire aux exigences de résistances suivantes :

- la résistance à la compression simple ( $R_c$ ), après 7 jours de cure à l'air, doit être supérieure à 1,8 MPa et inférieure à 3,0 MPa. Dans les mêmes conditions, la résistance à la traction mesurée par compression diamétrale (essai brésilien) doit être supérieure à 0,3 MPa ;
- la résistance à la compression simple ( $R'_c$ ) sur éprouvette ayant subi 3 jours de cure à l'air et 4 jours d'immersion dans l'eau doit être supérieure à 0,5 MPa.

### **III. STABILISATION DES MATERIAUX ROUTIERS**

#### **III.1. Définition et but**

Stabiliser un sol consiste à améliorer ses caractéristiques géotechniques soit par adjonction dosée d'une fraction granulométrique d'un autre matériau, soit par adjonction d'un liant hydraulique ou hydrocarboné (Nabil et Sidi, 2004). D'une manière générale, stabiliser un

Tableau 7. Spécification des graveleux latéritiques en couche de base et couche de fondation  
(CEBTP, 1984)

Paramètres	Couche de base	Couche de fondation
Densité sèche maximale	2,00 min.	1,90 min.
LL, %	35 % max.	70 % max.
IP, %	25 % max.	35 % max.
Gonflement linéaire	< 1 %	1 % max.
Granulométrie		
40 mm	100	100
31,5 mm	85 – 100	—
20 mm	60 – 100	85 – 95
10 mm	35 – 90	65 – 80
5 mm	20 – 75	42 – 56
2 mm	12 – 50	30 – 44
1 mm	10 – 40	26 – 38
0,5 mm	7 – 35	25 – 35
0,08 mm	5 – 25	20 – 30
CBR après 4 jours d'imbibition pour 95 % OPM, %	80 Min. ou 60 pour T1	30 Min., 25 pour T1

*CBR* : Californian bearing ratio ; *IP* : indice de plasticité ; *LL* : limite de liquidité ; *Min.* : valeur minimale ;  
*Max.* : valeur maximale ; *OPM* : optimum proctor modifié

Tableau 8. Caractéristiques du matériau susceptible d'être traité à la chaux (CEBTP, 1984)

<b>Paramètres</b>	<b>Ordre de grandeur</b>
Dimension maximale des particules, mm	10 à 50
Mortier ( $\Phi < 425 \mu\text{m}$ ), %	> 15
Fines ( $\Phi < 80 \mu\text{m}$ ), %	< 35
Matière organique, %	< 1
Module de plasticité (Pm)	< 2000
CBR, %	$\approx 60$

*CBR : Californian bearing ratio*

matériau c'est lui donner des propriétés irréversibles face aux contraintes physiques. Stabiliser un matériau revient à le traiter afin d'augmenter sa résistance, réduire sa compressibilité, réduire ou augmenter sa perméabilité (Cabane, 2004). La stabilisation est une opération à moyen et à long terme consistant à augmenter très sensiblement les caractéristiques mécaniques d'un sol de manière à lui conférer durablement un état définitif de stabilité à l'eau et au gel (Anonyme, 2010). Elle se traduit par un durcissement graduel du mélange au cours des semaines et des mois qui suivent le compactage. En construction routière, l'ajout d'un agent de traitement permet d'assurer une traficabilité de la couche traitée, l'obtention des compacités visées, une portance élevée et une durabilité de cette portance dans le temps sous l'influence de l'eau et du gel. Le but recherché par la stabilisation d'un matériau est l'accroissement de ses performances mécaniques et de sa durabilité lorsqu'il sera soumis aux agressivités des facteurs naturels et des charges appliquées. La stabilisation permet non seulement de diversifier les possibilités d'utilisation des matériaux locaux disponibles mais également d'améliorer les performances routières de ces matériaux (Nabil et Sidi, 2004 ; Anonyme, 2010).

### **III.2. Techniques de stabilisation**

Il existe plusieurs techniques de stabilisation. La stabilisation peut être mécanique, physique ou chimique (Nabil et Sidi, 2004 ; Ndofor, 2006). Le choix de l'une de ces techniques dépend des considérations économiques, de la nature des sols à traiter, de la disponibilité des matériaux à utiliser et des conditions d'environnement.

#### **III.2.1. Stabilisation mécanique**

La stabilisation mécanique consiste au compactage du sol modifiant ainsi sa densité, sa résistance mécanique, sa compressibilité, sa perméabilité et sa porosité. Ce traitement mécanique s'accompagne d'une augmentation de la densité du sol due à l'élimination de l'air. Ici, c'est la structure du sol qui est modifiée. Cette méthode est la plus utilisée en construction routière. Elle nécessite une connaissance de la teneur en eau optimale pour une bonne compressibilité du sol.

#### **III.2.2. Stabilisation physique**

La stabilisation physique se fait par modification des propriétés du sol en intervenant sur sa texture par :

- un mélange contrôlé de la fraction des grains différents ;
- un traitement thermique par déshydratation ou gel ;

- un traitement électrique par électro-osmose qui, favorise le drainage du matériau en lui conférant de nouvelles qualités structurales ;
- introduction des fibres végétales, animales, minérales ou synthétiques dans le sol.

Lorsque le sol n'est pas compatible avec cette technique, on fait recours à la stabilisation chimique.

### **III.2.3. Stabilisation chimique**

La stabilisation chimique est une technique consistant à ajouter dans le sol, d'autres matériaux ou produits chimiques qui modifient ses propriétés (Cabane, 2004 ; Olungbenga *et al.*, 2011). Elle se fait soit par une réaction physico-chimique entre les particules du matériau à stabiliser et le produit ajouté, soit par création d'une matrice qui lie ou enrobe les particules. La réaction physicochimique peut, entraîner la formation d'un nouveau matériau issu de la réaction entre l'argile et la chaux par exemple. Cette technique utilise des ajouts tels que le ciment, la chaux et le mélange chaux/ciment.

Le choix de l'une de ces méthodes se fait sur la base des paramètres tels que la teneur en fines, l'indice de plasticité (IP) et le produit  $IP \times \text{fines}$  (Anonyme, 2000 ; Youdale, 2019). Les protocoles de sélection du type de stabilisation en fonction des paramètres du matériau à amender sont présentés dans le tableau 9.




### **III.3. Stabilisation à la chaux**

La stabilisation à la chaux est un procédé de traitement permettant d'obtenir à partir des sols difficilement compactables et non traités, un matériau dont les qualités mécaniques sont améliorées. Elle est couramment utilisée dans les travaux routiers et surtout pour des routes temporaires. Elle se fait par réaction de la chaux avec la fraction argileuse du sol en modifiant son environnement chimique et sa structure minéralogique (Cabane, 2004 ; Millogo *et al.*, 2012). La chaux réagit avec l'eau du matériau à stabiliser pour donner des réseaux cristallins enchevêtrés ayant une bonne cohésion et pouvant aboutir à des jonctions avec le squelette minéral (Millogo, 2008 ; Amadi et Okeiyi, 2017). Lors de la stabilisation, la chaux réagit avec les argiles en deux phases regroupant quatre étapes. Il s'agit de la phase de modification du sol par échange cationique flocculation et agglomération (2) et, la phase de stabilisation proprement dite par carbonatation (3) et réaction pouzzolanique (4) (Millogo, 2008). On distingue généralement deux types d'effets de la chaux sur les sols : les effets à court terme et les effets à long terme (SETRA, 1990 ; Muzahim *et al.*, 2010).

Tableau 9. Guide de sélection de la méthode de stabilisation (Youdale, 2019)

IP (%)	Passants à 75 µm > 25 %			Passants à 75 µm < 25 %		
	IP < 10	10 < IP < 20	IP > 20	IP < 6.IP x % passants 75 µm	IP < 10	IP > 10
<b>Forme de stabilisation</b>						
Ciment et mélanges cimentaires	Stabilisation satisfaisante	Stabilisation douteuse	Stabilisation non satisfaisante	Stabilisation satisfaisante	Stabilisation satisfaisante	Stabilisation satisfaisante
Chaux	Stabilisation douteuse	Stabilisation satisfaisante	Stabilisation non satisfaisante	Stabilisation non satisfaisante	Stabilisation douteuse	Stabilisation satisfaisante
Bitume	Stabilisation douteuse	Stabilisation douteuse	Stabilisation non satisfaisante	Stabilisation satisfaisante	Stabilisation satisfaisante	Stabilisation douteuse
Mélange bitume-ciment	Stabilisation satisfaisante	Stabilisation douteuse	Stabilisation non satisfaisante	Stabilisation satisfaisante	Stabilisation satisfaisante	Stabilisation douteuse
Granulaire	Stabilisation satisfaisante	Stabilisation non satisfaisante	Stabilisation non satisfaisante	Stabilisation satisfaisante	Stabilisation satisfaisante	Stabilisation douteuse
Variétés chimiques	Stabilisation non satisfaisante	Stabilisation satisfaisante	Stabilisation satisfaisante	Stabilisation satisfaisante	Stabilisation douteuse	Stabilisation satisfaisante

	Stabilisation douteuse
	Stabilisation satisfaisante
	Stabilisation non satisfaisante

IP : indice de plasticité

### **III.3.1. Effets immédiats**

Dès l'incorporation une réaction chimique entre l'eau du sol et la chaux a lieu. Cette réaction qui est exothermique entraîne un assèchement du sol et la modification de ses propriétés géotechniques par la floculation. Cette floculation améliore le comportement du sol par augmentation de sa portance. L'assèchement se fait soit par hydratation de la chaux qui est une réaction exothermique soit par l'évaporation de l'eau provoquée par la chaleur dégagée lors de la réaction de la chaux avec de l'eau. La floculation quant à elle, est due à la modification du champ électrique entre les particules (Muzahim *et al.*, 2010).

### **III.3.2. Effets à long terme**

A long terme, il se produit un accroissement des performances mécaniques par cimentation des grains entre eux. Le ciment ici est produit par la réaction pouzzolanique tributaire de la mise en solution des silicates, de l'alumine et des oxydes de fer présents dans les minéraux argileux (Amadi et Okeiyi, 2017). La résistance à la compression simple et l'indice CBR se trouvent ainsi augmentés. Ces effets provoquent la stabilisation et la solidification du sol (Muzahim *et al.*, 2010). Toutes les réactions entre la chaux et le sol dépendent de la composition minéralogique du sol, de la concentration de chaux utilisée et de l'humidité.

## **CONCLUSION**

La zone d'étude est une plaine d'altitude moyenne comprise entre 600 et 900 m. Elle est soumise à un climat équatorial de transition à quatre saisons inégalement réparties sur toute l'année. Le réseau hydrographique est de type dendritique avec pour cours d'eau principal le Nyong. Le relief comprend trois unités morphologiques. La végétation est une forêt semi-décidue à Sterculiacées et Ulmacées, dégradée par endroits par une population qui a pour activités principales l'agriculture, la chasse, l'élevage et la pêche. Les sols rencontrés dans la région sont surtout des sols ferrallitiques développés sur des roches mères métamorphiques. Au sein des profils pédologiques, se rencontrent les graveleux latéritiques, objet du présent travail. Les graveleux latéritiques sont des matériaux évolutifs et leurs caractéristiques minéralogiques, géochimiques, physiques et mécaniques varient d'une aire géographique à une autre, gardant la signature de la roche parentale. Du point de vue géotechnique, ces matériaux sont le plus souvent utilisables en couche de fondation. Lorsqu'ils ne présentent pas des caractéristiques suffisantes, ils peuvent être stabilisés dans le but d'améliorer leurs propriétés mécaniques, pour une utilisation en couche de base. Ces



mécanismes de stabilisation peuvent être mécaniques, physiques ou chimiques. La méthodologie adoptée pour caractériser les graveleux latéritiques étudiés est présentée dans le chapitre suivant.

## CHAPITRE II.

---

# **MATERIELS ET METHODES**

---

## **INTRODUCTION**

Après les enquêtes bibliographiques, les travaux de terrain ont consisté en la localisation des sites, en la description des profils et au prélèvement des échantillons. Les travaux de laboratoire ont consisté aux analyses pétrographiques, minéralogiques et géochimiques et, aux essais géotechniques tant sur les matériaux naturels que sur les mélanges sols-chaux.

### **I. ENQUETES BIBLIOGRAPHIQUES**

Les enquêtes bibliographiques ont consisté en l'exploitation de différentes cartes topographiques et géologiques et, en celle d'articles et ouvrages scientifiques dédiés au thème d'étude. La bibliothèque du Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et Altérologie (LGIA) de l'Université de Yaoundé I et les informations obtenues sur Internet ont été utilisés à cet effet. Tout ceci a abouti à la rédaction de la problématique et à l'ensemble de la thèse.

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

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

#### **II.1.1. Localisation des points de prélèvement**

Les points de prélèvement sont soit des tranchées routières ou talus (Fig. 5), soit d'anciennes carrières de graveleux latéritiques (Fig. 6). Le matériel utilisé pour la localisation comprend un appareil photo muni d'un récepteur GPS, une carte topographique de la zone d'Akonolinga au 1/50 000 (feuille NA-33-XIX-4c).

#### **II.1.2. Echantillonnage**

Le prélèvement des échantillons a été effectué à l'aide d'une pelle et d'une pioche, par grattage, sur les talus des tranchées routières et les fronts de taille des carrières, par la méthode des tas coniques. Les matériaux destinés aux analyses minéralogiques et géochimiques (100 g) ont été prélevés et conditionnés dans des sachets en plastique. Sept cent kilogrammes de matériaux destinés aux essais d'identification, et de caractérisation géotechnique et mécanique ont été prélevés dans chaque site. Des sacs d'une capacité de 50 kg ont été utilisés à cet effet.



Figure 5. Talus routier dans la localité de Koundou

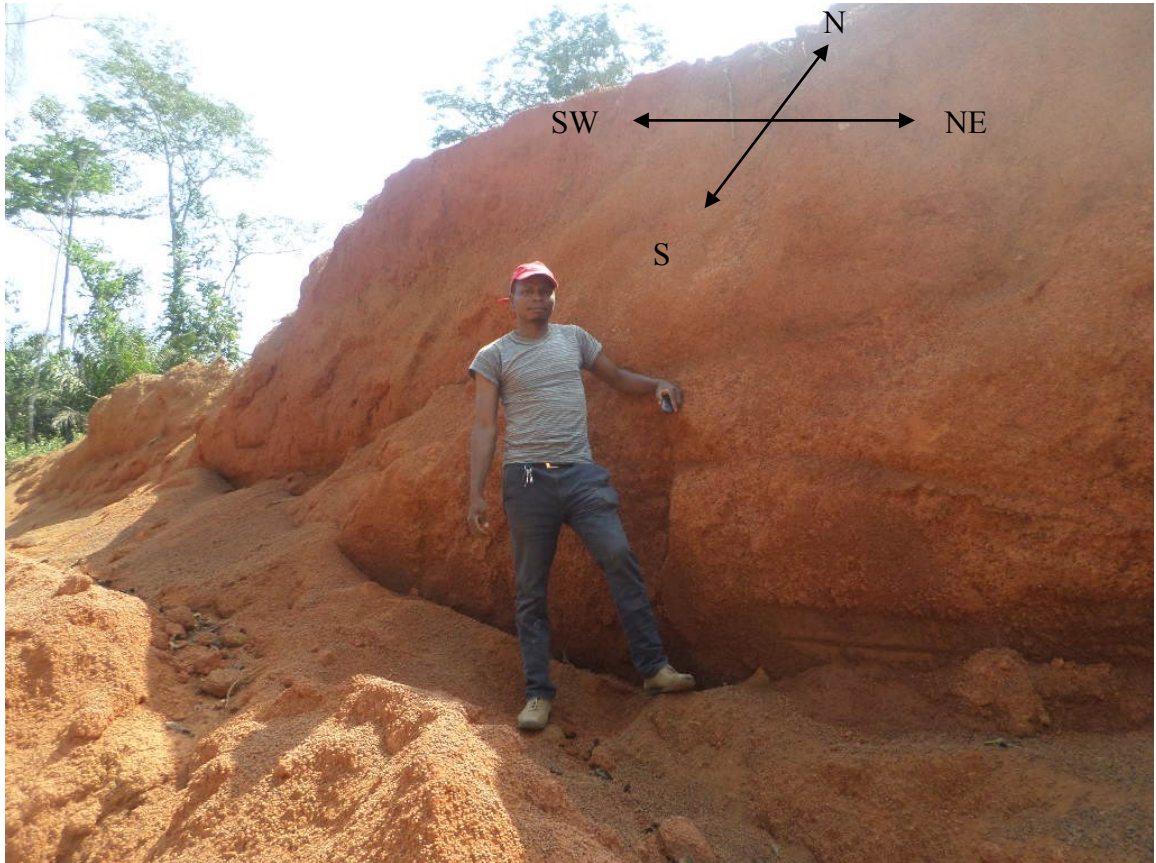


Figure 6. Carrière de graveleux latéritiques dans la localité de Nlobolé

### **II.1.3. Identification des échantillons**

L'encodage des échantillons a été effectué à l'aide d'un marqueur indélébile. La nomenclature adoptée comporte un préfixe constitué des trois premières lettres du nom de la localité où l'échantillon a été prélevé. Par exemple, Ebo désigne un échantillon prélevé dans la localité d'Ebogo.

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

### **II.2.1. Analyses pétrologiques**

Les échantillons de graveleux latéritiques retenus pour les analyses géochimiques ont été séchés à l'étuve à une température voisine de 30°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 la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, à l'aide d'une pulvérisette électrique de marque Fritsch.

#### **II.2.1.1. Analyses minéralogiques**

La minéralogie des poudres d'échantillons de graveleux latéritique 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 dans un géomatériau.

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

$$2d \sin = n\lambda \quad (3)$$

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 (Millogo, 2008). 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.

Les échantillons ont ensuite été analysés par diffraction des rayons X en utilisant un rayonnement Co à 40 kV et 45 mA aux laboratoires de Géosciences de l'Ontario Geological Survey à Sudbury Ontario (Canada).

### **II.2.1.2. 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. Microstructure**

La microstructure des graveleux latéritiques étudiés a été obtenue par microscopie optique pour les matériaux naturels et, par microscopie électronique à balayage pour les mélanges graveleux latéritiques-chaux. La microstructure a été étudiée sur des matériaux compactés à l'optimum Proctor.

La détermination de la microstructure par microscopie électronique s'est faite sur des lames minces confectionnées au laboratoire de lames minces de l'Institut de recherches géologiques et minières du Cameroun (IRGM). Le microscope utilisé est de marque Novex XP 201, Euromex, Arnhem, Netherlands, équipé d'un appareil-photo numérique Optika, Ponteranica - Italy, de résolution 9 megapixels.

La microstructure des mélanges graveleux latéritiques - chaux a été déterminée au Microscope électronique à balayage (MEB), au Laboratoire de l'Université de Lausanne (Suisse). Les images ont été obtenues par un détecteur d'électrons secondaires après métallisation des poudres à l'or, par pulvérisation plasma (distance 5 cm, 30 mA, 0,05 atm. d'argon, 50 secondes). La tension d'accélération (10,0 kV) est indiquée sur les images. Les images ont été prises à trois grossissements :  $\times 10$ ,  $\times 20$  et  $\times 100$ .

### **II.2.3. Travaux géotechniques**

Les essais géotechniques et mécaniques ont été réalisés au Laboratoire National de Génie Civil (LABOGENIE) et au Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et d'Altérologie de l'Université de Yaoundé I. Ces essais ont été réalisés tant sur le matériau naturel que sur les mélanges à 2, 4 % et 6% de chaux en poids du matériau sec.

#### **II.2.3.1. Propriétés physiques**

##### **II.2.3.1.1. Poids volumique des grains solides**

Pour cet essai, la méthode utilisée est celle par pesées successives au pycnomètre décrite par la norme NF P 94 –054 (AFNOR, 1991). Le poids volumique absolu est le poids par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains.

##### **II.2.3.1.2. Limites d'Atterberg**

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

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

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considéré, exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute. La différence entre LL et LP, qui définit l'étendue du domaine plastique, est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité (IP). L'indice de plasticité permet d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon. La détermination des limites d'Atterberg a été réalisée selon la norme NF P 94 – 051 (AFNOR, 1993).

##### **II.2.3.1.3. Valeur de bleu de méthylène**

La valeur de bleu de méthylène d'un sol (VBS) mesure par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. Cette quantité est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du sol. Cette valeur est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol ou le matériau rocheux. L'essai est réalisé selon la norme NF P 94 – 068 (AFNOR, 1998). La classification des sols d'après l'essai est donnée dans le tableau 10.



Tableau 10. Classification des sols selon les valeurs de bleu de méthylène (AFNOR, 1998)

<b>VBS</b>	<b>Classification</b>
$VBS \leq 0,2$	Sol sableux (sol insensible à l'eau)
$0,2 < VBS \leq 2,5$	Sol limoneux (sol peu plastique et sensible à l'eau)
$2,5 < VBS \leq 6$	Sol limono-argileux (sol de plasticité moyenne)
$6 < VBS \leq 8$	Sol argileux
$VBS > 8$	Sol très argileux

#### **II.2.3.1.4. Analyses granulométriques**

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

La méthode par tamisage se fait pour des grains de diamètre supérieur à 80  $\mu\text{m}$ . Les tamis à maille carrée sont le plus souvent utilisés à cet effet.

La méthode par sédimentométrie est utilisée pour les grains les plus fins. Elle consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau. Plus les grains sont fins, plus la vitesse de décantation est lente (loi de Stokes). La mesure de la densité de la suspension à des intervalles de temps variables permet de calculer la proportion de grains de chaque diamètre.

Les analyses granulométriques par tamisage et par sédimentométrie ont été réalisées selon les normes NF P 94 – 056 (AFNOR, 1996) et NF P 94 – 057 (AFNOR, 1992), respectivement.

#### **II.2.3.1.5. Caractéristiques de compactage**

L'ingénieur américain Proctor a démontré que pour une énergie de compactage donnée, la teneur en eau du matériau a une grande influence sur la compacité obtenue. En construction routière, c'est l'essai Proctor modifié qui est le plus souvent utilisé. Cet essai est réalisé selon la norme NF P 94–093 (AFNOR, 1999).

L'essai 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). L'essai CBR est réalisé par référence à la norme NF P 94–078 (AFNOR, 1997).

### **II.2.3.2. Essais mécaniques**

#### **II.2.3.2.1. Compression simple**

L'essai de compression simple vise à déterminer la résistance à la compression ( $R_c$ ) d'un matériau compacté et/ou stabilisé. Cet essai, réalisé conformément à la norme NF P 94 – 420 (AFNOR, 2000), consiste à exercer une pression verticale sur une éprouvette, cylindrique ou cubique, compactée et conservée pendant une période déterminée et, à augmenter progressivement la pression, jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Les éprouvettes soumises à l'essai de compression simple sont confectionnées par compactage du matériau homogénéisé, dans les moules de Duriez normal, de manière à obtenir des éprouvettes compactées à 95 %

OPM. La conservation se fait à l'air libre pour certaines éprouvettes et, à l'eau à 20°C, pendant 4 jours pour d'autres ; ceci dans le but d'apprécier l'influence de l'eau sur les caractéristiques mécaniques.

La résistance à la compression, en N/mm<sup>2</sup> ou en MPa, peut être calculée comme suit :

$$R_c = \frac{F}{S_t} \quad (4)$$

avec F = force maximale à la rupture (N) ;

S<sub>t</sub> = section transversale de l'éprouvette (mm<sup>2</sup>).

### **II.2.3.2.2. Traction indirecte ou essai brésilien**

L'essai de traction indirecte suit le même principe que celui de compression simple, à la seule différence que, pour la traction indirecte, l'éprouvette est placée de manière transversale, car les contraintes induites sont en majorité des contraintes de traction (AFNOR, 2001). L'essai est réalisé par référence à la norme NF P 94 – 422 (AFNOR, 2001). Les éprouvettes destinées à l'essai brésilien sont confectionnées suivant la même méthode que celle de l'essai de résistance à la compression.

La résistance à la traction indirecte R<sub>it</sub>, exprimée en N/mm<sup>2</sup>, peut être calculée comme suit :

$$R_{it} = \frac{2F}{\pi HD} \quad (5)$$

avec :

F = force maximale de rupture (N) ;

H = longueur de l'éprouvette (mm) ;

D = diamètre de l'éprouvette (mm).

On déduit à partir de R<sub>it</sub>, la valeur de la résistance à la traction R<sub>t</sub>, qui est la base d'un calcul de dimensionnement des structures :

$$R_t = 0,8R_{it} \quad (6)$$

## **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 diffractogrammes des rayons X. Cette exploitation a été effectuée qualitativement et

quantitativement. La méthode qualitative consiste à rechercher les espèces minérales présentes dans le matériau analysé à partir des pics émis par ces dernières. Les abaques de Brindley et Brown (1980) ont été utilisés à cet effet.

La méthode quantitative adoptée est celle des aires de pics, qui consiste à indexer tous les pics des minéraux déterminés qualitativement. L'aire de chaque pic est ensuite rapportée à la somme des aires des pics du diffractogramme. Le résultat obtenu correspond à la proportion du minéral dans l'échantillon. Si un pic porte plus d'un minéral, son aire est rapportée au nombre de minéraux qu'il porte. La proportion du minéral  $i$  dans le matériau est donnée par la relation :

$$P_i = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n \frac{A_p}{N_i} \quad (7)$$

avec :

$P_i$  : proportion du minéral  $i$  ;

$A$  : aire totale du diffractogramme ;

$A_p$  : aire du pic  $p$  ;

$N_i$  : nombre de minéraux sur un pic  $p$ .

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

### III.2.1. Indices et diagrammes géochimiques

Le calcul des indices géochimiques et l'utilisation des diagrammes ternaires sont des méthodes généralement utilisées pour quantifier les processus d'altération.

Ces indices sont CIA (*Chemical index of alteration*) de Nesbitt et Young (1982) et IOL (*Index of lateritisation*) de Babechuk *et al.* (2014). L'indice chimique d'altération CIA a pour formule :

$$CIA = 100 \times [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \quad (8)$$

L'indice CIA utilise les rapports molaires des oxydes des éléments majeurs. CaO molaire est corrigé pour la présence de carbonates et d'apatite pour ne considérer uniquement que Ca (CaO\*) lié aux silicates. La formule de CaO\* est donnée par l'équation 2 (Babechuk *et al.*, 2014) :

$$CaO^* = CaO - \left[ \left( \frac{10}{3} \right) \times P_2O_5 \right] \quad (9)$$

La muscovite présente des valeurs de CIA de l'ordre de 75. Pour l'illite tout comme la montmorillonite et la beidellite, les valeurs de ce paramètre varient entre 75 et 85. La kaolinite et la chlorite présentent des valeurs plus élevées et proches de 100 (Nesbitt et Young, 1982).

L'indice de latéritisation IOL (équation 10) utilise les pourcentages de SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3(T)</sub>, et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Babechuk *et al.*, 2014)

$$IOL = 100 \times \left[ \frac{(Al_2O_3 + Fe_2O_{3(t)})}{(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_{3(t)})} \right] \quad (10)$$

### 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, 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 composition minéralogique virtuelle pour chaque échantillon. Cette méthode permet de déterminer des paramètres tels que DVRAR (Degré virtuel relatif d'altération de la roche), IRLP (Indice relatif d'induration potentielle), IRCP (Indice relatif de confinement potentiel), PPFAL (prédominance potentielle des oxyhydroxydes de fer et d'aluminium libres), IAL (Indice d'alumine libre) et IFL (Indice de fer ferrique libre) (Ekodeck et Kamgang, 2002 ; 2011). Les paramètres ainsi évalués sont de 03 types :

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

$$PPFAL = \frac{(Gibb + Boeh + Cor)}{Goe + Hem} \quad (11)$$

$$IAL = \frac{(Gibb + Boeh + Cor)}{Gibb + Boeh + Cor + Goe + Hem + Co} \times 100 \quad (12)$$

$$IFL = \frac{(Goe + Hem)}{Gibb + Boeh + Cor + Goe + Hem + Co} \times 100 \quad (13)$$

$$IIP = \frac{(Oxydes + Hydroxydes de Fe^{3+}, Al^{3+}, Mn^{2+})}{Tous\ les\ minéraux} \times 100 \quad (14)$$

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 :

$$Co = \%aT - (\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3) \quad (15)$$

%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) :

$$ILP = \frac{(Gibb + Boeh)100 + (Kand)75 + (Sil.al Ca.alc)50 + (Sil.al FeMg)25}{Gibb + Boeh + Cor + Sil} \quad (16)$$

$$DVAR = \frac{[(Gibb + Boeh + Si.am)100 + (Kndt)75] + ss[(c-a)50 + (f-m)25]}{(Gibb + Boeh + Cor + ss + sp)} \quad (17)$$

Boeh : boehmite ; Kand : kandites ; Sil : silicates ; Sil.al : silicates d'altération ; Ca.alc : calcoalcalins ; FeMg : ferromagnésiens, Gibb : gibbsite, ss : silicates supergènes ; sp : silicates primaires ; Cor : corindon.

- le paramètre de caractérisation du milieu (ICP) :

$$ICP = \frac{(\text{Silicates} - \text{Kandites})}{Gibb + Cor + \text{Silicates}} \times 100 \quad (18)$$

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 :

$$ra = \frac{\%aT - \%Tr}{\%T} \times 100 \quad (19)$$

Avec :

%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.

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

L'exploitation des données géotechniques des matériaux a consisté en la comparaison des résultats aux spécifications établies, en la classification des matériaux étudiés et en la sélection des matériaux pour stabilisation à la chaux.

#### **III.3.1. Comparaison des résultats aux spécifications**

La comparaison des résultats obtenus aux spécifications a été effectuée par référence aux normes AFNOR (Association Française de Normalisation) et à l'exploitation des documents de référence tels que, le guide de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux (CEBTP, 1984) et les directives et recommandations de la direction des études générales et de la normalisation au Cameroun (DEGN, 1987).

#### **III.3.2. Classification**

La classification des matériaux s'est faite par référence systèmes AASHTO (American Association for state Highway and Transportation Officials) et CEBTP-ISTED (Centre d'Expertise du Bâtiment et des Travaux Publics – Institut des Sciences et des Techniques et de l'Environnement pour le Développement). Le but d'une classification géotechnique est, à partir des constats de terrain et d'essais simples de laboratoire, de prévoir le comportement mécanique des matériaux (Tockol, 1993). La classification géotechnique permet également de

regrouper les sols en familles à caractéristiques géomécaniques voisines (Bagarre, 1990). Il existe donc plusieurs systèmes de classification (DEGN, 1987 ; Bagarre, 1990 ; Millogo, 2008). L'un des paramètres important de cette classification est l'indice de groupe. Cet indice permet de qualifier les matériaux comme couches d'infrastructures routières et se calcule selon la formule de l'équation (1).

La classification proposée par le CEBTP - ISTED tient compte du pourcentage des fines ( $f$ ), de l'indice de plasticité ( $I_p$ ), du produit  $f \times I_p$ , de la densité sèche OPM et de la teneur en eau optimale. Les graveleux GL1 sont de bons matériaux de couches de fondation et, de couches de base après traitement. Les graveleux GL2 sont des matériaux intermédiaires qui ne pourront que, rarement, être utilisés en couches de fondation. Tandis que, les matériaux du groupe GL3 sied bien aux remblais et couches de forme. Ces trois classes (Tab. 11) conviennent aux routes non revêtues.

### III.3.3. Paramètres dérivés

Les paramètres dérivés étudiés sont l'activité de la fraction argileuse ( $A_{cb}$ ), le module de classement ( $G_m$ ), l'activité de Skempton ( $A_c$ ), le produit de plasticité ( $P_p$ ), le module de plasticité ( $P_m$ ) et le potentiel de gonflement ( $\epsilon_s$ ). Ces paramètres servent à quantifier l'influence de la plasticité des fines sur la performance générale du matériau, qui dépend de la proportion et de la nature de celles-ci (Charman, 1988 ; Bello et Osinubi, 2010). Ces paramètres sont définis par les formules ci-dessous :

$$A_{cb} = \frac{VBS}{\% < 2 \mu m} \quad (20)$$

$$G_m = \frac{300 - (\% \leq 2 \text{ mm} + \% < 425 \mu m + \% < 80 \mu m)}{100} \quad (21)$$

$$P_m = I_p \times (\% < 425 \mu m) \quad (22)$$

$$P_p = I_p \times (\% < 80 \mu m) \quad (23)$$

$$A_c = \frac{I_p}{\% < 2 \mu m} \quad (24)$$

Dans ces formules,  $<2 \text{ mm}$ ,  $<425 \mu m$ ,  $<80 \mu m$  et  $<2 \mu m$  représentent respectivement le squelette, le mortier, les fines et la teneur en argiles.

### III.3.4. Aptitude au traitement à la chaux

Concernant protocole de sélection et l'aptitude au traitement à la chaux, les matériaux ont été sélectionnés en utilisant des paramètres tels que la teneur en fines, l'indice de plasticité, le



Tableau 11. Paramètres de la classification CEBTP – ISTED (Bagarre, 1990)

<b>Groupe</b>	<b>Produit f x IP</b>	<b>Caractéristiques mécaniques</b>
GL1	< 250	CBR = 20 à 80 %, DSM = 2,1 à 2,50, TE – OPM = 5 à 8 %
GL2	250-600	CBR = 15 à 40 %, DSM = 2 à 2,25, TE – OPM = 7 à 10 %
GL3	600-1600	CBR < 30 %, DSM= 1,9 à 2,20, TE – OPM = 8 à 12 %

*CBR : californian bearing ratio ; DSM : densité sèche maximale ; f : fines ; GL : graveleux latéritiques, IP : indice de plasticité ; TE – OPM : teneur en eau à l'optimum Proctor Modifié*

module de plasticité et la portance CBR (CEBTP, 1984 ; Anonyme, 2000). Tous les matériaux présentant une valeur CBR supérieure ou égale à 60 % ont été éliminés. Il en est de même, pour ceux, présentant des valeurs d'indice de plasticité inférieures à 10 % et celles de module de plasticité supérieures à 2000.

### **III.4. Méthodes d'analyses statistiques des données**

Le traitement statistique des données d'analyses chimiques a nécessité de nombreux calculs pour la détermination valeurs de moyennes, écarts-types, coefficients de variation (CV) et coefficients de régression linéaire entre paramètres. Le logiciel XLstat version 2014.5.03 a permis une analyse en composantes principales (ACP) des données, couplée à une analyse par classification hiérarchique ascendante (CHA).

#### **III.4.1. Coefficient de variation**

Le coefficient de variation (CV) ou écart type relatif est une mesure de la dispersion relative des données autour de la moyenne. Il est défini comme étant le rapport entre l'écart-type et la moyenne. Sa formule est donnée par la relation :

$$CV = \frac{\text{Ecart - type}}{\text{Moyenne}} \times 100 \quad (25)$$

Pour évaluer les variations des propriétés des graveleux latéritiques sur la base de leur coefficient de variation (CV), la classification adoptée est celle de Wilding et Dress (1983) qui stipule que, si CV est inférieur à 15, alors le paramètre a une faible variation, si CV est compris entre 15 et 35, la variation est moyenne et, autrement, le paramètre a une forte variation.

#### **III.4.2. Analyses de régressions**

L'analyse de régression est une méthode statistique utilisée pour la modélisation des relations entre différentes variables. Elle permet de décrire et d'analyser les relations entre les données. Cette analyse peut être utilisée pour faire des prédictions au moyen des équations liant 02 paramètres. Dans la présente étude, la validation d'une relation se fait par le biais du coefficient de détermination ( $R^2$ ). Une relation est forte si la valeur de  $R^2$  est supérieure à 0,8, moyenne dans l'intervalle  $[0,50 - 0,80[$ , et faible dans l'intervalle  $[0,00 - 0,50[$ . Seules les relations dont la valeur de  $R^2$  est supérieure ou égale à 0,65 sont retenues.

### III.4.3. Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) constitue une des techniques d'analyse statistique les plus communément employées (De Lagarde, 1995). A partir d'un espace à  $n$  dimensions défini par  $p$  variables initiales, l'ACP a pour but de déterminer un sous espace de dimension moindre, en recherchant de nouvelles variables, linéairement indépendantes, expliquant au mieux l'ensemble des observations. Parmi ces variables initiales, certaines d'entre elles ne sont pas linéairement indépendantes, il existe donc des variables sur lesquelles la projection de l'inertie du nuage de points (sa variance) est maximale. Le calcul de ces composantes se ramène à celui des valeurs propres et des vecteurs propres de la matrice de covariance ou de corrélation. L'intérêt de la méthode est de se limiter à quelques composantes expliquant une proportion satisfaisante de la variabilité totale des variables initiales, pour résumer une information décrite de façon redondante par l'ensemble des variables initiales (Onana, 2010 ; Ndzié Mvindi *et al.*, 2017). Les variables peuvent y être représentées par des vecteurs dont les composantes sont les coefficients de corrélation qu'elles ont vis à vis des facteurs. On obtient grâce à l'ACP, un résumé descriptif, sous forme graphique, d'un ensemble de  $n$  observations effectuées sur  $p$  variables numériques continues. Les règles permettant d'interpréter la position des variables dans les plans factoriels (cercles de corrélation par exemple) (Fig. 7) sont celles-ci :

- dans un plan factoriel donné, une variable est d'autant mieux expliquée qu'elle est proche du bord du cercle (A, B) et, d'autant moins bien expliquée, qu'elle se situe à proximité du centre (O) ;
- deux variables bien expliquées dont les représentations sont proches l'une de l'autre sont en relation normale (B et C). (le coefficient de corrélation linéaire ( $r$ ) entre deux variables tend vers 1) ;
- deux variables bien expliquées dont les représentations se déduisent l'une de l'autre par une symétrie par rapport à l'axe vertical du cercle sont en relation inverse (B et D) ( $r$  tend vers -1) ;
- deux variables bien expliquées dont les représentations se déduisent l'une de l'autre par une rotation de  $90^\circ$  sont indépendantes (A et B) ( $r$  tend vers 0).

Les facteurs limitant de la méthode sont :

- un nombre maximal de composantes (dans un but de représentation graphique);
- un pourcentage minimal de variance totale expliquée (75 %) assurant la stabilité et l'interprétabilité des composantes.

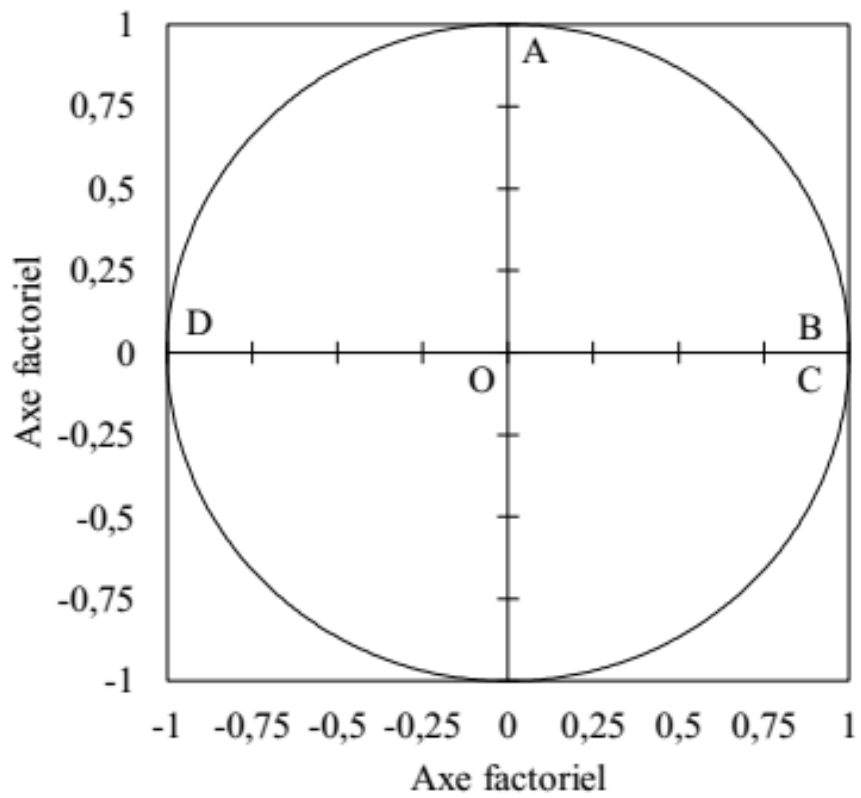


Figure 7. Représentation de projections typiques de variables dans un plan factoriel (De Lagarde, 1995)

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

La classification hiérarchique ascendante (CHA) est utilisée pour confirmer et compléter l'analyse en composantes principales. La classification hiérarchique ascendante est une technique de classification des données largement appliquée en Sciences de la Terre (Davis, 1986). Le résultat obtenu est exprimé sous forme de dendogramme (Fig. 8) (Ndzé Mvindi *et al.*, 2017). Des objets sont groupés de telle sorte que les individus semblables se regroupent dans la même classe et, les individus dissemblables, dans des classes différentes. La méthode de dissimilarité utilisée est la distance de Bray et Curtis (1957) et, celle d'agrégation, la méthode de Ward (1963).

#### **CONCLUSION**

Les travaux de terrain ont été focalisés sur la description macroscopique des matériaux des différents emprunts et au prélèvement des échantillons de graveleux latéritiques dans le secteur d'Akonolinga. Les travaux de laboratoire ont porté sur les analyses minéralogiques par DRX, les analyses géochimiques par fluorescence X et par titrimétrie, ainsi qu'à la réalisation des essais géotechniques et mécaniques sur les matériaux naturels et les mélanges matériaux naturels-chaux. Les traitements statistiques effectués concernent la détermination du coefficient de variation, les analyses de régression, l'analyse en composantes principales et la classification hiérarchique ascendante. Les principaux résultats obtenus sont consignés dans le prochain chapitre.

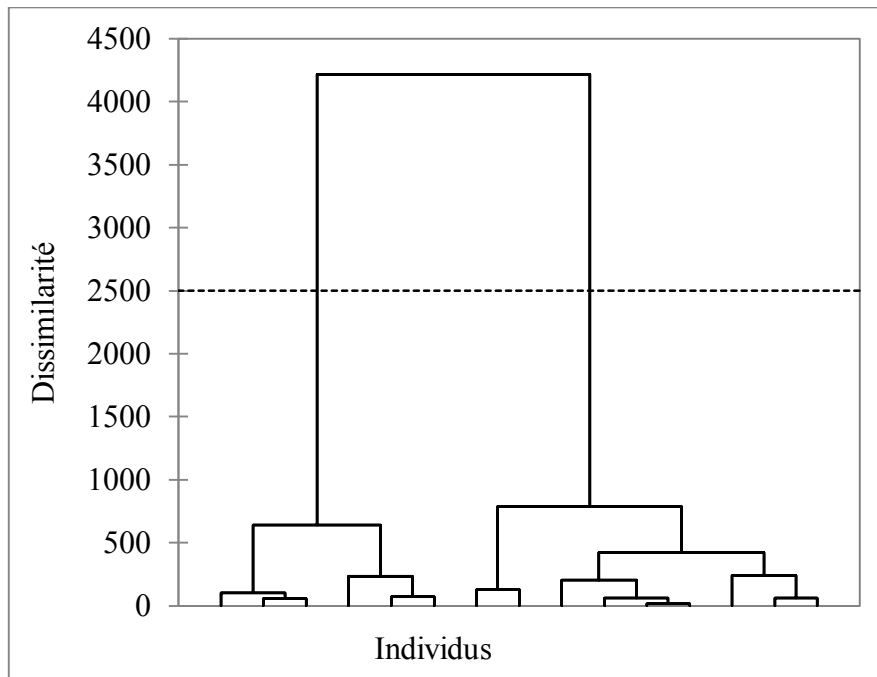


Figure 8. Dendrogramme de la classification hiérarchique ascendante (Ndzie Mvindi *et al.*, 2017)

## CHAPITRE III.

---

### **RESULTATS**

---

## **INTRODUCTION**

Le présent chapitre est consacré d'une part à la pétrologie des graveleux latéritiques dans la zone d'Akonolinga. Il s'agit d'une étude pétrographique, minéralogique et géochimique des graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes et sur micaschistes. D'autre part, les résultats des essais géotechniques et des analyses statistiques des données des graveleux latéritiques étudiés y sont également présentés. Le chapitre s'achève par la présentation des données géotechniques des mélanges graveleux latéritiques-chaux.

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

Après des descriptions macroscopiques, les échantillons de graveleux latéritiques ont été prélevés sur deux substratums différents et à des positions topographiques différentes (Figs. 9 et 10). Quinze points de prélèvement ont été retenus, notamment 08 carrières et tranchées routières pour les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes et, 07 carrières et tranchées routières pour les matériaux développés sur micaschistes (Tab. 12).

## **II. CARACTERISATION PETROLOGIQUE DES GRAVELEUX LATÉRIQUES**

### **II.1. Pétrographie**

#### **II.1.1. Pétrographie macroscopique**

Les graveleux latéritiques sur chloritoschistes présentent une épaisseur moyenne comprise entre 1,00 et 3,30 m. Ces matériaux sont composés d'une matrice jaune rougeâtre (2,5YR 4/8) de texture argileuse, friable au sein de laquelle, on observe 3 types d'éléments grossiers : les nodules millimétriques, les nodules centimétriques et les fragments de quartz centimétriques (Fig. 11). Les nodules millimétriques (50 – 55 %), plus ou moins arrondis, présentent un cortex rouge sombre (10R 8/2). Les nodules centimétriques (10 – 15 %), à cortex rouge sombre (10R 3/4), présentent des inclusions de grains de quartz millimétriques et un nucléus blanc rosâtre (5YR 8/2) riche en quartz. Des nodules friables ayant conservé la structure de la roche parentale sont observables à la base du niveau contenant ces matériaux. Des fragments de quartz centimétriques (10 – 15 %) et des grains de quartz millimétriques, en quantités très importantes, sont également emballés dans la matrice argileuse rouge.

Le graveleux latéritiques sur micaschistes ont une épaisseur variant entre 0,85 et 2,40 m. Ces matériaux sont constitués d'une matrice rougeâtre (2,5YR 5/8) argilo-sableuse dans laquelle, on observe deux types d'éléments grossiers : les nodules millimétriques à



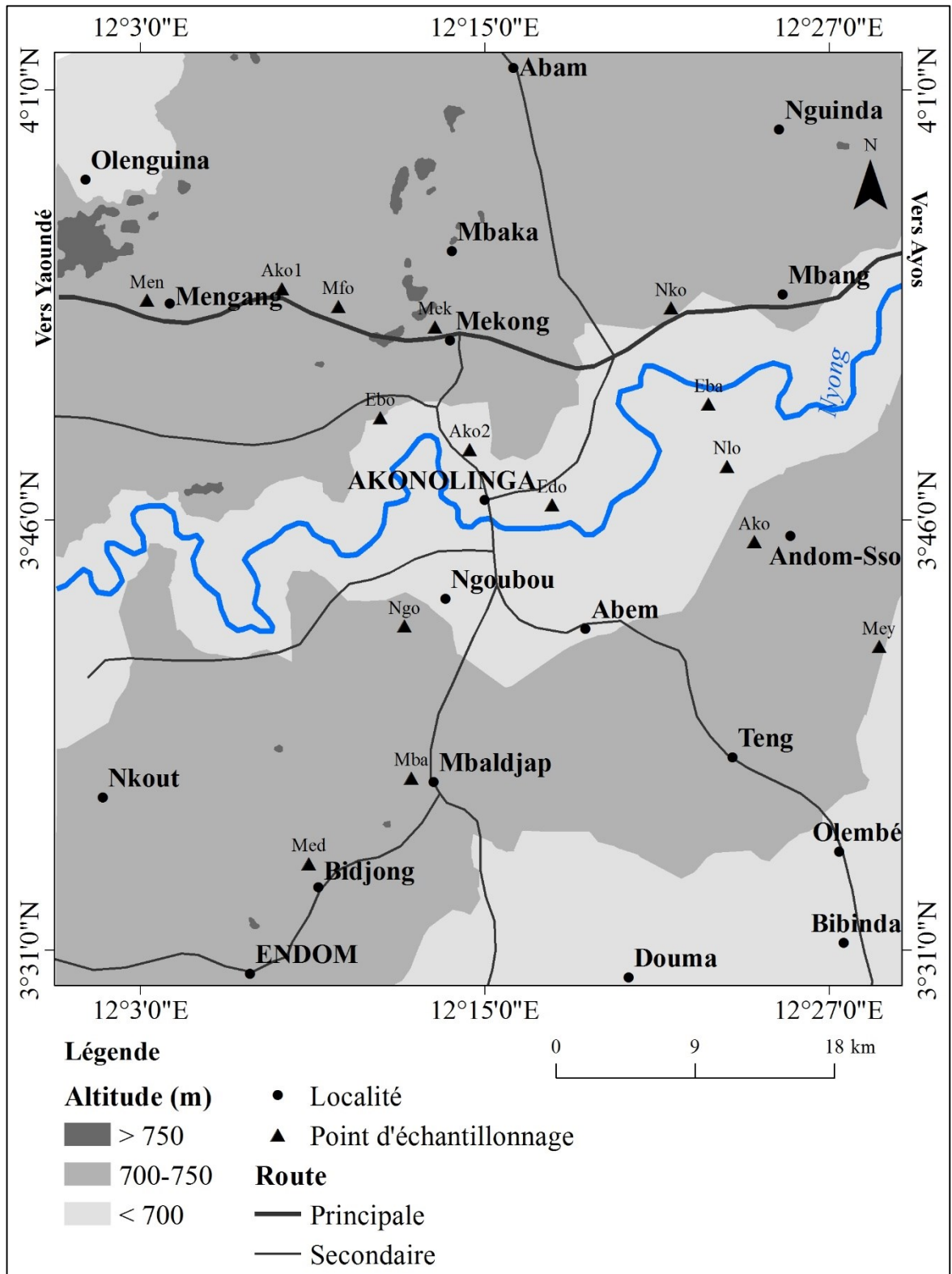


Figure 9. Localisation des points d'échantillonnage sur la carte géomorphologique de la zone d'Akonolinga (d'après la carte topographique de la zone d'Akonolinga, feuille NA-33-XIX au 1/50 000, INC - Cameroun)

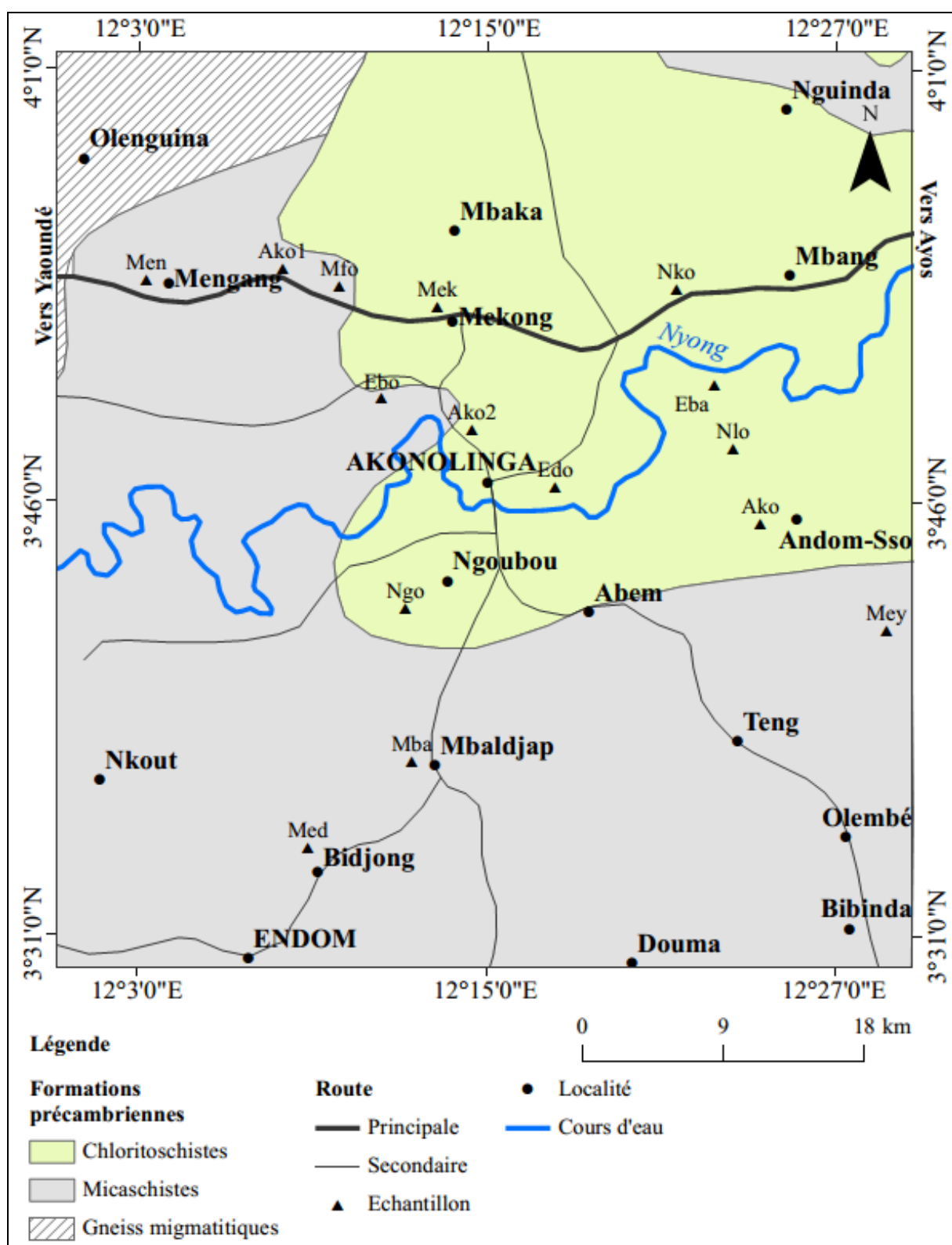


Figure 10. Localisation des points d'échantillonnage sur la carte géologique de la zone d'Akonolinga (d'après la carte géologique de reconnaissance du Cameroun au 1 /500 000, feuille d'Abong-Mbang Ouest (Gazel et Guiraudie, 1965, modifiée))

Tableau 12. Géolocalisation des points de prélèvement

<b>Echantillons</b>	<b>Localité</b>	<b>Substratum</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Altitude (m)</b>
Ako2	Mvé	Chloritoschistes	N 3° 48' 05"	E 12° 11' 01"	657
Ako	Akoua	Chloritoschistes	N 3° 45' 14"	E 12° 24' 24"	690
Eba	Ebanda	Chloritoschistes	N03° 50' 02"	E12°22' 49"	679
Edo	Edouma	Chloritoschistes	N 3° 46' 32"	E 12° 17' 20"	664
Mek	Mekong	Chloritoschistes	N 3° 52' 43"	E 12° 13' 16"	696
Ngo	Ngoubou	Chloritoschistes	N 3° 42' 17"	E 12° 12' 13"	705
Nko	Nkolessong	Chloritoschistes	N 3° 53' 23"	E 12° 21' 30"	691
Nlo	Nlobolé	Chloritoschistes	N03° 47' 52"	E12°23' 28"	684
Ako1	Koundou	Micaschistes	N 3° 54' 03"	E 12° 07' 56"	688
Ebo	Ebogo	Micaschistes	N 3° 49' 33"	E 12° 11' 22"	648
Mba	Mbaldjap	Micaschistes	N 3° 36' 59"	E 12° 12' 27"	698
Med	Medjap	Micaschistes	N 3° 34' 00"	E 12° 08' 52"	680
Men	Mengang	Micaschistes	N 3° 53' 30"	E 12° 03' 34"	702
Mey	MeyosYeze	Micaschistes	N 3° 41' 35"	E 12° 28' 46"	708
Mfo	Mfoumassi	Micaschistes	N 3° 53' 27"	E 12° 09' 54"	682



Figure 11. Aspect macroscopique des graveleux latéritiques sur chloritoschistes de la zone d'Akonolinga

centimétriques aux formes variées et, les fragments de quartz (Fig. 12). Les nodules représentent environ 60 à 70 % du volume de ce niveau. On observe à l'intérieur de ces nodules des grains de quartz millimétriques, des paillettes de muscovite et des petites tâches jaunes à texture limoneuse. Les fragments de quartz (5 – 10 %) sont centimétriques à pluricentimétriques. Les grains de quartz millimétriques sont disséminés dans la matrice argilo-sableuse. Des paillettes de muscovite et des reliques de roches sont observables dans ces matériaux ainsi que des blocs de cuirasse ferrugineuse, par endroit.

Les reliques de roche sont abondantes dans ces matériaux. On y observe également de fines paillettes de muscovite. Les matériaux sur chloritoschistes sont plus épais et moins quartzeux que ceux développés sur micaschistes. Les reliques de roches sont plus abondantes dans les graveleux latéritiques issus des chloritoschistes.

### **I.1.2. Pétrographie microscopique**

Sur le plan microscopique, la microstructure des éprouvettes de graveleux latéritiques compactées à l'optimum Proctor montre des nodules ferrugineux et des grains de quartz emballés dans une matrice argileuse (Fig. 13). Dans les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes, on observe la présence des minéraux allongés (Fig. 13b) et philliteux (Fig. 13d). On note également dans ces matériaux la présence des nodules avec des vides dans leur structure (Fig. 13c). Les matériaux dérivés des micaschistes renferment des nodules présentant une altération centripète (Fig. 13e, f, g, et h). Les nodules sont de grandes tailles comparativement à ceux observés dans les matériaux développés sur chloritoschistes.

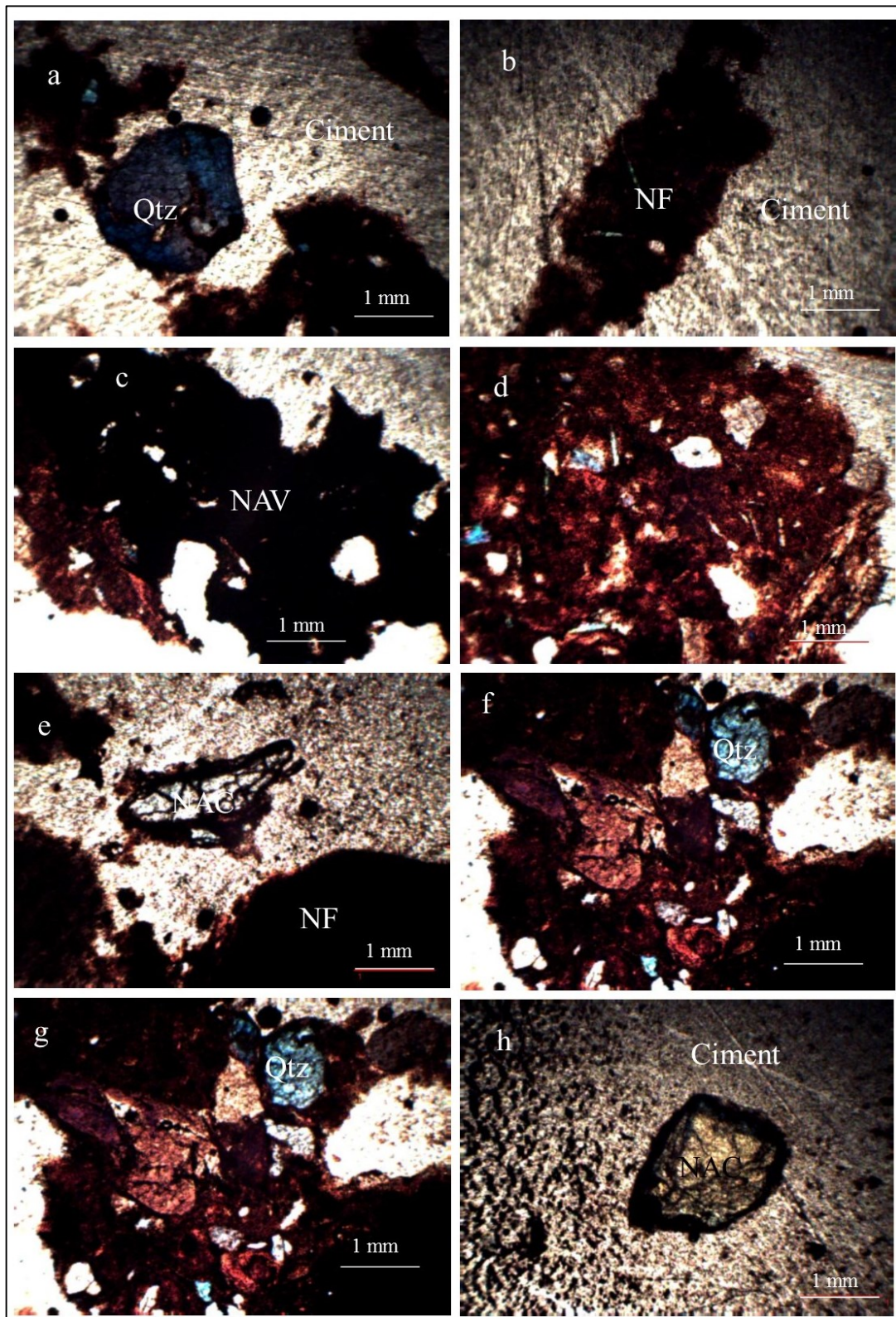
## **I.2. Minéralogie**

La minéralogie des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga a été déterminé par diffraction des rayons X. Le diffractogramme de la figure 14 présente le cortège minéralogique obtenu pour chaque type de graveleux latéritiques.

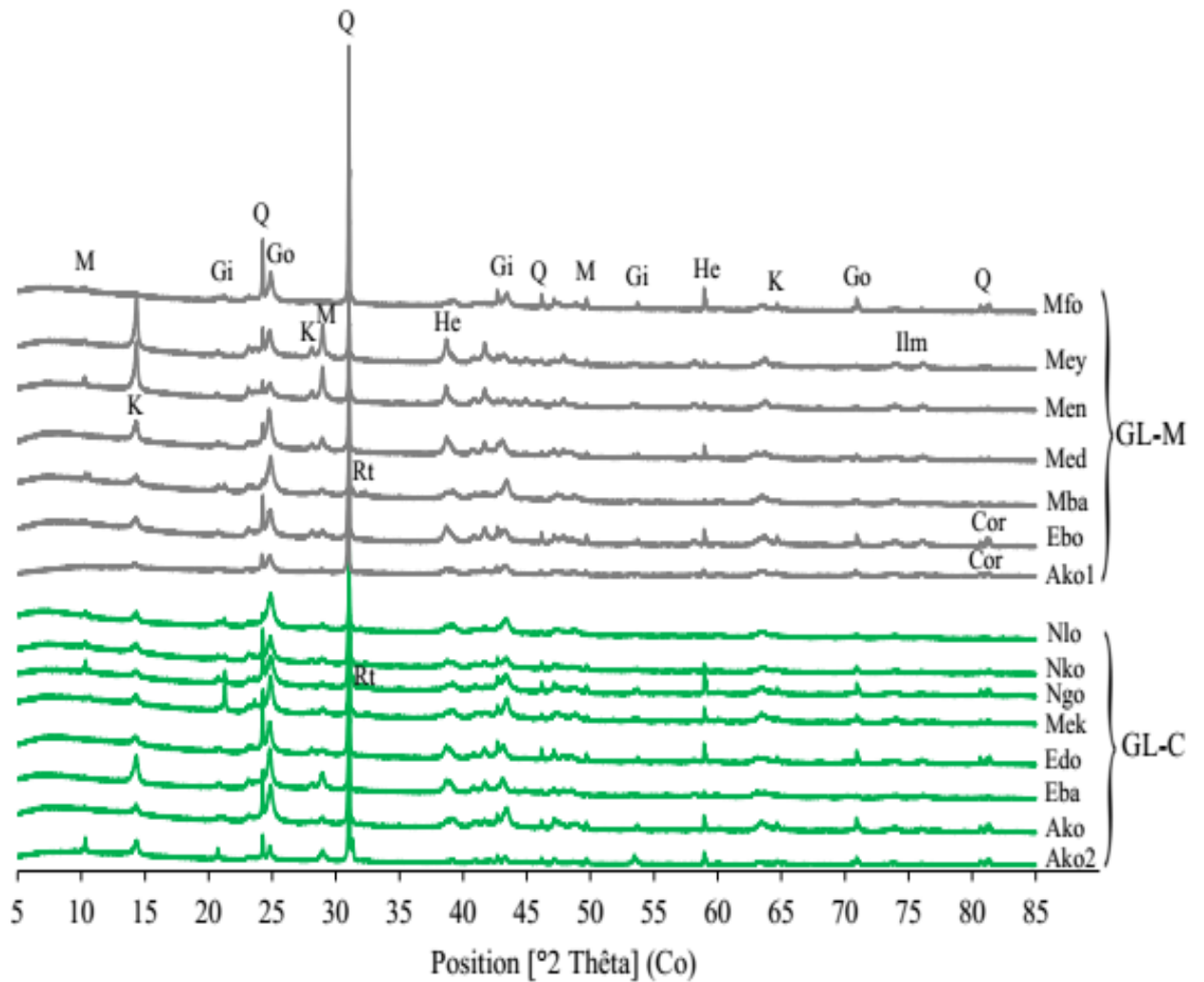
Les données d'analyses quantitatives sont présentées par le tableau 13. La diffractométrie des rayons X des graveleux latéritiques du secteur d'Akonolinga montre que les matériaux développés sur chloritoschistes sont composés de quartz (10,2 – 21,5 %), gibbsite (8,4 – 20,8 %), kaolinite (12,6 – 25,4 %), goethite (7,0 – 24,5 %), muscovite (17,5 – 36,0 %), hématite (5,1 – 11,8 %), ilménite (2,6 – 7,5 %) (Tab. 13). L'anatase apparaît dans les matériaux Ako2 (5,0 %) et Eba (2,0 %). Le corindon est présent dans les matériaux Ako2 (5,0



Figure 12. Aspect macroscopique des graveleux latéritiques sur micaschistes de la zone d'Akonolinga



*Qtz* : quartz ; *NF* : nodules ferugineux ; *NAC* : nodules à altération centripète ; *NAV* : nodules avec vides  
 Figure 13. Microphotographies des graveleux latéritiques sur Chloritoschistes (a, b, c et d) et sur micaschistes (e, f, g et h) dans la zone d'Akonolinga



*GL-C : graveaux latéritiques sur chloritoschistes ; GL-M : graveaux latéritiques sur micaschistes ; M : muscovite ; Gi : gibbsite ; Go : goethite ; K : kaolinite ; He : hématite ; Q : quartz ; Cor : corindon ; Ilm : ilménite ; Rt : rutile ; An : anatase*

Figure 14. Diffractogramme des graveaux latéritiques de la zone d'Akonolinga



Tableau 13. Composition minéralogique semi-quantitatives (%) des graveleux latéritiques dans la zone d'Akonolinga

Matériaux Phases minérales	GL-C (N = 8)								GL-M (N = 7)						
	Ako2	Ako	Eba	Edo	Mek	Ngo	Nko	Nlo	Ako1	Ebo	Mba	Med	Men	Mey	Mfo
Quartz	13,0	14,4	16,7	21,5	10,2	15,8	16,7	11,3	11,0	17,9	6,80	13,40	11,20	9,50	20,75
Kaolinite	16,0	18,1	25,4	15,3	18,1	13,2	14,3	12,6	22,0	18,5	20,30	22,10	38,50	32,10	14,03
Muscovite	36,0	25,4	17,5	22,2	20,5	25,0	23,8	21,3	31,0	22,0	25,10	15,00	18,50	14,30	23,07
Gibbsite	–	16,2	8,4	–	20,5	20,8	20,0	15,7	–	–	17,70	12,60	–	10,80	18,04
Hématite	11,0	5,7	8,2	10,3	8,9	5,1	8,7	11,8	9,0	10,1	7,50	10,30	9,40	10,50	2,06
Goethite	7,0	15,6	17,6	24,5	14,1	13,7	13,9	21,8	8,0	25,8	16,80	20,90	13,70	15,40	15,51
Anatase	5,0	–	2,0	–	–	–	–	–	8,0	–	–	5,70	–	7,30	4,58
Ilménite	–	4,5	–	3,8	7,5	–	2,6	–	–	2,9	–	–	3,30	–	–
Corindon	5,0	–	–	2,2	–	–	–	–	8,0	1,9	–	–	2,10	–	–
Rutile	–	–	1,7	–	–	4,1	–	5,1	–	–	5,70	–	–	–	–
Total	93,0	99,9	97,5	99,8	99,8	97,7	100	99,5	97,0	99,1	99,90	100	96,70	99,90	98,04

*GL-C : graveleux latéritiques sur chloritoschistes, GL-M : graveleux latéritiques sur micaschistes*

%) et Edo (2,2 %). Le rutile est présent dans les matériaux Eba (1,7 %) Ngo (4,1 %) et Nlo (5,1 %).

Les graveleux latéritiques dérivés des micaschistes sont constitués de quartz (6,8 – 20,8 %), gibbsite (10,8 – 18,0 %), kaolinite (14,0 – 38,5 %), goethite (8,0 – 25,8 %), muscovite (14,3 – 31,0 %), hématite (2,1 – 10,5 %) (Tab. 13). L'anatase présente des teneurs comprises entre 4,6 % et 8,0 %. L'ilménite apparaît dans les matériaux Ebo (2,9 %) et Men (3,3 %). Le corindon est présent dans les matériaux Ako1 (8,00 %), Ebo (1,9 %) et Men (2,1 %). Le rutile n'apparaît que dans le matériau Mba (5,7 %) (Tab. 13).

### **I.3. Géochimie**

Le tableau 14 montre la distribution des éléments majeurs dans les graveleux latéritiques du secteur d'Akonolinga.

Les graveleux latéritiques sur chloritoschistes présentent des teneurs modérées à élevées en  $\text{SiO}_2$  (14,02 – 46,50 %), dont la moyenne est de 28,78 %. Les teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sont modérées à élevées (19,51 – 50,20 %). L'oxyde d'aluminium  $\text{Al}_2\text{O}_3$  présente des teneurs comprises entre 13,49 – 21,29 %, pour une moyenne de 17,85 %. Les teneurs en  $\text{TiO}_2$  varient entre 0,79 et 2,03 % pour une valeur moyenne de 1,38 %. Les valeurs de perte au feu LOI sont comprises entre 10,81 et 15,31 %, soit une valeur moyenne de 12,94 %. Les autres oxydes ont des teneurs inférieures à 1,00 %. Les oxydes  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  représentent en moyenne 84 % en poids global de ces matériaux. L'indice d'altération chimique CIA présente des valeurs supérieures à 96 %. Les valeurs du controversé ratio silice sesquioxyde (S/R) varient entre 0,48 et 2,53, soit une moyenne de 1,29. Les valeurs de IOL sont comprises entre 45,4 % et 83,0 %, soit une valeur moyenne de 65,3 %.

Les graveleux latéritiques développés sur micaschistes présentent des teneurs modérées à élevées en  $\text{SiO}_2$  (17,88 – 37,95 %), soit une valeur moyenne de 27,93 %. Les teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sont modérées à élevées (19,51 – 50,20%) et en moyenne de 39,62 %. L'oxyde d'aluminium  $\text{Al}_2\text{O}_3$  présente des teneurs comprises entre 14,22 % et 22,08 %, pour une valeur moyenne de 17,51 %. Les teneurs en  $\text{TiO}_2$  varient entre 0,96 et 1,62 %. La perte au feu LOI présente des valeurs comprises entre 10,84 % et 15,02 %, soit une valeur moyenne de 12,29 %. Les autres oxydes ont des teneurs inférieures à 1,00 %. L'oxyde de sodium  $\text{Na}_2\text{O}$  est absent dans le matériau Mey. Les oxydes  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  représentent en moyenne 85 % en poids global des oxydes de ces matériaux. Les valeurs de CIA sont supérieures à 96 %. Les valeurs du controversé ratio silice sesquioxyde varient entre 0,63 et 1,79 pour une valeur

moyenne 1,14. Les valeurs de IOL sont comprises entre 55,6 et 78,3 %, soit une valeur moyenne de 67,34 %.

Sur le plan géochimique,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sont les oxydes majoritaires des graveleux latéritiques du secteur d'Akonolinga (Fig. 15). Le  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  est l'élément le plus abondant suivi de  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Les teneurs en  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sont plus élevées dans les graveleux latéritiques sur chloritoschistes tandis que  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  qui est plus abondant dans les graveleux latéritiques issus des micaschistes. Les graveleux latéritiques étudiés présentent des valeurs de LOI similaires à savoir dans les matériaux issus des chloritoschistes (12,94 %) et, dans ceux issus des micaschistes (12,29 %). En dehors du FeO qui est plus élevé dans les graveleux latéritiques sur chloritoschistes (0,31 %) que sur micaschistes (0,26 %), tous les autres oxydes présentent des teneurs égales. Les résultats d'analyses chimiques ont également permis la détermination des paramètres normatifs altérologiques (Tab. 15). Les paramètres déterminés sont l'indice d'alumine libre (IAL), l'indice de fer libre (IFL), l'indice relatif d'induration potentielle (IRIP), l'indice relatif de lixiviation potentielle (IRLP), le degré virtuel relatif d'altération de la roche (DVRAR) et l'indice relatif de confinement potentiel (IRCP).

Dans les graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes, les valeurs de IAL sont comprises entre 3,78 et 22,82 % pour une moyenne de 15,05 % ; celles des graveleux latéritiques dérivés des micaschistes, elles varient entre 0 et 20,83 %, pour 11,04 % de moyenne.

Les valeurs de IFL des graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes varient entre 20,40 et 57,79 % pour une valeur moyenne de 40,82 % tandis que, dans les matériaux formés sur micaschistes, elles varient entre 31,10 et 51,80 % pour une moyenne de 45,17 %.

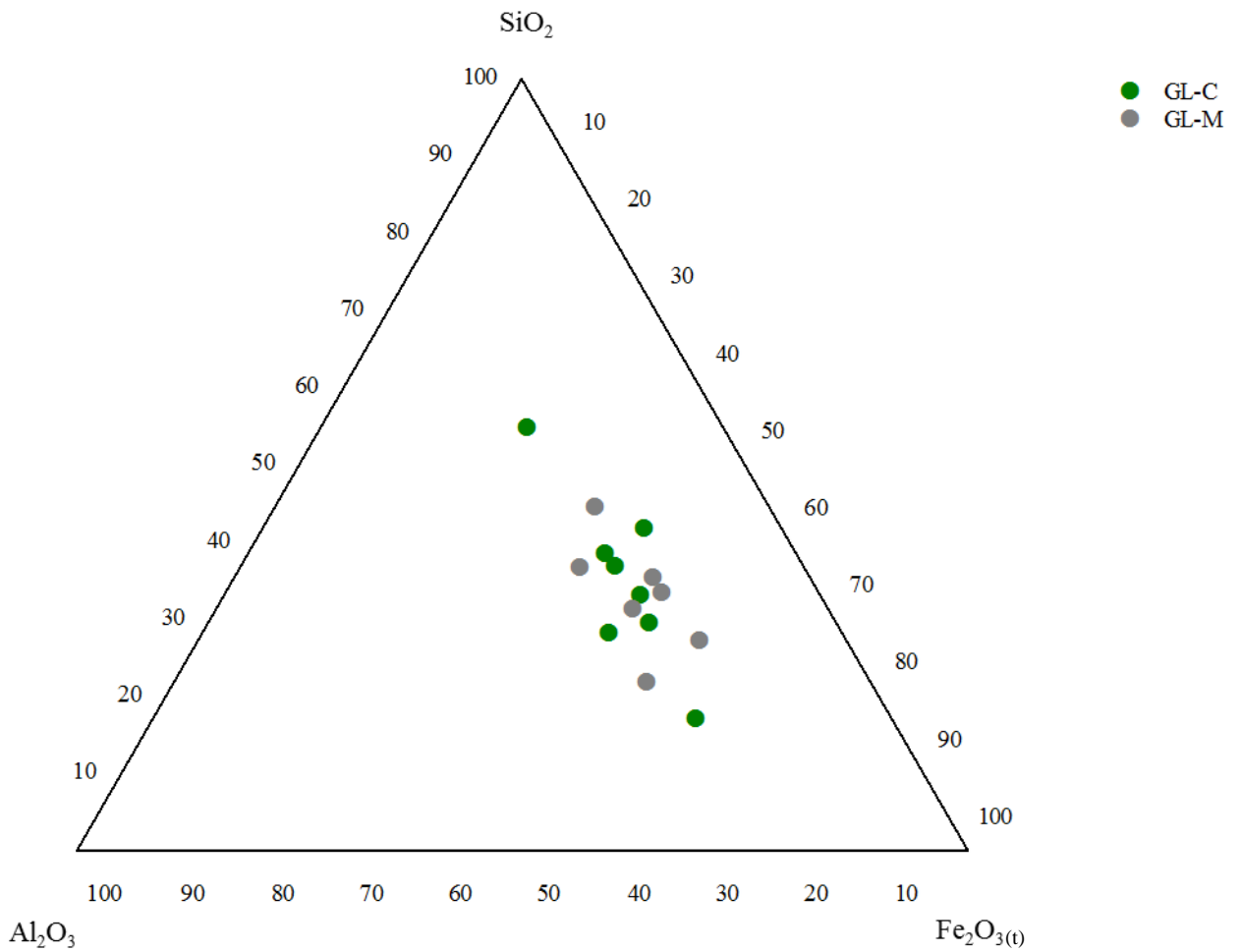
Dans les graveleux latéritiques issus des chloritoschistes, les valeurs de IRIP (I) sont comprises entre 44,60 % et 67,80 % pour 57,10 % de moyenne alors que, dans les matériaux développés sur micaschistes, elles oscillent entre 36,75 et 71,82 %, pour une valeur moyenne de 55,93 %.

Dans les graveleux latéritiques provenant des chloritoschistes, les valeurs de IRLP (L) varient entre 74,56 et 92,59 % pour une moyenne de 84,14 %, tandis que dans les graveleux latéritiques issus des micaschistes, elles oscillent entre 72,44 et 91,64 %, pour 82,06 % de moyenne.

Tableau 14. Données d'analyses chimiques des éléments majeurs et indices chimiques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga

Matériaux	GL-C (N = 8)									GL-M (N = 7)						
	Paramètres	<i>l.d.</i>	Ako2	Ako	Eba	Edo	Mek	Ngo	Nko	Nlo	Ako1	Ebo	Mba	Med	Men	Mey
SiO <sub>2</sub>	<i>0,04</i>	46,50	27,71	25,06	36,66	23,02	30,71	32,44	14,02	27,40	30,45	17,88	23,16	31,66	27,02	37,95
TiO <sub>2</sub>	<i>0,01</i>	1,55	1,32	0,95	0,79	2,03	1,36	1,59	1,42	1,62	1,08	1,46	0,96	1,19	1,37	1,32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<i>0,02</i>	18,86	17,09	18,00	13,49	21,29	17,60	18,39	18,07	14,50	15,42	20,69	14,22	22,08	18,98	16,69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<i>0,1</i>	19,51	39,32	42,38	37,80	37,28	35,08	34,04	50,20	40,50	40,56	43,70	48,37	33,10	40,63	30,51
FeO	<i>0,06</i>	0,20	0,31	0,17	0,17	0,73	0,21	0,50	0,16	0,46	0,26	0,23	0,19	0,15	0,14	0,36
MnO	<i>0,002</i>	0,02	0,04	0,02	0,07	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	0,12	0,01	0,00	0,01
MgO	<i>0,01</i>	0,11	0,13	0,05	0,11	0,11	0,14	0,15	0,08	0,02	0,16	0,15	0,10	0,12	0,08	0,15
CaO	<i>0,006</i>	0,02	0,04	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,02	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03
Na <sub>2</sub> O	<i>0,02</i>	0,07	0,07	0,03	0,02	0,18	0,18	0,21	0,12	0,03	0,04	0,29	0,03	0,04	<0,02	0,20
K <sub>2</sub> O	<i>0,01</i>	0,82	0,37	0,05	0,16	0,31	0,56	0,58	0,29	0,47	0,48	0,49	0,18	0,53	0,18	0,46
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<i>0,002</i>	0,07	0,22	0,25	0,26	0,12	0,37	0,22	0,12	0,15	0,22	0,19	0,45	0,10	0,14	0,14
LOI	<i>0,05</i>	11,57	13,56	12,07	10,81	15,31	13,72	11,78	14,70	13,48	10,84	15,02	12,41	11,02	11,34	11,89
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<i>0,002</i>	–	0,07	0,41	0,11	0,05	0,06	0,08	0,10	–	0,14	0,07	0,12	0,07	0,11	0,05
Total	–	–	100,25	99,46	100,48	100,48	100,05	100,05	99,31	–	99,70	100,22	100,33	100,08	100,01	99,75
SAF, %	–	84,87	84,12	85,44	87,95	81,59	83,39	84,87	82,29	82,40	86,43	82,27	85,75	86,84	86,63	85,15
S/R	–	2,53	1,12	0,95	1,66	0,87	1,31	1,38	0,48	1,16	1,25	0,63	0,87	1,25	1,02	1,79
IOL, %	–	<b>45,4</b>	67,2	70,7	58,4	72,1	63,3	62,0	<b>83,0</b>	67,0	64,9	78,3	73,1	63,6	68,9	55,6
CIA, %	–	96,7	99,6	100	100	98,2	99,5	97,3	98,6	96,1	99,3	99,1	100	98,0	100	96,8

*GL-C : graveleux latéritiques sur chloritoschistes ; GL-M : graveleux latéritiques sur micaschistes ; CIA : chemical index of alteration ; IOL : index of laterisation ; SAF : silice alumine fer ; S/R : rapport silice/sexquioxides*



*GL-C : graveleux latéritiques sur chloritoschistes ; GL-M : graveleux latéritiques sur micaschistes*

Figure 15. Position comparée des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga dans le diagramme géochimique SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3(t)</sub>

Tableau 15. Paramètres altérologiques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga

Matériaux	Echantillons	Paramètres altérologiques, %					
		IAL	IFL	IRIP (I)	IRLP (L)	DVRAR (A)	IRCP (C)
GL-C (N = 8)	Ako2	22,82	20,40	46,67	87,62	39,15	24,34
	Ako	21,63	39,17	67,80	92,59	50,23	13,86
	Eba	9,40	49,55	56,58	79,79	62,71	2,23
	Edo	15,35	38,99	58,53	90,27	37,33	7,93
	Mek	3,78	47,86	44,60	74,56	74,56	7,11
	Ngo	21,54	35,42	62,59	88,65	50,67	21,34
	Nko	15,73	37,35	53,83	80,97	50,27	17,41
	Nlo	10,11	57,79	66,21	78,69	78,69	8,29
	Min.	3,78	20,40	44,60	74,56	37,33	2,23
	Moy.	<b>15,05</b>	<b>40,82</b>	<b>57,10</b>	<b>84,14</b>	<b>55,45</b>	<b>12,81</b>
	Max.	22,82	57,79	67,80	92,59	78,69	24,34
GL-M (N = 7)	Ako1	18,25	41,48	65,92	91,64	52,32	16,73
	Ebo	10,00	45,76	55,31	78,56	49,30	14,44
	Mba	10,03	51,79	57,92	76,19	76,19	13,18
	Med	16,23	49,22	71,82	91,10	50,11	7,25
	Men	0,00	45,01	36,75	72,44	65,97	9,75
	Mey	1,91	51,80	46,94	74,84	66,54	3,77
	Mfo	20,83	31,10	56,87	89,63	40,88	19,91
	Min.	0,00	31,10	36,75	72,44	40,88	3,77
	Moy.	<b>11,04</b>	<b>45,17</b>	<b>55,93</b>	<b>82,06</b>	<b>57,33</b>	<b>12,15</b>
	Max.	20,83	51,80	71,82	91,64	76,19	19,91

*Min.* : valeur minimale ; *Moy.* : valeur moyenne ; *Max.* : valeur maximale ; *GL-C* : graveleux latéritiques sur chloritoschistes ; *GL-M* : graveleux latéritiques sur micaschistes ; *IAL* : indice d'alumine libre ; *IFL* : indice de fer libre ; *IRIP (I)* : indice relatif d'induration potentielle ; *IRLP (L)* : indice relatif de lixiviation potentielle ; *DVRAR (A)* : degré virtuel relatif d'altération de la roche ; *IRCP (C)* : indice relatif de confinement potentiel ; *N* : nombre d'échantillon

Les valeurs du DVRAR (A) varient entre 37,33 et 78,69 % pour une moyenne de 55,45 % dans les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes alors que dans les graveleux latéritiques formés sur micaschistes, ces valeurs vont de 40,88 à 76,19 %, pour une moyenne de 57,33 %.

Dans les graveleux latéritiques formés sur chloritoschistes, les valeurs de IRCP (C) varient entre 2,23 et 24,34 % pour une moyenne de 12,81 %, tandis que dans les graveleux latéritiques développés sur micaschistes, elles oscillent entre 3,77 et 19,91 % pour une valeur moyenne de 12,15 %.

## **II. CARACTERISATION GEOTECHNIQUE DES GRAVELEUX LATÉRIQUES**

Les paramètres géotechniques étudiés sont la masse volumique des grains solides, la granularité, les limites d'Atterberg, la valeur du bleu de méthylène et les caractéristiques de compactage.

### **II.1. Poids volumique des grains solides**

Les valeurs de poids volumique des grains solides des graveleux latéritiques sur chloritoschistes varient entre 2,68 et 3,12  $\text{gf/cm}^3$ , pour une valeur moyenne de 2,86  $\text{gf/cm}^3$  (Tab. 16). Pour les matériaux développés sur micaschistes, les valeurs de ce paramètre oscillent entre 2,75 et 3,05  $\text{gf/cm}^3$ , soit une moyenne de 2,86  $\text{gf/cm}^3$  également. Ces valeurs de poids volumique des grains solides sont typiques de celles des sols latéritiques (Tab 16).

### **II.2. Granularité**

Les graveleux latéritiques sur chloritoschistes sont constitués de teneurs fortes en graviers (48,00 – 72,60 %), faibles à modérées en sables (5,20 – 23,00 %) et en argiles (6,50 – 26,30 %). Les teneurs en limons sont très faibles (1,10 – 3,80 %) tandis que celles en cailloux sont très nulles à modérées (0,00 – 33,10 %) (Tab. 16). Ces graveleux latéritiques se composent donc de 12,80 à 52,00 % de squelette, 11,60 à 42,00 % de mortier et 8,40 à 32,60 % de particules fines, soit 22,08 % de fines en moyenne (Tab. 16).

Les graveleux latéritiques développés sur micaschistes sont constitués de teneurs fortes en graviers (53,00 – 77,10 %), faibles à modérées en sables (6,50 – 26,93 %) et en argiles (10,20 – 25,90 %). Les teneurs en limons sont très faibles (1,80 – 4,90 %) tandis que celles en cailloux présentent des proportions très faibles à modérées (0,00 – 26,50 %) (Tab. 16). Ces matériaux comprennent donc 18,60 à 41,70 % de squelette, 15,40 à 35,30 % de mortier et 13,30 à 33,60 %

Tableau 16. Paramètres géotechniques d'identification des graveleux latéritiques dans la zone d'Akonolinga

Matériaux	Echantillons	$\gamma_s$ (gf/cm <sup>3</sup> )	<2 mm (%)	<425 $\mu$ m (%)	<80 $\mu$ m (%)	<2 $\mu$ m (%)	Limons (%)	Sables (%)	Graviers (%)	Cailloux (%)	LL (%)	IP (%)
GL-C (N = 8)	Ako2	2,86	52,00	42,00	32,90	26,30	2,70	23,00	48,00	0,00	65	34
	Ako	2,85	40,00	32,70	23,70	18,30	3,10	18,60	60,00	0,00	58	24
	Eba	2,83	29,80	16,10	14,20	11,10	1,90	16,80	53,20	17,00	60	24
	Edo	3,12	12,80	11,60	8,40	6,50	1,10	5,20	54,10	33,10	52	20
	Mek	2,77	26,60	20,70	18,70	14,40	2,50	9,70	72,00	1,40	62	23
	Ngo	2,68	42,20	33,70	26,40	20,40	3,40	18,40	57,80	0,00	54	19
	Nko	3,00	42,60	35,60	29,50	22,80	3,80	16,00	57,40	0,00	58	21
	Nlo	2,73	27,40	23,80	22,80	17,70	3,10	6,60	72,60	0,00	68	27
	Min.	2,68	12,80	11,60	8,40	6,50	1,10	5,20	48,00	0,00	52	19
	Moy.	<b>2,86</b>	<b>34,20</b>	<b>27,00</b>	<b>22,10</b>	<b>17,20</b>	<b>2,70</b>	<b>14,30</b>	<b>59,40</b>	<b>6,40</b>	<b>60</b>	<b>24</b>
	Max.	3,12	52,00	42,00	32,90	26,30	3,80	23,00	72,60	33,10	68	34
GL-M (N = 7)	Ako1	3,05	41,70	33,00	25,00	16,30	4,90	20,50	58,30	0,00	55	27
	Ebo	3,00	28,70	21,10	15,20	11,80	1,90	15,00	71,30	0,00	47	13
	Mba	2,75	37,90	35,30	33,60	25,90	4,40	7,60	62,10	0,00	66	21
	Med	2,76	18,70	16,80	13,30	10,20	1,80	6,70	77,10	4,20	53	23
	Men	2,83	18,60	15,40	13,40	10,30	1,80	6,50	54,90	26,50	56	12
	Mey	2,82	31,00	26,50	22,10	17,10	2,90	11,00	66,70	2,30	55	17
	Mfo	2,82	46,20	33,50	21,10	16,40	2,90	26,90	53,00	0,80	49	14
	Min.	2,75	18,60	15,40	13,30	10,20	1,80	6,50	53,00	0,00	47	12
	Moy.	<b>2,86</b>	<b>31,80</b>	<b>25,90</b>	<b>20,50</b>	<b>15,40</b>	<b>2,90</b>	<b>13,50</b>	<b>63,30</b>	<b>4,80</b>	<b>54</b>	<b>18</b>
	Max.	3,05	46,20	35,30	33,60	25,90	4,90	26,90	77,10	26,50	66	27

GL-C : graveleux latéritiques sur chloritoschistes ; GL-M : graveleux latéritiques sur micascistes ; <2 mm (%) : squelette ; <425  $\mu$ m (%) : mortier ; <80  $\mu$ m (%) : teneur en particules fines ; <2  $\mu$ m (%) : teneur en argiles.  $\rho_s$  : masse volumique des grains solides ; LL : limite de liquidité ; IP : indice de plasticité ; Min. : valeur minimale ; Moy. : valeur moyenne ; Max. : valeur maximale ; N : nombre d'échantillons



de particules fines, soit 20,52 % de fines en moyenne (Tab. 15). Les graveleux latéritiques sur micaschistes sont moins fins que ceux développés sur chloritoschistes.

### **II.3. Caractéristiques de plasticité**

Les valeurs de limite de liquidité LL dans les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes varient entre 52 % et 68 %, soit une moyenne de 60 % (Tab. 15). Les valeurs correspondantes d'indice de plasticité IP sont comprises entre 19 % et 34 %, pour une moyenne de 24 % (Tab. 16).

Dans les graveleux latéritiques dérivés des micaschistes, les valeurs de LL des graveleux latéritiques sont comprises entre 47 % et 66 %, soit une moyenne de 54 % (Tab. 16). Celles de IP varient entre 12 % et 27 %, soit 18 % de moyenne. Les graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes sont plus plastiques que ceux développés sur micaschistes.

### **II.4. Valeur du bleu de méthylène**

Les valeurs de VBS des graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes sont comprises entre 6,50 et 10,00 g/100g, soit une moyenne de 7,66 g/100g. Pour les graveleux latéritiques sur micaschistes, les valeurs de ce paramètre oscillent entre 3,75 et 7,25 g/100g, pour une valeur moyenne de 6,07 g/100g (Tab. 17). Ce résultat confirme les données de granularité.

### **II.5. Paramètres dérivés**

Les paramètres dérivés étudiés sont l'activité de la fraction argileuse (Acb), l'activité de Skempton (Ac), le module de classement (Gm), le produit de plasticité (Pp), le module de plasticité (Pm) et le potentiel de gonflement ( $\epsilon_s$ ).

L'activité des colloïdes de Skempton (Ac) des matériaux développés sur chloritoschistes présente des valeurs comprises entre 0,92 et 3,08 pour 1,60 de moyenne (Tab. 18). L'activité de bleu de la fraction argileuse (Acb) des graveleux latéritiques sur chloritoschistes présente des valeurs comprises entre 0,26 et 1,19 (Tab. 18). Les valeurs du module de classement (Gm) des graveleux latéritiques étudiés oscillent entre 1,73 et 2,67 pour une valeur moyenne de 2,17. Les limites d'Atterberg et l'activité des colloïdes ont été identifiés comme reflétant la véritable influence de la composition chimique et minéralogique des sols (Gidigas, 1991). Les valeurs du produit de plasticité (Pp) des graveleux latéritiques sur chloritoschistes varient entre 166 et 1119 (Tab. 18). La valeur moyenne du module de plasticité (Pm) des matériaux sur chloritoschistes est de 668. Les valeurs de ce paramètre

Tableau 17. Valeurs au bleu de méthylène (VBS) des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga

Matériaux	Echantillons	VBS (g/100g)
GL-C (N = 8)	Ako2	6,75
	Ako	6,50
	Eba	10,00
	Edo	7,75
	Mek	6,75
	Ngo	6,75
	Nko	7,50
	Nlo	9,25
	Min.	6,50
	Moy.	<b>7,66</b>
Max.	10,00	
GL-M (N = 7)	Ako1	4,75
	Ebo	7,00
	Mba	7,00
	Med	6,25
	Men	6,50
	Mey	7,25
	Mfo	3,75
	Min.	3,75
	Moy.	<b>6,07</b>
Max.	7,25	

*GL-C : graveleux latéritiques sur chloritoschistes ; GL-M : graveleux latéritiques sur micaschistes ; Min. : valeur minimale ; Moy. : valeur moyenne ; Max. : valeur maximale ; N : nombre d'échantillon*

Tableau 18. Valeurs des paramètres dérivés des graveleux latéritiques dans la zone d'Akonolinga

Substratum	Paramètres	Ac	Acb	Gm	Pm	Pp	$\varepsilon_s$
GL-C (N = 8)	Ako2	1,29	0,26	1,73	1428	1119	0,027
	Ako	1,31	0,36	2,04	785	569	0,012
	Eba	2,16	0,90	2,40	387	341	0,012
	Edo	3,08	1,19	2,67	232	168	0,008
	Mek	1,60	0,47	2,34	476	430	0,011
	Ngo	0,93	0,33	1,98	640	502	0,007
	Nko	0,92	0,33	1,92	748	620	0,009
	Nlo	1,53	0,52	2,26	644	616	0,016
	Min.	0,92	0,26	1,73	232	168	0,007
	Moy.	<b>1,60</b>	<b>0,55</b>	<b>2,17</b>	<b>668</b>	<b>546</b>	<b>0,013</b>
Max.	3,08	1,19	2,67	1428	1119	0,027	
GL-M (N = 7)	Ako1	1,66	0,35	2,00	891	675	0,016
	Ebo	1,10	0,59	2,35	274	198	0,003
	Mba	0,81	0,27	1,93	741	706	0,009
	Med	2,25	0,61	2,51	386	306	0,011
	Men	1,17	0,63	2,53	185	161	0,003
	Mey	0,99	0,42	2,20	451	376	0,006
	Mfo	0,85	0,24	1,99	457	295	0,004
	Min.	0,81	0,24	1,93	185	161	0,003
	Moy.	<b>1,26</b>	<b>0,44</b>	<b>2,22</b>	<b>484</b>	<b>388</b>	<b>0,007</b>
	Max.	2,25	0,63	2,53	891	706	0,016

*GL-C : graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes ; GL-M : graveleux latéritiques dérivés des micaschistes ; Min. : valeur minimale ; Moy. : valeur moyenne ; Max. : valeur maximale ; N : nombre d'échantillon ; Acb : activité de bleu de la fraction argileuse ; Gm : module de classement ; Ac : activité des colloïdes de Skempton ; Pm : module de plasticité ; Pp : produit de plasticité ;  $\varepsilon_s$  : potentiel de gonflement*

varient entre 232 et 1428 (Tab. 18). Le gonflement est un caractère important pour l'utilisation des matériaux (Mahalinga-Iyer et Williams, 1997 ; Bell, 1996). Les valeurs du potentiel de gonflement ( $\epsilon_s$ ) des graveleux latéritiques sur chloritoschistes sont faibles et varient entre 0,010 et 0,030 (Tab. 18).

Pour les graveleux latéritiques sur micaschistes, l'activité des colloïdes de Skempton ( $A_c$ ) des matériaux sur micaschistes présente des valeurs comprises entre 0,81 et 2,25 pour une moyenne de 1,26. L'activité de bleu de la fraction argileuse présente des valeurs comprises entre 0,24 et 0,63 pour une moyenne de 0,44 (Tab. 2). Les valeurs du module de classement ( $G_m$ ) des graveleux latéritiques sur micaschistes oscillent entre 1,93 et 2,53 et présentent une valeur moyenne de 2,22 (Tab. 18). Les valeurs de ce paramètre varient entre 185 et 891. Les valeurs du produit de plasticité ( $P_p$ ) des graveleux latéritiques sur micaschistes varient entre 161 et 706 pour une moyenne de 388. Le module de plasticité ( $P_m$ ) moyen des matériaux étudiés sur micaschistes est de 484. Les valeurs du potentiel de gonflement ( $\epsilon_s$ ) dans ces matériaux oscillent entre 0,003 et 0,016 pour une valeur moyenne de 0,007.

## **II.6. Classification**

Selon la classification HRB, 100 % des graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes sont des graviers et sables limoneux ou argileux appartenant à la classe A-2-7 (Tab. 19). Les matériaux sur chloritoschistes couvrent toutes les classes classification CEBTP-ISTED.

Les matériaux développés sur micaschistes sont également à 100 % des graviers et sables limoneux ou argileux appartenant à la classe A-2-7 d'après la classification HRB. Les graveleux latéritiques développés sur micaschistes couvrent toutes les classes de la classification CEBTP-ISTED (Tab. 19).

## **II.7. Paramètres de compactage**

Les valeurs de teneur en eau à l'optimum Proctor modifié TE – OPM varient de 10,50 et 16,00 % (Tab. 20) pour une moyenne de 13,00 % dans les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes tandis que, dans les matériaux issus des micaschistes, elles oscillent entre 8,20 et 16,70 % pour 11,10 % de de moyenne.

Les graveleux latéritiques sur chloritoschistes présentent des valeurs de densité sèche maximale DSM comprises entre 1,84 et 2,34, pour une moyenne de 2,06 tandis que, dans les graveleux latéritiques développés sur micaschistes, elles varient entre 1,87 et 2,27 pour 2,12 de moyenne (Tab. 20).

Tableau 19. Classification des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga

Matériaux	Echantillons	HRB	CEBTP/ISTED
GL-C (N = 8)	Ako2	A-2-7 (4)	GL3
	Ako	A-2-7 (0)	GL2
	Eba	A-2-7 (0)	GL2
	Edo	A-2-7 (0)	GL1
	Mek	A-2-7 (0)	GL2
	Ngo	A-2-7 (0)	GL2
	Nko	A-2-7 (0)	GL3
	Nlo	A-2-7 (0)	GL3
GL-M (N = 7)	Ako1	A-2-7 (0)	GL2
	Ebo	A-2-7 (0)	GL1
	Mba	A-2-7 (2)	GL3
	Med	A-2-7 (0)	GL2
	Men	A-2-7 (0)	GL1
	Mey	A-2-7 (0)	GL2
	Mfo	A-2-7 (0)	GL2

*GL-C* : graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes ; *GL-M* : graveleux latéritiques dérivés des micaschistes ; *N* : nombre d'échantillon

Tableau 20. Caractéristiques de compactage des graveleux latéritiques dans la zone d'Akonolinga

Matériaux	Echantillons	TE – OPM (%)	DSM	CBR (%)
GL-C (N = 8)	Ako2	16,00	1,84	42
	Ako	12,90	2,03	58
	Eba	11,60	2,19	69
	Edo	10,50	2,34	36
	Mek	13,50	2,00	78
	Ngo	11,80	2,01	38
	Nko	12,30	2,16	48
	Nlo	15,30	1,92	60
	Min.	10,50	1,84	36
	Moy.	<b>13,00</b>	<b>2,06</b>	<b>54</b>
	Max.	16,00	2,34	78
GL-M (N = 7)	Ako1	11,50	2,11	49
	Ebo	9,50	2,22	80
	Mba	16,70	1,87	43
	Med	8,20	2,26	65
	Men	11,30	2,11	58
	Mey	8,80	2,18	78
	Mfo	11,90	2,10	66
	Min.	8,20	1,87	43
	Moy.	<b>11,10</b>	<b>2,12</b>	<b>63</b>
	Max.	16,70	2,26	80

*GL-C : graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes ; GL-M : graveleux latéritiques dérivés des micaschistes ; Min. : valeur minimale ; Moy. : valeur moyenne ; Max. : valeur maximale ; N : nombre d'échantillon ; TEO – OPM : teneur en eau à l'optimum Proctor modifié ; DSM : densité sèche maximale ; CBR : Californian bearing ratio*

Dans les graveleux latéritiques issus des chloritoschistes, les valeurs de CBR sont comprises entre 36 et 78 %, soit une moyenne de 54 % tandis que, dans les graveleux latéritiques sur micaschistes, elles oscillent entre 43 et 80 % pour une moyenne de 63 % (Tab. 20).

### III. VARIABILITE DES PROPRIETES GEOCHIMIQUES ET GEOTECHNIQUES

La base des données a été élargi en utilisant les résultats géotechniques des travaux antérieurs effectués dans la zone d'étude (Kamtchueng *et al.*, 2015). Le nombre d'échantillons passe ainsi à 42, soit 22 sur chloritoschistes et 20 sur micaschistes. Les données brutes figurent dans des tableaux rassemblés en annexe. Ces données et analyses se rapportent à :

- quatorze (14) paramètres géochimiques à savoir les teneurs en SiO<sub>2</sub>, en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en fer ferrique Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, la perte au feu (LOI), *Chemical index of alteration* (CIA), la teneur en oxydes majoritaires (SAF), le rapport S/R, *index of lateritisation* (IOL), l'indice relatif de lixiviation potentielle (IRLP), le degré virtuel relatif d'altération de la roche (DVRAR), l'indice relatif d'induration potentielle (IRIP), l'importance potentielle de l'alumine libre (IAL), l'importance potentielle de fer libre (IFL) et l'indice relatif de confinement potentiel (IRCP) ;
- vingt-un paramètres géotechniques : la masse volumique des grains solides ( $\rho_s$ ), le squelette (<2 mm), le mortier (<425  $\mu$ m), la teneur en fines (<80  $\mu$ m), argiles (<2  $\mu$ m), limons, sables, graviers, cailloux, la valeur de bleu (VBS), l'activité de la valeur de bleu (Acb), la limite de liquidité (LL), l'indice de plasticité (IP), le module de classement (Gm), l'activité des colloïdes de Skempton (Ac), le module de plasticité (Pm), le produit de plasticité (Pp), le potentiel de gonflement ( $\epsilon_s$ ), la teneur en eau à l'optimum Proctor modifié (TE – OPM), la densité sèche maximale (DSM) et l'indice de portance californien (CBR).

#### III.1. Coefficient de variation

##### III.1.1. Paramètres minéralogiques

Les valeurs de coefficient de variation des paramètres minéralogiques ont été obtenues en totalisant le corindon en gibbsite. Les résultats obtenus montrent que, la gibbsite est le paramètre qui varie le plus, tandis la teneur en muscovite est le paramètre qui varie le moins dans les deux types de matériaux (Tab. 21). Le fait est similaire pour les graveleux latéritiques développés sur micaschistes. La variation des teneurs en quartz, kaolinite et hématite présente des valeurs comprises entre 15 et 35, pour les matériaux développés sur chloritoschistes et, est

Tableau 21. Données récapitulatives des paramètres minéralogiques

Matériaux	Nombre d'échantillons	Variables	Quartz	Kaolinite	Muscovite	Gibbsite	Hématite	Goethite
GL-C	N = 8	Min.	10,20	12,60	17,50	2,20	5,10	7,00
		Max.	21,50	25,40	36,00	20,80	11,80	24,50
		$\sigma$	3,58	4,09	5,50	7,39	2,38	5,38
		Moy.	14,95	16,63	23,96	13,60	8,71	16,03
		CV	23,95	24,57	22,97	54,36	27,34	33,60
GL-M	N = 7	Min.	6,80	14,03	14,30	1,90	2,06	8,00
		Max.	20,75	38,50	31,00	18,04	10,50	25,80
		$\sigma$	4,87	8,43	5,90	6,62	2,98	5,60
		Moy.	12,94	23,93	21,28	10,16	8,41	16,59
		CV	37,63	35,24	27,71	65,17	35,44	33,76

*GL-C : graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes ; GL-M : graveleux latéritiques dérivés des micaschistes ; Min. : valeur minimale ; Moy. : valeur moyenne ; Max. : valeur maximale ; N : nombre d'échantillon ; CV : coefficient de variation =  $[(\sigma/\text{Moyenne}) \times 100]$  ;  $\sigma$  : écart-type*



supérieure à 35 pour les graveleux latéritiques sur micaschistes (Tab. 21). Pour tous les paramètres minéralogiques, les valeurs de coefficient de variation sont plus élevées dans les matériaux sur micaschistes comparativement à celles des graveleux latéritiques issus des chloritoschistes (Tab. 21).

### **III.1.2. Paramètres géochimiques**

Les valeurs de coefficient de variation montrent que, sur chloritoschistes, parmi les oxydes majoritaires et les indices chimiques, le ratio S/R (CV = 47,88) et SiO<sub>2</sub> (CV = 32,77) sont les paramètres qui varient le plus, tandis que CIA (CV = 1,26) et SAF (CV = 2,35) sont ceux qui varient le moins (Tab. 22). Le fait est similaire pour les graveleux latéritiques développés sur micaschistes. La variation de la teneur en alumine est supérieure à 15 pour les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes et comprise entre 15 et 35 pour ceux dérivés des micaschistes (Tab. 22). Le fait est contraire pour IOL. La variation du ratio S/R présente des valeurs comprises entre 15 et 35, pour les matériaux développés sur chloritoschistes et, est supérieure à 35 pour les graveleux latéritiques sur micaschistes (Tab. 21). Pour les paramètres altérologiques, IRCP (CV = 60,21) et IAL (CV = 72,31) sont les paramètres qui varient le plus respectivement pour les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes et ceux dérivés des micaschistes (Tab. 22). Pour les deux types de matériaux, la variation est la même pour les autres paramètres altérologiques : inférieure à 15 pour IRLP, comprise entre 15 et 35 pour IFL, DVRAR et IRIP. Les valeurs de ce paramètre sont supérieures à 35 pour les paramètres IAL et IRCP (Tab. 22).

### **III.1.3. Paramètres géotechniques**

L'étude a été effectuée sur 13 paramètres géotechniques, après élimination des teneurs en argiles (<2 μm), limons, sables, graviers, cailloux, la valeur de bleu (VBS), l'activité de la valeur de bleu (Acb) et l'activité des colloïdes de Skempton (Ac). Les valeurs de coefficient de variation obtenues montrent que le poids volumique des grains solides et la densité sèche maximale (DSM) sont les paramètres les moins variables sur les graveleux latéritiques étudiés sur micaschistes et sur chloritoschistes (Tab. 23). Par contre, et P<sub>m</sub> (CV = 56,97) et ε<sub>s</sub> (CV = 69,96) sont les paramètres qui varient le plus respectivement sur les graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes et micaschistes (Tab. 23).

Tableau 22. Données récapitulatives des paramètres géochimiques

Matériaux	Nombre d'échantillons	Variables	SiO <sub>2</sub> , %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	LOI, %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	SAF, %	S/R	IOL, %	CIA, %	IRLP, %	DVRAR, %	IRIP, %	IAL, %	IFL, %	IRCP, %
GL-C	N = 8	Min.	14,02	13,49	10,81	19,51	81,59	0,48	45,40	96,7	74,56	37,33	44,60	3,78	20,40	2,23
		Max.	46,50	21,29	15,31	50,20	87,95	2,53	83,00	100	92,59	78,69	67,80	22,82	57,79	24,34
		Moy.	29,52	17,85	12,94	36,95	84,32	1,29	65,26	98,7	84,14	55,45	57,10	15,05	40,82	12,81
		σ	9,67	2,17	1,61	8,68	1,98	0,62	11,02	1,25	6,46	15,25	8,50	6,86	11,20	7,71
		CV	32,77	12,14	12,47	23,50	2,35	47,88	16,89	1,26	7,67	27,51	14,88	45,61	27,44	60,21
GL-M	N = 7	Min.	17,88	14,22	10,84	30,51	82,27	0,63	55,60	96,1	72,44	40,92	36,75	0,00	31,10	3,77
		Max.	37,95	22,08	15,02	48,37	86,84	1,79	78,30	100	91,64	76,19	71,82	20,83	51,80	19,93
		Moy.	27,93	17,51	12,29	39,62	85,07	1,14	67,34	98,5	82,07	57,19	55,95	11,04	45,17	12,15
		σ	6,40	3,11	1,51	6,07	1,95	0,36	7,23	1,55	8,40	12,30	11,59	7,98	7,26	5,59
		CV	22,90	17,77	12,28	15,33	2,29	31,96	10,74	1,58	10,24	21,51	20,72	72,31	16,07	46,05

*GL-C : graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes ; GL-M : graveleux latéritiques dérivés des micaschistes ; Min. : valeur minimale ; Moy. : valeur moyenne ; Max. : valeur maximale ; N : nombre d'échantillon ; CV : coefficient de variation =  $[(\sigma/\text{Moyenne}) \times 100]$  ;  $\sigma$  : écart-type*

Tableau 23. Données récapitulatives des paramètres géotechniques

Matériaux	Nombre d'échantillon	Variables	Poids volumique des grains solides	Squelette (<2 mm), %	Mortier (<425 µm), %	Fines (<80 µm), %	LL (%)	IP (%)	Gm	Pm	Pp	ε <sub>s</sub>	TE – OPM (%)	DSM	CBR (%)
GL-C	22	Min.	2,61	12,80	11,60	6,10	47	11	1,46	232	168	0,002	7,20	1,84	25
		Max.	3,12	71,00	51,70	33,40	72	39	2,67	2016	1213	0,037	18,00	2,34	88
		Moy.	2,83	41,26	30,37	22,59	62	27	2,06	868	637	0,018	12,79	2,06	50
		σ	0,10	16,81	11,31	7,57	7,24	6,83	0,35	494,41	323,29	0,009	2,60	0,14	14,71
		CV (%)	3,64	40,73	37,23	33,51	11,70	25,12	16,84	56,97	50,72	51,33	20,30	6,72	29,15
GL-M	20	Min.	2,75	18,60	15,40	13,30	45	11	1,77	185	161	0,002	8,20	1,87	24
		Max.	3,05	60,80	43,01	33,60	66	28	2,53	918	755	0,017	16,70	2,26	84
		Moy.	2,84	39,85	29,80	21,50	52	18	2,09	517	389	0,007	11,78	2,10	62
		σ	0,07	13,86	8,59	5,59	5,82	5,58	0,25	203,53	190,40	0,005	2,01	0,09	16,38
		CV (%)	2,54	34,78	28,81	25,98	11,13	31,68	11,81	39,37	48,93	69,96	17,10	4,19	26,63

GL-C : graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes ; GL-M : graveleux latéritiques dérivés des micaschistes ; Min. : valeur minimale ; Moy. : valeur moyenne ; Max. : valeur maximale ; N : nombre d'échantillon ; CV : coefficient de variation =  $[(\sigma/\text{Moyenne}) \times 100]$  ; σ : écart-type ; Gm : module de classement ; Pm : module de plasticité ; Pp : produit de plasticité ; ε<sub>s</sub> : potentiel de gonflement ; TE – OPM : teneur en eau à l'optimum Proctor modifié ; DSM : densité sèche maximale ; CBR : Californian bearing ratio

## III.2. Analyses de régression

### III.2.1. Relations entre paramètres géochimiques

Sur les grèveux latéritiques développés sur chloritoschistes,  $\text{SiO}_2$  est lié à  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  par une relation linéaire (Tab. 24). La teneur en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et LOI sont liées à SAF par une relation linéaire (Tab. 24). Il en est de même pour S/R et IOL (Tab. 24). Le rapport S/R et IOL sont liés à  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  par une relation linéaire (Tab. 24).

Pour les grèveux latéritiques dérivés des micaschistes,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  est lié à  $\text{SiO}_2$  par une relation linéaire (Tab. 24). Le rapport S/R et le paramètre IOL sont liés par une relation linéaire (Tab. 24). Les paramètres S/R et IOL sont également liés à  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  par une relation linéaire (Tab. 24).

Les paramètres géochimiques sont fortement corrélés entre eux (Tab. 24). Sur chloritoschistes, le paramètre  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  est fortement corrélé à  $\text{SiO}_2$ , SR et IOL. Sur micaschistes, ces paramètres sont moyennement corrélés à  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . La relation  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vs SAF présente dans les matériaux sur chloritoschistes est absente dans les grèveux latéritiques développés sur micaschistes (Tab. 24).

Sur les matériaux dérivés des chloritoschistes, IAL est lié aux paramètres IRLP et IRCP par une relation linéaire et, à IFL, par une polynomiale d'ordre 2 (Tab. 24). L'indice de fer libre IFL est lié aux paramètres DVRAR et IRCP, par une relation linéaire. Le degré virtuel relatif d'altération DVRAR est lié à IRLP par une relation linéaire directe (Tab. 24). Le paramètre IAL évolue avec les phénomènes de lixiviation ( $R^2_{\text{IAL-IRLP}} = 0,76$ ). L'importance du fer libre (IFL) a tendance à évoluer avec l'altération ( $R^2_{\text{IFL-DVRAR}} = 0,71$ ). Ces évolutions traduisent une relation entre IAL et IFL ( $R^2_{\text{IAL-IFL}} = 0,69$ ). Dans les grèveux latéritiques développés sur chloritoschistes, l'altération est liée à la lixiviation ( $R^2_{\text{DVRAR-IRLP}} = 0,66$ ).

Pour les grèveux latéritiques développés sur micaschistes, le paramètre IAL est lié à IRIP et IRLP par une relation linéaire (Tab. 24). Le paramètre IAL évolue avec les phénomènes d'induration et de lixiviation ( $R^2_{\text{IAL-IRIP}} = 0,68$ ,  $R^2_{\text{IAL-IRLP}} = 0,86$ ). Les paramètres normatifs sont peu liés entre eux sur les grèveux latéritiques dérivés des micaschistes comparativement à ceux développés sur chloritoschistes (Tab. 24). Cependant, les paramètres IAL et IRLP sont fortement corrélés dans les matériaux développés sur micaschistes (Tab. 24).

Pour les matériaux développés sur chloritoschistes, IFL et DVRAR sont liés aux paramètres  $\text{SiO}_2$ , S/R et IOL, par une relation linéaire (Tab. 24). La somme des oxydes majoritaires (SAF) est liée à DVRAR par une polynomiale d'ordre 2 (Tab. 24).

Tableau 24. Données récapitulatives des relations entre paramètres géochimiques

Matériaux					GL-M (N = 7)			
GL-C (N = 8)					GL-M (N = 7)			
Relations	Type	Equation	Coefficient de détermination	Domaine d'étude	Type	Equation	Coefficient de détermination	Domaine d'étude
SiO <sub>2</sub> - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Linéaire	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = -0,8197SiO <sub>2</sub> + 61,144	R <sup>2</sup> = 0,834	SiO <sub>2</sub> ∈ [14,02 – 46,50]	Linéaire	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 0,8038SiO <sub>2</sub> + 62,078	R <sup>2</sup> = 0,7166	SiO <sub>2</sub> ∈ [17,88 – 37,95]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SAF	Linéaire	SAF = -0,7381Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 97,49	R <sup>2</sup> = 0,6508	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ∈ [13,49 – 21,29]	-	-	-	-
LOI - SAF	Linéaire	SAF = -1,1518LOI + 99,219	R <sup>2</sup> = 0,8787	SiO <sub>2</sub> ∈ [14,02 – 46,50]	Linéaire	SAF = -1,2059LOI + 99,882	R <sup>2</sup> = 0,8692	LOI ∈ [10,84 – 15,02]
S/R - IOL	Linéaire	IOL = -17,639SR + 87,973	R <sup>2</sup> = 0,9727	S/R ∈ [0,48 – 2,53]	Linéaire	IOL = -19,698S/R + 89,77	R <sup>2</sup> = 0,9829	S/R ∈ [0,63 – 1,79]
S/R - SiO <sub>2</sub>	Linéaire	SR = 0,0627SiO <sub>2</sub> - 0,5644	R <sup>2</sup> = 0,9693	SiO <sub>2</sub> ∈ [14,02 – 46,50]	Linéaire	S/R = 0,0558SiO <sub>2</sub> - 0,4214	R <sup>2</sup> = 0,9639	SiO <sub>2</sub> ∈ [17,88 – 37,95]
S/R - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Linéaire	SR = 0,0658Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 3,7198	R <sup>2</sup> = 0,8595	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ∈ [19,51 – 50,20]	Linéaire	S/R = -0,0501Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 3,1221	R <sup>2</sup> = 0,6982	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ∈ [30,51 – 48,37]
IOL - SiO <sub>2</sub>	Linéaire	IOL = -1,138SiO <sub>2</sub> + 98,849	R <sup>2</sup> = 0,9968	SiO <sub>2</sub> ∈ [14,02 – 46,50]	Linéaire	IOL = -1,1265SiO <sub>2</sub> + 98,809	R <sup>2</sup> = 0,9936	SiO <sub>2</sub> ∈ [17,88 – 37,95]
IOL - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Linéaire	IOL = 1,1848Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 21,482	R <sup>2</sup> = 0,8706	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ∈ [19,51 – 50,20]	Linéaire	IOL = 1,0183Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 26,994	R <sup>2</sup> = 0,732	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ∈ [30,51 – 48,37]
IAL - IRLP	Linéaire	IRLP = 0,8222IAL + 71,773	R <sup>2</sup> = 0,7635	IAL ∈ [3,78 – 22,82]	Linéaire	IRLP = 0,9751IAL + 71,308	R <sup>2</sup> = 0,858	IAL ∈ [0,00 – 20,83]
IAL - IFL	Polynomiale 2	IFL = -0,08451IAL <sup>2</sup> + 1,0882IAL + 47,042	R <sup>2</sup> = 0,6902	IAL ∈ [3,78 – 22,82]	-	-	-	-
IAL - IRIP	-	-	-	-	Linéaire	IRIP = 1,1966IAL + 42,743	R <sup>2</sup> = 0,6785	IAL ∈ [0,00 – 20,83]
IFL - DVRAR	Linéaire	DVRAR = 1,1511IFL + 8,4662	R <sup>2</sup> = 0,7142	IFL ∈ [20,40 – 57,79]	-	-	-	-
DVRAR - IRLP	Linéaire	IRLP = -0,3428DVRAR + 103,15	R <sup>2</sup> = 0,6557	DVRAR ∈ [37,33 – 78,69]	-	-	-	-
SiO <sub>2</sub> - IFL	Linéaire	IFL = -1,1011SiO <sub>2</sub> + 73,314	R <sup>2</sup> = 0,9043	SiO <sub>2</sub> ∈ [14,02 – 46,50]	Linéaire	IFL = -0,9368SiO <sub>2</sub> + 71,333	R <sup>2</sup> = 0,6816	SiO <sub>2</sub> ∈ [17,88 – 37,95]
SiO <sub>2</sub> - DVRAR	Linéaire	DVRAR = -1,4267SiO <sub>2</sub> + 97,559	R <sup>2</sup> = 0,8183	SiO <sub>2</sub> ∈ [14,02 – 46,50]	-	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - IFL	Linéaire	IFL = 1,2233Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 4,3865	R <sup>2</sup> = 0,8993	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ∈ [19,51 – 50,20]	-	-	-	-
S/R - IFL	Linéaire	IFL = -17,222SR + 62,989	R <sup>2</sup> = 0,8985	S/R ∈ [0,48 – 2,53]	Linéaire	IFL = -18,172S/R + 65,856	R <sup>2</sup> = 0,8299	S/R ∈ [0,63 – 1,79]
S/R - DVRAR	Linéaire	DVRAR = -21,019SR + 82,513	R <sup>2</sup> = 0,7214	S/R ∈ [0,48 – 2,53]	-	-	-	-
IOL - IFL	Linéaire	IFL = 0,9796IOL - 23,118	R <sup>2</sup> = 0,93	IOL ∈ [45,40 – 83,00]	Linéaire	IFL = 0,8667IOL - 13,202	R <sup>2</sup> = 0,7452	IOL ∈ [55,60 – 78,30]
IOL - DVRAR	Linéaire	DVRAR = 1,2302IOL - 24,833	R <sup>2</sup> = 0,7904	IOL ∈ [45,40 – 83,00]	-	-	-	-
SAF - DVRAR	Polynomiale 2	DVRAR = 0,8437SAF <sup>2</sup> - 148,83SAF + 6603,6	R <sup>2</sup> = 0,6559	SAF ∈ [81,59 – 87,95]	-	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - IRIP	-	-	-	-	Linéaire	IRIP = -3,038Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 109,15	R <sup>2</sup> = 0,6647	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ∈ [14,22 – 22,08]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - IRLP	-	-	-	-	Linéaire	IRLP = -2,2516Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 121,5	R <sup>2</sup> = 0,6955	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ∈ [14,22 – 22,08]
CIA - IRCP	-	-	-	-	Polynomiale 2	IRCP = -0,7673CIA <sup>2</sup> + 147,74CIA - 7093,6	R <sup>2</sup> = 0,6583	CIA ∈ [96,05 – 100]

- : pas de relation observée, GL-C : graveleux latéritiques sur chloritoschistes ; GL-M : graveleux latéritiques sur micaschistes ; CIA : chemical index of alteration ; DVRAR : degré virtuel relatif d'altération de la roche ; IAL : indice d'alumine libre ; IFL : indice de fer libre ; IOL : index of lateritisation, IRCP : indice relatif de confinement potentiel ; IRIP : indice relatif d'induration potentielle ; IRLP : indice relatif de lixiviation potentielle ; SAF : silice alumine fer

Sur micaschistes, les paramètres IFL et SiO<sub>2</sub> sont liés par une relation linéaire inverse ( $R^2 = 0,68$ ). La teneur en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> est liée à IRIP ( $R^2 = 0,66$ ) et IRLP ( $R^2 = 0,70$ ) par une relation linéaire. Le paramètre IFL est lié à S/R ( $R^2 = 0,83$ ) et IOL ( $R^2 = 0,75$ ), par une relation linéaire. Le paramètre IRCP est lié à CIA ( $R^2 = 0,66$ ), par une polynomiale d'ordre 2 (Tab. 24).

Les paramètres IFL et S/R sont fortement corrélés sur chloritoschistes et sur micaschistes. Sur chloritoschistes, IFL est fortement corrélé à SiO<sub>2</sub> ( $R^2 = 0,90$ ), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $R^2 = 0,90$ ) et IOL ( $R^2 = 0,93$ ) ; il en est de même de la relation DVRAR vs. SiO<sub>2</sub> (Tab. 24).

### III.2.2. Relations entre paramètres géotechniques

Les relations entre les paramètres géotechniques sont présentées dans le tableau 25. Les figures des regressions ainsi obtenues sont consignées en annexe.

Sur chloritoschistes, les valeurs de Gm sont liées à celles des paramètres squelette (<2 mm), mortier (<425 µm) et fines (<80 µm) par une relation linéaire (Tab. 25). Le paramètre fines (<80 µm) est lié au squelette (<2 mm) et au mortier (<425 µm) par une relation linéaire. L'indice de plasticité (IP) est lié à LL par une relation linéaire. Le module Pm est lié aux paramètres squelette (<2 mm), mortier (<425 µm), PI, et Gm par une relation linéaire et, à la teneur en fines (<80 µm), par une polynomiale d'ordre 2 (Tab. 25). Le produit de plasticité Pp est lié aux paramètres squelette (<2 mm), mortier (<425 µm), fines (< 80 µm), IP, Gm et Pm par une relation linéaire. Le potentiel de gonflement ( $\epsilon_s$ ) est lié à IP, Pm et Pp par une relation linéaire (Tab. 25). La densité sèche maximale (DSM) est liée à la teneur en eau à l'optimum Proctor modifié (TE – OPM) par une relation linéaire.

Sur micaschistes, Gm est lié aux paramètres squelette (<2 mm) et mortier (<425 µm) par une relation linéaire (Tab. 25). Sur micaschistes, le paramètre mortier (<425 µm) est lié au squelette (<2 mm) par une relation linéaire. Le potentiel de gonflement ( $\epsilon_s$ ) est lié à IP et Pp par une relation linéaire, et à Pm par une polynomiale d'ordre 3. Le produit de plasticité Pp est lié aux paramètres IP et Pm par une relation linéaire (Tab. 25). La densité sèche maximale (DSM) est liée à TE – OPM par une relation linéaire.

Tableau 25. Données récapitulatives des relations entre paramètres géotechniques

Graveleux latéritiques		GL-C (N = 22)			GL-M (N = 20)			
Relations	Type	Equation	Coefficient de détermination	Domaine d'étude	Type	Equation	Coefficient de détermination	Domaine d'étude
<425 µm - <2 mm	Linéaire	<425 µm = 0,6373(<2 mm) + 4,0753	R <sup>2</sup> = 0,8972	<2 mm € [12,80 – 71,00]	Linéaire	<425 µm = 0,5587(<2 mm) + 7,5446	R <sup>2</sup> = 0,8129	<2 mm € [18,60 – 60,80]
<80 µm - <2 mm	Linéaire	<80 µm = 0,3792(<2 mm) + 6,9422	R <sup>2</sup> = 0,7089	<2 mm € [12,80 – 71,00]	-	-	-	-
<80 µm - <425 µm	Linéaire	<80 µm = 0,6188(<425 µm) + 3,7965	R <sup>2</sup> = 0,8544	<425 µm € [11,60 – 57,70]	-	-	-	-
IP - LL	Linéaire	IP = 0,7945LL - 22,003	R <sup>2</sup> = 0,7102	LL € [47 – 72]	-	-	-	-
Gm - <2 mm	Linéaire	Gm = -0,0202(<2 mm) + 2,8898	R <sup>2</sup> = 0,957	<2 mm € [12,80 – 71,00]	Linéaire	Gm = -0,0169(<2 mm) + 2,7636	R <sup>2</sup> = 0,907	<2 mm € [18,60 – 60,80]
Gm - <425 µm	Linéaire	Gm = -0,0303(<425 µm) + 2,977	R <sup>2</sup> = 0,976	<425 µm € [11,60 – 57,70]	Linéaire	Gm = -0,0275(<425 µm) + 2,9095	R <sup>2</sup> = 0,9204	<425 µm € [15,40 – 43,01]
ε <sub>s</sub> - IP	Linéaire	ε <sub>s</sub> = 0,0013IP - 0,0177	R <sup>2</sup> = 0,9615	IP € [11 – 39]	Linéaire	ε <sub>s</sub> = 0,0009IP - 0,0083	R <sup>2</sup> = 0,9833	IP € [11 – 28]
ε <sub>s</sub> - Pm	Linéaire	ε <sub>s</sub> = 2E-05Pm - 0,0037	R <sup>2</sup> = 0,7721	Pm € [232 – 2016]	Polynomiale 3	ε <sub>s</sub> = 1E-10Pm <sup>3</sup> - 1E-07Pm <sup>2</sup> + 7E-05Pm - 0,0059	R <sup>2</sup> = 0,6639	Pm € [185 – 918]
ε <sub>s</sub> - Pp	Linéaire	ε <sub>s</sub> = 2E-05Pp - 0,0026	R <sup>2</sup> = 0,7145	Pp € [168 – 1213]	Linéaire	ε <sub>s</sub> = 2E-05Pp - 0,0016	R <sup>2</sup> = 0,736	Pp € [161 – 755]
Gm - <80 µm	Linéaire	Gm = -0,0425(<80 µm) + 3,0179	R <sup>2</sup> = 0,8625	<80 µm € [6,10 – 33,40]	-	-	-	-
Pm - <425 µm	Linéaire	Pm = 40,267(<425 µm) - 355,17	R <sup>2</sup> = 0,8484	<425 µm € [11,60 – 57,70]	-	-	-	-
Pm - <2 mm	Linéaire	Pm = 27,5(<2 mm) - 266,87	R <sup>2</sup> = 0,874	<2 mm € [12,80 – 71,00]	-	-	-	-
Pm - <80 µm	Polynomiale 2	Pm = 2,0916(<80 µm) <sup>2</sup> - 33,277(<80 µm) + 437,82	R <sup>2</sup> = 0,7193	<80 µm € [6,10 – 33,40]	-	-	-	-
Pm - IP	Linéaire	Pm = 60,043IP - 764,21	R <sup>2</sup> = 0,6878	IP € [11 – 39]	-	-	-	-
Pm - Gm	Linéaire	Pm = -1327,7Gm + 3599,9	R <sup>2</sup> = 0,8656	Gm € [1,46 – 2,67]	-	-	-	-
Pp - <2 mm	Linéaire	Pp = 17,15(<2 mm) - 70,273	R <sup>2</sup> = 0,795	<2 mm € [12,80 – 71,00]	-	-	-	-
Pp - <425 µm	Linéaire	Pp = 25,602(<425 µm) - 140,2	R <sup>2</sup> = 0,8021	<425 µm € [11,60 – 57,70]	-	-	-	-
Pp - <80 µm	Linéaire	Pp = 37,774(<80 µm) - 215,91	R <sup>2</sup> = 0,7824	<80 µm € [6,10 – 33,40]	-	-	-	-
Pp - IP	Linéaire	Pp = 38,598IP - 411,76	R <sup>2</sup> = 0,6647	IP € [11 – 39]	Linéaire	Pp = 29,157IP - 124,01	R <sup>2</sup> = 0,7292	IP € [11 – 28]
Pp - Gm	Linéaire	Pp = -856,78Gm + 2400,4	R <sup>2</sup> = 0,8431	Gm € [1,46 – 2,67]	-	-	-	-
Pp - Pm	Linéaire	Pp = 0,6288Pm + 91,691	R <sup>2</sup> = 0,9247	Pm € [232 – 2016]	Linéaire	Pp = 0,8249Pm - 37,358	R <sup>2</sup> = 0,7776	Pm € [185 – 918]
DSM – TE – OPM	Linéaire	DSM = -0,046(TE – OPM) + 2,6438	R <sup>2</sup> = 0,7467	TE – OPM € [7,20 – 18,00]	Linéaire	DSM = -0,0397(TE – OPM) + 2,564	R <sup>2</sup> = 0,827	TE – OPM € [8,20 – 16,70]

<425 µm : mortier ; <2 mm : squelette ; <80 µm : fines ; LL : limite de liquidité ; IP : indice de plasticité ; Gm : module de classement ; Pm : module de plasticité ; Pp : produit de plasticité ; TE – OPM : teneur en eau à l'optimum Proctor modifié ; DSM : densité sèche macimale ; CBR : californian bearing ratio

Le mortier est lié au squelette par une relation linéaire sur chloritoschistes et sur micaschistes (Tab. 25). Il en est de même pour les relations entre Gm et le paramètres mortier et squelette. Le potentiel de gonflement ( $\epsilon_s$ ) est lié à Pm linéairement sur chloritoschistes et par une polynomiale d'ordre 3 sur micaschistes. Les relations entre Gm – fines, et les relations liant Pm aux paramètres granulométriques et à IP sont absentes dans les matériaux sur micaschistes (Tab. 25). La relation entre LL et IP est absente dans les matériaux développés sur micaschistes.

### **III.3. Analyses en composantes principales**

#### **III.3.1. Paramètres minéralogiques**

L'analyse en composantes principales (ACP) des paramètres minéralogiques permet de retenir trois axes (F1, F2 et F3) et deux plans factoriels (F1-F2 et F1-F3). Ces axes cumulent 82,79 % de la variabilité des matériaux étudiés (Fig. 16). Ceci indique la bonne qualité de la représentation. Les teneurs en kaolinite et hématite sont les paramètres participant le plus à la construction de l'axe F1 (Tab. 26). L'axe F2 est construit par les paramètres goethite et quartz tandis que l'axe F3 est construit par les teneurs en muscovite et gibbsite. Les paramètres goethite et gibbsite sont très proches des cercles de corrélations F1-F2 et F1-F3 respectivement (Fig. 16). Les paramètres étudiés sont éparpillés dans les cercles de corrélations. Ces positions traduisent peu de corrélations entre les paramètres étudiés. On note néanmoins de faibles corrélations négatives entre goethite et muscovite (-0,572) et entre hématite et gibbsite (-0,518) (Tab. 27).

#### **III.3.2. Paramètres géochimiques**

L'analyse en composantes principales (ACP) des paramètres géochimiques permet de retenir deux axes (F1 et F2) et un plan factoriel (F1-F2). Ces axes cumulent 75,44 % de la variabilité des individus étudiés (Fig. 17). Ceci indique la bonne qualité de la représentation. Les teneurs en SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, S/R, IOL, IFL, IRCP et DVRAR sont les paramètres participant le plus à la construction de l'axe F1 (Tab. 28). L'axe F2 est construit par les paramètres Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, IAL, IRLP et IRIP. Les paramètres IOL, SiO<sub>2</sub>, S/R, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, IRLP et IRIP sont très proches du cercle de corrélation (Fig. 17). Ces paramètres sont donc bien expliqués. La position de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, IFL et IOL, comparée à celle de SiO<sub>2</sub> et S/R, confirme des corrélations entre ces paramètres (Fig. 17). Ces positions se traduisent d'après la matrice de corrélation (Tab. 29) issue de l'ACP par de fortes corrélations négatives entre SiO<sub>2</sub> - IOL (-0,998), SiO<sub>2</sub> -



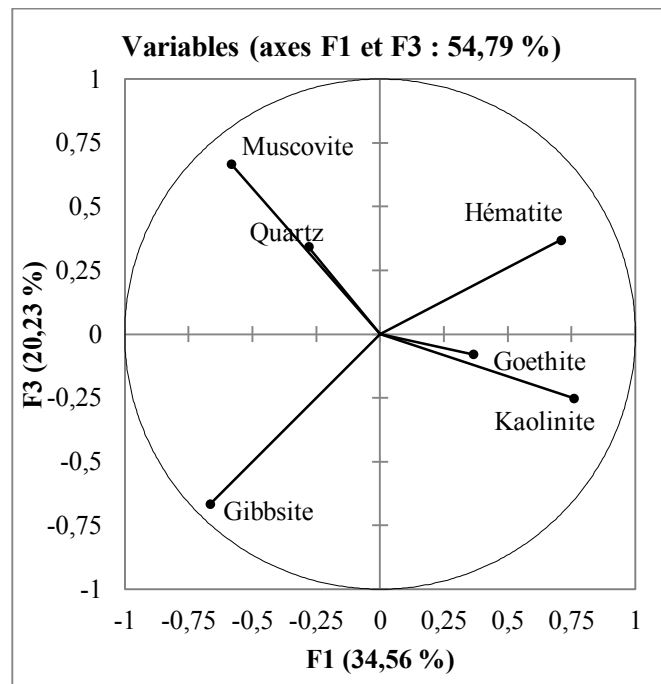
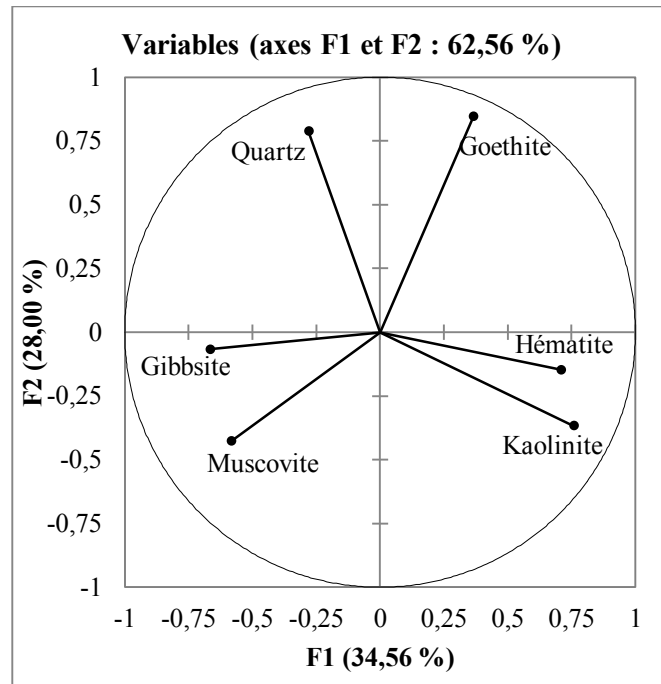


Figure 16. Cercles de corrélations F1 – F2 et F1 – F3 des paramètres minéralogiques des graveleux latéritiques du secteur d'Akonolinga

Tableau 26. Cosinus carrés des paramètres minéralogiques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga

	F1	F2	F3
Quartz	0,0781	<b>0,6199</b>	0,1174
Kaolinite	<b>0,5761</b>	0,1351	0,0633
Muscovite	0,3406	0,1823	<b>0,4456</b>
Gibbsite	0,4431	0,0045	<b>0,4450</b>
Hématite	<b>0,5021</b>	0,0218	0,1361
Goethite	0,1339	<b>0,7163</b>	0,0064

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

Tableau 27. Matrice de corrélations de Pearson (1905) des paramètres minéralogiques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga

Variables	Quartz	Kaolinite	Muscovite	Gibbsite	Hématite	Goethite
Quartz	<b>1</b>					
Kaolinite	-0,419	<b>1</b>		N = 15		
Muscovite	0,003	-0,470	<b>1</b>			
Gibbsite	-0,180	-0,455	-0,029	<b>1</b>		
Hématite	-0,336	0,241	-0,112	<b>-0,518</b>	<b>1</b>	
Goethite	0,379	-0,136	<b>-0,572</b>	-0,189	0,201	<b>1</b>

*Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification  $\alpha = 0,05$*

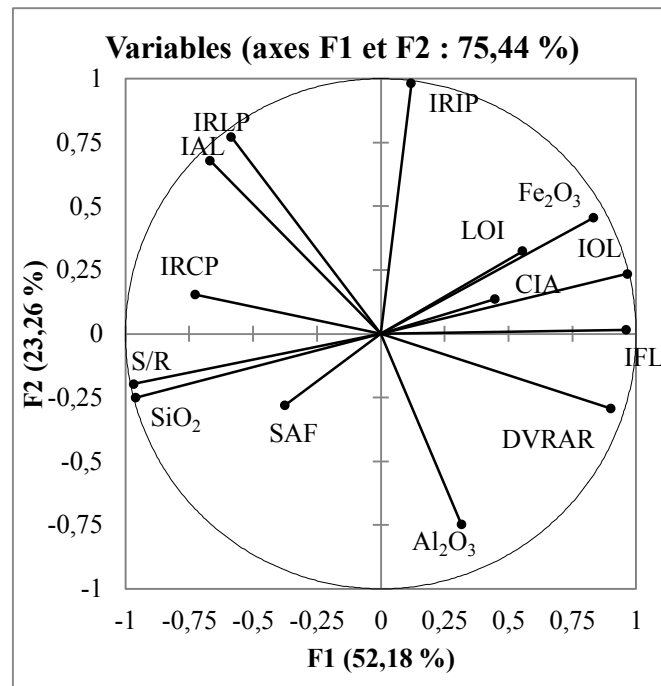


Figure 17. Cercle de corrélations des paramètres géochimiques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga

Tableau 28. Cosinus carrés des paramètres géochimiques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga

	F1	F2
SiO <sub>2</sub>	<b>0,9215</b>	0,0625
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1004	<b>0,5590</b>
LOI	0,3099	0,1058
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>0,6943</b>	0,2066
SAF	0,1408	0,0784
S/R	<b>0,9328</b>	0,0387
IOL	<b>0,9355</b>	0,0556
CIA	0,2002	0,0186
IAL	0,4464	<b>0,4601</b>
IFL	<b>0,9270</b>	0,0003
IRLP	0,3416	<b>0,5948</b>
IRIP	0,0143	<b>0,9661</b>
IRCP	<b>0,5260</b>	0,0236
DVRAR	<b>0,8142</b>	0,0860

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

Tableau 29. Matrice de corrélation de Pearson (1905) des paramètres géochimiques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga

Variables	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SAF	S/R	IOL	CIA	IAL	IFL	IRLP	IRIP	IRCP	DVRAR
SiO <sub>2</sub>	<b>1</b>													
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,167	<b>1</b>												
LOI	<b>-0,671</b>	0,302	<b>1</b>											
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>-0,893</b>	-0,240	0,379	<b>1</b>										
SAF	0,511	-0,301	<b>-0,938</b>	-0,190	<b>1</b>									
S/R	<b>0,982</b>	-0,162	<b>-0,578</b>	<b>-0,903</b>	0,402	<b>1</b>								
IOL	<b>-0,998</b>	0,151	<b>0,627</b>	<b>0,911</b>	-0,455	<b>-0,986</b>	<b>1</b>							
CIA	-0,377	-0,133	-0,055	<b>0,543</b>	0,346	-0,440	0,414	<b>1</b>						
IAL	0,447	<b>-0,554</b>	0,019	-0,328	-0,128	<b>0,518</b>	-0,476	-0,272	<b>1</b>					
IFL	<b>-0,911</b>	0,147	0,349	<b>0,893</b>	-0,164	<b>-0,937</b>	<b>0,932</b>	0,507	<b>-0,703</b>	<b>1</b>				
IRLP	0,381	<b>-0,756</b>	-0,072	-0,143	0,039	0,415	-0,395	-0,120	<b>0,898</b>	<b>-0,555</b>	<b>1</b>			
IRIP	-0,362	<b>-0,703</b>	0,325	<b>0,567</b>	-0,259	-0,312	0,353	0,219	<b>0,591</b>	0,146	<b>0,679</b>	<b>1</b>		
IRCP	<b>0,584</b>	-0,075	-0,013	<b>-0,662</b>	-0,213	<b>0,645</b>	<b>-0,622</b>	<b>-0,630</b>	<b>0,721</b>	<b>-0,803</b>	0,453	0,058	<b>1</b>	
DVRAR	<b>-0,823</b>	<b>0,653</b>	<b>0,608</b>	<b>0,537</b>	-0,504	<b>-0,802</b>	<b>0,817</b>	0,178	<b>-0,728</b>	<b>0,800</b>	<b>-0,761</b>	-0,188	<b>-0,543</b>	<b>1</b>

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification  $\alpha = 0,05$

IFL (-0,911) et SiO<sub>2</sub> - DVRAR (-0,823), S/R - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (-0,903), IOL - S/R (-0,986), IFL - S/R (-0,937), DVRAR - S/R (-0,802) et IRCP - IFL (-0,803). De fortes corrélations positives apparaissent entre S/R - SiO<sub>2</sub> (0,982), IOL - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,911), IFL - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,893), IFL - IOL (0,932), DVRAR - IOL (0,817), IRLP - IAL (0,898) et DVRAR - IFL (0,800) (Tab. 29).

Les paramètres IOL, SiO<sub>2</sub>, S/R, IOL et IFL sont les variables les plus proches de l'axe F1 qui explique 52,18 %. Ces paramètres joueraient donc un rôle important dans la classification géochimique des matériaux étudiés. L'axe F2 sépare les graveleux latéritiques sur chloritoschistes de ceux dérivés des micaschistes (Fig. 18).

### III.3.3. Paramètres géotechniques

L'analyse en composantes principale permet également de réduire le nombre de paramètres par élimination de ceux qui sont fortement corrélés. Par conséquent, les paramètres suivants ont été éliminés : argiles (<2 μm), limons, sables, graviers, cailloux, valeur de bleu (Vb), activité de la valeur de bleu (Acb) et l'activité des colloïdes de Skempton (Ac). Les résultats de l'ACP effectuée sur 13 paramètres montrent que le premier plan factoriel explique 74,85 % de l'information contenue dans les données (Fig. 19). Ce pourcentage est donc important et le premier plan factoriel représente bien la variabilité contenue dans l'ensemble du jeu de données. Le premier facteur explique 58,28% de la variance. La somme des cosinus carrés sur les deux 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 Pm, avec des cos<sup>2</sup> de 0,92, représentent le plus la réalité contrairement au poids volumique des grains solides LL et CBR avec des cos<sup>2</sup> respectifs de 0,01, 0,42 et 0,42 (Tab. 30). Sous cette base, l'interprétation des paramètres poids volumique des grains solides, LL et CBR sera donc hasardeuse. Le cercle de corrélation F1-F2 des variables (Fig. 19) montre que l'axe 2 oppose le groupe de paramètres Gm, DSM, CBR et poids volumique des grains solides, au groupe de paramètres PP, Pm, <80 μm, <425 μm, IP, <2 mm, ε<sub>s</sub>, LL, TE – OPM. Il en ressort qu'il existe trois groupes de paramètres géotechniques, le groupe paramètres granulométriques <80 μm, <425 μm, <2 mm et TE – OPM, le groupe paramètres de plasticité Pp, Pm, PI, LL et ε<sub>s</sub>, et le groupe paramètres physiques et de compactage DSM, CBR, Gm, poids volumique des grains solides. Ces regroupements suggèrent l'existence de corrélations entre ces différents paramètres et confirment les corrélations observées entre paramètres géotechniques. La position du groupe des paramètres granulométriques par rapport au groupe des paramètres de plasticité, indique des corrélations positives entre les paramètres de ces différents groupes.

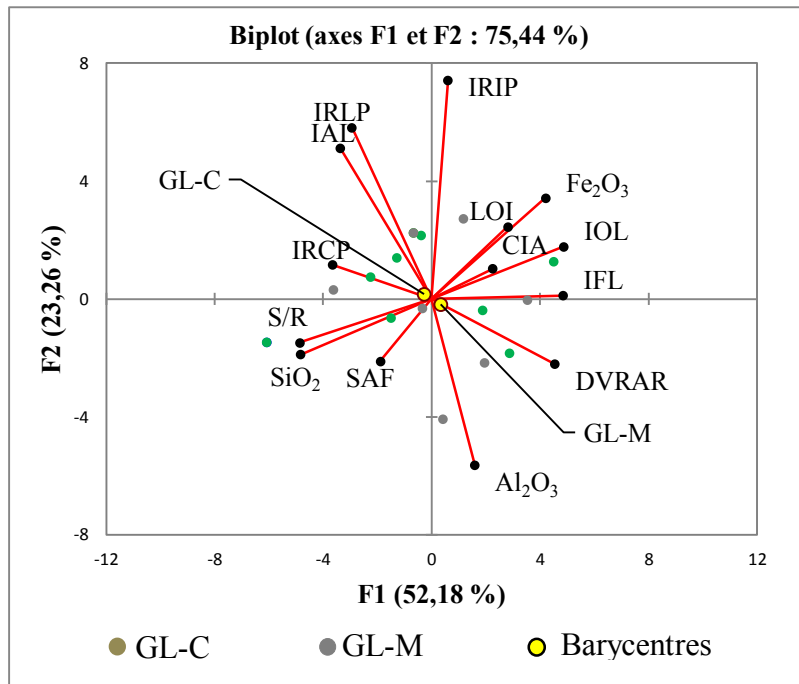


Figure 18. Biplot des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga en fonction des paramètres géochimiques

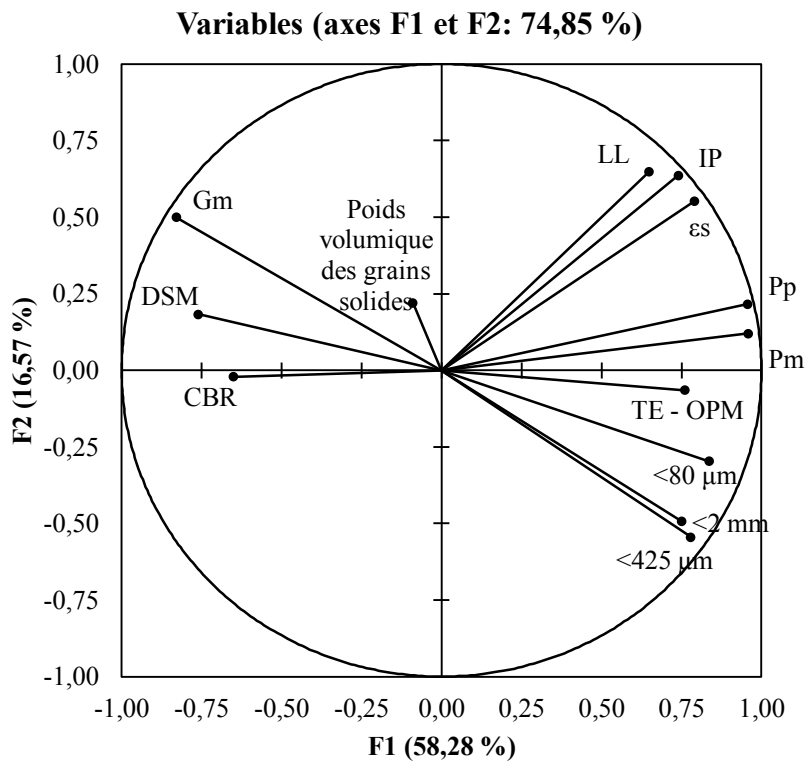


Figure 19. Cercle de corrélations des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga

Tableau 30. Cosinus carré des variables géotechniques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga

	F1	F2	F3
Masse volumique des grains solides	0,008	0,048	<b>0,592</b>
<2 mm (%)	<b>0,565</b>	0,244	0,090
<425 µm (%)	<b>0,608</b>	0,296	0,043
<80 µm (%)	<b>0,700</b>	0,088	0,001
LL (%)	<b>0,422</b>	0,421	0,007
PI (%)	<b>0,548</b>	0,405	0,004
Gm	<b>0,687</b>	0,249	0,046
Pm	<b>0,918</b>	0,014	0,027
Pp	<b>0,917</b>	0,047	0,002
εs	<b>0,626</b>	0,305	0,011
TE – OPM (%)	<b>0,578</b>	0,004	0,139
DSM	<b>0,577</b>	0,033	0,286
CBR (%)	<b>0,422</b>	0,000	0,005

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

Les variables  $\varepsilon_s$ , LL, IP, Pp, Pm,  $<80 \mu\text{m}$ ,  $<425 \mu\text{m}$ ,  $<2 \text{ mm}$  et Gm sont proches du cercle de corrélations donc bien expliquées et bien corrélées aux axes factoriels. La position des paramètres DSM et Gm, opposée à ceux du groupe granulométrie, suppose des corrélations négatives entre eux. Le paramètre DSM est inversement corrélé à TE – OPM ( $r = -0,88$ ) et aux fines ( $r = -0,70$ ). Le module de classement (Gm) est inversement corrélé aux paramètres du groupe granulométrie, notamment avec  $<80 \mu\text{m}$  ( $r = -0,82$ ),  $<425 \mu\text{m}$  ( $r = -0,98$ ) et  $<2 \text{ mm}$  ( $r = -0,97$ ). Les variables CBR et TE – OPM, sont les variables les plus proches de l'axe factoriel principal qui explique 58 % de la variance totale des matériaux. Ces variables jouent donc un rôle important dans la classification des graveleux latéritiques.

#### **IV. STABILISATION A LA CHAUX DES GRAVELEUX LATÉRIQUES**

Les données des mélanges graveleux latéritiques-chaux, notamment l'aptitude de traitement à la chaux des matériaux étudiés, les données de microstructure et les essais géotechniques et mécaniques effectués sont présentées.

##### **IV.1. Aptitude au traitement à la chaux**

Pour le protocole de sélection et l'aptitude au traitement à la chaux, tous les matériaux présentant une valeur CBR supérieure ou égale à 60 % ont été éliminés. Ainsi, 05 matériaux sur chloritoschistes et 03 sur micaschistes ont été retenus (Tab. 31). Ces matériaux présentent des valeurs de Pm inférieures à 2000 (Tab. 31). Pour les autres paramètres, les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes, les matériaux Ako2, Ako, Ngo et Nko, sont aptes au traitement à la chaux. Le matériau Edo est insatisfaisant au traitement à la chaux à cause de sa teneur en mortier inférieure à 15 %. Les matériaux développés sur micaschistes sont tous aptes au traitement à la chaux.

##### **IV.2. Microscopie électronique à balayage**

La microstructure a été déterminée par microscopie électronique (MEB) sur des matériaux compactés à 95 % OPM après ajout de 2 % de chaux. Les microphotographies des matériaux sur chloritoschistes présentent des agrégats d'argiles et des fissures (Fig. 20), tandis que celles des graveleux latéritiques dérivés des micaschistes montrent que ces matériaux sont compacts (Fig. 21).



Tableau 31. Aptitude au traitement des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga

Matériaux	GL-C					GL-M		
	Ako2	Ako	Edo	Ngo	Nko	Ako1	Mba	Men
Dmax, mm	16,00	16,00	40,00	16,00	16,00	20,00	16,00	40,00
Mortier (< 0,425 mm), %	42,00	32,70	11,60	33,70	35,60	33,00	35,30	15,40
Fines (< 80 µm), %	32,90	23,70	8,40	26,40	29,50	25,00	33,60	13,40
% ≤ 75 µm	32,40	23,40	8,30	26,10	29,20	24,70	33,20	13,30
IP, %	34	24	20	19	21	27	20	12
6IP*(% ≤ 75 µm)	66,10	33,70	9,96	29,75	36,79	40,01	41,83	9,58
Pm	1407	785	237	650	762	904	720	185
CBR, %	42	58	36	38	48	49	43	58
Aptitude au traitement à la chaux	Apte	Apte	-	Apte	Apte	Apte	Apte	Apte

*GL-C : graveleux latéritiques sur chloritoschistes ; GL-M : graveleux latéritiques sur micaschistes ; IP : indice de plasticité ; Dmax : diamètre maximal des particules ; Pm : module de plasticité ; CBR : californian bearing ratio*

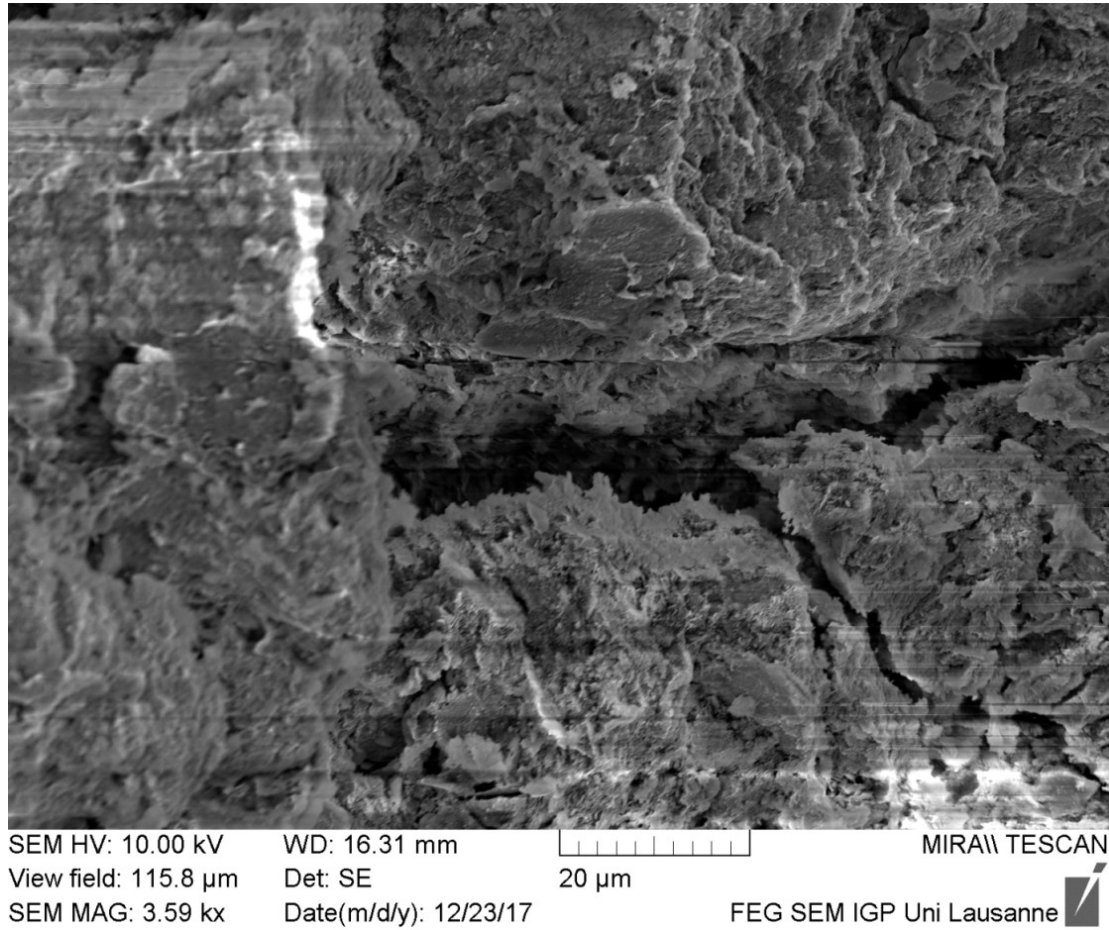


Figure 20. Microstructure après ajout de 2 % de chaux aux graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes de la zone d'Akonolinga

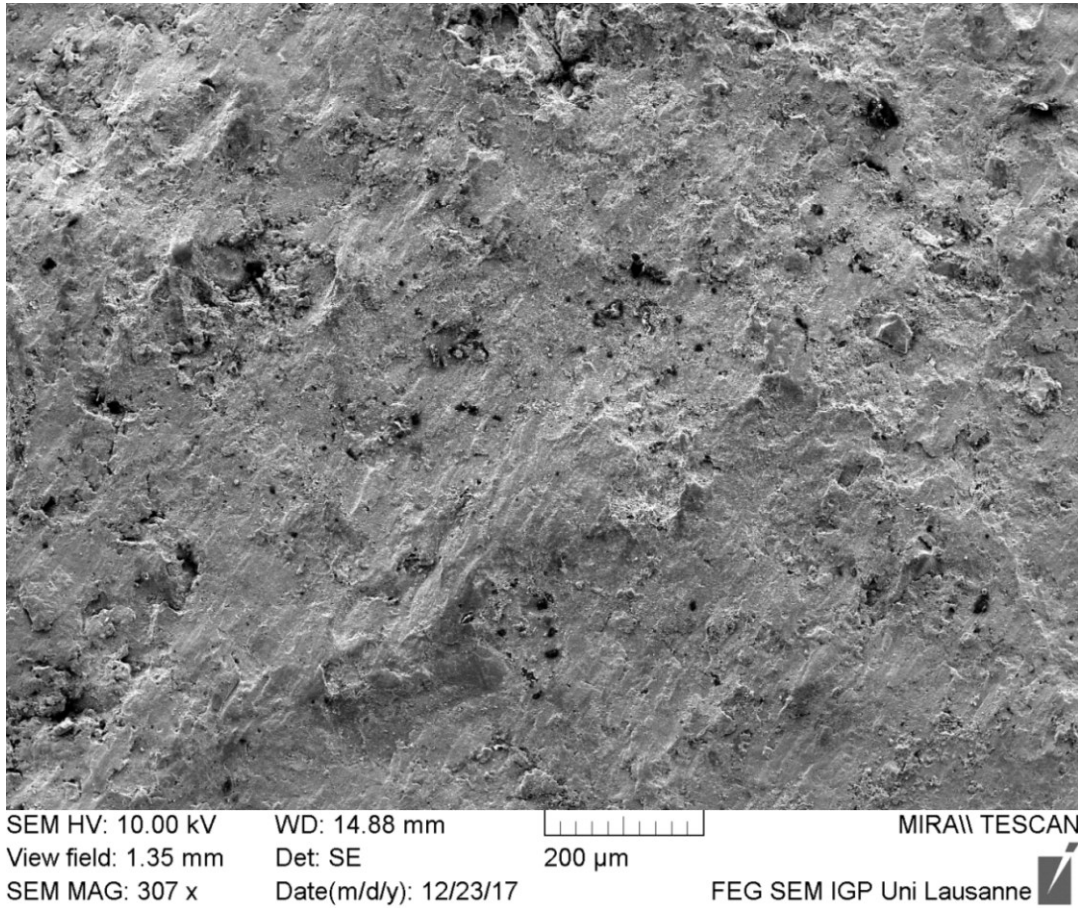


Figure 21. Microstructure des mélanges après ajout de 2 % de chaux aux graveleux latéritiques développés sur micaschistes de la zone d'Akonolinga

### **IV.3. Paramètres d'identification**

Les valeurs de LL des mélanges graveleux latéritiques - chaux sont consignées dans le tableau 32. Dans les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes, comparées à la valeur obtenue sur les matériaux naturels, les valeurs de LL obtenues après ajout de chaux croissent avec l'augmentation de la teneur en chaux. Dans les matériaux dérivés des micaschistes, le comportement est différent. L'on observe pour les matériaux Mba, une évolution en dents de scie ; une diminution de LL avec un ajout de 2 % de chaux, une augmentation à 4 % et une baisse avec un ajout de 6 % de chaux. Pour les matériaux Men, l'on observe une augmentation de LL avec l'ajout de chaux. Cependant, il s'observe une baisse de ce paramètre avec un ajout de 6 % de chaux.

Les valeurs de IP des mélanges graveleux latéritiques-chaux sont consignées dans le tableau 32. Les matériaux développés sur chloritoschistes présentent 02 types de comportement avec ajout de chaux : une diminution de la valeur de IP avec l'augmentation du pourcentage de chaux (Ako2 et Ako) et une augmentation des valeurs de IP après ajout de 2 % de chaux suivie d'une baisse de ces valeurs pour ajout d'un pourcentage de chaux supérieur à 2 % (Edo et Ngo). Le matériau Nko présente une augmentation des valeurs de IP avec ajout de 2 à 4 % de chaux et, on note une baisse de la valeur de ce paramètre après ajout de 6 % de chaux. Les graveleux latéritiques dérivés des micaschistes, présentent également 02 types de comportement après ajout de chaux : une diminution de la valeur de IP avec l'augmentation du pourcentage de chaux (Ako1), et une augmentation des valeurs de IP avec ajout de 2 % de chaux suivie d'une baisse de ces valeurs après ajout d'un pourcentage de chaux supérieur à 2 % (Mba et Men) (Tab. 32). De façon générale, il s'observe une diminution des valeurs de IP avec l'ajout de chaux.

### **IV.4. Paramètres de compactage**

Les valeurs de densité sèche (DSM) des mélanges graveleux latéritiques-chaux varient en fonction du pourcentage de chaux. Pour les matériaux Ako et Men, on observe une diminution des valeurs de DSM après un ajout de chaux. Pour les matériaux Edo, Ngo et Nko, les valeurs de DSM diminuent pour un ajout de chaux inférieur à 6 %. Au-delà de ce pourcentage, les valeurs de DSM croissent comparées à celles obtenues après un ajout de 4 % de chaux. Le matériau Ako1 présente une augmentation de la valeur de DSM à 2 % de chaux et une baisse à 4 et 6 %. Par contre, pour le matériau Ako2, on observe une baisse des valeurs de DSM, après un ajout de 2 et 6 %, et une augmentation après un ajout de 4 % de chaux (Tab. 33).

Tableau 32. Valeurs de limite de liquidité et indices de plasticité des mélanges graveleux latéritiques-chaux dans la zone d'Akonolinga

Matériaux		GL-C					GL-M		
Paramètres	Teneur en chaux (%)	Ako2	Ako	Edo	Ngo	Nko	Ako1	Mba	Men
LL (%)	0	65	58	52	54	58	55	66	56
	2	66	59	57	61	59	60	62	61
	4	67	58	56	57	58	57	66	58
	6	66	57	56	57	56	55	57	56
IP (%)	0	34	24	21	19	21	27	21	12
	2	22	22	22	23	22	18	22	13
	4	25	24	18	20	22	17	21	12
	6	25	24	18	19	18	15	18	11

*GL-C : graveleux latéritiques sur chloritoschistes ; GL-M : graveleux latéritiques sur micaschistes ; IP : indice de plasticité ; LL : limite de liquidité*

Tableau 33. Paramètres Proctor des mélanges graveleux latéritiques-chaux dans la zone d'Akonolinga

Matériaux		GL-C					GL-M		
Paramètres	Teneur en chaux (%)	Ako2	Ako	Edo	Ngo	Nko	Ako1	Mba	Men
DSM	0	1,84	2,03	2,34	2,01	2,16	2,11	-	2,11
	2	1,72	2,03	2,20	1,92	2,01	2,12	-	2,00
	4	1,87	1,98	2,23	1,92	2,11	2,08	-	1,98
	6	1,79	1,94	2,26	2,00	2,15	2,10	-	1,98
TE – OPM (%)	0	16,00	12,90	10,50	11,80	12,30	11,50	-	11,30
	2	15,80	12,50	10,40	16,0	11,30	10,60	-	12,80
	4	14,40	14,80	8,70	16,00	13,90	10,20	-	11,90
	6	14,40	14,30	8,00	15,00	8,20	12,00	-	12,90

*GL-C : graveleux latéritiques sur chloritoschistes ; GL-M : graveleux latéritiques sur micaschistes ; DSM : densité sèche maximale ; TE – OPM : teneur en eau à l'optimum Proctor modifié ; - : non analysé*

Les valeurs de teneur en eau à l'optimum Proctor modifié (TE – OPM) des mélanges graveleux latéritiques-chaux varient en fonction du pourcentage de chaux. Pour les matériaux Edo et Ako2, on observe une diminution des valeurs de TE – OPM après un ajout de chaux. Les matériaux Men et Ngo présentent après ajout de chaux, une augmentation des valeurs de TE – OPM comparées à celles obtenues dans le matériau naturel. Les matériaux Ako, Nko et Ako1 présentent une diminution des valeurs de TE – OPM après un ajout de 2 % de chaux. Pour un pourcentage de chaux supérieur à 2 %, le comportement est différent. Pour le matériau Ako, on observe une augmentation des valeurs de TE – OPM après un ajout de 4 à 6 % de chaux. Pour les matériaux Nko, les valeurs de TE – OPM augmentent après un ajout de 4 % de chaux et diminuent à 6 %. Par contre, les matériaux Ako1 présentent plutôt une baisse des valeurs de TEO après un ajout de 4 % de chaux et une augmentation à 6 % (Tab. 33).

Les valeurs CBR des mélanges graveleux latéritiques-chaux sont présentées dans le tableau 32. Les valeurs de ce paramètre augmentent avec le pourcentage de chaux. Pour les matériaux Ako, Ngo et Nko, les valeurs de CBR restent inférieures à 100 %, quel que soit le pourcentage de chaux. Les matériaux Edo, Ako1 et Ako2 présentent des valeurs de CBR supérieures à 100 % après ajout d'un pourcentage de chaux supérieur ou égal à 2 %. Le matériau Men présente une valeur de CBR supérieure à 100 %, après ajout de 6 % de chaux. Le matériau Edo présentent une valeur de CBR supérieure à 160 % pour un ajout de 6 % de chaux. Par contre, le matériau Ako1 présente des valeurs CBR supérieures à 160 % pour un ajout de 2 % à 4 % de chaux (Tab. 34).

#### **IV.5. Caractéristiques mécaniques**

Les valeurs de résistance à la compression ( $R_C$ ) des mélanges graveleux latéritiques-chaux sont présentées dans le tableau 35. Les valeurs de  $R_C$  augmentent avec le pourcentage de chaux pour les matériaux Edo et Ako2. Dans les autres matériaux, les valeurs de  $R_C$  croissent après ajout de 2 % à 4 % de chaux et, diminuent après un ajout de 6 % de chaux. Les valeurs de résistance à la compression à l'eau ( $R'_C$ ) augmentent avec l'augmentation du pourcentage de chaux pour les matériaux Ako et Ako2. Pour le matériau Ako1, les valeurs de  $R'_C$  diminuent avec l'augmentation du pourcentage de chaux. Dans les autres matériaux, les valeurs de ce paramètre présentent une évolution en dents de scie.

Les valeurs de résistance à la traction ( $R_t$ ) des mélanges graveleux latéritiques-chaux sont présentées dans le tableau 36. Les valeurs de ce paramètre augmentent avec le pourcentage de chaux pour les matériaux développés sur chloritoschistes et sur micaschistes. Les valeurs de la résistance à la traction à l'eau ( $R'_t$ ) présentent 02 tendances pour les

Tableau 34. Données CBR des mélanges graveleux latéritiques-chaux dans la zone d'Akonolinga

Matériaux Teneur en chaux (%)	GL-C					GL-M		
	Ako2	Ako	Edo	Ngo	Nko	Ako1	Mba	Men
0	42	58	36	38	48	49	-	58
2	<b>115</b>	65	<b>101</b>	61	64	<b>163</b>	-	62
4	<b>125</b>	80	<b>109</b>	67	76	<b>168</b>	-	92
6	<b>134</b>	91	<b>177</b>	74	95	<b>120</b>	-	<b>109</b>

*GL-C : graveleux latéritiques sur chloritoschistes ; GL-M : graveleux latéritiques sur micaschistes ; - : non analysé*

Tableau 35. Données de résistance à la compression des mélanges graveleux latéritiques-chaux dans la zone d'Akonolinga

Matériaux	GL-C									GL-M														
	Ako2			Ako			Edo			Ngo			Nko			Ako1			Mba			Men		
Teneur en Chaux (%)	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6
R <sub>c</sub>	12,50	16,50	24,00	15,00	21,80	19,50	4,00	7,30	8,50	16,00	24,00	9,30	11,00	24,00	9,30	21,80	23,00	17,00	-	-	-	8,30	14,00	8,50
R' <sub>c</sub>	1,80	3,50	5,30	2,50	3,50	3,50	2,80	2,50	3,30	1,80	1,30	2,30	2,50	1,30	2,30	4,80	4,50	4,30	-	-	-	2,80	1,50	2,50
R' <sub>c</sub> /R <sub>c</sub>	0,14	0,21	0,22	0,17	0,16	0,18	0,70	0,34	0,39	0,11	0,05	0,25	0,23	0,05	0,25	0,22	0,20	0,25	-	-	-	0,34	0,11	0,29
% d'imbibition	-	-	-	3,50	2,90	7,20	0,80	0,30	19,50	90,20	1,60	1,50	2,00	1,60	1,50	-	-	-	-	-	-	2,90	-0,10	6,30

GL-C : graveleux latéritiques sur chloritoschistes ; GL-M : graveleux latéritiques sur micaschistes ; R<sub>t</sub> : résistance à la compression simple ; R'<sub>t</sub> : résistance à la compression simple à l'eau ; - : non analysé

Tableau 36. Données de résistance à la traction des mélanges graveleux latéritiques-chaux dans la zone d'Akonolinga

Matériaux	GL-C									GL-M														
	Ako2			Ako			Edo			Ngo			Nko			Ako1			Mba			Men		
Teneur en chaux (%)	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6
R <sub>t</sub>	1,30	1,30	1,60	0,60	0,90	2,30	0,60	0,90	2,00	0,60	0,90	3,30	0,80	0,90	3,30	1,30	1,30	1,50	-	-	-	0,70	1,00	2,80
R' <sub>t</sub>	0,30	0,30	0,80	0,30	0,60	0,20	0,30	0,60	0,50	0,20	0,20	0,90	0,20	0,20	0,30	0,70	0,70	0,30	-	-	-	0,20	0,40	0,20
R' <sub>t</sub> /R <sub>t</sub>	0,23	0,23	0,50	0,50	0,67	0,09	0,50	0,67	0,25	0,33	0,22	0,27	0,25	0,22	0,09	0,54	0,54	0,20	-	-	-	0,29	0,40	0,07
R <sub>t</sub> /R <sub>c</sub>	0,10	0,08	0,07	0,04	0,04	0,12	0,15	0,12	0,24	0,04	0,04	0,35	0,07	0,04	0,35	0,06	0,06	0,09	-	-	-	0,08	0,07	0,33

GL-C : graveleux latéritiques sur chloritoschistes ; GL-M : graveleux latéritiques sur micaschistes ; R<sub>t</sub> : résistance à la traction ; R'<sub>t</sub> : résistance à la traction à l'eau ; - : non analysé



matériaux développés sur chloritoschistes : une augmentation en fonction de l'ajout de chaux (Ngo, Nko, Ako2), une augmentation de 2 % à 4 % suivie, d'une baisse à 6 % (Ako et Edo). Dans les matériaux sur micaschistes, les valeurs de ce paramètre augmentent après un ajout de 2 % à 4 % de chaux et baissent avec un ajout de 6 % de chaux.

## CONCLUSION

Le quartz, la muscovite, la kaolinite, la goethite, l'hématite et la goethite constituent le cortège minéralogique des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga. Les résultats des essais géotechniques effectués sur les graveleux latéritiques étudiés montrent que les graveleux latéritiques sur micaschistes sont moins fins et moins plastiques et présentent une portance élevée par rapport à ceux dérivés des chloritoschistes. Les relations établies à partir de la matrice de corrélations issue de l'analyse en composantes principales montrent de fortes corrélations positives et négatives entre paramètres altérologiques et indices géochimiques. Les résultats obtenus à l'aide de l'analyse en composantes principales montrent que les paramètres IOL, SiO<sub>2</sub>, S/R, DVRAR et IFL joueraient un rôle important dans la classification géochimique des matériaux étudiés. Sur le plan géotechnique, l'indice CBR ne se corrèle à aucun paramètre géotechnique. Les variables CBR et TE – OPM, proches de l'axe factoriel principal qui explique 58,28 % de la variance totale des matériaux, joueraient un rôle dans la classification géotechnique des graveleux latéritiques étudiés. Traités à la chaux vive, les matériaux sur micaschistes présentent une structure très compacte en MEB tandis que les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes présentent des fissures. Ce traitement entraîne une augmentation des valeurs de LL et une diminution de celles de IP avec l'augmentation du pourcentage de chaux. Cet ajout de chaux s'accompagne également de la diminution des valeurs de DSM couplée à une augmentation de celles de TE – OPM et de CBR. Pour les paramètres de résistance mécanique, les valeurs de résistance à la compression simple augmentent avec le pourcentage de chaux pour les matériaux développés sur chloritoschistes et sur micaschistes. Les valeurs de résistance à la traction augmentent avec un ajout de 2 % à 4 % chaux suivie d'une baisse avec ajout de 6 % de chaux. Ces principaux résultats sont discutés dans le prochain chapitre.

CHAPITRE IV.

---

**INTERPRETATION ET DISCUSSION**

---

## INTRODUCTION

Le présent chapitre interprète et discute les principaux faits d'observation et d'analyses minéralogiques, microstructurales, géochimiques et géotechniques sur les graveleux latéritiques développés sur deux roches métamorphiques différentes, les micaschistes et les chloritoschistes. Les analyses statistiques permettent de mettre en parallèle les caractéristiques génétiques et géotechniques des graveleux latéritiques étudiés. Le chapitre s'achève en précisant l'utilisation, en construction routière, des matériaux naturels et ceux stabilisés à la chaux.

### I. INTENSITE DE L'ALTERATION DANS LES GRAVELEUX LATÉRIQUES SUR CHLORITOSCHISTES ET SUR MICASCHISTES

Les graveleux latéritiques sur chloritoschistes sont plus épais et plus quartzeux que ceux développés sur micaschistes. La richesse en quartz des graveleux latéritiques sur chloritoschistes est due à la présence des lits quartzitiques dans la roche parentale de ces matériaux. Les matériaux nodulaires issus des chloritoschistes et des micaschistes dans la zone d'Akonolinga, sont plus épais que ceux observés dans le niveau nodulaire des profils d'altération sur chloritoschistes dans la série de Mbalmayo-Bengbis à Ayo (0,82 m) (Ntouala, 2014), à Mbalmayo (0,50 m) (Onana *et al.*, 2016) et, sur micaschistes à Mfou (1,00 m) (Kamtchueng *et al.*, 2015), en zone de Plateau sud camerounais. Les principaux minéraux rencontrés dans les graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga sont le quartz, la kaolinite, l'hématite, la goëthite et la muscovite. La teneur en quartz est plus élevée dans les graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes que sur ceux issus des micaschistes. Cette teneur élevée résulterait de la résistance des lits quartzitiques présents dans les chloritoschistes à l'altération. La teneur en kaolinite est plus élevée sur micaschistes. La teneur en muscovite est plus élevée sur chloritoschistes ; il en est de même pour la teneur en gibbsite. Les teneurs en oxyhydroxydes de fer (hématite et goëthite) sont comparables dans les graveleux latéritiques étudiés. Le cortège minéralogique obtenu est similaire à ceux signalés sur les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes (Onana *et al.*, 2016) et sur micaschistes de la série de Mbalmayo-Bengbis au Cameroun (Kamtchueng *et al.*, 2015). L'illite présente dans les graveleux latéritiques sur chloritoschistes de la même série à l'Est Cameroun (Ntouala, 2014) est absente dans les matériaux étudiés. Les graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga sont constitués majoritairement de minéraux résistants à l'altération (Fig. 22). Ces minéraux sont les plus corrélés aux paramètres géochimiques (Tab. 37). Néanmoins, les transformations minéralogiques qui se produisent dans ces matériaux peuvent être expliquées par des diagrammes binaires et indices d'altération CIA,  $MIA_{(O)}$  ou IOL, en fonction de LOI. Il apparaît que le processus pédogénétique prédominant dans ces graveleux latéritiques est la

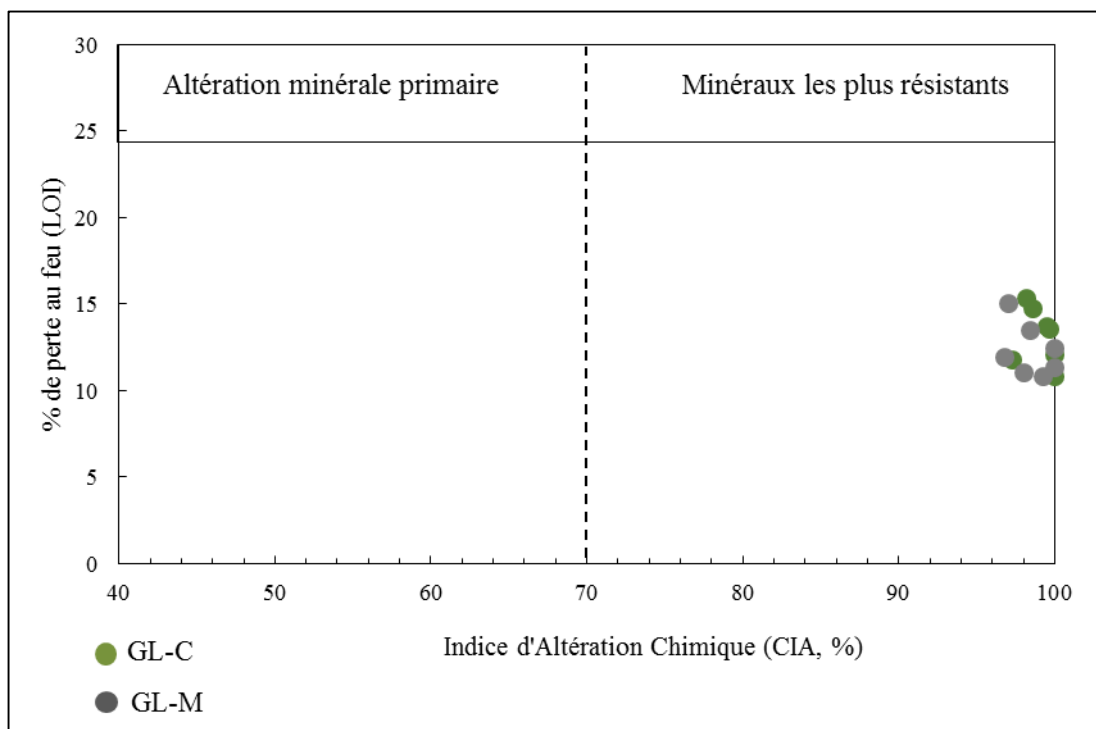


Figure 22. Covariation de la perte au feu (LOI) et de l'indice d'altération chimique (CIA) dans les graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga (d'après le diagramme de Babechuk *et al.*, 2014)

Tableau 37. Matrice de corrélations de Pearson (1905) entre paramètres minéralogiques et géochimiques

Variabes	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SAF	S/R	IOL	CIA	IAL	IFL	IRLP	IRIP	IRCP	DVRAR	Quartz	Kaolinite	Muscovite	Gibbsite	Hématite	Goethite
SiO <sub>2</sub>	1																			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		1																		
LOI			1																	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				1																
SAF					1															
S/R						1														
IOL							1													
CIA								1												
IAL									1											
IFL										1										
IRLP											1									
IRIP												1								
IRCP													1							
DVRAR														1						
Quartz	<b>0,549</b>	<b>-0,590</b>	<b>-0,562</b>	-0,252	<b>0,538</b>	0,493	<b>-0,527</b>	0,070	0,454	-0,458	0,484	0,177	0,201	<b>-0,751</b>	<b>1</b>					
Kaolinite	-0,101	0,377	-0,325	0,079	0,382	-0,201	0,128	0,167	<b>-0,689</b>	0,351	-0,491	-0,502	-0,502	0,338		<b>1</b>				
Muscovite	0,471	-0,070	0,148	<b>-0,582</b>	-0,370	<b>0,579</b>	-0,514	<b>-0,654</b>	<b>0,651</b>	<b>-0,699</b>	0,432	0,065	<b>0,814</b>	-0,396			<b>1</b>			
Gibbsite	-0,376	0,262	<b>0,695</b>	0,145	<b>-0,662</b>	-0,341	0,338	-0,057	0,204	0,077	0,035	0,277	0,165	0,295				<b>1</b>		
Hématite	-0,177	-0,015	-0,158	0,240	0,169	-0,137	0,201	0,138	-0,424	0,357	-0,339	-0,162	-0,408	0,248					<b>1</b>	
Goethite	-0,341	-0,386	-0,172	<b>0,601</b>	0,380	-0,382	0,387	<b>0,673</b>	-0,233	0,512	-0,111	0,295	-0,491	0,054						<b>1</b>

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification  $\alpha = 0,05$

kaolinitisation (Fig. 23). Cette kaolinitisation est cependant plus accentuée dans les graveleux latéritiques dérivés des micaschistes. Elle est associée, à un degré moindre, à la latérisation dans les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes (Fig. 23).

Le diagramme A – CN – K (Nesbitt, 1992) associé à CIA montre que les graveleux latéritiques suivent une évolution parallèle à A – K (Fig. 24). Ceci correspond à une évacuation totale de Ca et Na, associée à un enrichissement très faible en K ; l'évacuation en Ca et Na étant d'égale intensité dans les graveleux latéritiques étudiés. Cette évolution est semblable à celles rencontrées dans les graveleux latéritiques développés sur migmatites (Nzabakurikiza *et al.*, 2012), gneiss migmatitiques (Yongue, 1986 ; Ndjigui, 2008), chloritoschistes (Onana *et al.*, 2016), et charnockites (Onana *et al.*, 2017) au Cameroun mais, différente sur basaltes en Inde (Babechuk *et al.*, 2014).

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 (Figs. 25 et 26) (Nesbitt et Young, 1989 ; Nesbitt, 1992 ; Babechuk *et al.*, 2014). Le diagramme A – L – F (Fig. 25) montre une diminution très importante des éléments labiles et, une kaolinitisation des matériaux étudiés, accompagnée d'une latérisation faible à très légèrement modérée dans les chloritoschistes.

La position des graveleux latéritiques étudiés dans le diagramme AF – CNK – M (Fig. 26), montre que la dissolution des feldspaths (pertes en Ca, Na et K) est proportionnelle à celle des minéraux mafiques (perte en Mg). Ce constat est similaire à celui fait sur le même type de matériaux développés sur chloritoschistes à Mbalmayo et Bengbis (Onana *et al.*, 2016), sur migmatites (Nzabakurikiza *et al.*, 2012) et sur granites (Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017).

Le diagramme  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{T})}$  (SAF), permet de différencier les matériaux kaolinitisés, latérisés et bauxitisés (Schellmann, 1981, 1986). La position des matériaux étudiés dans le diagramme ternaire SAF (Fig. 27) indique que les graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga sont majoritairement kaolinitisés. Seuls quelques graveleux latéritiques développés aussi bien sur chloritoschistes que sur micaschistes présentent une latérisation faible à modérée, tandis qu'un autre, développé sur chloritoschistes indique un degré de latérisation moyen. Les matériaux étudiés sont ferrugineux. Ce constat est similaire à celui des travaux effectués dans le Plateau sud camerounais (Ekodeck, 1984 ; Yongue, 1986 ; Bitom, 1988 ; Ndjigui, 2008 ; Onana *et al.*, 2016 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017). Les teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  demeurent comparables dans les graveleux latéritiques étudiés.

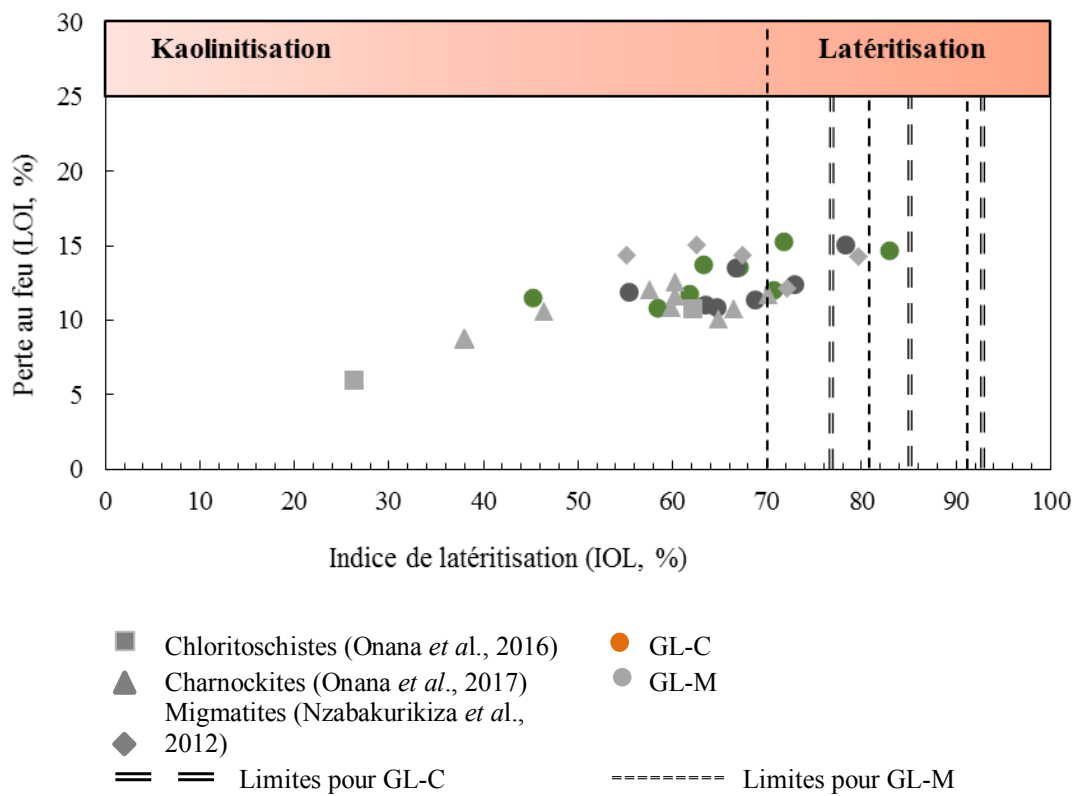
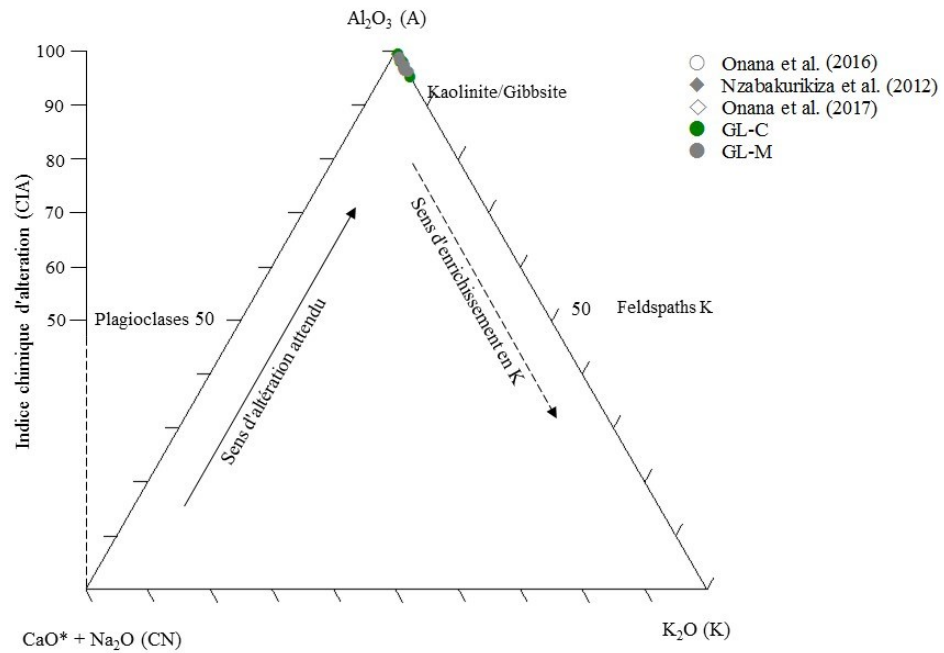


Figure 23. Covariation comparée perte au feu (LOI) – Indice de latérisation (IOL) dans les graveleux latéritiques de la zone d’Akonolinga avec ceux des autres auteurs (d’après le diagramme de Babechuk *et al.*, 2014)



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

Figure 24. Position comparée des différents degrés d'altération des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga et ceux des autres auteurs dans le diagramme molaire  $Al_2O_3 - CaO^* + Na_2O - K_2O$  (A – CN – K) (Nesbitt et Young, 1989)



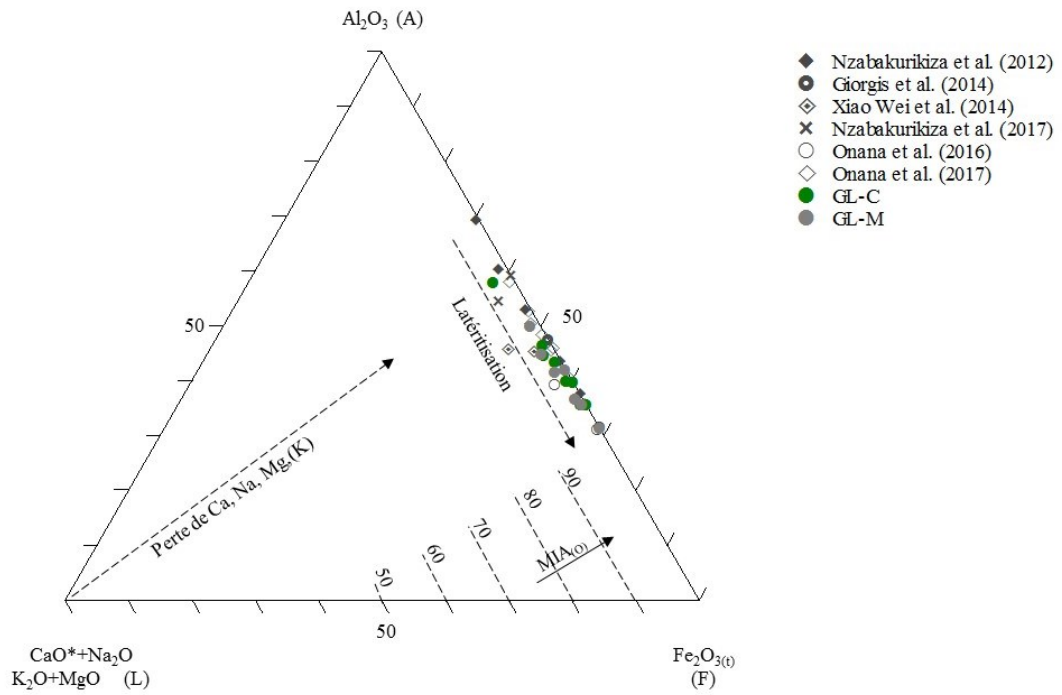


Figure 25. Position comparée des différents degrés d'altération des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga et ceux des autres auteurs dans le diagramme molaire A- L-F (d'après Babechuk *et al.*, 2014)

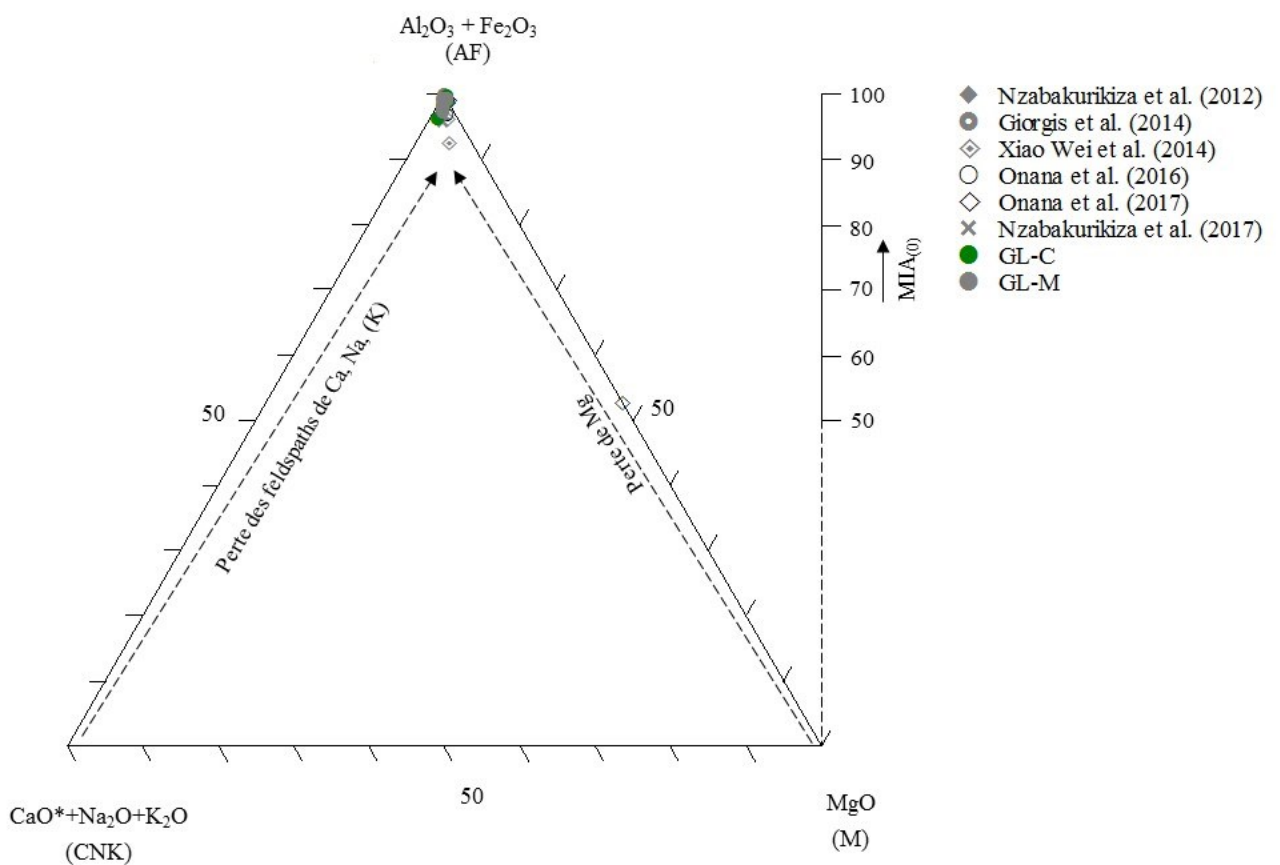


Figure 26. Illustration comparée des différents degrés d'altération des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga dans le diagramme AF-CNK-M (d'après Schellmann, 1986)

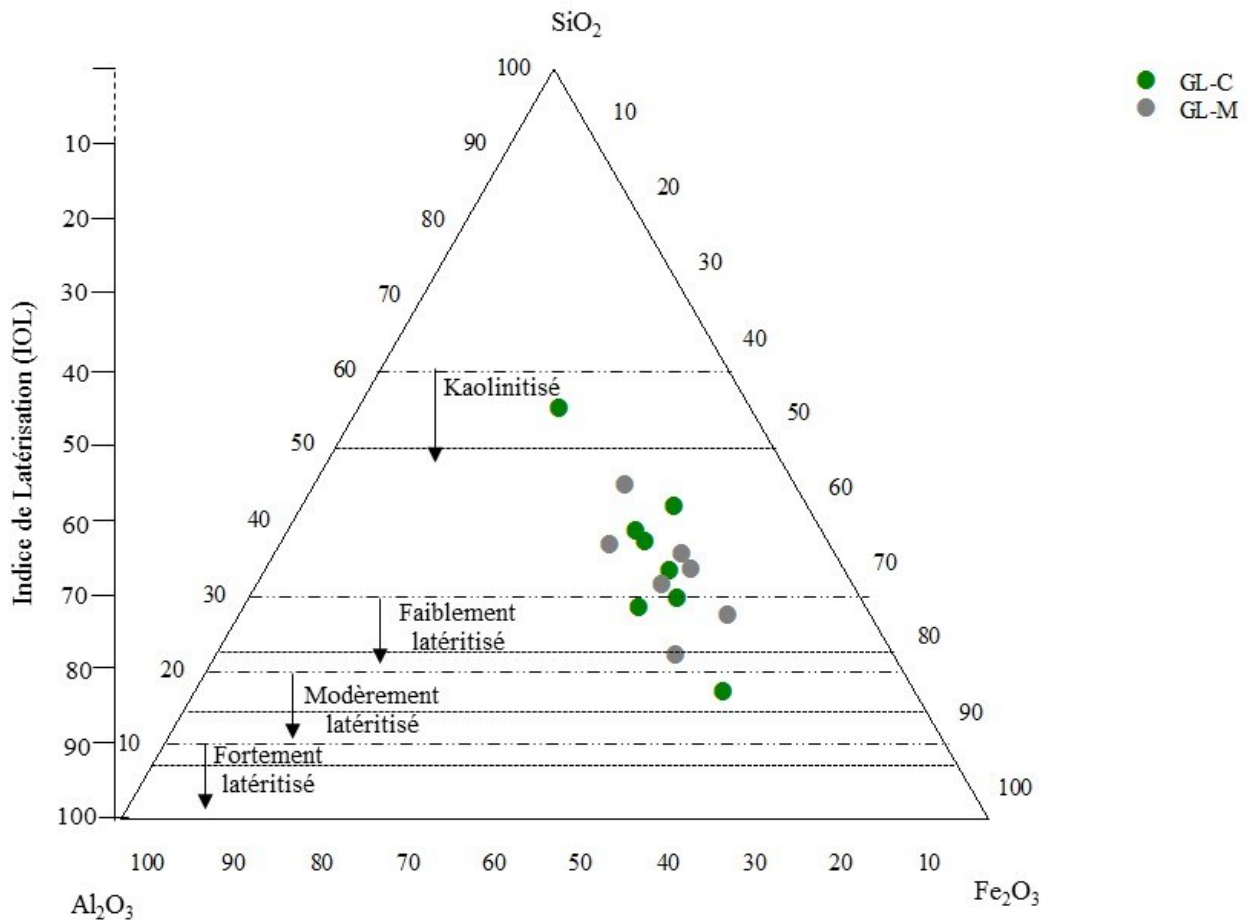


Figure 27. Illustration des différents degrés d'altération dans le diagramme ternaire  $\text{SiO}_2$ – $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (SAF) (d'après Babechuk *et al.*, 2014)

Les diagrammes altérologiques triangulaires (Figs. 28 et 29) permettent de préciser certains faits. Le diagramme triangulaire L – I – C (Fig. 28) 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 charnockites (Onana *et al.*, 2017) et sur chloritoschistes (Onana, 2010 ; Ntoulala, 2014) en zone de Plateau sud camerounais. L'évolution d'ensemble du milieu d'altération, que présente le diagramme A – I – C (Fig. 29), montre que le duo altération – induration prévaut dans les graveleux latéritiques étudiés ; l'altération prévalant sur l'induration. Ce fait concorde avec les résultats obtenus en zone de Plateau sud camerounais (Ekodeck, 1984 ; Yongue, 1986 ; Bitom, 1988 ; Ndjigui 2008 ; Onana *et al.*, 2016 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017).

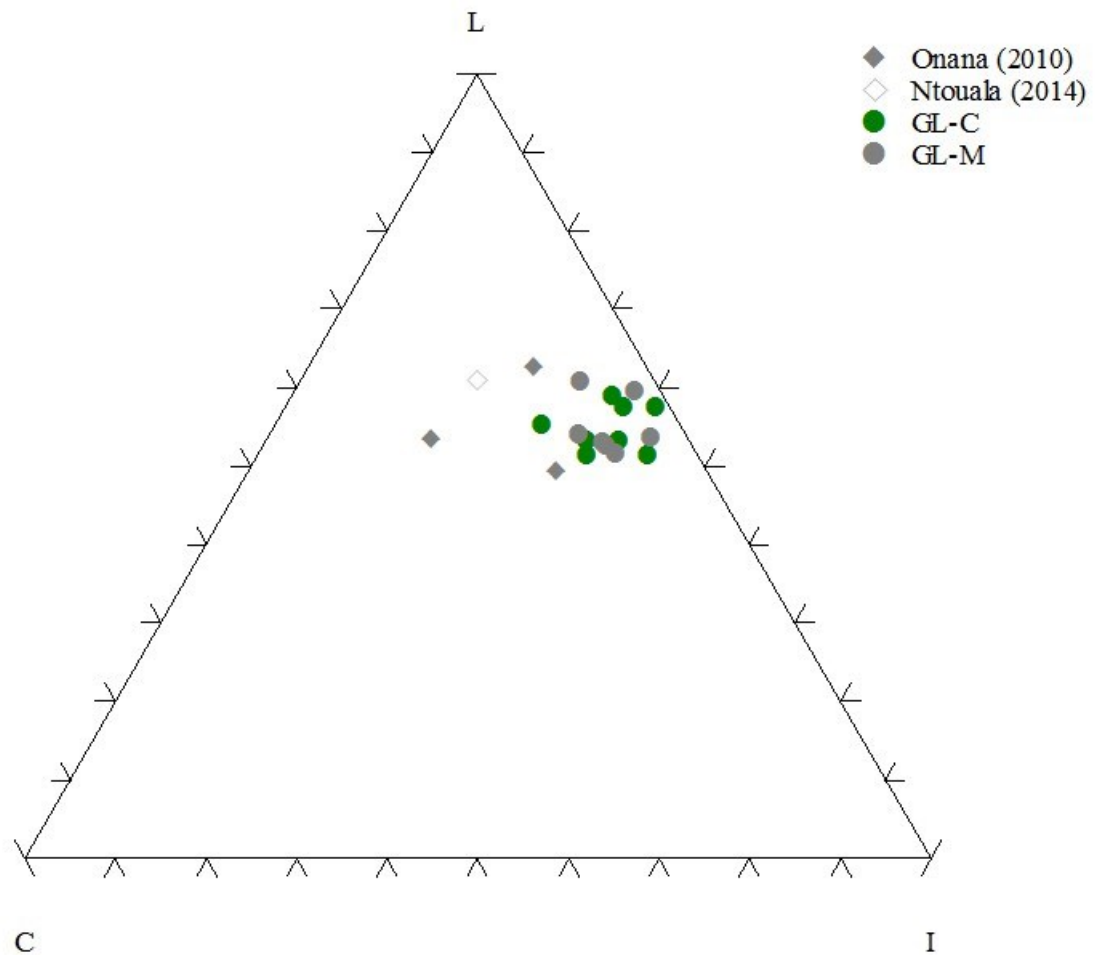
Les diagrammes carrés des figures 29 et 30 traduisent le caractère modéré à franc de la ferrallitisation dans les graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga. Ces matériaux sont faiblement à moyennement ferrugineux (Figs. 30 et 31). Les libérations des oxyhydroxydes de fer sont à l'intérieur de leurs zones respectives de cuirassement potentiel ; les matériaux développés sur chloritoschistes étant plus ferrugineux que ceux dérivés des micaschistes. Ce fait est en rapport avec les cuirasses ferrugineuses observables sur le terrain dans la zone d'étude. Les points représentatifs des graveleux latéritiques étudiés se localisent dans les domaines de la monosiallisation et de l'allitisation, avec une prédominance de l'allitisation (Figs. 30 et 31). Ces matériaux sont à oxyhydroxydes d'aluminium subordonnés. L'importance potentielle de l'aluminium libre (IAL) indique des matériaux très faiblement à faiblement alumineux (Fig. 31). L'évolution d'ensemble montre que l'altération est moyenne à forte dans les graveleux latéritiques dérivés des micaschistes et, moyenne à très forte, dans ceux dérivés des chloritoschistes dans la zone d'Akonolinga (Fig. 31).

Au total, les graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga sont kaolinitisés. Les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes présentent un degré de latéritisation moyen, alors que ceux dérivés des micaschistes sont faiblement à modérément latéritisés. Le trio lixiviation - altération - induration prévaut dans les graveleux latéritiques étudiés, mais de manière relativement prononcée dans les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes.

## **II. VARIABILITE STATISTIQUE**

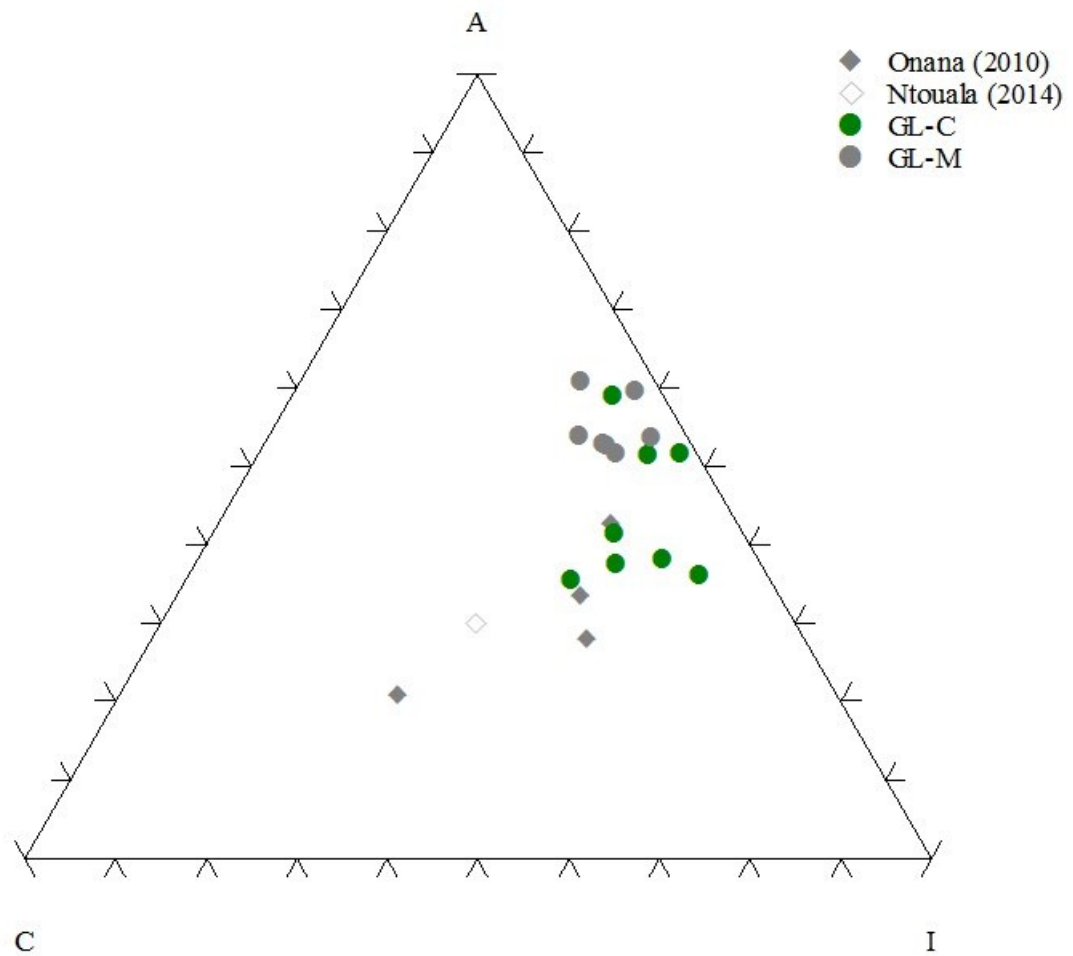
### **II.1. Types de graveleux latéritiques dans la zone d'Akonolinga**

L'étude pétrologique des graveleux de la zone d'Akonolinga montre des différences



*L : lixiviation ; I : induration ; C : confinement*

Figure 28. Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les graveleux latéritiques sur chloritoschistes et sur micaschistes de la zone d'Akonolinga (d'après Ekodeck et Kamgang, 2002)



*A : altération ; I : induration ; C : confinement*

Figure 29. Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les graveleux latéritiques sur chloritoschistes et sur micaschistes de la zone d'Akonolinga (d'après Ekodeck et Kamgang, 2002)

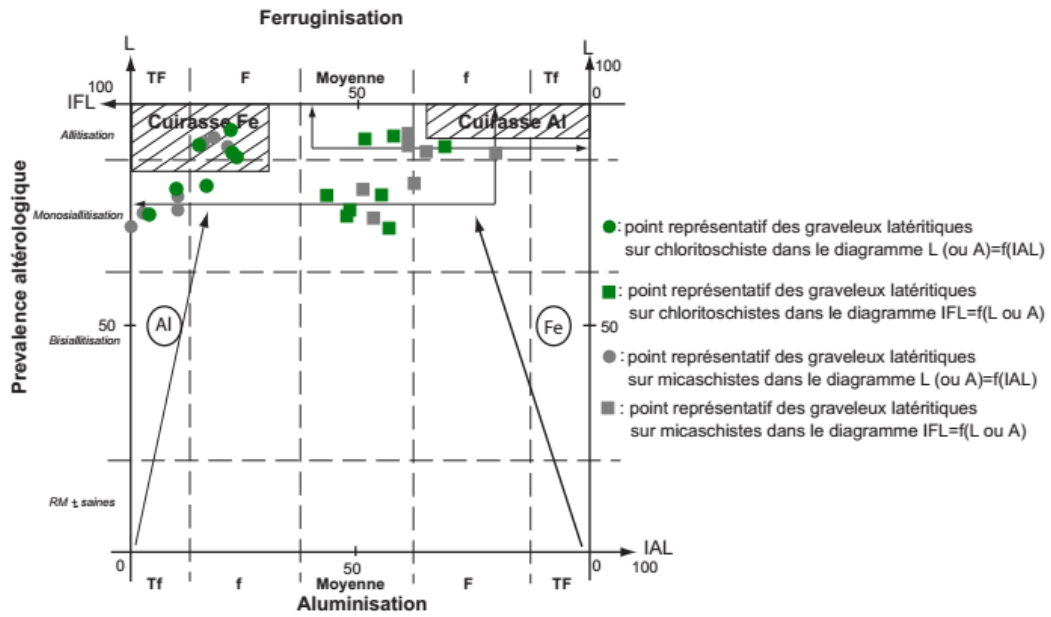


Figure 30. Evolution des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga du point de vue lixiviation et libération des oxyhydroxydes d'aluminium (IAL) et de fer ferrique (IFL) (d'après Ekodeck et Kamgang, 2002)

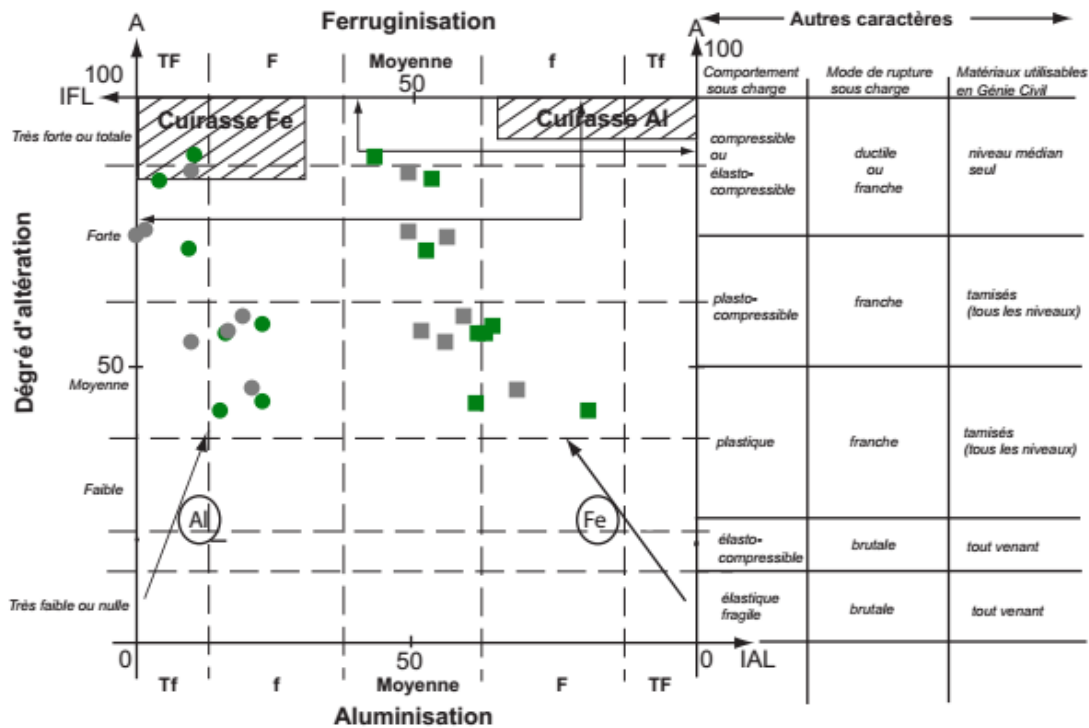


Figure 31. Caractérisation de l'importance de l'altération dans les graveleux latéritiques sur chloritoschistes et sur micaschistes de la zone d'Akonolinga, en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; Altération (d'après Ekodeck et Kamgang, 2002)

dans l'évolution pédogénétique des graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes et des micaschistes. L'étude statistique par classification hiérarchique ascendante (CAH) des données géotechniques a donc pour but de confirmer ou d'infirmer l'existence de deux types de graveleux latéritiques bien distincts, en fonction de la roche parentale.

Les résultats de la CHA réalisée à partir des données géotechniques sont présentés sous forme de dendrogramme (Fig. 32). Ces résultats confirment l'existence de 02 classes de graveleux latéritiques dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 35. La classe 1 est constituée de 18 graveleux latéritiques dont, 14 sur chloritoschistes et 4 sur micaschistes et, la classe 2, de 16 graveleux latéritiques dérivés des micaschistes et, 8 des chloritoschistes. Le diagramme des niveaux obtenu (Fig. 33), avec une courbe non rectiligne, confirme la bonne qualité de la classification réalisée. Le fait d'avoir des groupes hétérogènes serait dû à la dispersion des données des graveleux latéritiques, notamment, ceux développés sur chloritoschistes. Le nuage des individus (Fig. 34) montre que l'axe 2 oppose les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes à ceux dérivés des micaschistes. Le plan factoriel illustre donc globalement 02 grands groupes de matériaux : les graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes et, ceux développés sur micaschistes. Le biplot des individus et des variables (Fig. 35) montre que les graveleux latéritiques développés sur micaschistes sont caractérisés par les paramètres physiques et de compactage, tandis que, ceux dérivés des chloritoschistes, sont principalement caractérisés par les paramètres de granulométrie et de plasticité.

## **II.2. Coefficient de variation des paramètres minéralogiques, géochimiques et géotechniques**

Le coefficient de variation des paramètres minéralogiques indique une grande dispersion des variables minéralogiques dans les matériaux sur micaschistes comparativement à celles des graveleux latéritiques issus des chloritoschistes. La faible variation de la teneur en muscovite traduit des teneurs similaires dans les deux types de matériaux. La variation des teneurs en quartz, kaolinite et hématite est moyenne, pour les matériaux développés sur chloritoschistes et, élevée pour les graveleux latéritiques sur micaschistes. Pour tous les paramètres minéralogiques, les valeurs de coefficient de variation sont plus élevées dans les matériaux sur micaschistes comparativement à celles des graveleux latéritiques issus des chloritoschistes. La faible variation de SAF traduit des teneurs comparables des oxydes majoritaires dans les graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga. La variation de la teneur en alumine  $Al_2O_3$  est faible pour les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes et,

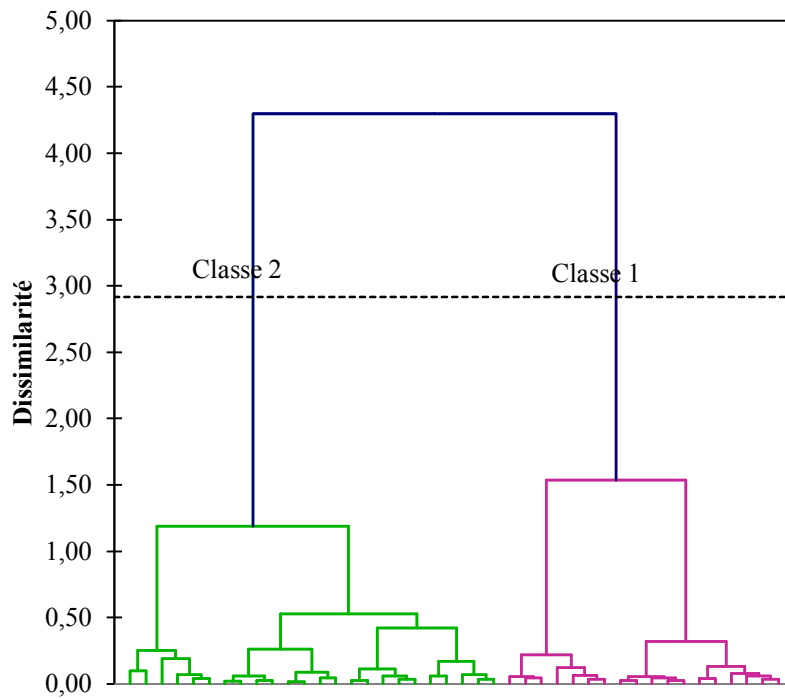


Figure 32. Dendrogramme des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga en fonction des paramètres géotechniques

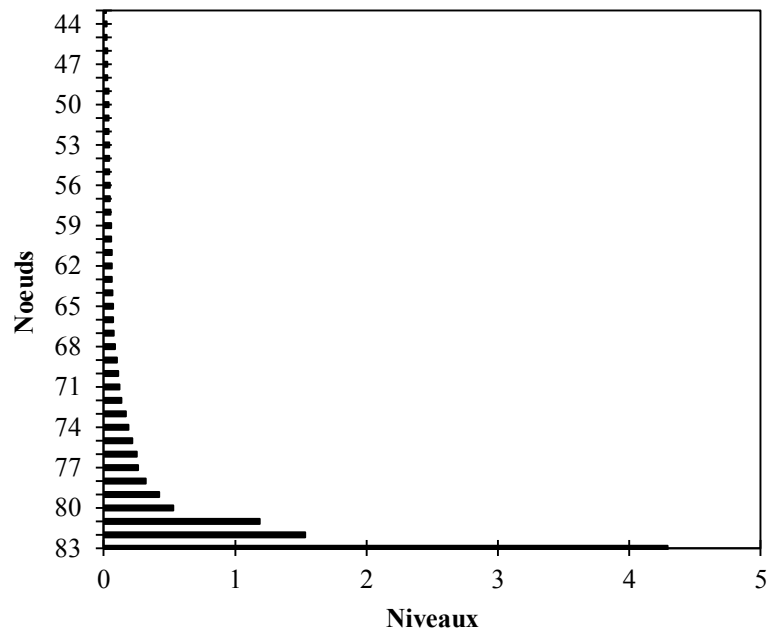
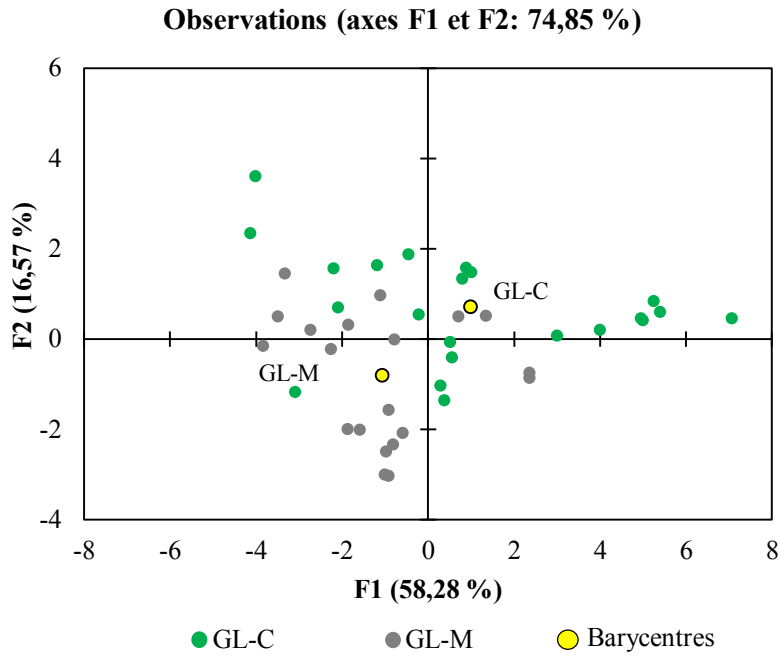


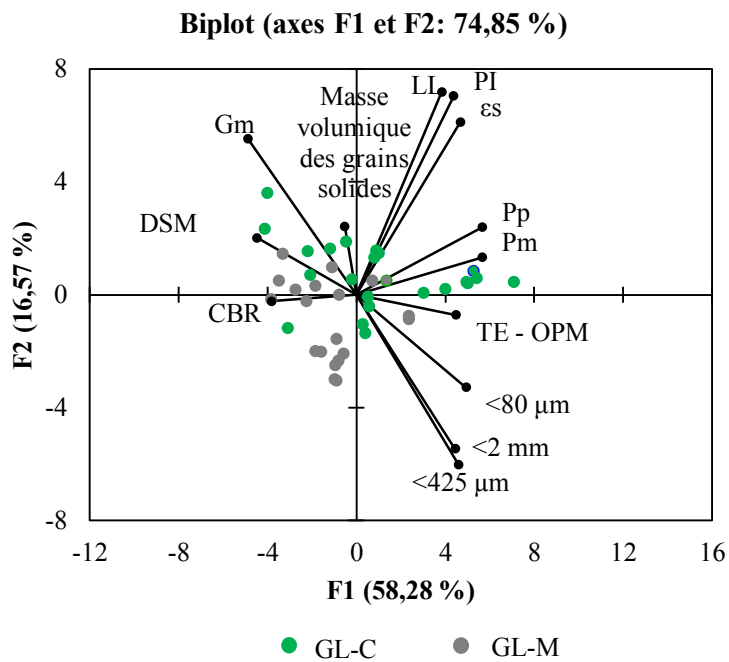
Figure 33. Diagramme des niveaux des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga





*GL-C : graveleux latéritiques sur chloritoschistes ; GL-M : graveleux latéritiques sur micaschistes*

Figure 34. Nuage de points des individus des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga



*GL-C : graveleux latéritiques sur chloritoschistes ; GL-M : graveleux latéritiques sur micaschistes*

Figure 35. Biplot des variables géotechniques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga

Tableau 35. Principales caractéristiques géotechniques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga en fonction des barycentres des classes

Classe	$\gamma_s$ (gf/cm <sup>3</sup> )	Squelette (<2 mm), %	Mortier (<425 $\mu$ m), %	Fines (<80 $\mu$ m), %	LL (%)	IP (%)	Gm	Pm	Pp	$\varepsilon_s$	TE – OPM (%)	DSM	CBR (%)
1													
(GL-C)	2,83	48,27	36,31	27,63	63	29	1,88	1064	797	0,019	13,79	2,00	44
2													
(GL-M)	2,83	34,82	25,45	17,90	53	18	2,22	428	311	0,007	11,19	2,13	65

*Classe 1 : GL-C : Graveleux latéritiques sur chloritoschistes ; Classe 2 : GL-M : Graveleux latéritiques sur micaschistes ;  $\gamma_s$  : masse volumique des grains solides, LL : limite de liquidité ; IP : indice de plasticité ; Gm : module de classement ; Pm : module de plasticité ; Pp : produit de plasticité ;  $\varepsilon_s$  : potentiel de gonflement ; TE – OPM : teneur en eau à l'optimum Proctor modifié ; DSM : densité sèche maximale ; CBR : californian bearing ratio*

moyenne, pour ceux dérivés des micaschistes (Tab. 36). La variation du ratio S/R est élevée pour les matériaux développés sur chloritoschistes et moyenne pour les graveleux latéritiques sur micaschistes (Tab. 36). Pour les indices géochimiques, IAL (CV = 72,31) est le paramètre qui varie le plus dans les graveleux latéritiques étudiés (Tab. 36). La variation est faible pour IRLP, moyenne pour IFL, DVRAR et IRIP. De tous les paramètres géochimiques étudiés, les valeurs de CV sont en général plus élevées sur les graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes que sur ceux dérivés des micaschistes. La faible variation de la masse volumique des grains solides corrobore le constat fait sur la valeur de ce paramètre dans les matériaux de la région de Yaoundé (CV < 10 %) (Ekodeck et Kamgang, 2002). Dans les graveleux latéritiques dérivés des micaschistes, de tous les paramètres étudiés, seuls IP et  $\epsilon_s$ , présentent des valeurs de CV supérieures à celles obtenues pour les mêmes paramètres sur les graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes (Tab. 37). La variation des paramètres squelette (<2 mm) et mortier (<425  $\mu\text{m}$ ) est moyenne pour les graveleux latéritiques dérivés des micaschistes et, forte, pour ceux développés sur chloritoschistes (Tab. 37). Dans les deux types de matériaux, la variation de Gm est liée à celle des paramètres squelette et mortier. Les paramètres squelette, mortier, fines et TE – OPM sont plus dispersés sur chloritoschistes, contrairement à l'indice de plasticité (IP) qui présente une grande dispersion sur les graveleux latéritiques étudiés sur micaschistes. Pour les paramètres dérivés, seul Gm présente une variation différente pour les deux types de matériaux : faible sur ceux développés sur micaschistes et, moyenne, sur ceux dérivés des chloritoschistes (Tab. 37). Les valeurs de DSM présentent une faible variation tandis que celles de TE – OPM et CBR varient moyennement. La dispersion des résultats de ces paramètres de compactage peut être due à la ségrégation des grains dans le moule de compactage et à la variabilité intrinsèque du sol (Otálvaro *et al.*, 2015). En général, le coefficient de variation des différents paramètres des graveleux latéritiques étudiés montre une grande dispersion sur les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes.

### **II.3. Relations entre paramètres minéralogiques et géotechniques**

Sur les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes, la teneur en quartz est liée négativement aux paramètres LL (-0,809) et TE – OPM (-0,800) et positivement aux paramètres masse volumique des grains solides (0,734), teneur en cailloux (0,780) et DSM (0,854) (Tab. 38). La teneur en muscovite est liée négativement à Gm (-0,753) et positivement aux paramètres Pm (0,909), Pp (0,849),  $\epsilon_s$  (0,712), <2 mm (0,715), <425  $\mu\text{m}$  (0,791), <80  $\mu\text{m}$

Tableau 36. Variation des paramètres géochimiques des graveleux latéritiques dans la zone d'Akonolinga

Variation	CV (%)	GL-C	GL-M
Faible	< 15	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> , LOI, SAF, CIA, <b>IRIP</b> , IRLP	LOI, SAF, <b>IOL</b> , CIA, IRLP
Moyenne	15–35	SiO <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , <b>IOL</b> IFL, DVRAR	SiO <sub>2</sub> , <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , <b>S/R</b> IFL, DVRAR, <b>IRIP</b>
Forte	> 35	<b>S/R</b> , IAL, IRCP	IAL, IRCP

*GL-C : Gravelleux latéritiques sur chloritoschistes ; GL-M : Gravelleux latéritiques sur micaschistes*

*Les paramètres en gras traduisent les différences de variation dans les deux types de matériaux*

Tableau 37. Variation des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga

Variation	CV (%)	GL-C	GL-M
Faible	< 15	$\gamma_s$ , LL, DSM	$\gamma_s$ , LL, <b>Gm</b> , DSM
Moyenne	15–35	<80 $\mu$ m, IP, <b>Gm</b> , TE – OPM, CBR	<b>&lt;2 mm, &lt;425 <math>\mu</math>m</b> , <80 $\mu$ m, IP, TE – OPM, CBR
Forte	> 35	<b>&lt;2 mm, &lt;425 <math>\mu</math>m</b> , Pm, Pp, $\epsilon_s$	Pm, Pp, $\epsilon_s$

*GL-C : Gravelleux latéritiques sur chloritoschistes ; GL-M : Gravelleux latéritiques sur micaschistes*

*Les paramètres en gras traduisent les différences de variation dans les deux types de matériaux*

Tableau 38. Matrice de corrélation de Pearson (1905) des relations entre paramètres minéralogiques et géotechniques des graveleux latéritiques sur chloritoschistes de la zone d'Akonolinga

Variables	Acb	Gm	Ac	Pm	Pp	es	Vbs	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	< 2 mm (%)	< 425 $\mu$ m (%)	< 80 $\mu$ m (%)	< 2 $\mu$ m (%)	Limons (%)	Sables (%)	Graviers (%)	Cailloux (%)	LL (%)	IP (%)	TE – OPM (%)	DSM	CBR (%)	
Acb	1																					
Gm		1																				
Ac			1																			
Pm				1																		
Pp					1																	
es						1																
Vbs							1															
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )								1														
< 2 mm (%)									1													
< 425 $\mu$ m (%)										1												
< 80 $\mu$ m (%)											1											
< 2 $\mu$ m (%)												1										
Limons (%)													1									
Sables (%)														1								
Graviers (%)															1							
Cailloux (%)																1						
LL (%)																	1					
IP (%)																		1				
TE – OPM (%)																			1			
DSM																					1	
CBR (%)																						1
Quartz	0,655	0,376	0,553	-0,419	-0,514	-0,466	0,140	<b>0,734</b>	-0,334	-0,340	-0,472	-0,469	-0,464	-0,114	-0,622	<b>0,780</b>	<b>-0,809</b>	-0,512	<b>-0,800</b>	<b>0,854</b>	-0,606	
Kaolinite	0,361	0,294	0,335	-0,240	-0,264	0,013	0,403	0,014	-0,124	-0,382	-0,414	-0,403	-0,451	0,226	-0,255	0,306	0,003	0,070	-0,257	0,278	0,573	
Muscovite	-0,552	<b>-0,753</b>	-0,390	<b>0,909</b>	<b>0,849</b>	<b>0,712</b>	-0,596	0,031	<b>0,715</b>	<b>0,791</b>	<b>0,711</b>	<b>0,732</b>	0,262	0,617	-0,495	-0,366	0,181	0,642	0,559	-0,568	-0,545	
Gibbsite	-0,630	-0,321	<b>-0,733</b>	-0,046	0,001	-0,413	-0,281	-0,554	0,272	0,313	0,395	0,360	<b>0,780</b>	0,059	0,624	<b>-0,718</b>	0,064	-0,389	0,050	-0,299	0,338	
Hématite	0,262	0,209	0,371	0,138	0,237	0,545	0,386	0,287	-0,291	-0,210	-0,089	-0,065	-0,324	-0,455	0,108	0,215	0,578	0,548	0,493	-0,112	0,020	
Goethite	<b>0,778</b>	<b>0,853</b>	0,701	<b>-0,806</b>	<b>-0,777</b>	-0,523	0,541	0,314	<b>-0,887</b>	<b>-0,817</b>	<b>-0,796</b>	<b>-0,806</b>	-0,498	<b>-0,844</b>	0,327	0,658	-0,256	-0,482	-0,478	0,626	0,028	

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification  $\alpha = 0,05$

(0,711), <2  $\mu\text{m}$  (0,732). La teneur en gibbsite liée positivement à la teneur en limons (0,780) et négativement à la teneur en cailloux (-0,718) et à Ac (-0,733) (Tab. 38). La teneur en goethite est liée positivement aux paramètres Acb (0,778) et Gm (0,853) et, négativement aux paramètres Pm (-0,806), <2 mm (-0,887), <425  $\mu\text{m}$  (-0,818), <80  $\mu\text{m}$  (-0,796), <2  $\mu\text{m}$  (-0,806) et teneur en sables (-0,844) (Tab. 38).

Dans les matériaux développés sur micaschistes, la teneur en quartz est liée négativement à LL (-0,879) (Tab. 39). Il en est de même de la relation entre la teneur en gibbsite et Acb (-0,741). Des relations positives existent entre muscovite et limons (0,767), hématite et VBS (0,759) et, entre kaolinite et teneur en cailloux (0,794) (Tab. 39).

#### **II.4. Relations entre paramètres géochimiques et géotechniques**

Dans les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes, les teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et la somme des oxydes majoritaires (SAF) sont liés de manière directe aux paramètres géotechniques. La teneur en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  est liée au CBR par une relation polynomiale directe d'ordre 2 (Tab. 40). La somme des oxydes majoritaires (SAF) est liée à DSM par une polynomiale directe d'ordre 2 et, à la masse volumique des grains solides  $\rho_s$  par une relation linéaire directe (Tab. 40). Le paramètre CBR est lié à IRLP par une relation linéaire inverse. La portance CBR diminue donc avec l'augmentation de la lixiviation. La teneur en graviers est liée au paramètre IRLP par une relation polynomiale inverse d'ordre 3 (Tab. 40).

Dans les graveleux latéritiques dérivés des micaschistes, SAF est lié aux paramètres granulométriques (fines, limons, Pm et Pp) par une relation linéaire inverse et, à CBR, par une relation linéaire directe. Le paramètre LOI est lié aux fines, Pm, Pp et CBR par une relation linéaire inverse et, à la teneur en limons, par une relation polynomiale inverse d'ordre 2. La teneur en graviers est liée à  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  par une relation linéaire directe (Tab. 40), ce qui indique que les graviers observés sont ferrugineux. Cette relation marque l'intervention du fer sous forme de concrétions (Ekodeck et Kamgang, 2002). La teneur en sables est liée au rapport S/R par une polynomiale d'ordre 2. Les valeurs de bleu de méthylène (VBS) et de CIA sont liées par une relation linéaire directe (Tab. 38), donc l'altération augmente l'argilosité dans les graveleux latéritiques. Le paramètre IFL est lié au VBS par une relation linéaire directe et, à la teneur en sables par une relation linéaire inverse. Les teneurs en sables diminuent donc avec l'induration due au fer ferrique libre. Par contre, la valeur de bleu augmente avec IFL. Les paramètres DVRAR et LL sont liés par une relation linéaire directe (Tab. 40). La portance CBR n'est liée à aucun paramètre altérologique dans ces matériaux dérivés des micaschistes.

Au total, le comportement des paramètres géochimiques et des paramètres

Tableau 39. Matrice de corrélation de Pearson (1905) des relations entre paramètres minéralogiques et géotechniques des graveleux latéritiques micaschistes de la zone d'Akonolinga

Variables	Acb	Gm	Ac	Pm	Pp	εs	Vbs	γs (gf/cm <sup>3</sup> )	< 2 mm (%)	< 425 μm (%)	< 80 μm (%)	< 2 μm (%)	Limons (%)	Sables (%)	Graviers (%)	Cailloux (%)	LL (%)	IP (%)	TE – OPM (%)	DSM	CBR (%)	
Acb	1																					
Gm		1																				
Ac			1																			
Pm				1																		
Pp					1																	
εs						1																
Vbs							1															
ρs (g/cm <sup>3</sup> )								1														
< 2 mm (%)									1													
< 425 μm (%)										1												
< 80 μm (%)											1											
< 2 μm (%)												1										
Limons (%)													1									
Sables (%)														1								
Graviers (%)															1							
Cailloux (%)																1						
LL (%)																	1					
IP (%)																		1				
TE – OPM (%)																			1			
DSM																					1	
CBR (%)																						1
Quartz	0,045	0,097	-0,031	-0,414	-0,592	-0,428	-0,554	0,244	0,191	-0,099	-0,499	-0,472	-0,449	0,667	-0,056	-0,162	<b>-0,879</b>	-0,457	-0,369	0,478	0,534	
Kaolinite	0,507	0,538	0,018	-0,375	-0,272	-0,191	0,489	-0,154	-0,626	-0,544	-0,297	-0,292	-0,279	-0,614	-0,106	<b>0,794</b>	0,263	-0,231	-0,215	0,105	0,034	
Muscovite	-0,551	-0,683	-0,150	0,724	0,638	0,464	-0,499	0,592	0,701	0,672	0,556	0,427	<b>0,767</b>	0,543	-0,489	-0,335	0,163	0,401	0,589	-0,510	-0,609	
Gibbsite	<b>-0,764</b>	-0,638	-0,155	0,475	0,488	0,240	-0,350	-0,590	0,554	0,661	0,609	0,661	0,425	0,231	-0,119	-0,508	0,366	0,323	0,449	-0,474	-0,332	
Hématite	0,706	0,582	0,452	-0,162	-0,065	0,199	<b>0,759</b>	0,192	-0,704	-0,587	-0,299	-0,334	-0,222	-0,701	0,645	0,196	0,108	0,207	-0,447	0,396	0,201	
Goethite	0,457	0,430	0,016	-0,578	-0,508	-0,493	0,467	-0,158	-0,401	-0,434	-0,395	-0,268	-0,648	-0,259	0,697	-0,191	-0,372	-0,411	-0,295	0,361	0,591	

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha = 0,05

Tableau 40. Données récapitulatives des relations entre paramètres géochimiques et géotechniques

GL-C (N = 8)					GL-M (N = 7)				
Matériaux	Relations	Type	Equation	Coefficient de détermination	Domaine d'étude	Type	Equation	Coefficient de détermination	Domaine d'étude
SAF - <80 µm	-	-	-	-	-	Linéaire	<80 µm = -3,099SAF + 284,15	R <sup>2</sup> = 0,6752	SAF ∈ [82,27 – 86,84]
SAF - Limons	-	-	-	-	-	Linéaire	Limons = -0,595SAF + 53,55	R <sup>2</sup> = 0,8373	SAF ∈ [82,27 – 86,84]
SAF - Pm	-	-	-	-	-	Linéaire	Pm = -119,95SAF + 10688	R <sup>2</sup> = 0,8731	SAF ∈ [82,27 – 86,84]
SAF - Pp	-	-	-	-	-	Linéaire	Pp = -104,45SAF + 9271	R <sup>2</sup> = 0,8805	SAF ∈ [82,27 – 86,84]
SAF - CBR	-	-	-	-	-	Linéaire	CBR = 5,8041SAF - 431,02	R <sup>2</sup> = 0,671	SAF ∈ [82,27 – 86,84]
SAF - DSM	Polynomiale 2		DSM = 0,0107SAF <sup>2</sup> - 1,7465SAF + 73,323	R <sup>2</sup> = 0,6978	SAF ∈ [81,59 – 87,95]	-	-	-	-
SAF - γ <sub>s</sub>	Linéaire		γ <sub>s</sub> = 0,0603SAF - 2,2272	R <sup>2</sup> = 0,6875	SAF ∈ [81,59 – 87,95]	-	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - graviers	-	-	-	-	-	Linéaire	Graviers = 1,2241Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 14,838	R <sup>2</sup> = 0,7072	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ∈ [30,51 – 48,37]
S/R - Sables	-	-	-	-	-	Polynomiale 2	Sables = 10,368S/R <sup>2</sup> - 8,3851S/R + 8,3907	R <sup>2</sup> = 0,6567	S/R ∈ [0,63 – 1,79]
CIA - VBS	-	-	-	-	-	Linéaire	VBS = 0,7064CIA - 63,486	R <sup>2</sup> = 0,6919	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - CBR	Polynomiale 2		CBR = 0,5507Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2</sup> - 13,537Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 117,54	R <sup>2</sup> = 0,6525	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ∈ [13,49 – 21,29]	-	-	-	-
LOI - <80 µm	-	-	-	-	-	Linéaire	<80 µm = 4,0413LOI - 29,126	R <sup>2</sup> = 0,6863	LOI ∈ [10,84 – 15,02]
LOI - Limons	-	-	-	-	-	Polynomiale 2	Limons = -0,0619LOI <sup>2</sup> + 2,2678LOI - 15,463	R <sup>2</sup> = 0,6501	LOI ∈ [10,84 – 15,02]
LOI - Pm	-	-	-	-	-	Linéaire	Pm = 139,12LOI - 1223,6	R <sup>2</sup> = 0,702	LOI ∈ [10,84 – 15,02]
LOI - Pp	-	-	-	-	-	Linéaire	Pp = 131,55LOI - 1230,9	R <sup>2</sup> = 0,8349	LOI ∈ [10,84 – 15,02]
LOI - CBR	-	-	-	-	-	Linéaire	CBR = -7,6698LOI + 156,94	R <sup>2</sup> = 0,7004	LOI ∈ [10,84 – 15,02]
CBR - IRLP	Linéaire		CBR = -1,9793IRLP + 220,17	R <sup>2</sup> =0,7007	IRLP ∈ [74,56 – 92,59]	-	-	-	-
Graviers - IRLP	Polynomiale 3		Graviers = -0,0158IRLP <sup>3</sup> + 3,9879IRLP <sup>2</sup> + 9432,1	R <sup>2</sup> = 0,6625	IRLP ∈ [74,56 – 92,59]	-	-	-	-
VBS - IFL	-	-	-	-	-	Linéaire	VBS = 0,1667IFL - 1,458	R <sup>2</sup> = 0,8396	IFL ∈ [31,10 – 51,80]
Sables - IFL	-	-	-	-	-	Linéaire	Sables = -0,9362IFL + 55,744	R <sup>2</sup> = 0,7531	IFL ∈ [31,10 – 51,80]
LL - DVRAR	-	-	-	-	-	Linéaire	LL = 0,4324DVRAR + 29,698	R <sup>2</sup> = 0,759	DVRAR ∈ [40,88 – 76,19]



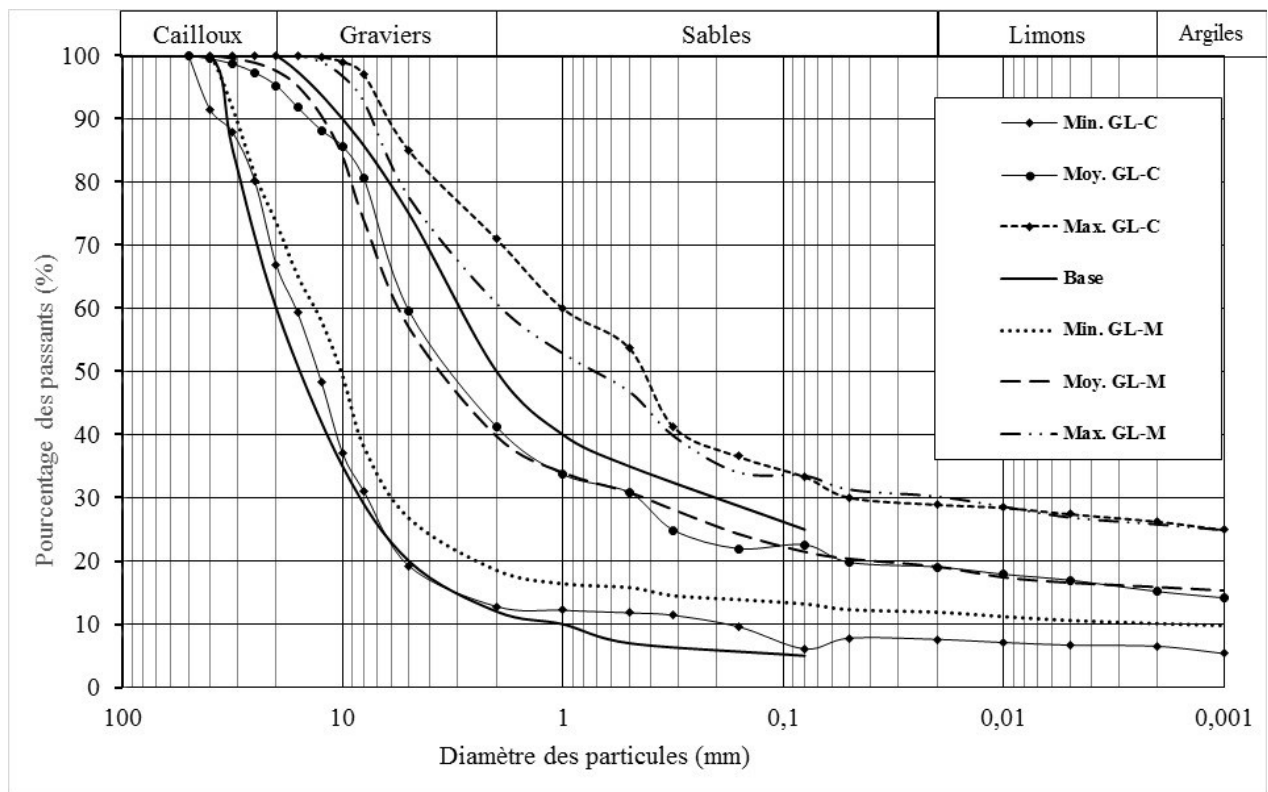
géotechniques est différent dans les deux types de graveleux latéritiques étudiés.

Dans les graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes, il existe peu de relations entre paramètres géotechniques et paramètres géochimiques. Les relations SAF vs. DSM et, SAF vs.  $\gamma_s$  obtenues, sont absentes dans les matériaux développés sur micaschistes. Les relations DSM vs. SiO<sub>2</sub> et, CBR vs. SiO<sub>2</sub>, obtenues dans les graveleux latéritiques du Sénégal (Nkoumou *et al.*, 2004) sont absentes dans les matériaux étudiés. Les relations IP vs. IRLP et, IP vs. IFL, observées dans les matériaux de la zone de Yaoundé (Ekodeck et Kamgang, 2002), sont absentes dans les matériaux de la zone d'Akonolinga.

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

##### **IV.1. Graveleux latéritiques naturels**

Les graveleux latéritiques ont de faibles performances si leur poids volumique des grains solides est inférieur à 2,75 gf/cm<sup>3</sup> et, d'excellentes performances, si la valeur de ce paramètre est supérieure ou égale à 2,85 gf/cm<sup>3</sup> (De Graft Johnson *et al.*, 1972 ; Nwaiwu *et al.*, 2006 ; Paige-Green *et al.*, 2015). Tous les graveleux latéritiques développés sur micaschistes ont des valeurs de poids volumique des grains solides supérieures ou égales à 2,75 gf/cm<sup>3</sup>. Ces matériaux présentent donc des performances bonnes à excellentes en construction routière. Les courbes granulométriques minimales et moyennes des matériaux étudiés s'intègrent dans le fuseau de spécification pour couche de base (CEBTP, 1984) (Fig. 36). Le fait est contraire pour les courbes maximales. La valeur moyenne de l'indice de plasticité IP obtenue (18 %) est inférieure au maximum exigé (20 %) pour une utilisation en couche de fondation des chaussées à fort trafic et, supérieure au maximum exigé (15 %), pour la construction des couches de base (CEBTP, 1984). Cinquante-cinq pourcent des matériaux développés sur micaschistes ont une valeur de IP inférieure à 15 %. La valeur moyenne de IP (18 %), proche de 15 %, suggère l'utilisation de ces matériaux en couche de fondation et, éventuellement, en couche de base. Selon l'abaque de plasticité de Casagrande, 40 % des graveleux latéritiques dérivés des micaschistes sont de plasticité moyenne. Les paramètres dérivés servent à quantifier l'influence de la plasticité des fines sur la performance générale du matériau, qui dépend de la proportion et de la nature de celles-ci (Charman, 1988 ; Bello et Osinubi, 2010). La valeur moyenne du module de classement (G<sub>m</sub>) des graveleux latéritiques sur micaschistes est de 2,10. Pour une utilisation en couche de base des chaussées à faible trafic, la valeur de G<sub>m</sub> doit être supérieure ou égale à 1,5 (Charman, 1988 ; Nwaiwu *et al.*, 2006). Les graveleux latéritiques sur micaschistes sont donc utilisables en couche de fondation pour tout type de trafic et en couche de base pour les chaussées à faible trafic.



GL-C : graveux latéritiques dérivés des chloritoschistes ; GL-M : graveux latéritiques dérivés des micaschistes

Figure 36. Position des courbes granulométriques des graveux latéritiques de la zone d'Akonolinga dans le fuseau de spécification pour couches de base (CEBTP, 1984)

Soixante pour cent des matériaux développés sur micaschistes présentent des valeurs de module de plasticité ( $P_m$ ) inférieures à 500, le maximum pour une utilisation en couche de fondation pour tout type de trafic (Charman, 1988). Le gonflement est un caractère important pour l'utilisation des matériaux (Millogo *et al.*, 2008). Les valeurs du potentiel de gonflement ( $\epsilon_s$ ) des graveleux latéritiques dérivés des micaschistes (0,002 – 0,017) indiquent que ces matériaux sont peu gonflants (Djedid *et al.*, 2001). Les valeurs du produit de plasticité ( $P_p$ ) de ces matériaux varient entre 161 et 755. La valeur moyenne obtenue (389) est largement supérieure à celles obtenues au Nigéria (133 – 197) (Nwaiwu *et al.*, 2006). Le produit de plasticité  $P_p$  est une caractéristique importante du comportement des graveleux latéritiques (DEGN, 1987 ; Bagarre, 1990). Quarante-vingt pour cent des matériaux développés sur micaschistes présentent des valeurs de  $P_p$  inférieures à 600. Ils peuvent donc, de ce fait, être utilisés en couche de fondation pour tout type de trafic. La valeur moyenne de la teneur en eau à l'optimum Proctor modifié (TE – OPM) des graveleux latéritiques sur micaschistes est de 11,78 %. Cette valeur moyenne est similaire à celles obtenues à l'Est (11,90 %) (Nzabakurikiza *et al.*, 2017) et au Sud (11,70 %) (Onana *et al.*, 2017) Cameroun. La valeur de densité sèche maximale (DSM) est de 2,10. Cette valeur est égale à celle obtenue sur les matériaux développés sur micaschistes du Centre Cameroun (2,10) (Kamtchueng *et al.*, 2015). Les graveleux latéritiques doivent avoir une densité sèche maximale supérieure ou égale à 1,80 et, à 2,00, pour des utilisations respectives en couche de fondation et en couche de base (CEBTP, 1984 ; DEGN, 1987). Cent pour cent des graveleux latéritiques dérivés des micaschistes présentent une valeur de DSM, acceptable pour une utilisation en couche de fondation et en couche de base. La valeur moyenne de l'indice portant CBR à 95 % OPM de ces matériaux est de 62 %. La valeur moyenne de ce paramètre est supérieure à celles obtenues sur les graveleux latéritiques dans la zone de Mfou (39 %) au Centre Cameroun (Kamtchueng *et al.*, 2015) et, au Burkina Faso (43 %) (Millogo *et al.*, 2008). Cette valeur moyenne CBR est comprise dans la fourchette de celles signalées au Sud Cameroun (31 – 68 %) (Onana *et al.*, 2017) et au Sénégal (60 – 84 %) (Fall *et al.*, 2008) ; elle est supérieure à 60 %, le minimum exigible, pour une utilisation en couche de base, pour les chaussées à faible trafic (CEBTP, 1984).

Au total, les graveleux latéritiques développés sur micaschistes sont utilisables en couche de fondation pour tout type de trafic et, en couche de base, pour les trafics T1 et T2.

Les graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes possèdent des valeurs de poids volumiques des grains solides supérieures à 2,75  $\text{gf/cm}^3$  ; ce qui prédit également des performances bonnes à excellentes en construction routière (De Graft-Johnson *et al.*, 1972 ;

Nwaiwu *et al.*, 2006 ; Paige-Green *et al.*, 2015). Ces matériaux présentent des valeurs de LL variant entre 47 et 72 %, soit une moyenne de 62 %. La valeur moyenne de leur indice de plasticité IP est de 27 %. Les graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes sont donc plus plastiques que ceux issus des micaschistes. La valeur moyenne de ce paramètre est supérieure à celles obtenues en zone de savane du Centre Cameroun (20 – 23 %) (Ndzié Mvindi *et al.*, 2017) et en Afrique de l’Ouest (7 – 19 %) (Ogunsanwo, 1988 ; Fall *et al.*, 1995 ; Frempong, 1995 ; Millogo *et al.*, 2008). Cette valeur moyenne de IP obtenue est également supérieure au maximum exigé pour une utilisation en couche de fondation des chaussées à fort trafic (20 %) (CEBTP, 1984). Dans ces graveleux latéritiques, la valeur moyenne du module de classement (Gm) est de 2,06. Plus de 95 % de ces graveleux latéritiques présentent des valeurs de ce paramètre, supérieures à 1,5. Cette valeur moyenne (2,06), est inférieure à celle obtenue (2,18) en zone forestière de l’Est Cameroun (Nzabakurikiza *et al.*, 2017) et, comparable à celle obtenue (2,04) au Sud Cameroun (Onana *et al.*, 2017). Les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes présentent une valeur moyenne de Pm de 868. Les valeurs de ce paramètre varient entre 232 et 2016. Les valeurs du potentiel de gonflement ( $\epsilon_s$ ) des graveleux latéritiques sur chloritoschistes (0,002 – 0,037) indiquent que ces matériaux sont peu gonflants (Djedid *et al.*, 2001). Les valeurs du produit de plasticité Pp varient entre 168 et 1213. Cette valeur moyenne (637), est largement supérieure à celles obtenues sur les latérites au Nigéria (133 – 197) (Nwaiwu *et al.*, 2006). La valeur moyenne de TEO est de 12,79 %. Cette valeur moyenne est similaire à celles obtenues en zone de savane humide au Centre Cameroun (12,70 %) (Ndzié Mvindi *et al.*, 2017) et au Ghana (12,80 %) (Frempong, 1995) (Fig. 49). La valeur moyenne de densité sèche maximale (DSM) est de 2,06. Cette valeur moyenne est similaire à celles obtenues à l’Est (2,06) (Nzabakurikiza *et al.*, 2017) et au Sud (2,07) (Onana *et al.*, 2017) Cameroun. Tous les graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes ont une valeur de DSM acceptable pour une utilisation en couche de fondation. Ces valeurs sont toutes supérieures à 1,80, le minimum exigible (CEBTP, 1984). Par contre, seulement 59 % des matériaux sur chloritoschistes possèdent une valeur de DSM supérieure ou égale à 2,00. Ces matériaux présentent une valeur moyenne d’indice portant CBR à 95 % OPM de 50 %. Cette valeur moyenne est comprise dans l’intervalle 35 – 60 % établi en zone forestière au Cameroun (DEGN, 1987 ; Sikali et Djalal, 1987). Elle est supérieure à celles obtenues au Centre (39 %) (Kamtchueng *et al.*, 2015) et au Sud Cameroun (42 %) (Onana *et al.*, 2017), au Ghana (33 %) (Frempong, 1995) et au Burkina Faso (43 %) (Millogo *et al.*, 2008). La valeur moyenne de portance CBR de ces graveleux latéritiques,

supérieure à 35 %, suggère leur utilisation en couche de fondation, pour tout type de trafic (CEBTP, 1984), nonobstant quelque peu leur granularité (Fig. 36).

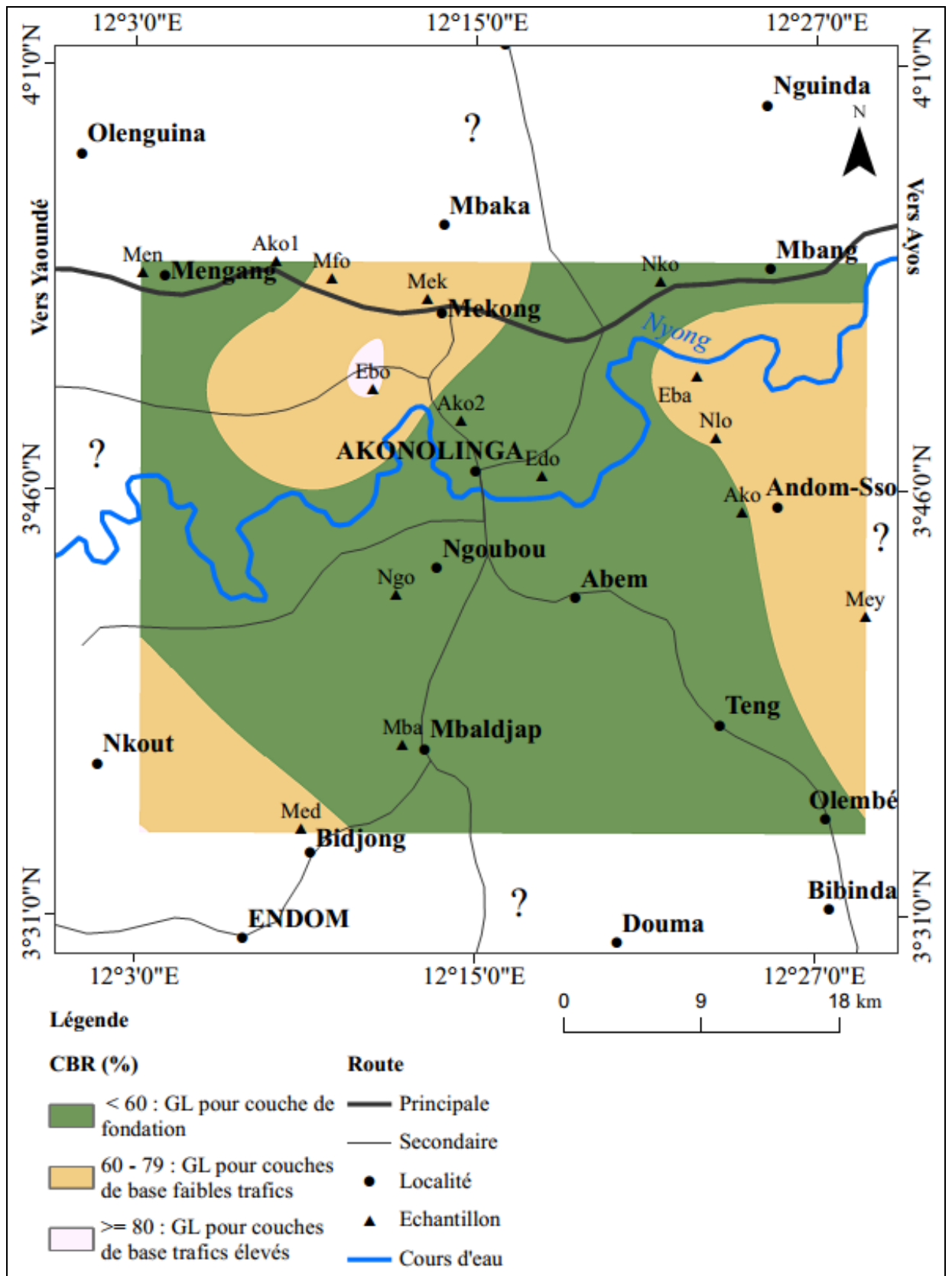
Au total, les graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes, plus altérés et relativement plus indurés, sont aptes à une utilisation comme matière première pour couche de fondation. Leur valeur moyenne, inférieure à 60 %, indique un traitement préalable avant toute éventuelle utilisation en couche de base (CEBTP, 1984 ; Bagarre, 1990). Le CBR étant un paramètre incontournable dans le dimensionnement des chaussées, une esquisse de carte géotechnique a été réalisée (Fig. 37). Celle-ci peut servir de guide, pour réaliser des économies, en temps et en argent pendant la prospection des graveleux latéritiques dans la zone d'étude. Dans la zone d'Akonolinga, on rencontre principalement deux groupes de matériaux : (1) les graveleux latéritiques utilisables en couches de fondation pour tout type de trafic ( $CBR < 60\%$ ) et le graveleux latéritiques utilisables en couches de base pour les chaussées à faible trafic ( $60 \leq CBR < 80\%$ ) (Fig. 37). Les graveleux latéritiques utilisables en couche de base pour les chaussées à trafic élevé ( $CBR \geq 80\%$ ) sont rares (Fig. 37).

## **IV.2. Graveleux latéritiques stabilisés à la chaux**

Les graveleux latéritiques étudiés, notamment ceux dérivés des chloritoschistes, possèdent des valeurs de CBR inférieures à 60 %, le minimum exigible, pour une utilisation en couche de base. Un amendement à la chaux de ces matériaux est préconisé pour une utilisation en couche de base.

### **IV.2.1. Evolution de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité**

L'évolution des valeurs de la limite de liquidité (LL) présente deux tendances : une diminution suivie d'une augmentation. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus dans les travaux antérieurs (Asma et Dariusz, 2013 ; Hastuty *et al.*, 2018 ; Lubis *et al.*, 2018). L'augmentation des valeurs de LL après ajout de chaux peut être due à la présence de la kaolinite dans les matériaux étudiés. La valeur de LL des sols riches en kaolinite augmente après ajout de chaux (Bell, 1989). De façon générale, les valeurs de LL après ajout de chaux, augmentent comparativement à celles obtenues sur les matériaux naturels. L'indice de plasticité IP est l'un des paramètres utilisés dans le choix d'un matériau en couche de chaussée (CEBTP, 1984). L'idéal voudrait que sa valeur soit la moins élevée. La réduction de la plasticité indique une amélioration des caractéristiques du matériau. La réduction de la plasticité rend le matériau plus friable et facile à manipuler (Muzahim et Abdelmadjid, 2008). L'évolution des valeurs de IP présente les mêmes tendances que celles des valeurs de LL :



CBR : californian bearing ratio ; GL : graveleux latéritiques

Figure 37. Esquisse de carte géotechnique des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga

une diminution suivie d'une augmentation. Ces observations sont similaires à celles faites sur les graveleux latéritiques du Burkina Faso (Millogo *et al.*, 2012), notamment, une diminution des valeurs de IP puis, une augmentation, pour un pourcentage de chaux supérieur à 3 %. La baisse des valeurs de IP est due à la réaction d'échange cationique qui entraîne la floculation du matériau et la réduction de la fraction argileuse. Cette baisse des valeurs de IP après ajout de chaux peut être due au processus d'hydratation de la chaux (Hastuty *et al.*, 2018), qui augmente les forces de liaison entre les particules, entraînant la formation des grains de diamètre plus grand et donc, plus stables. Par contre, l'augmentation des valeurs de IP serait due à l'excès de chaux hydratée donc, non impliquée dans la réaction et, plus plastique, que le mortier des graveleux latéritiques naturels.

#### **IV.2.2. Evolution des paramètres de compactage**

L'essai Proctor a été utilisé pour étudier l'effet de la chaux sur la teneur en eau à l'optimum Proctor modifié (TE – OPM) et de la densité sèche maximale (DSM). Le traitement à la chaux des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga s'accompagne d'une augmentation des valeurs de TE – OPM et d'une réduction de celles de DSM. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus dans les travaux antérieurs (Afès et Didier, 2000 ; Basha *et al.*, 2005 ; Le Borgne, 2010 ; Asma et Dariusz, 2013 ; Hastuty *et al.*, 2018 ; Lubis *et al.*, 2018). L'augmentation des valeurs de DSM indique une amélioration (Basha *et al.*, 2005). Par contre, dans les graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga, on observe une diminution des valeurs de DSM, qui peut être due à la taille des particules, à la masse volumique des grains solides et type de stabilisant (Rahman, 1986). Les particules de graveleux latéritiques sont plus denses (2,83) comparées à celles de la chaux moins denses. La diminution des valeurs de DSM indique qu'une faible énergie de compaction est nécessaire pour atteindre un compactage optimal des mélanges graveleux – chaux. Le coût du compactage est ainsi réduit. La diminution des valeurs de DSM est due à la réaction immédiate entre la chaux et le matériau à travers la floculation et l'agglomération (Millogo *et al.*, 2012 ; Asma et Dariusz, 2013). A travers ces processus, les particules argileuses du matériau occupent un grand volume et la masse varie peu. Par contre, l'augmentation des valeurs de TE – OPM est due à l'augmentation des particules fines apportées par la chaux, au processus d'hydratation et, à la grande affinité entre l'eau et la chaux (Dash et Hussain, 2012 ; Millogo *et al.*, 2012). La chaux demande beaucoup d'eau pour la réaction pouzzolanique (Asma et Dariusz, 2013). L'essai Proctor a été réalisé directement après ajout de chaux. L'évolution de ce paramètre dépendrait donc du temps de cure entre le mélange et la réalisation de l'essai. Plus le temps de cure est

long, plus la diminution de la densité sèche est accentuée (Bell, 1989 ; Atto-Okine, 1990). L'évolution des paramètres IP, TE – OPM et DSM est similaire à celle obtenue sur les sols latéritiques du Ghana (Atto-Okine, 1990 ; Atto-Okine 1995), du Nigéria (Amadi et Okeiyi 2017) et du Burkina Faso (Millogo *et al.*, 2012), stabilisés à la chaux. L'indice portant Californien CBR indique généralement dans le cadre du dimensionnement des chaussées, la portance du sol support et celles des matériaux à utiliser en couche de fondation et en couche de base (Amadi et Okeiyi, 2017). Les valeurs CBR des mélanges graveleux latéritiques – chaux montrent que, l'ajout de chaux améliore de façon significative de ce paramètre. Ceci est en accord avec les travaux effectués sur les sols latéritiques du Nigéria (Amadi et Okeiyi, 2017). Les matériaux Edo, Ako1 et Ako2 (CBR > 100) restent utilisables en couche de fondation après ajout d'un pourcentage de chaux supérieur ou égal à 2 %. Le matériau Men est utilisable en couche de fondation après ajout de 6 % de chaux. Le matériau Edo, développé sur chloritoschistes dont la valeur de CBR est supérieure à 160 %, après un ajout de 6 % de chaux, est utilisable en couche de base. Par contre, le matériau Ako1, dérivé des micaschistes, et de valeur de CBR supérieure à 160 %, est apte à une utilisation en couche de base, après un ajout de 2 à 4 % de chaux (CEBTP, 1984 ; Bagarre, 1990). Les matériaux développés sur chloritoschistes exigent plus de chaux (> 6 %), pour une utilisation en couche de base, comparativement à ceux issus des micaschistes (2 – 4 %).

#### **IV.2.3. Evolution des caractéristiques mécaniques**

Les valeurs de résistance à la compression simple ( $R_c$ ) des mélanges graveleux latéritiques – chaux présentent le même comportement pour les deux types de matériaux. L'ajout de chaux s'accompagne d'une diminution des valeurs de  $R_c$  avec le pourcentage de chaux. La diminution des valeurs de ce paramètre après un ajout de 6 % de chaux indique que ce pourcentage est en excès et a un effet néfaste sur la résistance à la compression des mélanges graveleux latéritiques – chaux. L'évolution des valeurs de  $R_c$  est similaire à celle obtenue sur les graveleux latéritiques du Burkina Faso (Millogo *et al.*, 2012), c'est-à-dire que l'on observe une diminution des valeurs de ce paramètre après ajout d'un pourcentage de chaux supérieur à 3 %. La baisse des valeurs de  $R_c$  peut être due à la présence des particules de graviers qui réduisent l'aptitude au compactage et la teneur en eau pendant le temps de cure (Hyoumbi *et al.*, 2018). Les valeurs de résistance à la compression à l'eau ( $R'_c$ ) croissent avec l'augmentation du pourcentage de chaux pour les matériaux Ako et Ako2, dérivés des chloritoschistes. Pour le matériau Ako1 issu des micaschistes, les valeurs de  $R'_c$  diminuent



avec l'augmentation du pourcentage de chaux. Pour les autres matériaux, les valeurs de ce paramètre présentent une évolution en dents de scie. Les valeurs de résistance à la compression des mélanges graveleux latéritiques – chaux sont inférieures à celles obtenues après stabilisation des sols fins de Bafang à l'aide des granulats de Basanites (2,85 – 4,43 MPa) (Hyoumbi *et al.*, 2018).

Les valeurs de résistance à la traction ( $R_t$ ) augmentent avec le pourcentage de chaux pour les matériaux développés sur chloritoschistes et sur micaschistes. Les valeurs de la résistance à la traction à l'eau ( $R'_t$ ) présentent deux tendances en fonction de l'ajout de chaux, pour les matériaux développés sur chloritoschistes : une augmentation de 2 % à 4 % (Ngo, Nko, Ako2), suivie d'une baisse à 6 % (Ako et Edo). Pour les matériaux issus des micaschistes, les valeurs de  $R'_t$  augmentent après un ajout de 2 % à 4 % de chaux et, diminuent, après un ajout de 6 %. L'évolution des caractéristiques mécaniques des mélanges graveleux – chaux, peut s'expliquer par leur granulométrie et la variabilité de leurs propriétés géotechniques.

Les résistances à la compression simple ( $R_c$ ) à 7 jours restent inférieures à 0,3 MPa, minimum exigé, pour un mélange sol-ciment. Les valeurs rapport  $R_t/R_c$  des matériaux étudiés s'intègrent dans l'intervalle 0,04 – 0,16, proposé pour un mélange sol-ciment (Anonyme, 2001). Pour les deux types de matériaux, les résistances à la traction ne sont pas conformes pour une utilisation en couche de base.

## CONCLUSION

Les graveleux latéritiques dérivés de roches de faible (chloritoschistes) et de moyen (micaschistes) degrés de métamorphisme sont kaolinisés. Cependant, les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes présentent un degré de latéritisation moyen, alors que ceux dérivés des micaschistes sont faiblement à modérément latéritisés. Le trio lixiviation - altération - induration prévaut dans ces matériaux, mais de manière relativement prononcée dans les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes. Les nuances mises en évidence dans l'évolution pédogénétique des graveleux latéritiques étudiés, dérivés des chloritoschistes et des micaschistes sont confirmées par l'analyse statistique par classification hiérarchique ascendante. Les graveleux latéritiques développés sur micaschistes se caractérisent par les paramètres physiques et par les paramètres de compactage, tandis que, ceux dérivés des chloritoschistes, sont principalement caractérisés par les paramètres de granulométrie et ceux de plasticité. Le comportement des paramètres géochimiques et des paramètres géotechniques est différent dans les deux types de graveleux latéritiques étudiés. Dans les matériaux dérivés

des chloritoschistes, il existe peu de relations entre paramètres géotechniques et paramètres géochimiques, contrairement à ceux développés sur micaschistes. Dans les graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes, le paramètre CBR qui est le plus utilisé dans le dimensionnement des épaisseurs des assises de chaussée est lié à IRLP par une relation linéaire inverse. La portance CBR diminue donc avec l'augmentation de la lixiviation dans ces matériaux ; tandis que dans ceux dérivés l'indice CBR est lié à LOI, par une relation linéaire inverse. Les graveleux latéritiques développés sur micaschistes sont utilisables en couche de fondation pour tout type de trafic et, en couche de base, pour les trafics T1 et T2, alors que ceux dérivés des chloritoschistes sont aptes uniquement à une utilisation comme matière première pour couche de fondation. Ces matériaux développés sur chloritoschistes, plus altérés, exigent plus de chaux ( $> 6 \%$ ), pour une utilisation en couche de base, comparativement à ceux issus des micaschistes ( $2 - 4 \%$ ).

---

# **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

---

La zone d'Akonolinga, localisée en zone de Plateau sud camerounais, est une plaine d'altitude moyenne comprise entre 600 et 900 m. Elle est soumise à un climat équatorial de transition à quatre saisons, inégalement réparties dans l'année. Le réseau hydrographique est de type dendritique, avec pour cours d'eau principal le Nyong. Le relief comprend trois unités morphologiques : les unités d'altitudes inférieures à 700 m, celles d'altitudes comprises entre 700 et 750 m et, celles d'altitude supérieures à 750 m. La végétation appartient au grand domaine de la forêt humide semi-caducifoliée ; c'est une forêt semi-décidue à *Sterculiacées* et *Ulmacées*, dégradée par endroits par une population qui a pour activités principales : l'agriculture, la chasse, l'élevage et la pêche. Les sols rencontrés dans la région sont de type ferrallitique, développés sur roches de faible degré, les chloritoschistes, et de degré moyen de métamorphisme, les micaschistes. Parmi ces sols, se rencontrent les graveleux latéritiques, objet de la présente étude, qui avait donc pour but d'une part, d'évaluer l'influence du degré de métamorphisme des roches sur les propriétés géotechniques des graveleux latéritiques et, d'autre part, de proposer des solutions pour améliorer les propriétés géotechniques de ces matériaux, après adjonction d'un liant hydraulique, la chaux, en vue de leur utilisation en construction routière. Les résultats obtenus montrent que les graveleux latéritiques dérivés des roches de faible degré de métamorphisme (chloritoschistes) sont plus épais et plus quartzeux que ceux dérivés des roches de degré de métamorphisme moyen (micaschistes). Les principaux minéraux rencontrés dans les graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes et des micaschistes sont le quartz, la kaolinite, l'hématite, la goethite et la muscovite. La teneur en quartz est plus élevée dans les graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes que sur ceux issus des micaschistes. Cette teneur élevée résulterait de la résistance des lits quartzitiques présents dans les chloritoschistes à l'altération. La teneur en kaolinite est plus élevée sur micaschistes. La teneur en muscovite est plus élevée sur chloritoschistes ; il en est de même pour la teneur en gibbsite. Les teneurs en oxyhydroxydes de fer (hématite et goethite) sont comparables dans les graveleux latéritiques étudiés. Ces graveleux latéritiques dérivés de roches de degrés différents de métamorphisme sont kaolinisés. Cependant, les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes présentent un degré de latéritisation moyen, alors que ceux dérivés des micaschistes sont faiblement à modérément latéritisés. Le trio lixiviation - altération - induration prévaut dans ces matériaux, mais de manière relativement prononcée dans les graveleux latéritiques développés sur chloritoschistes. Les nuances mises en évidence dans l'évolution pédogénétique des graveleux latéritiques étudiés, dérivés des roches de faible degré de métamorphisme, les chloritoschistes, et celles de degré moyen de métamorphisme, les micaschistes, sont confirmées par l'analyse statistique par

classification hiérarchique ascendante. Les graveleux latéritiques développés sur micaschistes se caractérisent par les paramètres physiques et par les paramètres de compactage, tandis que, ceux dérivés des chloritoschistes, sont principalement caractérisés par les paramètres de granulométrie et ceux de plasticité. Le comportement des paramètres géochimiques et des paramètres géotechniques est différent dans les deux types de graveleux latéritiques étudiés. Dans les matériaux dérivés des chloritoschistes, il existe peu de relations entre paramètres géotechniques et paramètres géochimiques, contrairement à ceux développés sur micaschistes. Dans les graveleux latéritiques dérivés des chloritoschistes, le paramètre CBR qui est le plus utilisé dans le dimensionnement des épaisseurs des assises de chaussée est lié à IRLP par une relation linéaire inverse. La portance CBR diminue donc avec l'augmentation de la lixiviation dans ces matériaux ; tandis que dans ceux dérivés des micaschistes, l'indice CBR est lié à LOI, par une relation linéaire inverse. Les graveleux latéritiques développés sur micaschistes sont utilisables en couche de fondation pour tout type de trafic et, en couche de base, pour les trafics T1 et T2, alors que ceux dérivés des chloritoschistes sont aptes uniquement à une utilisation comme matière première pour couche de fondation. Ces matériaux développés sur chloritoschistes, plus altérés, exigent plus de chaux (> 6 %), pour une utilisation en couche de base, comparativement à ceux issus des micaschistes (2 – 4 %). Plus le degré de métamorphisme de la roche parentale est élevée, plus les graveleux latéritiques générés sont aptes comme matériaux de corps de chaussée, en géotechnique routière.

En guise de perspectives, une étude géochimique des profils d'altération sur micaschistes et sur chloritoschistes permettrait de mieux comprendre les caractéristiques génétiques des graveleux latéritiques étudiés. Une étude géophysique pour la quantification des volumes de ces matériaux est nécessaire. La diversité des corrélations obtenues sur les graveleux latéritiques, le caractère évolutif et l'hétérogénéité de ces matériaux confirment la nécessité de leur étude à l'échelle nationale, en vue de la réalisation d'une classification, d'une cartographie géotechnique des sols et de la tropicalisation des normes d'utilisation de ces matériaux au Cameroun. Une étude à long terme des caractéristiques géotechniques et mécaniques et, la détermination des caractéristiques minéralogiques et des modules d'élasticité des mélanges graveleux latéritiques – chaux seraient nécessaires afin de (1) mieux comprendre leur comportement et, (2) déterminer les conditions de mise en œuvre de ces matériaux dans les structures de chaussée. En outre, l'évaluation de la résistance à la fragmentation et à l'attrition des nodules de ces matériaux à travers les essais Los Angeles et micro Deval (MDE) permettra un choix efficient de ces matériaux comme couche de base.

---

# **BIBLIOGRAPHIE**

---

- Adeyemi GO, 1995. The influence of parent rock factor on some engineering index properties of three residual lateritic soils in south western Nigeria. *Bulletin of International Association of Engineering Geology* 52, 3–8.
- Afès M, Didier G, 2000. Stabilisation des sols gonflants : cas d'une argile en provenance de Mila (Algérie). *Bulletin of Engineering and Environment* 59, 5–83.
- AFNOR, 1991. NF P94–054 : Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la masse volumique des particules solides des sols – Méthode du pycnomètre à eau. Association française de normalisation, Paris.
- AFNOR, 1992. NF P 94–057 : Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique. Méthode par sédimentation. Association française de normalisation, Paris.
- AFNOR, 1993. NF P 94–051 : Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau. Association française de normalisation, Paris.
- AFNOR, 1996. NF P 94–056 : Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique. Méthode par tamisage à sec après lavage. Association française de normalisation, Paris.
- AFNOR, 1997. 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. Association française de normalisation, Paris.
- AFNOR, 1998. NF P 94–068 : Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'absorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache. Association française de normalisation, Paris.
- AFNOR, 1999. NF P 94–093. Sols : reconnaissance et essais. Détermination des références de compactage d'un matériau. Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié. Association française de normalisation, Paris.
- AFNOR, 2000. NF P 94–420 : Roches : détermination de la résistance à la compression uniaxiale. Association française de normalisation, Paris.

- AFNOR, 2001. NF P 94–422 : Roches : détermination de la résistance à la traction - Méthode indirecte - Essai Brésilien. Association française de normalisation, Paris.
- Ali JA, Muzamir H, Mohammed YF, 2016. Engineering properties of clayey soil stabilized with lime. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences* 11(4), 2434 – 2441.
- Amadi AA, Okeiyi A, 2017. Use of quick and hydrated lime in stabilization of lateritic soil: comparative analysis of laboratory data. *Journal of Geo-Engineering* 8(3). <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0041-3>.
- Anonyme, 2000. Guide to stabilization in roadways. Australian Road Transport and Traffic Agencies (Austroad), Sydney (Australie), 25 p.
- Anonyme, 2001. Etude d'amélioration au ciment de graveleux naturels - route Esso. Rapport LABOGENIE, dossier Y.01–3886/ CR 640, 10 p.
- Anonyme, 2010. Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Recommandations R 81/10 du Centre de Recherches Routière, 96 p.
- Asma M, Dariusz W, 2013. Effect of Lime Stabilisation on the Strength and Microstructure of Clay. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* 6(3), 87–94.
- Attoh-Okine B, 1990. Stabilizing effect of locally produced lime on selected lateritic soils. *Construction and Building Materials* 4(2), 86–91.
- Attoh-Okine NO, 1995. Lime treatment of laterite soils and gravels – revisited. *Construction and Building Materials* 9(5), 283–287.
- Autret P, 1983. Latérites et graveleux latéritiques. Bulletin du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France, 38 p.
- Babechuk MG, Widdowson M, Kamber BS, 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. Rapport ISTED, 143 p.



- Bagnouls F, Gaussen H, 1957. Les climats biologiques et leur classification. *Annales de géographie* 335, 193–220.
- Basha EA, Hashim R, Mahmud HB, Muntohar AS, 2005. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construction Building Materials* 19, 448–453.
- Bayiga EC, Bitom D, Ndjigui P-D, Bilong P, 2011. Mineralogical and geochemical characterization of weathering products of amphibolites at SW Eséka (Northern border of the Nyong unit, SW Cameroon). *Journal of Geology and Mining Research* 3(10), 281–293.
- Bell FG, 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology* 42(4), 223–337.
- Bell G, 1989. Lime stabilization of clay soils. *Bulletin of Engineering Geology* 39, 67–74.
- Bello AA, Osinubi KJ, 2010. Attenuative capacity of compacted three reddish brown tropical soils. *Continental Journal of Engineering and Sciences* 5(2), 39–54.
- Bessoles B, Trompette R, 1980. Géologie de l’Afrique. La chaîne mobile panafricaine "zone mobile d’Afrique Centrale" (partie sud) et zone mobile soudanaise". Mémoire BRGM 92, 237 p.
- Bitom LD, 1988. Organisation et évolution d’une couverture ferrallitique en zone tropicale humide (Cameroun) : genèse et transformation d’ensembles ferrugineux indurés profonds. Thèse Doctorat Université de Poitiers (France), 214 p.
- Bohi ZPB, 2008. Caractérisation des sols latéritiques utilisés en construction routière : cas de la région de l’Agnéby (Côte d’Ivoire). Thèse Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 124 p.
- Bray JB, Curtis JT, 1957. An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin. *Ecological Monographs* 27, 325–49.
- Brindley GW, Brown G, 1980. Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. *Mineralogical Society*, London, 495 p.
- Cabane N, 2004. Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : contribution à l’identification et à l’analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation. Thèse

- de Doctorat, Université Jean Monnet et Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (France), 189 p.
- CEBTP, 1984. Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. Centre d'expertise du bâtiment et des travaux publics, Saint-Rémy-lès-Chevreuse (France), 155 p.
- Charman JH, 1988. Laterite in road pavements. Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), Special Publication 47, Westminster - London, 71 p.
- Chetelat B, Liu CQ, Wang QL, Zhang GP, 2013. Assessing the influence of lithology on weathering indices of the Changjiang River sediments. *Chemical Geology* 359, 108–115.
- Cross W, Iddings JP, Pirsson LV, Washington HS, 1903. Quantitative classification of igneous rocks. University of Chicago Press, 286 p.
- Dash KS, Hussain M, 2012. Lime stabilization of soils: reappraisal. *Journal of Materials in Civil Engineering* 24(6), 707–714.
- Davis JC, 1986. Statistics and Data Analysis in Geology. John Wiley & Sons Inc., New York.
- De Graft-Johnson JWS, Bhatia HS, Hammond AA, 1972. Lateritic gravel evaluation for road construction. *Journal soil Mechanics and Foundations Division* 98(11), 1245–1265.
- De Lagarde J, 1995. Initiation à l'analyse des données. Edition Dunod - Paris, 157 p.
- Dercourt J, Paquet J, 1999. Géologie, objets et méthodes. Cours et exercices résolus. Edition Dunod – Paris, 457 p.
- DEGN (Direction des Etudes Générales et de la Normalisation), 1987. Recommandation pour l'utilisation en corps de chaussées de graveleux latéritiques naturels. Recommandation 30.004-R. Ministère de l'équipement, République du Cameroun.
- Djedid A, Bekkouche A, Aissa Mamoune AM, 2001. Identification et prévision du gonflement de quelques sols de la région de Tlemcen - Algérie. Bulletin du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées 233, 67–75.

- Duchaufour P, 2001. Introduction à la science du sol : Sol, végétation, environnement. Dunod 6<sup>ème</sup> édition, Paris, 331 p.
- Ekodeck GE, 1984. L'altération des roches métamorphiques du Sud Cameroun et ses aspects géotechniques. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, Université de Grenoble I, 392 p.
- Ekodeck GE, 1989. L'algorithme généralisé de restructuration normative altérologique et les diagrammes correspondants d'interprétation et de caractérisation. Document inédit, 116 p.
- Ekodeck GE, Kamgang KBV, 2002. L'altérologie normative et ses applications : une expression particulière des roches alumino-silicatées du point de vue de leur évolution supergène. Presses Universitaires de Yaoundé (Cameroun), Collection Connaissances, 231 p.
- Ekodeck GE, Kamgang KBV, 2011. Normative alterology and advanced applications a particular facet of aluminosilicate-bearing rocks petrology, with regard to their supergene evolution. Presses Universitaires de Yaoundé (Cameroun), Collection Connaissances, 225 p.
- Fall M, Sawangsuriya A, Benson CH, Edil TB, Bosscher PJ, 2008. On the investigations of resilient modulus of residual tropical gravel lateritic soils from Senegal (West Africa). *Geotechnical and Geological Engineering* 26(1), 109–121.
- Fall M, Tisot JP, Cissé IK, 1995. Stress-strain behaviour of three-compacted lateritic gravel from western Senegal using the shear box machine. *Bulletin of International Association of Engineering Geology* 52, 59–73.
- Frempong EM, 1995. Field compaction control studies on road bases in new settlement area in Ghana. *Geotechnical and Geological Engineering* 13, 227–241.
- Gazel J, Guiraudie C, 1965. Carte géologique de reconnaissance du Cameroun à l'échelle du 1/500 000, feuille Abong - Mbang - Ouest avec notice explicative. Direction des Mines et de la Géologie, Yaoundé-Cameroun, 34 p.
- Gidigas MD, 1991. Characterization and use of tropical gravels for pavement construction in West Africa. *Geotechnical and Geological Engineering* 9, 219–260.

- 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.
- Guo Y, Yang S, Ni Su, Chao Li, Ping Yin, Wang Z, 2018. Revisiting the effects of hydrodynamic sorting and sedimentary recycling on chemical weathering indices. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 227 48–63.
- Hastuty IP, Roesyanto, Limbong MN, Oberlyn JS, 2018. California Bearing Ratio (CBR) test on stabilization of clay with lime addition. *Materials Science and Engineering* 309. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/309/1/012076>.
- Hieng IO, 2003. Etude des paramètres géotechniques des sols du Cameroun. Editions CLE, Yaoundé (Cameroun) 147 p.
- Hyoumbi WT, Pizette P, Wouatong ASL, Abriak N-E, Borrel LR, Francine Norotiana Razafimahatratra FN, Guiouillier T, 2018. Investigations of the Crushed Basanite Aggregates Effects on Lateritic Fine Soils of Bafang Area (West-Cameroon). *Geotechnical and Geological Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0751-0>.
- Kamgang KBV, Ekodeck GE, Njilah IK, 2001. Evolution géochimique des formations latéritiques dans l'écosystème péri-forestier du Sud-Est Cameroun : le site de Kandara. *African Journal of Science and Technologies* 2(1), 19–32.
- Kamtchueng TB, Onana VL, Fantong WY, Akira U, Ntouala RFD, Wongolo MHD, Ndongo GB, Ngo'o Ze A, Kamgang VKB, Ondo JM, 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.
- Katte YV, Mfoyet Moupe S, Manefouet B, Wouatong ASL, 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>.

- Le Borgne T, 2010. Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise du traitement des sols. Thèse de doctorat, Université de Nancy, Institut Polytechnique de Lorraine (France) 224 p.
- Letouzey R, 1985. Notice de la carte phytogéographique du Cameroun au 1/50 000. Institut de la carte internationale de la végétation, 63–94.
- Lubis AS, Muis ZA, Simbolon CA, 2018. The estimation of parameter compaction values for pavement subgrade stabilized with lime. *Materials Science and Engineering* 309. [https://doi:10.1088/1757-899X/309/1/012118](https://doi.org/10.1088/1757-899X/309/1/012118)
- Mahalinga-Iyer U, Williams DJ, 1997. Properties and performance of lateritic soil in road pavements. *Engineering Geology* 46, 71–80.
- Meissa F, 1993. Identification et caractérisation mécanique des graveleux latéritiques du Sénégal : application dans le domaine routier. Thèse de Doctorat INPL Nancy-France, 179 p.
- 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 Doctorat, Université de Ouagadougou (Burkina Faso), 144 p.
- Millogo Y, Karfa T, Raguilnaba O, Kalsibiri K, Blanchart P, Thomassin JH, 2008. Geotechnical, mechanical, chemical and mineralogical characterization of lateritic gravels of Sapouy (Burkina Faso) used in road construction. *Construction and Building Materials* 22, 70–76.
- Millogo Y, Morel JC, Traoré K, Ouedraogo R, 2012. Microstructure, geotechnical and mechanical characteristics of quicklime-lateritic gravels mixtures used in road construction. *Construction and Building Materials* 26, 663–669.
- Muzahim A, Abdelmadjid L, 2008. Effect of hydrated lime on the engineering behaviour and the microstructure of highly expansive clay. In: *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, India, 1-6 October, 3590–3598.

- Muzahim, Abdelmadjid L, Alcover JF, 2010. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 50°C. *Applied clay science* 50, 199–203.
- Nabil A et Sidi MAM, 2004. Stabilisation des sols gonflants par les sels. Conférence Internationale de Géotechnique- Beyrouth, 8p.
- Ndam NJR, Braun JJ, Meybeck M, Bedimo BJP, 1998. Réactualisation des données hydroclimatiques des bassins fluviaux de la Sanaga et du Nyong (Sud Cameroun). Géocam 2, Presses Universitaires, Yaoundé (Cameroun) 51–64 pp.
- Ndjigui PD, 2008. Altération supergène des serpentinites et distribution des éléments du groupe du platine dans les profils latéritiques du complexe ultrabasique de Lomié (Sud-Est Cameroun). Thèse de Doctorat/Ph.D, Université de Yaoundé I (Cameroun), 255 p.
- Ndofor AF, 2006. Stabilisation of soils from Cameroon for construction purposes. Degree Master in Science of physical land resources. Universiteit Gent, Belgium, 97 p.
- Ndzié Mvindi AT, Onana VL, Ngo'o Ze A, Nyassa Ohandja H, Ekodeck GE, 2017. 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. *Transportation Geotechnics* 12, 70–84.
- Nedelec A, Macaudiere J, Nzenti JP, Barbey P, 1986. Evolution crustale et métamorphique des schistes de Mbalmayo (Cameroun). Implications sur la structure de la zone mobile panafricaine d'Afrique Centrale au contact du Craton du Congo. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris* 303(II-1), 75–80.
- Nesbitt HW, 1992. Diagenesis and metasomatism of weathering profiles, with emphasis on Precambrian paleosols. In: Martini, IP, Chesworth, W. (Eds.), weathering, Soils & Paleosols. Elsevier Ed., Netherlands, 127–152 pp.
- Nesbitt HW, Young GM, 1982. Early proterozoic climates and plates motions inferred from major elements chemistry of lutites. *Nature* 299,715–717.
- Nesbitt HW, Young GM, 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. *The Journal of Geology* 97(2), 129–147.

- Ngo'o Ze A, Onana VL, Ndzié Mvindi AT, Nyassa Ohandja H, Medjo Eko R, Ekodeck GE, 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>.
- Nkoumou AJ-F, Mouhamadou BD, Fary D, Parisot JC, Ndiane D, 2004. Etude corrélative entre propriétés géochimiques et caractéristiques géomécaniques des latérites. *Journal des Sciences et Technologies* 3(1 – 2), 10 p.
- Ntouala RFD, 2014. Produits d'altération des schistes et argiles alluviales de la serie d'Ayos à Akok-Maka (Est Cameroun) : mineralogie, géochimie et valorisation agro-pédologique et géotechnique. Thèse de Doctorat/Ph.D, Université de Yaoundé I, Cameroun, 210 p.
- Nwaiwu CMO, Alkali IBK, Ahmed UA, 2006. Properties of ironstone lateritic gravels in relation to gravel road pavement construction. *Geotechnical and Geological Engineering* 24, 283–284.
- Nzabakurikiza A, Onana VL, Likiby B, Ndome Effoudou P, Kamgang Kabeyene BV, Ekodeck GE, 2012. Chemical and mineralogical methods in the indentification of laterite gravels over migmatites for engineering purposes. *Revue CAMES-Série A13*(2), 28–33.
- Nzabakurikiza A, Onana VL, Ngo'o Ze A, Ndzié Mvindi AT, Ekodeck GE, 2017. Geological, geotechnical, and mechanical characterization of lateritic gravels from Eastern Cameroon for road construction purposes. *Bulletin of Engineering Geology and Environment* 76, 1549–1562.
- Ogunsanwo O, 1988. Basic geotechnical properties, chemistry and mineralogy of some laterite soils from S.W. Nigeria. *Bulletin of International Association of Engineering Geology* 37, 131–135.
- Olinga JB, 2003. Cadre géodynamique et évolution tectonométamorphique des ensembles cristallophylliens d'Awae et Ayos (Sud Cameroun). Thèse de Doctorat/Ph.D, Université de Yaoundé I (Cameroun), 159 p.

- Olinga JB, Mpesse JE, Minyem D, Ngako V, Mbarga TN, Ekodeck GE, 2010. The Awaé - Ayos strike-slip shear zones (southern Cameroon): Geometry, kinematics and significance in the late Pan-African tectonics. *Neues Jahrbuch Geologie Paläontologie Abhandlungen* 257(1), 1–11.
- Olivry JC, 1986. Fleuves et rivières du Cameroun. *Collection monographies hydrologiques OSTROM* 9, 733 p.
- Olungbenga OA, Oluwole FB, Iyiola AK, 2011. The suitability and lime stabilization requirement of some lateritic soil samples as pavement. *International Journal of Pure and applied Sciences and Technology* 2(1), 29–46.
- Onana VL, 2010. L'altération supergène des chloritoschistes de la série de Mbalmayo-Bengbis (Sud Cameroun) et ses implications géotechnique. Thèse de Doctorat/Ph.D, Université de Yaoundé I (Cameroun), 159 p.
- Onana VL, Ndome Effoudou Priso E, Kamgang Kabeyene Beyala V, Ekodeck GE, 2009. Essai préliminaire de corrélations entre paramètres altérologiques normatifs et caractéristiques physico-mécaniques des roches et des produits d'altération de la série de Mbalmayo-Bengbis (Sud - Cameroun), à l'usage du génie civil. *Journal of the Cameroon Academy of Sciences* 8(2/3), 81–90.
- Onana VL, Ngo'o Ze A, Medjo Eko R, Ntouala RFD, Nanga Bineli MT, Ngono Owoudou B, Ekodeck GE, 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 VL, Ntouala RFD, Noa Tang S, Ndome EE, Kamgang Kabeyene BV, Ekodeck GE, 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 VL, Nzabakurikiza A, Ndome Effoudou E, Likiby B, Kamgang Kabeyene V, Ekodeck GE, 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.



- Otálvaro IF, Neto MPC, Caicedo B, 2015. Compressibility and microstructure of compacted laterites. *Transportation Geotechnics* 5, 20–34
- Paige–Green P, Pinard M, Netterberg F, 2015. A review of specifications for lateritic materials for low volume roads. *Transportation Geotechnics* 5, 86–98.
- Pearson K, 1905. On the general theory of skew correlation and non-linear regression. London : Dulau & Co.
- Rahman MDA, 1986. The potentials of some stabilizers for the use of lateritic soil in construction. *Building and Environment* 21(1), 57–61.
- Regnault JM, 1986. Synthèse géologique du Cameroun. Mémento Ministère des Mines et de l’Energie (Cameroun), 119 p.
- Santoir C, Villiers JF, 1995. Atlas régional du Sud Cameroun. Volume Végétation, Edition ORSTOM, 4–5 pp.
- 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.
- SETRA, 1990. Traitement des sols à la chaux et (ou) au ciment, présentation des aspects technique, économique. Note d’information, 4 p.
- Sikali F, Djalal ME, 1987. Utilisation des latérites en technique routière au Cameroun. In Séminaire Régional sur les Latérites : Sols, Matériaux, Minerais, Douala (Cameroun). ORSTOM Edition (sessions 1 et 3), 277–288 pp.
- Tockol I, 1993. Contribution à l’étude des graveleux latéritiques dans les pays du Sahel : cas des routes non revêtues. PhD Ecole de Génie, Université d’Edmonton (Canada), 207 p.

- Tockol I, Massiera M, Chiasson PA, Maiga MS, 1994. Les graveleux latéritiques dans les pays du Sahel : Cas des routes non revêtues. 7ème Congrès International de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, 3423–3431 pp.
- Vallerie M, 1995. Pédologie. Carte au 1/500000. Atlas régional Sud Cameroun, Edition ORSTOM, 6–7 pp.
- Vicat JP, 1998. Esquisse géologique du Cameroun. Géosciences au Cameroun, Edition collection GEOCAM, Presses Universitaires de Yaoundé (Cameroun), 3–11 pp.
- Ward JH, 1963. Hierarchical grouping to optimize and objective function. *Journal of American Statistics Association* 58, 36–44.
- Wilding LP and Dress LR, 1983. Spatial variability and pedology. In LP Wilding, N Smeck and GF Hall (eds.), Wageningen. Netherlands. *Pedogenesis and Soil Taxonomy*, 83–116 pp.
- 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.
- Yongue FR, 1986. Contribution à l'étude pétrologique de l'altération et des faciès de cuirassement ferrugineux des gneiss migmatitiques de la région de Yaoundé. Thèse de Doctorat 3ème Cycle, Université Yaoundé (Cameroun), 214 p.
- Youdale G, 2019. Guide to pavement technology part 4D : stabilised materials. Australian Road Transport and Traffic Agencies (Austroad), AP – 60/98, Sydney (Australie), 65 p.

---

# **ANNEXES**

---

## **ANNEXE I. DONNEES DE RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE**

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

Auteurs	$\gamma_s$ (gf/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	IP (%)	TE – OPM (%)	DSM	CBR (%)
Ndzié Mvindi 2011	2,62	46	24	22	9,50	2,03	46
Bikond Tonyé 2004	2,81	61	33	28	14,19	2,01	51
	2,85	60	35	25	13,44	2,06	32
Edzimbi Mbarga (2013)	2,44	80,55	51,4	29,15	10,00	1,98	43
Bekon Ndongo (2012)	2,64	62,5	31	31,5	12,60	1,99	73
Doum Motanoc (2012)	2,84	70,2	35,3	34,8	16,60	1,91	68
Gueuwou (2013)	2,85	60,4	32,6	27,8	12,50	2,06	88
Mbia (2009)	2,9	65,5		32	24,00	2,04	37
	2,8	64		29,3	11,90	2,03	38
Bella Nsono 2011	2,65	71,8	32,6	39,1	16,50	1,75	31
Ngo Mandeng (2018)	2,81	86	50	36	14,30	1,99	26
	2,86	63	43	20	16,60	1,91	28
	2,86	86	50	36	10,40	2,30	51
Souanfo (2018)	2,85	86	50	36	14,30	2,07	44
	2,85	72	46	26	12,30	2,08	37
	2,75	73	45	28	12,20	2,02	64
Kenglefac (2019)	2,73	63	42	21	13,70	2,00	65
	2,74	64	35	29	11,40	2,00	47
	2,81	70	42	28	16,30	1,86	27
Minimum	2,44	46	24	20	9,50	1,75	26
<b>Gneiss</b>	<b>2,77</b>	<b>69</b>	<b>40</b>	<b>29</b>	<b>13,83</b>	<b>2,00</b>	<b>47</b>
Maximum	2,9	86	51,4	39,1	24,00	2,3	88

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

Auteurs	$\gamma_s$ (gf/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	IP (%)	TE – OPM (%)	DSM	CBR (%)
Kamtchueng <i>et al.</i> (2015)	2,97	60,8	32,4	28,4	11,2		38
	2,94	55,9	30,6	25,3	13,7		24
	2,87	70,9	35,2	35,7	11,8		54
Ngo'o Ze 2011	3,05	55,14	27,7	27,4	11,5	2,11	49
Onana (2001)	2,69	58	30	28			
	2,80	46	24	22			
	2,69	65	36	29			
	2,72	53	35	18			
	2,80	54	35	15			

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

Auteurs	$\gamma_s$ (gf/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	IP (%)	TE – OPM (%)	DSM	CBR (%)
Onana (2001)	2,69	52	31	21			
	2,75	51	23	28			
	2,79						
Mbia (2009)	2,84	68	35,25	32,75	13,5	1,95	38
	2,9	61	34	27	11,3	2,08	44
	2,91	63,8	35,5	28,3	11	2,12	53
	2,9	66	35,2	30,8	13,23	1,98	21
	2,87	69	32,5	36,5	12,2	2,04	26
	2,73	71,4	39,4	32	15,5	1,91	25
	2,89	69	31,9	37,1	12,8	2,07	26
	2,88	51	30,2	20,8	12,4	2,07	31
Nkou Atangana (2016)	2,91	46	28	18	9,7	2,16	45
	2,87	51	28	23	8	2,27	58
	2,97	50	27	23	10,4	2,17	45
	2,82	51	28	23	9,8	2,17	46
	2,74	45	28	17	11,5	2,03	41
	2,82	48	29	19	9	2,09	45
	2,91	49	30	19	8,9	2,23	58
	2,85	47	27	20	9,3	2,2	55
	2,83	46	27	19	8,3	2,19	50
	2,87	48	29	19	8	2,26	57
Mpesse (2018)	2,83	45	33	12	12,5	2,07	48
	2,83	48	33	15	8,7	2,21	78
	2,86	54	34	20	12,7	2,14	84
	2,85	47	32	15	12,6	2,09	50
	2,83	51	38	13	13	2,03	54
	2,81	47	33	14	11	2,08	71
	2,8	47	34	13	10,4	2,12	63
	2,83	54	39	15	12,8	2,05	74
	2,81	46	35	11	12,2	2,06	63
	2,72	47	35	12	12,8	2,15	78
Ewoni Biloa (2017)	2,78	53	37	16	13,2	2,1	63
	2,8	57	34	23	9,4	2,14	63
Minimum	2,69	45	23	11	8,00	1,91	21
<b>Moyenne</b>	<b>2,83</b>	<b>54</b>	<b>32</b>	<b>22</b>	<b>11,30</b>	<b>2,11</b>	<b>51</b>
Maximum	3,05	71,4	39,4	37,1	15,5	2,27	84

Tableau III. Données récapitulatives des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques sur chloritoschistes

Auteurs	$\gamma_s$ (gf/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	IP (%)	TE - OPM (%)	DSM	CBR (%)
Ekodeck (1984)	2,74						
Onana (2002)		55		18	9,64	2,06	33
	2,85				9,71	2,19	49
Ntouala (2009)	2,86	63	33	30	7,2	2,34	88
Mba Nsoé (2009)	2,75	40,4					
Onana (2010)	2,69						
	2,9	51					
Ngo'o Ze (2011)	2,86	64,94	31,44	33,5	16	1,84	42
Elom (2002)	2,81	65	37	28	13	2,07	60
	2,87	66	36	30	12	2,16	52
Onana (2001)	2,69						
	2,8	51					
Kessoum (2009)	2,75						
Nneme (2011)	2,82	67,9	30	37,9	14,2	1,99	31
	2,86	71,6	36,6	35	15,2	1,98	45
	2,8	70,2	31,2	39	16,8	1,91	33
	2,86	69,6	37,2	32,4	15,8	1,92	25
	2,87	62,3	30,6	31,7	18	1,88	44
	2,74	62,1	35,5	26,6	12	2,06	46
	2,86	59,6	36	23,6	12,2	2,04	42
	2,83	70,3	40,2	30,1	10,8	2,04	65
Mbia (2009)	2,91	67	37,3	29,7	11,2	2,11	39
	2,86	65	34,1	30,9	13,1	2,01	23
	2,84	55	30,7	24,3	12,4	2,06	35
	2,87	59	30,4	28,6	9,8	2,11	36
	2,8	65,1	29,6	35,5	9	2,22	46
	2,92	52	28,7	23,3	10,2	2,09	40
	2,9	69	35,4	33,6	11,5	2,13	30
Pekassa (2015)	2,79	69	44	25	10	2,2	64
	2,76	47	36	11	9	2,19	64
	2,76	53	32	21	12,4	1,98	54
Ndoumou 2017	2,78	71	52	19	9,5	2,25	77
	2,76	62	36	26	9,6	2,16	66
Minimum	2,69	40,4	28,7	11	7,2	1,84	23
<b>Moyenne</b>	<b>2,82</b>	<b>62</b>	<b>35</b>	<b>28</b>	<b>11,93</b>	<b>2,08</b>	<b>47</b>
Maximum	2,92	71,6	52	39	18	2,34	88

Tableau IV. Données récapitulatives des paramètres géotechniques des graveaux latéritiques sur quartzites

Auteur	$\gamma_s$ (gf/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	IP (%)	TE – OPM (%)	DSM	CBR (%)
Eyenga (2011)	2,82	63,3	31,5	31,9	11	2,1	33
	2,94	67,9	36,1	31,8	25,3	1,67	52
	2,72	63,9	32,3	31,3	12,3	1,96	62
Minimum	2,72	63,3	31,5	31,3	11	1,67	33
Moyenne	<b>2,83</b>	<b>65,03</b>	<b>33,30</b>	<b>31,67</b>	<b>16,20</b>	<b>1,91</b>	<b>49</b>
Maximum	2,94	67,9	36,1	31,9	25,3	2,1	62

Tableau VA. Données récapitulatives des paramètres géotechniques des graveaux latéritiques sur roches plutoniques

Auteurs	$\gamma_s$ (gf/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	IP (%)	TE- OPM (%)	DSM	CBR (%)
Ohandja (2011)	2,87	63	31	32	13,4	2,04	60
	2,88	46	26	20	10,2	2,14	52
	2,88	50	28	22	8,8	2,16	55
Wongolo 2011	2,99	54,94	33,3	21,7	9,7	2,2	78
Bikoy 2015	2,8	69	35	34	8,6	2,18	43
	2,78	81	37	44	14,2	1,95	32
	2,83	57	31	26	10,2	2,17	52
Edang (2015)	2,85	73	35	38	10,4	2,14	68
	2,75	73	37	35	14,5	1,94	36
Nanga Bineli (2015a)	2,69	76	43	33	14,3	1,95	31
	2,87	65	34	31	9,8	2,20	58
Nanga Bineli (2015b)	2,85	76,8	48,8	32	9,8	2,00	35
Ngono Owoudou (2015)	2,79	95,3	40,3	55	12,8	2,01	36
	2,85	85,1	46	39,1	13,6	2,03	31
Nzabakurikiza <i>et al.</i> (2017)	2,8	61	34	27	12,2	2,04	54
	2,73	56	28	28	13	2,06	68
	2,81	61	31	30	12	2,05	47
	2,79	64	34	30	12	2,06	64
	2,9	53	31	22	10	2,18	69
	2,89	55	26	29	13,2	1,91	58
	2,9	63	33	30	11	2,09	68
	2,89	62	30	32	12	2,05	58
	2,88	61	31	30	12	2,08	59



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

Auteurs	$\gamma_s$ (gf/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	IP (%)	TE-OPM (%)	DSM	CBR (%)
Nzabakurikiza <i>et al.</i> (2017)	2,85	58	31	27	12	2,05	60
Katte et al 2018		66,5	43,2	23,3	10,40	2,18	43
		86,9	51,3	35,6	11,10	2,15	37
		43,6	26,5	17,1	13,30	2,05	30
		64,7	42,6	22,1	11,00	2,19	47
		43,6	30	13,6	12,60	2,11	30,5
		74,9	43,5	31,4	9,90	2,15	47
		80,6	41,7	38,9	12,30	2,00	18,5
		77,8	44,2	33,6	12,90	2,09	25
		77,7	43,3	34,4	11,60	2,15	38
		66,4	39,3	27,1	14,00	2,07	23
		56,7	33	23,7	12,40	2,13	35
		64,5	35,5	29	13,00	2,01	28
		73,7	41,5	32,2	10,20	2,17	47
		58,6	27,5	31,1	12,00	2,18	42
		57,7	31,7	26	12,50	2,05	35
		86,3	42	44,3	13,00	2,14	37
		85,8	48,9	36,9	13,40	2,06	35,5
		62,5	30,6	31,9	14,80	1,99	26
		66	37,5	28,5	12,40	2,13	31
		57,7	34,8	22,9	12,30	2,10	41
		79,9	43,2	36,7	13,60	2,10	31
		54,6	38,4	16,2	12,50	2,12	35
		79,8	38,5	41,3	15,00	1,96	21
		59,7	37,3	22,4	16,50	1,91	14,2
		83,7	45,7	38	11,00	2,16	49,5
		68	43,8	24,2	16,00	1,96	19,3
		63,8	39,7	24,1	12,40	2,06	29
		63,1	42,8	20,3	11,50	2,23	48,9
		92,6	62,1	30,5	10,60	2,15	49
		85,9	51,9	34	12,00	2,02	31
	68,7	40,2	28,5	14,20	2,05	30	
	86,8	52,8	34	9,60	2,33	49,5	
	65,9	38,9	27	10,10	2,25	49	
Minimum	2,69	43,6	26	13,6	8,60	1,91	14,2
<b>Moyenne</b>	<b>2,84</b>	<b>68</b>	<b>38</b>	<b>30</b>	<b>12,10</b>	<b>2,09</b>	<b>43</b>
Maximum	2,99	95,3	62,1	55	16,50	2,33	78

## **ANNEXE II. DONNEES GEOTECHNIQUES DES GRAVELEUX LATERITIQUES**

Tableau VI. Données de construction des courbes granulométriques des graveleux latéritiques sur chloritoschistes

Tamis (mm)	Mek	Ako	Edo	Ngo	Nko	Ako2	Nlo	Eba
50	100	100	100	100	100	100	100	100
40	100	100	100	100	100	100	100	91,50
31,5	100	100	90,00	100	100	100	100	87,80
25	100	100	80,10	100	100	100	100	85,70
20	98,60	100	66,90	100	100	100	100	83,00
16	98,10	100	59,30	100	100	100	98,50	77,80
12,5	96,10	99,70	48,40	99,30	98,50	99,40	94,00	71,10
10	90,30	97,90	37,10	98,80	93,20	98,50	87,10	58,60
8	81,30	93,20	31,00	96,20	86,40	96,70	76,60	47,80
5	46,70	65,40	19,20	69,90	64,90	77,40	61,80	38,50
2	26,60	40,00	12,80	42,20	42,60	52,00	27,40	29,80
1	22,50	36,50	12,20	37,20	38,20	46,50	24,90	16,50
0,5	21,00	33,60	11,80	34,70	36,10	43,20	24,00	16,30
0,315	20,30	31,30	11,40	32,30	34,80	41,30	23,60	15,90
0,16	19,20	26,00	9,60	27,80	31,50	36,60	22,60	14,40
0,08	18,70	23,70	8,40	26,40	29,50	32,90	22,80	14,20
0,05	17,50	22,10	7,80	24,70	27,60	30,10	22,40	14,00
0,02	16,90	21,40	7,60	23,80	26,60	29,00	20,80	13,00
0,01	15,90	20,20	7,10	22,50	25,20	28,50	18,50	11,50
0,005	15,00	19,10	6,70	21,20	23,80	27,50	18,10	11,30
0,002	14,40	18,30	6,50	20,40	22,80	26,30	17,70	11,10
0,001	13,90	17,70	6,20	19,70	22,00	25,00	17,30	10,80

Tableau VII. Données de construction des courbes granulométriques des graveleux latéritiques sur micaschistes

Tamis (mm)	Ebo	Mba	Med	Men	Mey	Ako1	Mfo
50	100	100	100	100	100	100	100
40	100	100	100	100	100	100	100
31,5	100	100	100	91,50	100	100	100
25	100	100	98,10	81,10	100	100	100
20	100	100	95,80	73,50	97,70	100	99,17
16	97,00	100	90,10	65,10	95,00	96,90	97,16
12,5	93,60	98,80	81,50	58,00	91,70	94,00	91,87
10	87,40	96,70	70,00	49,20	82,50	87,70	84,8
8	79,90	89,00	59,30	43,40	72,90	82,70	72,07
5	51,90	58,30	33,20	26,80	48,00	63,60	61,09
2	28,70	37,90	18,70	18,60	31,00	41,70	46,17
1	23,60	36,30	17,50	16,50	28,50	37,10	39,38
0,5	21,60	35,50	17,00	15,90	26,90	34,10	35,23
0,315	20,40	35,00	16,50	14,60	25,80	31,40	30,86
0,16	17,60	34,10	14,80	14,00	23,10	27,30	25,33
0,08	15,20	33,60	13,30	13,40	22,10	25,00	21,07
0,05	14,20	31,40	12,40	12,50	20,70	23,10	20,64
0,02	13,70	30,30	12,00	12,10	200	21,20	19,24
0,01	130	28,70	11,30	11,40	18,90	20,10	17,08
0,005	12,30	27,00	10,70	10,80	17,80	18,20	16,71
0,002	11,80	25,90	10,20	10,30	17,10	16,30	16,38
0,001	11,40	25,00	9,90	10,00	16,50	15,20	15,99

Tableau VIII. Base de données élargie des caractéristiques géotechniques des graveleux latéritiques sur chloritoschistes (N = 22).

Location	Mbalmayo									Bengbis			Akonolinga									Statistiques		
Variable	Bik1	Bik2	Bik3	Bik4	Ola1	Ola2	Ola3	Ola4	Mba1	Yan	Mek1	Yem	Ako2	Ako	Edo	Ngo	Nko	Nlo	Eba	Eko	Mba2	AM	Moy.	$\sigma$
Poids volumique des grains solides (gf/cm <sup>3</sup> )	2.82	2.86	2.8	2.86	2.87	2.74	2.86	2.83	<b>2.61</b>	2.79	2.76	2.76	2.86	2.85	<b>3.12</b>	2.68	3.00	2.73	2.83	2.81	2.87	2.86	2.83	0.10
< 2 mm, %	<b>71.00</b>	64.00	71.00	61.00	53.90	32.30	43.10	60.00	36.70	33.20	29.80	22.70	52.00	40.00	<b>12.80</b>	42.20	42.60	27.4	29.8	28.57	38.52	15.2	41.26	16.81
< 425 $\mu$ m, %	42.80	44.53	<b>51.70</b>	40.53	37.95	25.93	24.05	44.78	32.74	23.03	25.49	17.39	42.00	32.70	<b>11.60</b>	33.70	35.60	23.84	16.14	20.393	28.80	12.54	30.37	11.31
<80 $\mu$ m, %	26.00	<b>33.40</b>	31.10	30.60	27.80	24.30	17.80	27.80	22.20	17.20	20.20	13.20	32.90	23.70	8.40	26.40	29.50	22.80	14.20	18.00	23.38	<b>6.10</b>	22.59	7.57
LL (%)	68	<b>72</b>	70	70	62	62	60	70	50	69	<b>47</b>	53	65	58	52	54	58	68	60	65	66	63	62	7.24
IP (%)	38	35	<b>39</b>	33	32	31	24	30	22	25	<b>11</b>	21	34	24	20	19	21	27	24	28	30	30	27	6.83
Gm	1.60	1.58	<b>1.46</b>	1.68	1.80	2.17	2.15	1.67	2.08	2.27	2.25	2.47	1.73	2.04	<b>2.67</b>	1.98	1.92	2.26	2.40	2.33	2.09	2.66	2.06	0.35
Pm	1626	1558	<b>2016</b>	1337	1214	804	577	1343	720	576	280	365	1428	785	<b>232</b>	640	748	644	387	571	864	376	868	494.41
Pp	988	1169	<b>1213</b>	1010	890	753	427	834	488	430	222	277	1119	569	<b>168</b>	502	620	616	341	504	701	183	637	323.29
$\epsilon_s$	0.035	0.029	<b>0.037</b>	0.025	0.024	0.022	0.012	0.020	0.010	0.014	<b>0.002</b>	0.009	0.027	0.012	0.008	0.007	0.009	0.016	0.012	0.017	0.020	0.020	0.018	0.009
TE-OPM (%)	14.10	14.60	16.90	15.80	<b>18.00</b>	12.00	12.40	10.80	12.70	10.00	9.00	12.40	16.00	12.90	10.50	11.80	12.30	15.30	11.60	13.00	12.00	<b>7.20</b>	12.79	2.60
DSM	1.99	1.98	1.91	1.92	1.88	2.06	2.04	2.04	1.98	2.20	2.19	1.98	<b>1.84</b>	2.03	<b>2.34</b>	2.01	2.16	1.92	2.19	2.07	2.16	2.34	2.06	0.14
CBR	31	45	38	<b>25</b>	44	46	43	66	38	64	64	56	42	58	36	38	48	59	69	60	52	<b>88</b>	50	14.71

Tableau IX. Base de données élargie des caractéristiques géotechniques des graveleux latéritiques sur micaschistes (N = 20).

	Mfou*			Akonolinga																Statistiques		
	Nkil	Nkol	Mfi	Akol	Ebo	Mba	Med	Mek	Men	Mey	Bib	Eko	May	Mil	Mpa	Any	Nza	Aba	Nde	Zog	Moy	$\sigma$
Poids volumique des grains solides (gf/cm <sup>3</sup> )	2.84	2.85	2.80	<b>3.05</b>	3.00	<b>2.75</b>	2.76	2.77	2.83	2.82	2.78	2.81	2.83	2.83	2.83	2.81	2.86	2.83	2.8	2.85	2.84	0.07
< 2 mm, %	41.80	54.90	35.30	41.70	28.70	37.90	18.70	26.60	<b>18.60</b>	31.00	<b>60.80</b>	57.60	60.10	37.50	41.40	52.30	25.60	22.70	52.80	50.90	39.85	13.86
<425 $\mu\text{m}$ , %	32.77	34.89	25.04	33.00	21.10	35.30	16.80	20.70	<b>15.40</b>	26.50	<b>43.01</b>	42.18	31.48	29.72	33.88	42.75	23.96	17.62	33.25	36.74	29.81	8.59
< 80 $\mu\text{m}$ , %	26.70	30.20	21.10	25.00	15.20	<b>33.60</b>	<b>13.30</b>	18.70	13.40	22.10	19.00	19.30	23.30	26.20	28.60	19.10	21.30	16.80	15.50	21.60	21.50	5.59
LL (%)	60	56	51	55	47	<b>66</b>	53	62	56	55	47	46	48	51	<b>45</b>	47	54	54	47	47	52	5.82
IP (%)	<b>28</b>	25	23	27	13	21	23	23	12	17	12	<b>11</b>	15	13	12	14	20	15	13	15	18	5.58
Gm	1.99	1.80	2.19	2.00	2.35	1.93	2.51	2.34	<b>2.53</b>	2.20	<b>1.77</b>	1.81	1.85	2.07	1.96	1.86	2.29	2.43	1.98	1.91	2.09	0.25
Pm	<b>918</b>	872	576	891	274	741	386	476	<b>185</b>	451	516	464	472	386	407	599	479	264	432	551	517	203.53
Pp	748	<b>755</b>	485	675	198	706	306	430	<b>161</b>	376	228	212	350	341	343	267	426	252	202	324	389	190.4
es	<b>0.017</b>	0.014	0.011	0.016	0.003	0.009	0.011	0.011	0.003	0.006	0.003	<b>0.002</b>	0.004	0.003	0.003	0.004	0.008	0.004	0.003	0.004	0.007	0.005
TE-OPM (%)	11.20	13.70	11.80	11.50	9.50	<b>16.70</b>	<b>8.20</b>	13.50	11.30	8.80	12.90	12.20	8.70	13.30	12.50	11.20	12.70	12.80	10.40	12.60	11.78	2.01
DSM	2.10	2.00	2.08	2.11	2.22	<b>1.87</b>	<b>2.26</b>	2.00	2.11	2.18	2.15	2.06	2.21	2.03	2.07	2.08	2.14	2.05	2.12	2.09	2.10	0.09
CBR	38	<b>24</b>	54	49	80	43	65	78	58	78	79	61	77	57	48	71	<b>84</b>	78	66	51	62	16.49

\* Kamtchueng et al., 2015

### **ANNEXE III. SEMINAIRES ET COLLOQUES**

1. **Ngo'o Ze A**, Onana VL, Ndzié Mvindi AT, Nyassa Ohandja H, Medjo Eko R, Ekodeck GE, 2019. Variability of geotechnical parameters of lateritic gravels overlying contrasted metamorphic rocks in a tropical humid area (Cameroon): Implications for road construction. Présentation orale, 2<sup>ème</sup> Colloque de Géosciences du Cameroun , du 04 au 07 Décembre 2019, Université de Yaoundé 1 (Cameroun).
2. **Ngo'o Ze A**, Onana VL, Medjo Eko R, Ndzié Mvindi AT, Ntouala RFD, Ekodeck GE, 2017. Geological characterization and effects of quicklime on geotechnical and mechanical properties of schistose rocks–derived lateritic gravels in a humid tropical area (Centre Cameroon) for road constructions purposes. In recueil des résumés, Colloque de la Société des Géosciences du Cameroun, 21 – 23 novembre 2017, Université de Douala (Cameroun).
3. **Ngo'o Ze A**, Onana V. L., Medjo Eko R., Ndzié Mvindi AT, Ntouala RFD, Ekodeck GE, 2016. Geological characterization and effects of quicklime on geotechnical and mechanical properties of schistose rocks–derived lateritic gravels in a humid tropical area (Centre Cameroon) for road constructions purposes. In recueil des résumés, séminaire Entre Géosciences et Chimie, deuxième édition (EGC\_2). Université de Yaoundé, 20 décembre 2016.
4. Medjo Eko R, **Ngo'o Ze A**, Onana VL, Ndzié Mvindi AT, Nyassa Ohandja H, Eyenga P, Ekodeck GE, 2013. Caractérisation géotechnique, minéralogique et chimique de deux graveleux latéritiques sur micaschistes et sur schistes de la région d'Akonolinga (Centre Cameroun) pour une utilisation en construction routière. Hommages académiques au Professeur Georges Emmanuel Ekodeck, communication orale, 16 – 17 mai 2013, Université de Douala.



# CERTIFICATE OF PARTICIPATION



THIS ATTESTATION IS ATTRIBUTED TO  
*NGO'O ZE Arnaud, Author of a Communication*  
*University of Yaounde I*

FOR ITS PRECIOUS CONTRIBUTION TO THE

*2<sup>nd</sup> Colloquium of the Cameroon Association of Geoscience*  
**GEOSCIENCE YAOUNDE - 2019**

LE COORDONNATEUR DU COMITÉ D'ORGANISATION

LE SECRÉTAIRE GÉNÉRAL DE LA CAG



*Ndjigul Paul-Désiré*  
Professeur

DATE 06 DEC 2019



*Px. Sébastien Orona*



CERTIFICATE OF  
PARTICIPATION



THIS ATTESTATION IS ATTRIBUTED TO

*Ngo'o Ze Arnaud*  
*University of Yaoundé I*

FOR HIS PRECIOUS CONTRIBUTION TO THE

*Colloquium of the Geoscience Society of Cameroon — GEOSCIENCES DOUALA -2017*  
*Through the communication entitled:*  
*Geological characterization and effects of quicklime on geotechnical and mechanical*  
*properties of schistose rocks – derived lateritic gravels in a humid tropical area (Centre*  
*Cameroon) for road constructions purposes*

THE PRESIDENT OF ORGANIZING COMMITTEE

A handwritten signature in green ink, appearing to read 'Marie Joseph NTAMAK'.

Dr. Marie Joseph NTAMAK - NIDA



THE GENERAL SECRETARY

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Pr. Sébastien Ouona'.

Pr. Sébastien Ouona  
Associate Professor



**Séminaire Entre Géosciences et Chimie**  
**Seconde édition (EGC-2)**

**LETTRE D'ACCEPTATION N° 014/EGC-2016**

Cher Monsieur **NGO'O ZE**,

Votre communication intitulée, **“Geological characterization and effects of quicklime on geotechnical and mechanical properties of schistose rocks–derived lateritic gravels in a humid tropical area (Centre Cameroon) for road constructions purposes”**, a été retenue pour une présentation orale, à l’occasion de la seconde édition des séminaires Entre Géosciences et Chimie, qui se tiendra le 20 Décembre 2016.

Le programme final vous sera communiqué dans les meilleurs délais.

Dans l’attente de vous accueillir durant ces échanges,

Recevez nos cordiales salutations.

Le Président du Comité d’organisation

**Jean Aimé MBEY, PhD**



## Hommage Académique au Professeur Georges Emmanuel EKODECK

### THEME : "GÉOSCIENCES ET APPUI AU DÉVELOPPEMENT"

Du 09 - 10 Mai 2013, Faculté des Sciences, Université de DOUALA (CAMEROUN)

Le Secrétariat Général

[www.univ-douala.com](http://www.univ-douala.com)

[hommage.ekodeck@univ-douala.com](mailto:hommage.ekodeck@univ-douala.com)

## LETTRE D'ACCEPTATION

\*\*\*\*\*

Prof./Dr./Mme/M : **NGO'O ZE Arnaud**

Numéro du résumé : **#99hommagesekodeck**

**Acceptation pour une communication orale**

Cher Auteur,

Par la présente, nous avons le plaisir de porter à votre connaissance que votre résumé intitulé « **Caractérisation géotechnique, minéralogique et chimique de deux graveleux latéritiques sur micaschistes et sur schistes de la région d'Akonolinga (Centre Cameroun) pour une utilisation en construction routière** », a été accepté pour une présentation orale dans l'atelier **Géotechnique et Structurale**, par le Comité Scientifique du colloque « **Géosciences et Appui au Développement** », organisé du 09 au 10 mai 2013 à l'Université de Douala, à l'occasion de l'hommage académique au **Professeur Georges Emmanuel EKODECK**. Vous recevrez en temps opportun, le programme détaillé du colloque et toutes les informations nécessaires pour votre présentation.

Cordialement.

Fait à Douala, le 16/04/2013

Le Secrétariat du Comité d'Organisation

Et P.O.

Sébastien OWONA, Ph.D.

#### **ANNEXE IV. PUBLICATION**

**Ngo'o Ze A**, Onana VL, Ndzié Mvindi AT, Nyassa Ohandja H, Medjo Eko R, Ekodeck GE, 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* 78, 5531–5549. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01488-0>



# Variability of geotechnical parameters of lateritic gravels overlying contrasted metamorphic rocks in a tropical humid area (Cameroon): implications for road construction

Arnaud Ngo'o Ze<sup>1</sup> · Vincent Laurent Onana<sup>1</sup> · Aloys Thierry Ndzié Mvindi<sup>1,2</sup> · Hervé Nyassa Ohandja<sup>1</sup> · Robert Medjo Eko<sup>1</sup> · Georges Emmanuel Ekodeck<sup>1</sup>

Received: 27 February 2018 / Accepted: 23 February 2019  
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2019

## Abstract

The variability of the geotechnical properties of lateritic gravels developed on metamorphic rocks from the same clay protolith and of a nearby degree of metamorphism was studied for road construction purposes. Chlorite schist-derived lateritic gravels are more quartzose, more plastic (Plasticity Index PI = 27%) and have a weak Californian bearing ratio (CBR = 50%) compared to those developed on mica schists (PI = 18%, CBR = 62%). The principal components analysis results confirmed by those of agglomerative hierarchical clustering reveal the existence of two groups of materials, the lateritic gravels on chlorite schists (skeleton = 48.27%, mortar = 36.31%, fines = 27.63%, PI = 29%, grading modulus (Gm) = 1.88, maximum dry density (MDD) = 2.00 g/cm<sup>3</sup>, CBR = 44%) and the mica schist-derived lateritic gravels (skeleton = 34.82%, mortar = 25.45%, fines = 17.90%, PI = 18%, Gm = 2.22, MDD = 2.13 g/cm<sup>3</sup>, CBR = 65%). Chlorite schist-derived lateritic gravels are mainly characterized by granulometric and plasticity parameters, while those developed on mica schists are characterized by physical and compaction parameters. The mica schist-derived lateritic gravels are usable as sub-base layers for any type of traffic and as base course for low volume traffic. On the other hand, those developed on chlorite schists can be used as a sub-base for any type of traffic and require some treatment prior to a possible use as base layers. The higher the degree of metamorphism of the parental rock, the better the geotechnical properties of the lateritic gravels generated.

**Keywords** South Cameroon · Schistose rocks · Laterites · Geotechnical properties · Statistical analyses · Sub-base and base courses

## Introduction

In the hot and humid tropical zones, rocks and lateritic gravels are the most used natural materials in road construction. The latter constitute 90 to 100% of pavement materials (Sikali and Djalal 1987; Bagarre 1990; Kassogue et al. 2002; Paige-Green et al. 2015; Ndzié Mvindi et al. 2017). The formation of soils, and consequently that of lateritic gravels, is strongly conditioned by the climatic factors prevailing in the tropics. This led to a majority of scientists and engineers grouping all the materials formed under the tropical latitudes under the generic

name of 'laterites' (Oyelami and Van Rooy 2016a). However, the formation of laterites, and in particular that of lateritic gravels, is conditioned, in addition to the climate, by four variable factors namely: bedrock, topography, vegetation and time (Ekodeck 1984; Duchaufour 2001; Kamgang et al. 2001). The variable combination of these various factors gives rise to very heterogeneous lateritic gravels, with different textures, chemico-mineralogical compositions, geotechnical and mechanical characteristics (Gidigas 1991; Adeyemi 1995; Santoir and Villiers 1995), even inside the tropical zone. This justifies the need for a fine geotechnical characterization of these materials, while taking into account several factors in a bid to provide their exact classification and their detailed mapping. For example, lateritic gravels, selected only on the basis of their geotechnical properties, sometimes behaved poorly on pavements (Tockol 1993). Consequently, some researchers suggested associating the chemical and mineralogical analysis with the traditional geotechnical tests (Tockol 1993; Mahalinga-Iyer and Williams 1997; Millogo et al. 2008). These studies

✉ Vincent Laurent Onana  
onana.vl@gmail.com

<sup>1</sup> Engineering Geology and Alterology Laboratory, Faculty of Science, University of Yaoundé I, P.O. Box 812, Yaoundé, Cameroon

<sup>2</sup> National Civil Engineering Laboratory of Cameroon (LABOGENIE), P.O. Box 1094, Douala, Cameroon



**Table 2** Geotechnical characteristics of chlorite schist-derived lateritic gravels (N = 22)

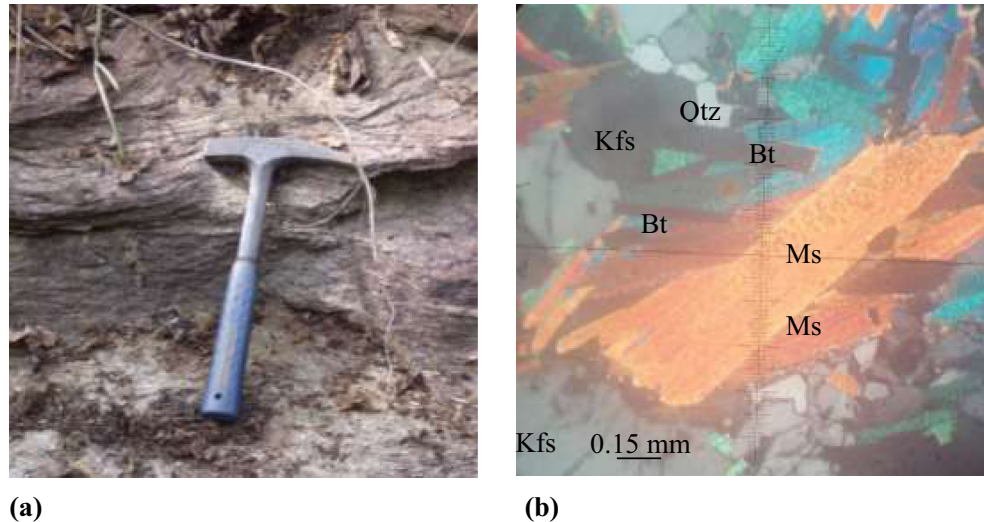
Location	Variable	Specific gravity	<2 mm (%)	<425 μm (%)	<80 μm (%)	LL (%)	PI (%)	Gm	Pm	Pp	ε <sub>s</sub>	OMC (%)	MDD (g/cm <sup>3</sup> )	CBR (%)
Mbalmayo site (N=9)	Bik1	2.82	71.00	42.80	26.00	68	38	1.60	1626	988	0.035	14.1	1.99	31
	Bik2	2.86	64.00	44.53	33.40	72	35	1.58	1558	1169	0.029	14.6	1.98	45
	Bik3	2.80	71.00	51.70	31.10	70	39	1.46	2016	1213	0.037	16.9	1.91	38
	Bik4	2.86	61.00	40.53	30.60	70	33	1.68	1337	1010	0.025	15.8	1.92	25
Bengbis site (N=3)	Ola1	2.87	53.90	37.95	27.80	62	32	1.80	1214	890	0.024	18.0	1.88	44
	Ola2	2.74	32.30	25.93	24.30	62	31	2.17	804	753	0.022	12.0	2.06	46
	Ola3	2.86	43.10	24.05	17.80	60	24	2.15	577	427	0.012	12.4	2.04	43
	Ola4	2.83	60.00	44.78	27.80	70	30	1.67	1343	834	0.020	10.8	2.04	66
Akonolinga site (N=10)	Mba1	2.61	36.70	32.74	22.20	50	22	2.08	720	488	0.010	12.7	1.98	38
	Yan	2.79	33.20	23.03	17.20	69	25	2.27	576	430	0.014	10.0	2.20	64
	Mek1	2.76	29.80	25.49	20.20	47	11	2.25	280	222	0.002	9.0	2.19	64
Edo site (N=10)	Yem	2.76	22.70	17.39	13.20	53	21	2.47	365	277	0.009	12.4	1.98	56
	Ako2	2.86	52.00	42.00	32.90	65	34	1.73	1428	1119	0.027	16.0	1.84	42
	Ako	2.85	40.00	32.70	23.70	58	24	2.04	785	569	0.012	12.9	2.03	58
	Edo	3.12	12.80	11.60	8.40	52	20	2.67	232	168	0.008	10.5	2.34	36
	Ngo	2.68	42.20	33.70	26.40	54	19	1.98	640	502	0.007	11.8	2.01	38
	Nko	3.00	42.60	35.60	29.50	58	21	1.92	748	620	0.009	12.3	2.16	48
	Nlo	2.73	27.4	23.84	22.80	68	27	2.26	644	616	0.016	15.3	1.92	59
Mba2 site (N=10)	Eba	2.83	29.8	16.14	14.20	60	24	2.40	387	341	0.012	11.6	2.19	69
	Eko1	2.81	28.57	20.393	18.00	65	28	2.33	571	504	0.017	13.0	2.07	60
	Mba2	2.87	38.52	28.80	23.38	66	30	2.09	864	701	0.020	12.0	2.16	52
AM	2.86	15.2	12.54	6.10	63	30	2.66	376	183	0.020	7.2	2.34	88	

$G_m = [300 - (\% \leq 2 \text{ mm} + \% < 425 \mu\text{m} + \% < 75 \mu\text{m})] / 100$ ,  $P_m = PI \times \text{percentage passing } 425 \mu\text{m test sieve}$  (Charman 1988),  $P_p = PI \times \text{percentage passing } 75 \mu\text{m test sieve}$  (Charman 1988),  $\epsilon_s = I \times 10^{-5} \times P_f^{2.24}$  (Millogo et al. 2008)

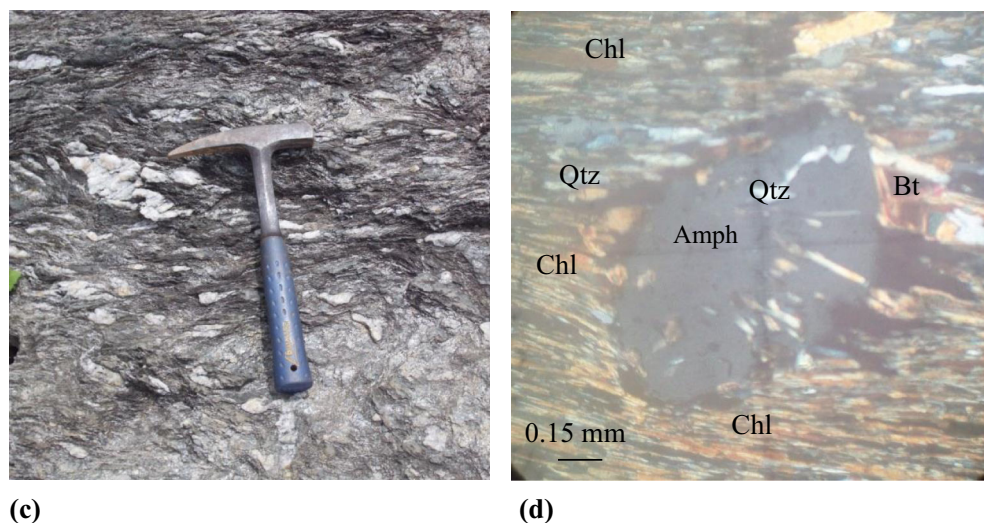


**Table 3** Mineralogical composition of the studied rocks

Minerals (wt.%)	Quartz	Biotite	Muscovite	Garnet	Chlorite	Disthene	Sillimanite	Feldspars	Plagioclases
Mica schists	30–40	20–25	5–7	5–7	10–12	5–7	2–3	traces	traces
Chlorite schists	45–55	2–5	5–10	–	25–30	–	–	<1.5	–

**Fig. 2** Photography (a) and microphotography (b) of mica schists of the studied area (*Qtz* quartz, *Bt* biotite, *Ms* muscovite, *Kfs* potassic feldspars)

actually confirmed the fact that it is very necessary to control the petrogenetic conditions and the evolution of these heterogeneous materials (Gidigasu 1991), in order to optimize their use in road construction. Therefore, it appears that after the climate, the nature of the rocks, and thus genetic filiation, would be the second factor influencing the lateritic gravels typology. The aim of this work is to demonstrate through statistical analysis that the difference in the degree of metamorphism of two metamorphic rocks resulting from the same clay protolith, and localized in the same climatic zone, results in the formation of lateritic gravels with different geotechnical properties in road construction.

**Fig. 3** Photography (c) and microphotography (d) of chlorite schists of the studied area (*Qtz* quartz, *Bt* biotite, *Ms* muscovite, *Chl* chlorite, *Amph* amphibole, *Kfs* potassic feldspars)

## Experimental methods

The studied materials were collected in the Akonolinga, Bengbis, Mbalmayo and Mfou zones (Fig. 1). A total of 42 samples were studied, 20 on mica schists and 22 on chlorite schists. The zone is crossed by a transitional equatorial climate with four seasons unequally distributed throughout the year (Ndam et al. 1998). The total annual rainfall is 1469 mm, and the average temperature is 28 °C.

## Geological analysis

Geological analysis consisted of localizing the borrow sites, describing materials and collecting samples. The rock samples were obtained with a two-handed hammer for petrographic analysis. The petrographic studies were carried out at the Department of Earth Sciences of the University of Yaoundé I on thin sections made at the laboratory of mineralogy of the Institute for Geological and Mining Research (IRGM). The lateritic gravel samples were described and carried using a shovel on the road cuts. Their colour was given using a Munsell color chart (Munsell color charts 2000). The mineralogy of the lateritic gravel samples was determined by X-ray diffraction (XRD) using a PAN analytical X'Pert Pro, in the Canadian Geoscience Laboratories of Ontario Geological Survey in Sudbury (Canada).

## Geotechnical analysis

The geotechnical tests were carried out at the National Civil Engineering Laboratory of Cameroon (LABOGENIE). The determination of the specific gravity of materials is that prescribed by the standard NF P94-054 (AFNOR 1991). The grain size analysis by dry sieving and sedimentation was conducted according to standards NF P94-056 (AFNOR 1996) and NF P94-057 (AFNOR 1992), respectively. The liquid limit (LL) was obtained according to the dish method of Casagrande. The plasticity limit (PL) was determined by the roller method. All these measures were carried out according to standard NF P94-051 (AFNOR 1993). The maximum dry density (MDD) and the optimum moisture content (OMC) were obtained according to standard NF P94-093 (AFNOR 1999). Californian bearing ratio (CBR) after 4 days soaking was performed according to standard NF P94-078 (AFNOR 1997). Punching was carried out with a Labo Test universal press type machine coupled with a pressure gauge.

## Statistical analysis

Statistical analyses were performed on 13 geotechnical variables determined on the 42 representative samples of lateritic gravels (Tables 1 and 2). The geotechnical studied variables are: specific gravity, skeleton (<2 mm), mortar (<425  $\mu\text{m}$ ), fines (<80  $\mu\text{m}$ ), 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) and Californian bearing ratio (CBR). All data in this study were subjected to statistical analysis using the XLSTAT 2014 software version 2014.5.03. A correlation matrix, coefficient of variation (CV), regression analysis, standardized principal components analysis (PCA) and agglomerative hierarchical clustering (AHC) were performed on 13



(a)



(b)

Fig. 4 Mica schist- (a) and chlorite schist- (b) derived lateritic gravels

geotechnical quantitative variables of the 42 samples. The AHC is a data classification technique largely applied in earth sciences (Davis 1986). The objects are grouped so that similar individuals fall into the same class and those in different groups are dissimilar. The method of dissimilarity used is the Bray and Curtis (1957) distance and a Ward-like (1963) method of aggregation.

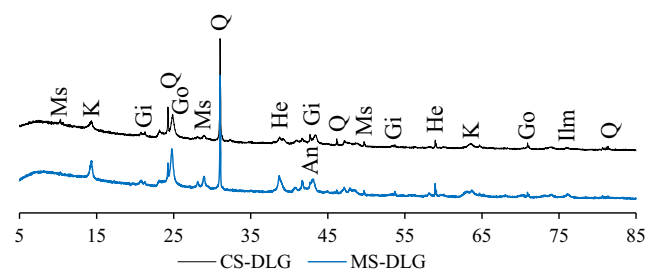


Fig. 5 Mineralogy of the studied lateritic gravels (*Ms* muscovite, *K*: kaolinite, *He* hematite, *Go* goethite, *Q* quartz, *An* anatase, *Ilm* ilmenite, *Gi* gibbsite. *MS-DLG* mica schist-derived lateritic gravels, *CS-DLG* chlorite schist-derived lateritic gravels)

**Table 4** Mineralogical composition of the studied lateritic gravels

Minerals (wt.%)	Quartz	Kaolinite	Muscovite	Gibbsite	Hematite	Goethite	Ilmenite	Anatase
Chlorite schist- derived lateritic gravels	16	14	23	20	8	13	2	–
Mica schist- derived lateritic gravels	13	22	15	12	10	20	–	5

## Results and discussion

### Geological features

#### Petrography of parent rocks

Low grade metamorphic rocks are characterized by an abundance of hydrous minerals, such as chlorite and serpentine. As the grade of metamorphism increases, hydrous minerals become less hydrous by losing H<sub>2</sub>O and non-hydrous minerals like muscovite, biotite, pyroxene and garnet become more common. In the pelitic sequence of metamorphic rocks, when the metamorphic grade grows, (chlorite) schists evolve to mica schists with temperature and pressure increase (Dercourt and Paquet 1999).

The mica schists found in the Endom zone consist of quartz, biotite, muscovite, garnet, chlorite, disthene, sillimanite, k-feldspars and plagioclases (Table 3). The accessory minerals are graphite, rutile, epidote and zircon. Texture is lepidoblastic to porphyroblastic (Fig. 2). They are metamorphic rocks of medium grade metamorphism. This description conforms with that of Olinga (2003) and Kamtchueng et al. (2015) in the Southern Cameroon Plateau.

The Nkolessong area rocks are greenish-grey, some shiny on the surface and laminated (Fig. 3). They contain quartzitic levels and the rock is banded with alternating light and dark beds. Its texture is granoblastic heterogranular to granolepidoblastic, sometimes mylonitic. These rocks consist

of quartz, chlorite, muscovite, biotite, alkaline feldspars and opaque minerals (Table 3). Accessory minerals are calcite, tourmaline and apatite. These rocks are chlorite schists-metamorphic rocks that evolved during a low grade of metamorphism.

#### Petrography of lateritic gravels

The mica schist-derived lateritic gravels have a thickness varying between 0.85 and 2.40 m. These materials consist of a reddish sandy clayey matrix in which two types of coarse elements are observed: millimetre- to centimetre-length nodules with varied forms and the quartz fragments (Fig. 4). The nodules account for approximately 60 to 70% of the volume of the materials. The millimetre-length quartz grains and muscovite flakes are present inside the nodules. The quartz fragments (5–10%) are centimetric to pluricentimetric. The millimetre-length quartz grains are disseminated in the sandy clayey matrix. The rock relics and ferruginous hardpan are observable in these lateritic gravels. The results of mineralogical analysis by XRD (Fig. 5) show that the mica schist-derived lateritic gravels consist of quartz, kaolinite, muscovite, gibbsite, hematite, goethite and anatase (Table 4).

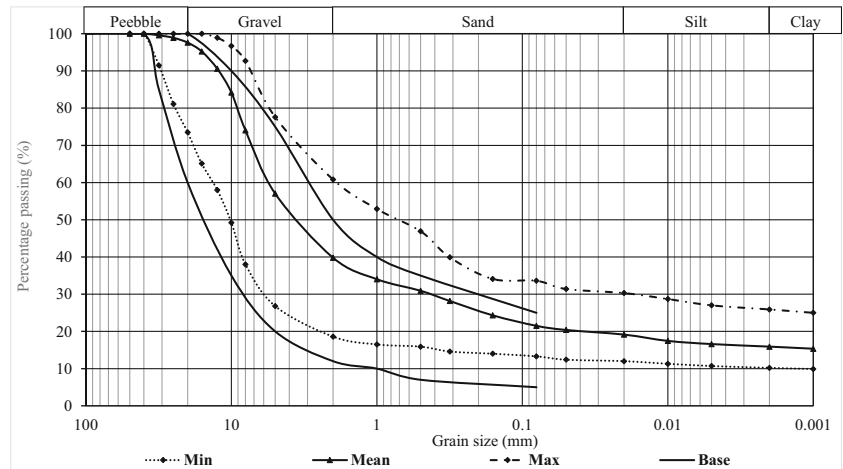
Chlorite schist-derived lateritic gravels have an average thickness ranging between 1.0 and 3.3 m. These materials are made of a reddish-yellow clayey matrix, friable texture within which three types of coarse elements are observed: the millimetre-length nodules, the centimetric

**Table 5** Statistical summaries of variables of mica schist and chlorite schist-derived lateritic gravels

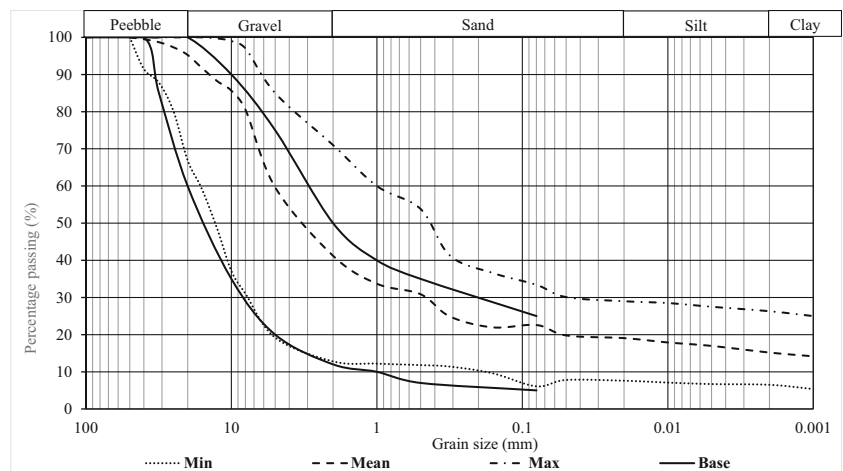
Parent rock	Number of sample (N = 42)	Variable	Specific gravity	Skeleton (<2 mm), %	Mortar (<425 μm), %	Fines (<80 μm), %	LL (%)	PI (%)	Gm	Pm	Pp	ε <sub>s</sub>	OMC (%)	MDD (g/cm <sup>3</sup> )	CBR (%)
Mica schist	20	Min	2.75	18.60	15.40	13.30	45	11	1.77	185	161	0.002	8.2	1.87	24
		Max	3.05	60.80	43.01	33.60	66	28	2.53	918	755	0.017	16.7	2.26	84
		Mean	2.84	39.85	29.80	21.50	52	18	2.09	517	389	0.007	11.8	2.10	62
		Sd	0.07	13.86	8.59	5.59	5.82	5.58	0.25	203.53	190.40	0.005	2.01	0.09	16.38
		CV (%)	3	35	29	26	11	32	12	39	49	70	17	4	27
Chlorite schist	22	Min	2.61	12.80	11.60	6.10	47	11	1.46	232	168	0.002	7.2	1.84	25
		Max	3.12	71.00	51.70	33.40	72	39	2.67	2016	1213	0.037	18.0	2.34	88
		Mean	2.83	41.26	30.37	22.59	62	27	2.06	868	637	0.018	12.8	2.06	50
		Sd	0.10	16.81	11.31	7.57	7.24	6.83	0.35	494.41	323.29	0.009	2.60	0.14	14.71
		CV (%)	4	41	37	34	12	25	17	57	51	51	20	7	29

CV: coefficient of variation = [(Sd/Mean) × 100]

**Fig. 6** Mica schist- (a) and chlorite schist- (b) derived lateritic gravels inside the base grading envelope (CEBTP 1984)



(a)



(b)

nodules and the centimetric quartz fragments (Fig. 4). The millimetre-length nodules (50–55%) are more or less rounded and display a dark red core. The centimetre nodules (10–15%), with dark red cortex, present inclusions of millimetre-length quartz grains and a white-reddish-pink nucleus rich in quartz. Friable nodules having preserved the structure of the parental rock are observable at the base of the level containing these materials. The centimetric fragments of quartz (10–15%) and the millimetre-length quartz grains, in very significant

quantities, are also visible in the reddish-yellow clayey matrix. The rock relics are abundant, and the presence of fine muscovite flakes can also be noted in these materials. The lateritic gravels developed on chlorite schists consist of quartz, kaolinite, muscovite, gibbsite, hematite, goethite and ilmenite (Table 4).

These materials are thicker and more quartzose than those developed on mica schists. The rock relics are more abundant in the lateritic gravels resulting from chlorite schists.

**Table 6** Variability grouping of geotechnical properties of the studied lateritic gravels

	CV (%)	Mica schist-derived lateritic gravels	Chlorite schist-derived lateritic gravels
Least variable	<15	Specific gravity, LL, <b>G<sub>m</sub></b> , MDD	Specific gravity, LL, MDD
Moderately variable	15–35	<b>&lt;2 mm</b> , <b>&lt;425 μm</b> , <80 μm, PI, OMC, CBR	<80 μm, PI, <b>G<sub>m</sub></b> , OMC, CBR
Highly variable	>35	P <sub>m</sub> , P <sub>p</sub> , ε <sub>s</sub>	<b>&lt;2 mm</b> , <b>&lt;425 μm</b> , P <sub>m</sub> , P <sub>p</sub> , ε <sub>s</sub>

Parameters in bold underline differences between the two types of materials

**Table 7** Summary of relations between geotechnical of the studied lateritic gravels

Parameters	Mica schist-derived lateritic gravels		Chlorite schist-derived lateritic gravels			
	Relations	Type of regression Equations	Statistical parameter	Type of regression Equations		
425 $\mu\text{m}$ - 2 mm	Linear	$<425 \mu\text{m} = 0.5587(<2 \text{ mm}) + 7.5446$	$R^2 = 0.8129$	Linear	$<425 \mu\text{m} = 0.6373(<2 \text{ mm}) + 4.0753$	$R^2 = 0.8972$
80 $\mu\text{m}$ - 2 mm	-	-	-	Linear	$<80 \mu\text{m} = 0.3792(<2 \text{ mm}) + 6.9422$	$R^2 = 0.7089$
80 $\mu\text{m}$ - 425 $\mu\text{m}$	-	-	-	Linear	$<80 \mu\text{m} = 0.6188(<425 \mu\text{m}) + 3.7965$	$R^2 = 0.8544$
PI - LL	-	-	-	Linear	$PI = 0.7945LL - 22.003$	$R^2 = 0.7102$
Gm - 2 mm	Linear	$Gm = -0.0169(<2 \text{ mm}) + 2.7636$	$R^2 = 0.907$	Linear	$Gm = -0.0202(<2 \text{ mm}) + 2.8898$	$R^2 = 0.957$
Gm - 425 $\mu\text{m}$	Linear	$Gm = -0.0275(<425 \mu\text{m}) + 2.9095$	$R^2 = 0.9204$	Linear	$Gm = -0.0303(<425 \mu\text{m}) + 2.977$	$R^2 = 0.976$
$\varepsilon_s$ - PI	Linear	$\varepsilon_s = 0.0009PI - 0.0083$	$R^2 = 0.9833$	Linear	$\varepsilon_s = 0.0013PI - 0.0177$	$R^2 = 0.9615$
$\varepsilon_s$ - Pm	Polynomial 3	$\varepsilon_s = 1E-10Pm^3 - 1E-07Pm^2 + 7E-05Pm - 0.0059$	$R^2 = 0.6639$	Linear	$\varepsilon_s = 2E-05Pm - 0.0037$	$R^2 = 0.7721$
$\varepsilon_s$ - Pp	Linear	$\varepsilon_s = 2E-05Pp - 0.0016$	$R^2 = 0.736$	Linear	$\varepsilon_s = 2E-05Pp - 0.0026$	$R^2 = 0.7145$
Gm - 80 $\mu\text{m}$	-	-	-	Linear	$Gm = -0.0425(<80 \mu\text{m}) + 3.0179$	$R^2 = 0.8625$
Pm - 425 $\mu\text{m}$	-	-	-	Linear	$Pm = 40.267(<425 \mu\text{m}) - 355.17$	$R^2 = 0.8484$
Pm - 2 mm	-	-	-	Linear	$Pm = 27.5(<2 \text{ mm}) - 266.87$	$R^2 = 0.874$
Pm - 80 $\mu\text{m}$	-	-	-	Polynomial 2	$Pm = 2.0916(<80 \mu\text{m})^2 - 33.277(<80 \mu\text{m}) + 437.82$	$R^2 = 0.7193$
Pm - PI	-	-	-	Linear	$Pm = 60.043PI - 764.21$	$R^2 = 0.6878$
Pm - Gm	-	-	-	Linear	$Pm = -1327.7Gm + 3599.9$	$R^2 = 0.8656$
Pp - 2 mm	-	-	-	Linear	$Pp = 17.15(<2 \text{ mm}) - 70.273$	$R^2 = 0.795$
Pp - 425 $\mu\text{m}$	-	-	-	Linear	$Pp = 25.602(<425 \mu\text{m}) - 140.2$	$R^2 = 0.8021$
Pp - 80 $\mu\text{m}$	-	-	-	Linear	$Pp = 37.774(<80 \mu\text{m}) - 215.91$	$R^2 = 0.7824$
Pp - PI	Linear	$Pp = 29.157PI - 124.01$	$R^2 = 0.7292$	Linear	$Pp = 38.598PI - 411.76$	$R^2 = 0.6647$
Pp - Gm	-	-	-	Linear	$Pp = -856.78Gm + 2400.4$	$R^2 = 0.8431$
Pp - Pm	Linear	$Pp = 0.8249Pm - 37.358$	$R^2 = 0.7776$	Linear	$Pp = 0.6288Pm + 91.691$	$R^2 = 0.9247$
MDD - OMC	Linear	$MDD = -0.0397OMC + 2.564$	$R^2 = 0.827$	Linear	$MDD = -0.0460MC + 2.6438$	$R^2 = 0.7467$

-: no relation

## Variability of geotechnical properties

### Descriptive analysis

The variables of the lateritic gravels of the studied area are presented in Tables 1 and 2. The specific gravity values of mica schist-derived lateritic gravels vary between 2.75 and 3.05, with an average of 2.84 (Table 5). The specific gravity values of lateritic gravels developed on chlorite schists vary between 2.61 and 3.12, averaging 2.83 (Table 5). The specific gravity values of mica schists and chlorite schist-derived lateritic gravels are similar. This is due to similarities in the mineralogical compositions of these two types of materials. Grading curves (Fig. 6) show that the mica schist-derived lateritic gravels consist of 18.60–60.80 wt.% of skeleton, 15.40–43.01 wt.% of mortar and 13.30–33.60 wt.% of fines, with an average of 21.50 wt.% for fines (Table 5). The materials on chlorite schists present 12.80–71.00 wt.% of skeleton, 11.60–51.70 wt.% of mortar and 6.10–33.40 wt.% of fines, with an average of 22.59 wt.% for fines (Table 5). The contents of skeleton, mortar and fines available in those materials are similar.

The values of liquid limit LL of lateritic gravels on mica schists vary between 45 and 66%, with an average value of 52% (Table 5). The chlorite schist-derived lateritic gravels present LL values varying between 47 and 72%, with an average of 62%. The values of LL are higher in the lateritic gravels developed on chlorite schists. The values of plasticity index (PI) of mica schist-derived materials vary between 11 and 28%, for an average of 18%. On chlorite schists, the values of this parameter vary between 11 and 39%, with an average of 27%. The chlorite schist-derived lateritic gravels are more plastic than those developed on mica schists.

The values of the grading modulus (Gm) of mica schist-derived lateritic gravels vary between 1.77 and 2.53 and present an average value of 2.09. For the lateritic gravels on chlorite schists, the values of Gm vary between 1.46 and 2.67, with an average value of 2.06 (Table 5). The plasticity modulus (Pm) average of materials developed on mica schists is 517. The values of this parameter vary between 185 and 918. The lateritic gravels on chlorite schists present a Pm average value of 868. The values of this parameter vary between 232 and 2016. The values of the swelling potential ( $\epsilon_s$ ) of the studied lateritic gravels are very low, 0.002–0.017, on mica schists and, 0.002–0.037, on chlorite schists. The plasticity product (Pp) values of lateritic gravels resulting from the mica schists vary between 161 and 755, with an average of 389. On chlorite schist-derived lateritic gravels, the Pp values vary between 168 and 1213, with an average of 637. Concerning the derived parameters, the lateritic gravels resulting from mica schists present the highest values of Gm.

The values of the optimum moisture content (OMC) of lateritic gravels developed on mica schists vary between 8.2 and 16.7%, with an average of 11.8% (Table 5). On chlorite

schist-derived lateritic gravels, the values of OMC vary between 7.2 and 18.0%, with an average of 12.8% (Table 5). On mica schists, the studied lateritic gravels have values of maximum dry density (MDD) ranging between 1.87 and 2.26 g/cm<sup>3</sup>, with an average of 2.10 g/cm<sup>3</sup>. For chlorite schist-derived lateritic gravels of the studied zone, the average value of MDD is 2.06 g/cm<sup>3</sup>, for values ranging between 1.84 and 2.34 g/cm<sup>3</sup>. The values of CBR at 95% of MDD of mica schist-derived lateritic gravels oscillate between 24 and 84% with an average of 62%. On the lateritic gravels resulting from the chlorite schists in the studied zone, the values of this parameter vary between 25 and 88%, with an average of 50%. The lateritic gravels developed on mica schists have the highest values of MDD and CBR, and the lowest values of OMC.

### Coefficient of variation

For evaluating the variations of lateritic gravel properties based on their coefficient of variation (CV), the study adopted the classification of Wilding and Dress (1983): (1) if CV is less than 15, then the parameter has low variations, (2) if CV is between 15 and 35, the variable has medium variations and (3) otherwise, the parameter has high variations. The values of the coefficient of variation of the studied materials are presented in Table 5. The specific gravity and the maximum dry density (MDD) are the least variable parameters on the lateritic gravels studied on mica schists and chlorite schists. On the other hand,  $\epsilon_s$  and Pm are the highly variable parameters, respectively, on lateritic gravels resulting from mica schists and chlorite schists (Table 5). In the lateritic gravels developed on mica schists, among all the studied parameters, only PI and  $\epsilon_s$  present values of CV higher than those obtained for the same parameters on the chlorite schist-

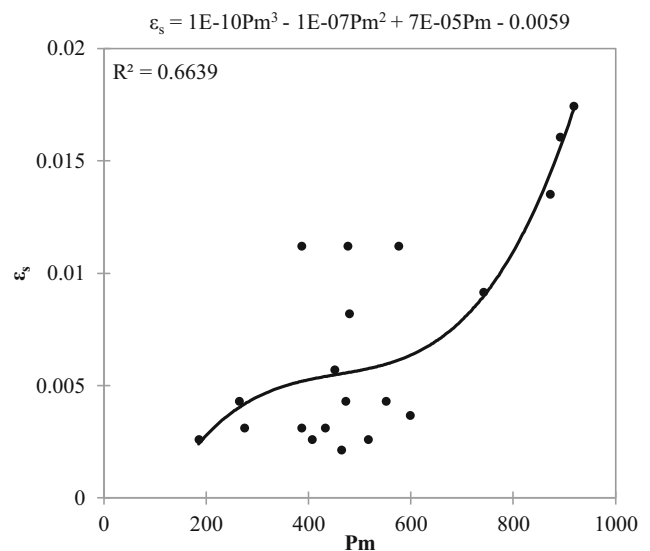


Fig. 7 Scatter plot between  $\epsilon_s$  and Pm and adjusted curve

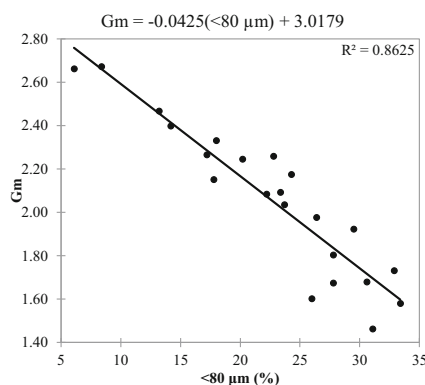
derived lateritic gravels (Table 5). The variation of skeleton (<2 mm) and mortar (<425 μm) parameters are average on mica schist-derived lateritic gravels and high for those developed on chlorite schists (Table 6). Skeleton, mortar, fines and OMC parameters are dispersed on chlorite schists, contrary to the plasticity index (PI), which presents a great dispersion on the lateritic gravels studied on mica schists. For the derived parameters, only Gm presents a different variation for the two types of materials: weak on those developed on mica schists and average on those resulting from the chlorite schists (Table 6). The values of MDD present a weak variation,

while those of OMC and CBR vary fairly. For these studied parameters, the data are heterogeneous and the values relatively dispersed. Generally, the coefficient of variation of the various parameters from the studied lateritic gravels shows a great dispersion on chlorite schist-derived materials.

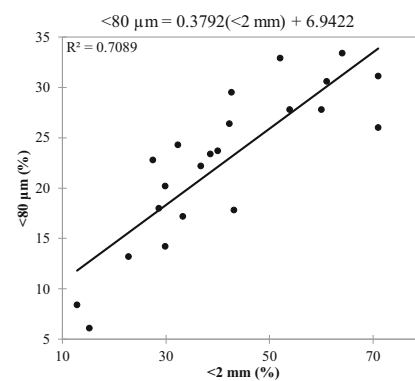
### Regression analysis

Regarding the lateritic gravels studied on mica schists, mortar (<425 μm) is related to skeleton (<2 mm) by a linear relation (Table 7). The grading modulus (Gm) is linked to the skeleton

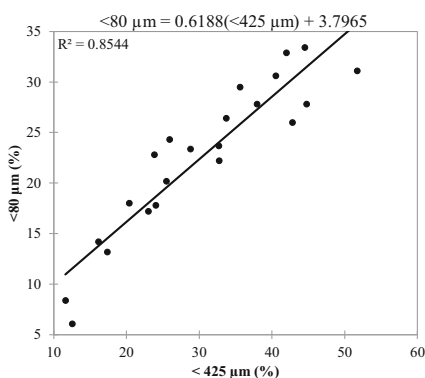
**Fig. 8** Scatter plot between <80 μm, Pm, Gm, PI and other parameters and adjusted curve



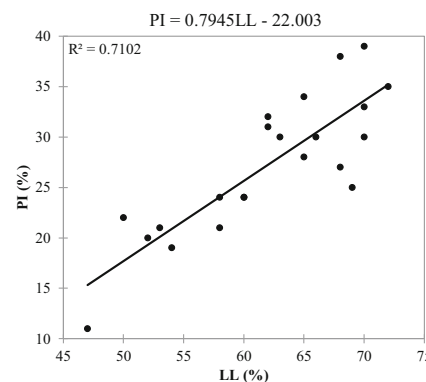
(a) Scatter plot between Gm and <80 μm and adjusted curve



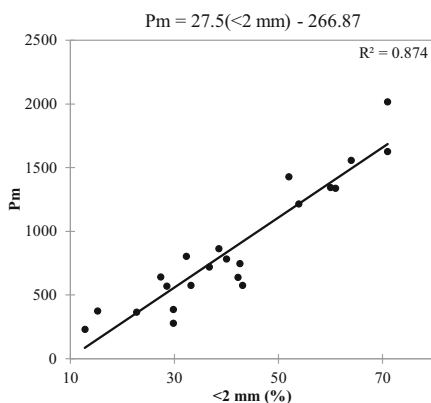
(b) Scatter plot between <80 μm and <2 mm and adjusted curve



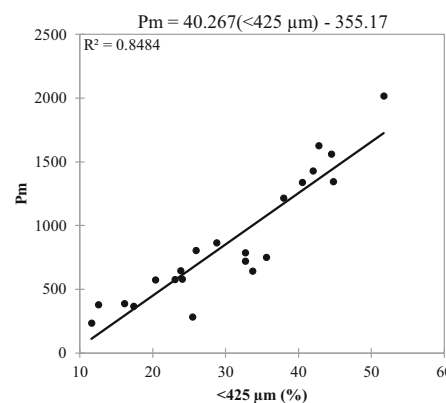
(c) Scatter plot between <80 μm and <425 μm and adjusted curve



(d) Scatter plot between PI and LL and adjusted curve



(e) Scatter plot between Pm and <2 mm and adjusted curve



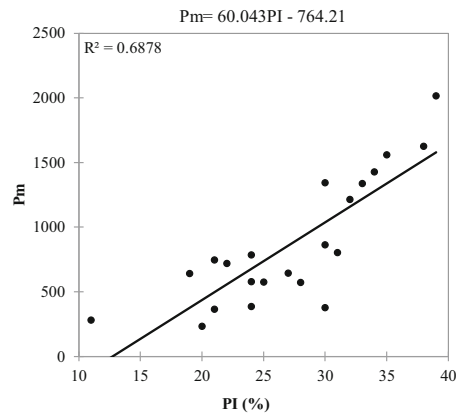
(f) Scatter plot between Pm and <425 μm and adjusted curve

(<2 mm) and mortar (<425 μm) parameters by a linear relation (Table 7). The swelling potential ( $\epsilon_s$ ) is related to PI and Pp by a linear relation (Table 7) and to Pm by a polynomial relation of order 3 (Fig. 7). The Pp parameter is related to PI and Pm parameters by a linear relation (Table 7). The maximum dry density (MDD) is linked to the optimum moisture content (OMC) by a linear relation (Table 7). This relation between MDD and OMC is a common result (Fall et al. 1994; Ndzié Mvindi et al. 2017).

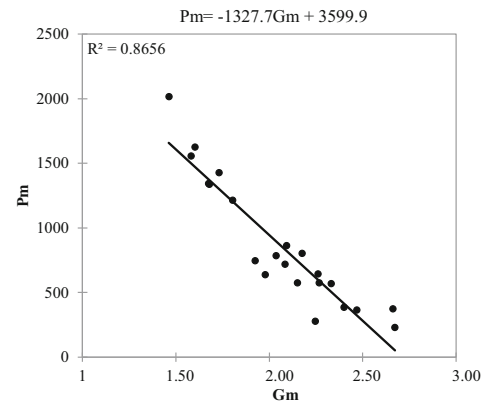
On the lateritic gravels resulting from chlorite schists, mortar (<425 μm) is related to skeleton (<2 mm) by a linear

relation (Table 7). The values of Gm are linked to those of skeleton (<2 mm), mortar (<425 μm) and fines (<80 μm) parameters by a linear relation (Table 7). The parameter fines (<80 μm) is related to skeleton (<2 mm) and to mortar (<425 μm) by a linear relation (Fig. 8). The plasticity index (PI) is related to the liquid limit (LL) by a linear relation (Fig. 8), while the plasticity modulus Pm is related with skeleton (<2 mm), mortar (<425 μm), PI and Gm parameters by a linear relation (Figs. 8 and 9) and with the fines content (<80 μm) by a polynomial relation of order 2 (Fig. 9). The plasticity product Pp is linked to skeleton (<2 mm), mortar

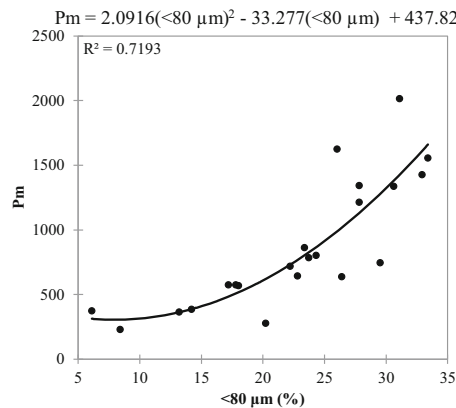
**Fig. 9** Scatter plot between Pm, Pp and other parameters and adjusted curve



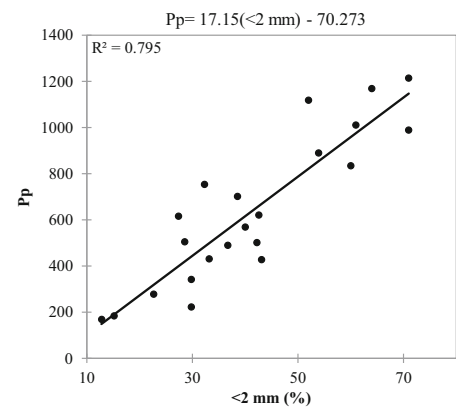
(a) Scatter plot between Pm and PI and adjusted curve



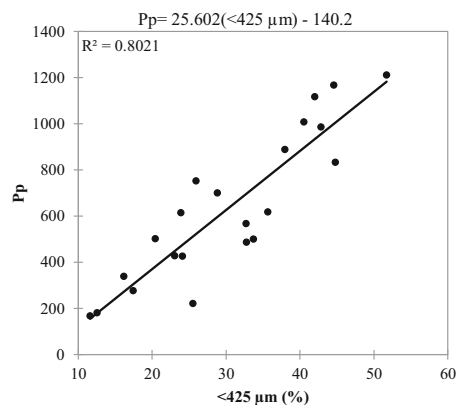
(b) Scatter plot between Pm and Gm and adjusted curve



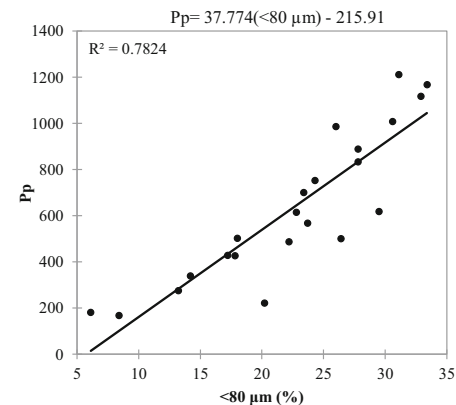
(c) Scatter plot between Pm and <80 μm and adjusted curve



(d) Scatter plot between Pp and <2 mm and adjusted curve



(e) Scatter plot between Pp and <425 μm and adjusted curve



(f) Scatter plot between Pp and <80 μm and adjusted curve



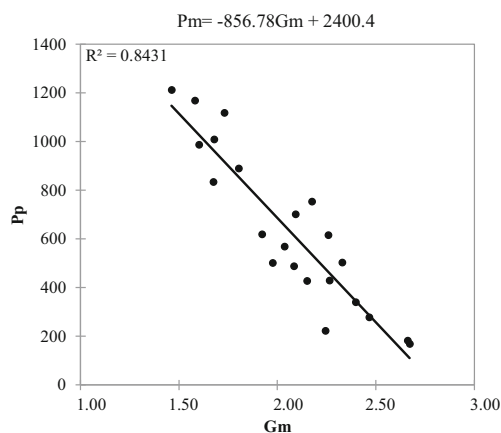


Fig. 10 Scatter plot between Pp and Gm and adjusted curve

(<425 μm), fines (<80 μm), PI, Gm and Pm parameters by a linear relation (Figs. 9 and 10). The swelling potential (ε<sub>S</sub>) is related to PI, Pm and Pp by a linear relation (Table 7). The maximum dry density (MDD) is related to OMC by a linear relation (Table 7).

The ε<sub>S</sub> vs. skeleton relation is inexistent on mica schist-derived materials (Table 7). The Gm vs. <80 μm relation and those linking Pm to the granulometric parameters and PI do not appear on lateritic gravels developed on mica schists (Table 7). Relations between LL and PI, Pp and Gm and between MDD and Pp are also absent in the lateritic gravels developed on mica schists. The relation ε<sub>S</sub> vs. PI, polynomial 2 in the dry savannah lateritic gravels (Ndzié Mvindi et al. 2017), is linear in the studied materials. The relations Pp vs. <2 mm, Pp vs. <425 μm, Pp vs. <80 μm, and Pp vs. PI, polynomial of order 3 and 4 in humid savannah zone (Ndzié Mvindi et al. 2017), are linear in the studied lateritic gravels (Table 7). The road specifications in the tropical countries considered the CBR index as the key parameter for road dimensioning (Fall et al. 1994). The latter is not related to any parameter in the studied materials. Very well-known relations, such as PI vs. OMC and MDD vs. fines, are not observed in the studied lateritic gravels. This report is similar to that done on the Centre Cameroon savannah zone lateritic gravels (Ndzié Mvindi et al. 2017).

Principal components analysis

The results of the principal components analysis (PCA) show that the first factorial design explains 75% of the information

Table 8 Eigenvalues

	F1	F2	F3
Eigenvalue	7.58	2.15	1.25
Variability (%)	58.28	16.57	9.63
Cumulative (%)	58.28	74.85	84.49

Table 9 Squared cosines of the variables

	F1	F2	F3
Specific gravity	0.008	0.048	<b>0.592</b>
<2 mm (%)	<b>0.565</b>	0.244	0.090
<425 μm (%)	<b>0.608</b>	0.296	0.043
<80 μm (%)	<b>0.700</b>	0.088	0.001
LL (%)	<b>0.422</b>	0.421	0.007
PI (%)	<b>0.548</b>	0.405	0.004
Gm	<b>0.687</b>	0.249	0.046
Pm	<b>0.918</b>	0.014	0.027
Pp	<b>0.917</b>	0.047	0.002
ε <sub>S</sub>	<b>0.626</b>	0.305	0.011
OMC (%)	<b>0.578</b>	0.004	0.139
MDD (g/cm <sup>3</sup> )	<b>0.577</b>	0.033	0.286
CBR (%)	<b>0.422</b>	0.000	0.005

Values in bold correspond for each variable to the factor with the largest squared cosine

contained in the data (Table 8). As such, this percentage is significant and the first factorial plan clearly represents the variability contained as a whole of the data file. The eigenvalues also showed that factor 1 alone accounted for 58.28% of the variance. The sum of the square cosines on the first two factorial axes F1 and F2, for a given observation, gives an idea of the fidelity of the representation in the plan defined by F1 and F2, for this observation (Ndzié Mvindi et al. 2017). This reveals that the parameters PP and Pm, with cos<sup>2</sup> of 0.92, better represent the reality, as opposed to the specific gravity, LL and CBR, with respective cos<sup>2</sup> of 0.01, 0.42 and 0.42 (Table 9). On this basis, the interpretation of specific gravity, LL and CBR parameters will therefore be inaccurate. The correlation circle F1-F2 of variables (Fig. 11) shows that axis 2 opposes the group of Gm, MDD, CBR and specific gravity parameters, with the group of parameters PP, Pm, <80 μm,

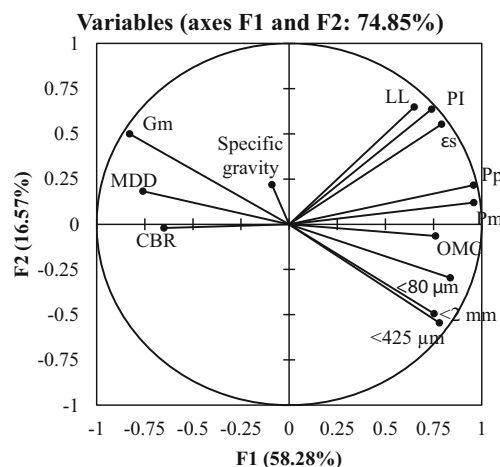


Fig. 11 PCA data of the geotechnical variables of the studied lateritic gravels

<425  $\mu\text{m}$ , PI, <2 mm,  $\epsilon_s$ , LL and OMC. This fact is similar to the observations made on the Centre Cameroon savannah zone lateritic gravels (Ndzié Mvindi et al. 2017). Thus, this circle highlights the description of three groups of geotechnical parameters, the group of granulometric parameters <80  $\mu\text{m}$ , <425  $\mu\text{m}$ , <2 mm and OMC, the group of plasticity parameters Pp, Pm, PI, LL and  $\epsilon_s$  and that of physical and compaction parameters MDD, CBR, Gm and specific gravity. These groupings suggest that there are correlations between these various parameters. The position of the group of granulometric parameters compared to the group of the plasticity parameters indicates positive correlations between the parameters of these various groups. Variables  $\epsilon_s$ , LL, PI, Pp, Pm, <80  $\mu\text{m}$ , <425  $\mu\text{m}$ , <2 mm and Gm are close to the correlation circle, and are thus well explained and well correlated to the factorial axis. This result is in agreement with that obtained on the Central Cameroon lateritic gravels (Ndzié Mvindi et al. 2017). The position of parameters MDD and Gm, opposed to those of the granulometric group, indicates negative correlations between them. Parameter MDD is inversely correlated with OMC ( $R = -0.88$ ) and with fines ( $R = -0.70$ ). The grading modulus (Gm) is inversely correlated with the parameters of the granulometric group, in particular with <2 mm ( $R = -0.97$ ), <425  $\mu\text{m}$  ( $R = -0.98$ ) and <80  $\mu\text{m}$  ( $R = -0.82$ ). The CBR and OMC, are the variables closest to the main factorial axis, which explains 58.28% of the variance of the individuals. Thus, these variables have a significant role in the classification of lateritic gravels (Fall et al. 1994). The cloud of the individuals (Fig. 12) shows that axis 2 opposes the lateritic gravels developed on mica schist to those resulting from chlorite schists. As a whole, this factorial plan illustrates two major groups of materials: the mica schist-derived lateritic gravels and those developed on chlorite schists. The biplot of the individuals and the variables

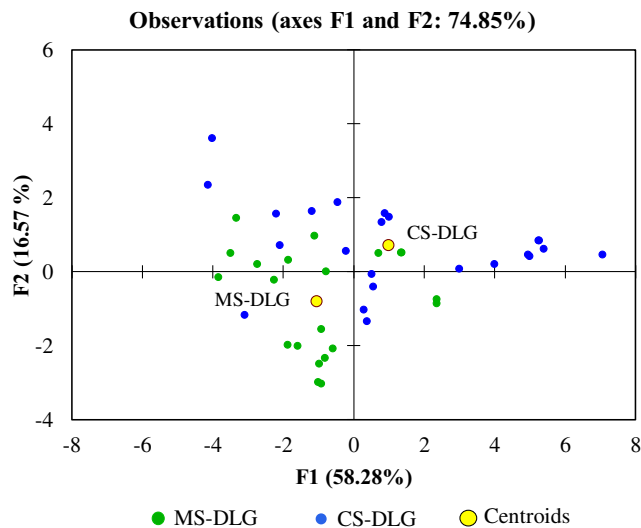


Fig. 12 Plotting of the studied lateritic gravels (MS-DLG mica schist-derived lateritic gravels, CS-DLG chlorite schist-derived lateritic gravels)

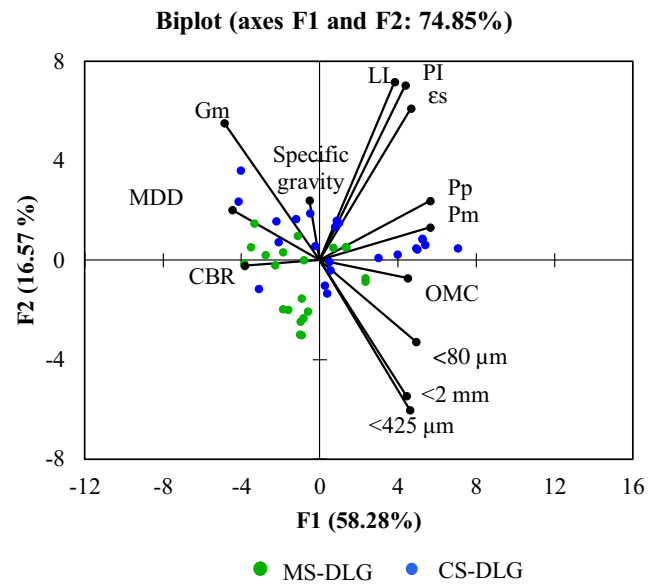


Fig. 13 Biplot of the studied lateritic gravels (MS-DLG mica schist-derived lateritic gravels, CS-DLG chlorite schist-derived lateritic gravels)

(Fig. 13) shows that the mica schist-derived lateritic gravels are characterized by physical and compaction parameters, while those developed on chlorite schists are mainly characterized by granulometric and plasticity parameters.

### Agglomerative hierarchical clustering

Agglomerative hierarchical clustering (AHC) was used to investigate the dissimilarities between the studied materials. The results of the AHC are given in the form of dendrogram (Fig. 14). This result confirms the existence of two classes of lateritic gravels whose characteristics are presented in Table 10. The first class is made up of 18 individuals, including 14 on chlorite schists and four on mica schists, and the second

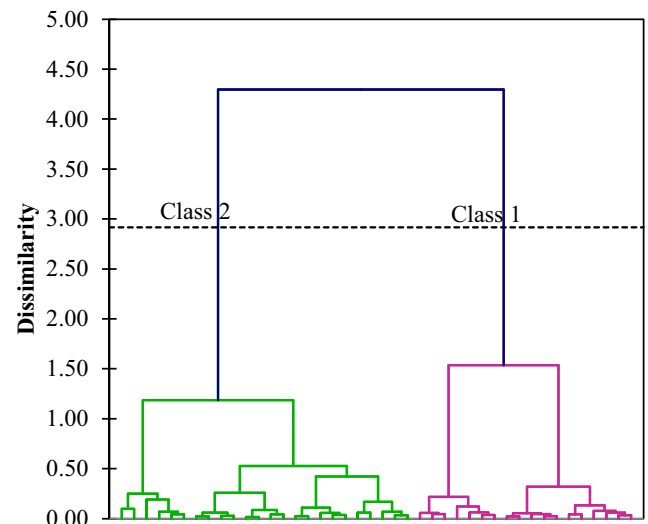


Fig. 14 Dendrogram of the studied lateritic gravels

**Table 10** Main characteristics of lateritic gravel-based classes (centroid of classes)

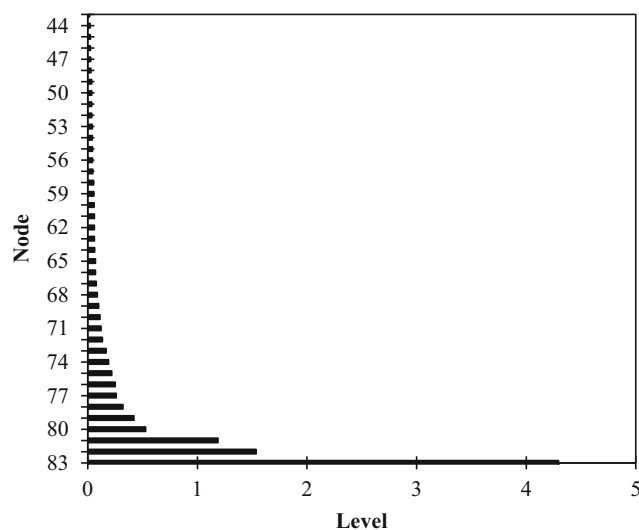
Class	Specific gravity	Skeleton (<2 mm), %	Mortar (<425 $\mu\text{m}$ ), %	Fines (<80 $\mu\text{m}$ ), %	LL (%)	PI (%)	Gm	Pm	Pp	$\epsilon_s$	OMC (%)	MDD ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	CBR (%)
1	2.83	48.27	36.31	27.63	63	29	1.88	1064	797	0.019	13.8	2.00	44
2	2.83	34.82	25.45	17.90	53	18	2.22	428	311	0.007	11.2	2.13	65

class has 16 individuals on mica schists and 8 on chlorite schists. The straight curve in the levels diagram (Fig. 15) confirms the good quality of classification carried out. The occurrence of very mixed groups could be due to the dispersion of the data of lateritic gravels developed on chlorite schists.

## Implications for road construction

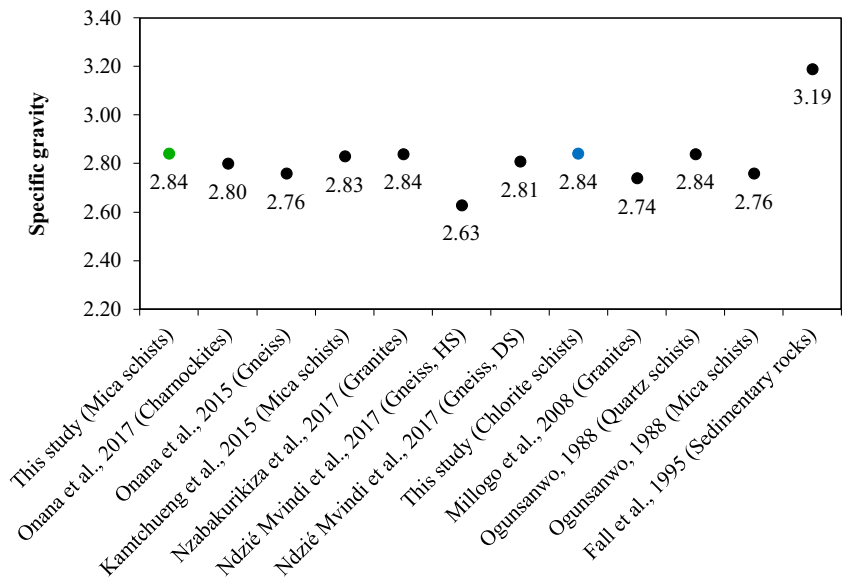
### Mica schist-derived lateritic gravels

The lateritic gravels are of weak performance if their specific gravity is lower than 2.75 and of excellent performances if the value of this parameter is higher or equal to 2.85 (De Graft Johnson et al. 1972; Nwaiwu et al. 2006; Paige-Green et al. 2015). All mica schist-derived materials have a specific gravity equal to or higher than 2.75. The mica schist-derived lateritic gravels will thus have performances rated well to excellent in road construction. The obtained average value (2.84) is equal to that obtained on the lateritic gravels of Central Cameroon (2.83) (Kamtchueng et al. 2015) and with that obtained on lateritic gravels resulting from quartz schist in Nigeria (2.84) (Ogunsanwo 1988) (Fig. 16). However, this value of specific gravity is higher than that obtained on mica schists in Nigeria (2.76) (Ogunsanwo 1988) and on gneiss in East Cameroon (2.76) (Onana et al. 2015). The obtained values are 2.5–3.6 established by Indraratna and Nutalaya

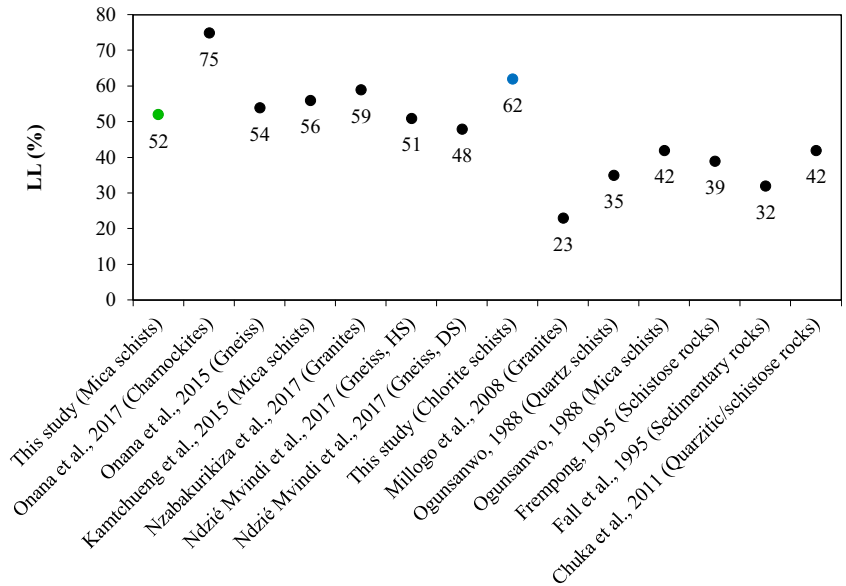
**Fig. 15** Levels bar chart

(1991). The studied materials developed on mica schists present specific gravity values of typical lateritic soils. The minimal grading and average granulometric curves of the studied materials are integrated in the specification envelop for base courses (CEBTP 1984) (Fig. 6). This fact is contrary with regard to the maximal granulometric curve. The average value of the liquid limit (LL = 52%) of lateritic gravels on mica schists is similar to that obtained in the Centre Cameroon humid savannah zone (51%) (Ndzié Mvindi et al. 2017). This value of LL is higher than those obtained in West Africa (23–55%) (Fall et al. 1995; Frempong 1995; Millogo et al. 2008; Oyelami and Van Rooy 2016b) (Fig. 17). The PI average value (18%) is lower than those obtained on mica schists in Centre Cameroon (26%) (Kamtchueng et al. 2015) and in Nigeria (20%) (Chuka et al. 2011) (Fig. 18). This average value is lower than the required maximum (20%) for use as sub-bases of high volume traffic roads and higher than the required maximum (15%) for construction of base layers (CEBTP 1984). Fifty-five percent of mica schist-derived lateritic gravels have a PI value lower than 15%. The average value of PI (18%), near 15%, suggests the use of these materials as sub-base and possibly as base layers. According to the plasticity diagram chart of Casagrande, 40% of materials developed on mica schists are of average plasticity (Fig. 19). The derived parameters are used to quantify the influence of the plasticity of fines on the general performance of the material, which depends on the proportion and the nature of fines (Charman 1988; Bello and Osinubi 2010). The average value of the grading modulus (Gm) of lateritic gravels on mica schists is 2.09. To be used as base layers for roads with low volume traffic, Gm must be equal to or higher than 1.5 (Charman 1988; Nwaiwu et al. 2006). Mica schist-derived lateritic gravels are thus usable as sub-base layers for any type of traffic and as base layers for low volume traffic roads. Sixty percent of materials developed on mica schists present values of the plasticity modulus (Pm) lower than 500; the required maximum for use as sub-base for any type of traffic (Charman 1988). Swelling is a significant characteristic for materials use (Millogo et al. 2008). The swelling potential ( $\epsilon_s$ ) values of lateritic gravels resulting from mica schists (0.002–0.017) indicate that these materials are of low swelling potential (Djedid et al. 2001). The values of the plasticity product (Pp) of mica schist-derived lateritic gravels vary between 161 and 755. The obtained average value (389) is largely higher than those obtained in Nigeria (133–197) (Nwaiwu et al. 2006). The plasticity product, Pp, is a significant characteristic of the

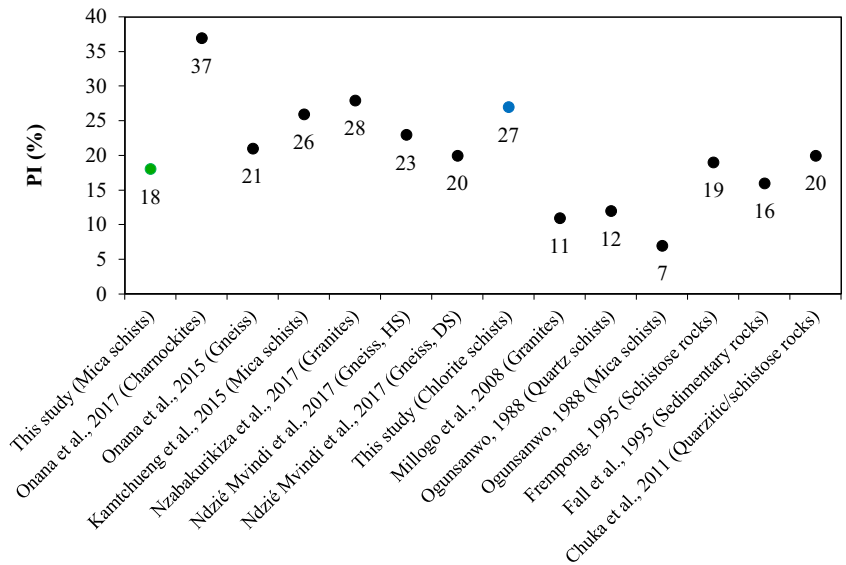
**Fig. 16** Comparison of specific gravity values with those of other authors' previous works (*HS* humid savannah, *DS* dry savannah)

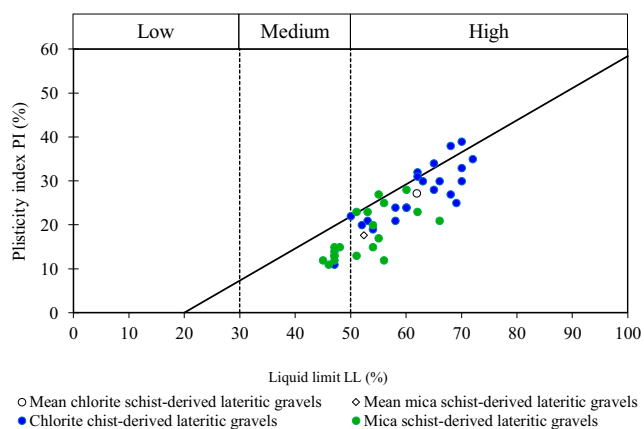


**Fig. 17** Comparison of liquid limit (LL) values with those of other authors' previous works (*HS* humid savannah, *DS* dry savannah)



**Fig. 18** Comparison of plasticity index (PI) values with those of other authors' previous works (*HS* humid savannah, *DS* dry savannah)

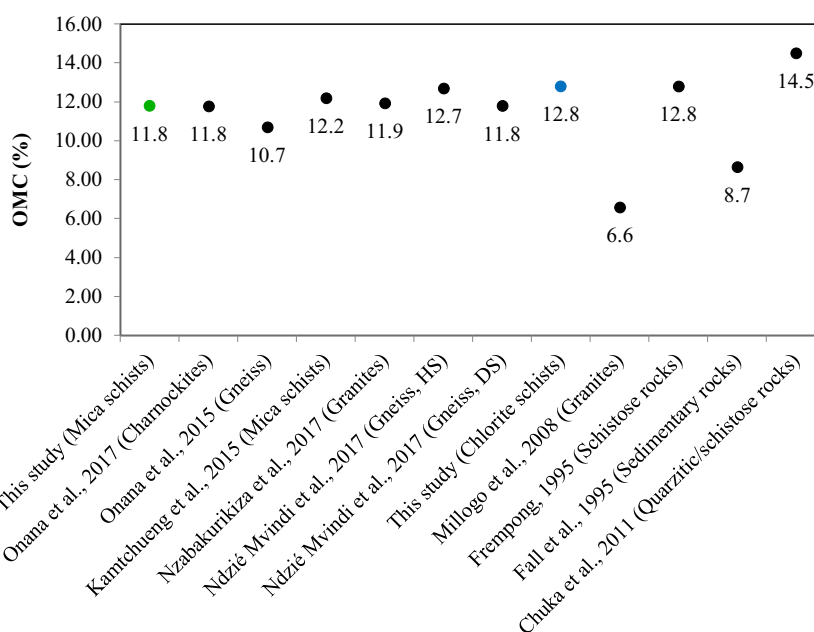




**Fig. 19** Graphic representation of the sample in the Casagrande plasticity chart

behaviour of lateritic gravels (Direction des Etudes Générales et de la Normalisation (DEGN) 1987; Bagarre 1990). Eighty percent of materials developed on mica schists present values of Pp lower than 600. Thus, they can be used as a sub-base for any type of traffic. The optimum moisture content (OMC) average value of mica schist-derived lateritic gravels is 11.8% (Table 5). This average value is similar to that obtained in Centre (11.8%) (Ndzé Mvindi et al. 2017) and South (11.8%) (Onana et al. 2017) Cameroon (Fig. 20). The value of MDD is 2.10 g/cm<sup>3</sup>. This value is equal to that obtained on materials developed on mica schists of the Central Cameroon (2.10 g/cm<sup>3</sup>) (Kamtchueng et al. 2015) (Fig. 21). The lateritic gravels must have a maximum dry density higher or equal to 1.80 and to 2.00 g/cm<sup>3</sup>, for use as sub-base and base layers, respectively (CEBTP 1984; Direction des Etudes Générales et de la Normalisation (DEGN) 1987). One hundred percent of mica schist-derived materials present an acceptable MDD value for sub-base and base layers (Table 1). The mica schist-derived

**Fig. 20** Comparison of optimum moisture content (OMC) values with those of other authors' previous works (HS humid savannah, DS dry savannah)



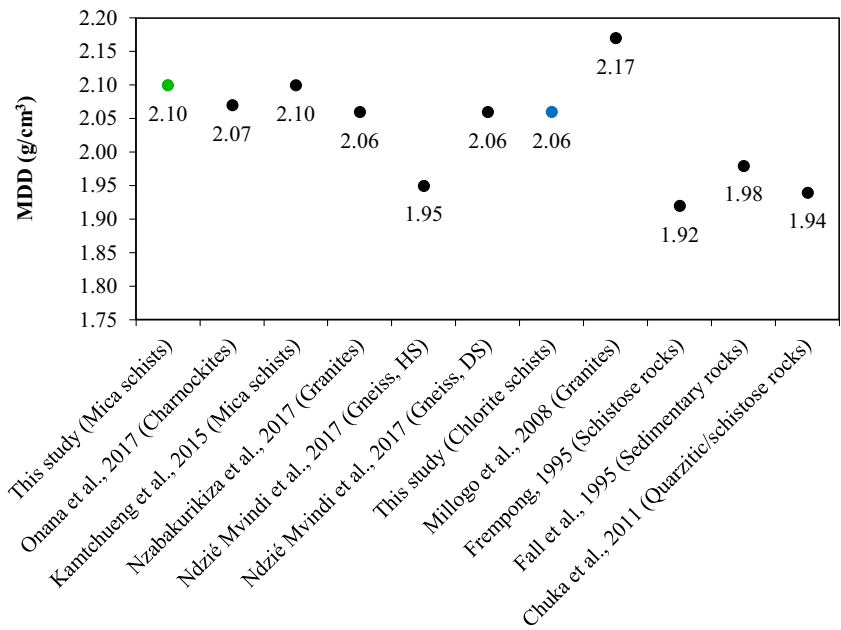
lateritic gravels average value of CBR at 95% of MDD is 62%. The average value of this parameter is higher than those obtained on lateritic gravels in Centre Cameroon (39%) (Kamtchueng et al. 2015) and in Burkina Faso (42%) (Millogo et al. 2008). The CBR average value fits into the CBR range signalled in South Cameroon (31–68%) (Onana et al. 2017) and in Senegal (60–84%) (Fall et al. 2008) (Fig. 22). This average value is higher than 60; the eligible minimum for use as base course for the roadways with low volume traffic (CEBTP 1984).

In a nutshell, the lateritic gravels developed on mica schists are usable as a sub-base for any type of traffic and as a base course for the low volume traffic T1 and T2.

### Chlorite schist-derived lateritic gravels

The average specific gravity of chlorite schist-derived lateritic gravels is 2.83. More than 83% of the studied materials have a specific gravity equal to or higher than 2.75. Close to 46% of these materials have specific gravity values higher or equal to 2.85. As such, this may imply that the lateritic gravels on chlorite schists will have performances rated well to excellent in road construction (De Graft-Johnson et al. 1972; Nwaiwu et al. 2006; Paige-Green et al. 2015). The materials developed on chlorite schists present values of liquid limit varying between 47 and 72% with an average of 62% (Table 5). The average value of their plasticity index is 27%. The chlorite schist-derived lateritic gravels are more plastic than those developed on mica schists. The average value of this parameter is higher than those obtained in the Central Cameroon savannah zone (20–23%) (Ndzé Mvindi et al. 2017) and in West Africa (7–19%) (Ogunsanwo 1988; Fall et al. 1995; Frempong 1995; Millogo et al. 2008; Oyelami and Van Rooy 2016b) (Fig. 18). This average value obtained is also higher than the maximum

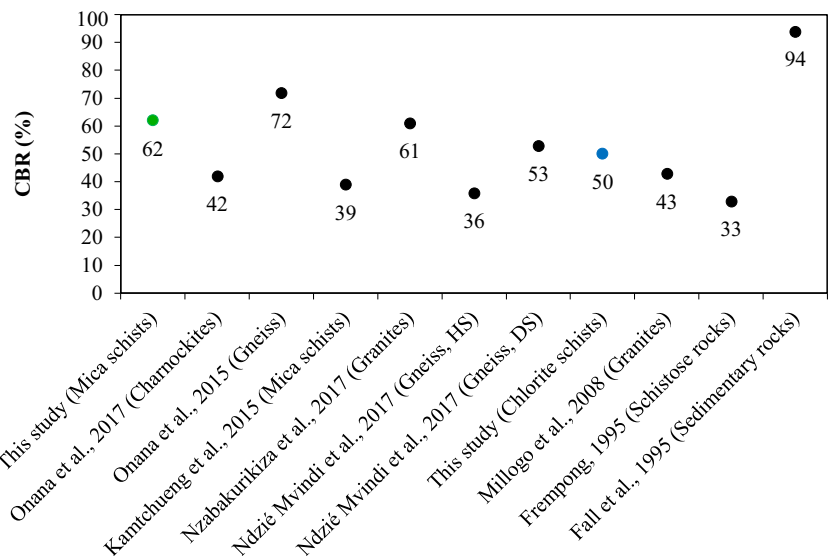
**Fig. 21** Comparison of maximum dry density (MDD) values with those of other authors' previous works (HS humid savannah, DS dry savannah)



required for use as sub-base for roads with high volume traffic (20%) (CEBTP 1984). The position of these materials resulting from the chlorite schists in the Casagrande plasticity chart diagram confirms their very plastic character (Fig. 19). For these lateritic gravels, the average value of the grading modulus (Gm) is 2.06. More than 95% of these lateritic gravels present Gm values higher than 1.5. This average value is lower than that obtained in the forest zone of the East (2.18) (Nzabakurikiza et al. 2017) and comparable with that obtained in South Cameroon (2.04) (Onana et al. 2017). The chlorite schist-derived lateritic gravels present an average Pm value of 868. The values of this parameter vary between 232 and 2016. The values of the swelling potential ( $\epsilon_s$ ) of chlorite schist-derived lateritic gravels (0.002–0.037) indicate that these materials are of low swelling potential (Djedid et al. 2001). For the

studied lateritic gravels developed on chlorite schists, Pp values vary between 168 and 1213. The average value of this parameter (637) is higher than those obtained in Nigeria (133–197) (Nwaiwu et al. 2006). For the chlorite schist-derived lateritic gravels, the OMC average value is 12.8% (Table 5). This average is similar to that obtained in Centre Cameroon humid savannah zone (12.7%) (Ndzié Mvindi et al. 2017) and in Ghana (12.8%) (Frempong 1995) (Fig. 20). The average value of the maximum dry density (MDD) is 2.06 g/cm³. This average is similar to the values obtained in the East (2.06 g/cm³) (Nzabakurikiza et al. 2017) and South (2.07 g/cm³) (Onana et al. 2017) of Cameroon (Fig. 21). All the studied materials have an MDD value acceptable for sub-base. All the values obtained are higher than 1.80 g/cm³; the eligible minimum for use as sub-base

**Fig. 22** Comparison of Californian bearing ratio (CBR) values with those of other authors' previous works (HS humid savannah, DS dry savannah)



(CEBTP 1984). However, only 59% of materials on chlorite schists have a value of MDD higher or equal to  $2.00 \text{ g/cm}^3$ . The lateritic gravels on chlorite schists present an average CBR value of 50% at 95% of MDD. This average value is 35–60% as established in Cameroon forest zone (Direction des Etudes Générales et de la Normalisation (DEGN) 1987; Sikali and Djalal 1987). It is higher than those obtained in the Centre Cameroon (39%) (Kamtchueng et al. 2015), in South Cameroon (42%) (Onana et al. 2017), in Ghana (33%) (Frempong 1995) and in Burkina Faso (43%) (Millogo et al. 2008) (Fig. 22). The average value of CBR obtained (50%) higher than 35% implies that these materials can be used as a sub-base for any type of traffic (CEBTP 1984), in spite of their granularity (Fig. 6). A value close to 60% recommends a treatment for a possible use in base course (CEBTP 1984; Bagarre 1990).

## Conclusions

This study on the influence of the degree of metamorphism of the parental rocks on the geotechnical properties of lateritic gravels generated in the tropics shows that:

- (1) The lateritic gravels on chlorite schists are more quartzose, more plastic and have a weak bearing capacity ratio compared to those developed on mica schists;
- (2) The values of the geotechnical parameters are more dispersed on chlorite schist-derived lateritic gravels than those resulting from the mica schists;
- (3) Lateritic gravels resulting from the chlorite schists are mainly characterized by granulometric and plasticity parameters, while those developed on mica schists are characterized by the physical and compaction parameters;
- (4) The CBR index, which is the geotechnical parameter used to define the characteristics of a soil for designing pavement layers in tropical countries, is not correlated with any other parameter in lateritic gravels generated by chlorite schists and mica schists;
- (5) The mica schist-derived lateritic gravels are usable as a sub-base for any type of traffic and as a base course for low volume traffic T1 and T2. Nevertheless, those developed on chlorite schists can be used only as a sub-base for any type of traffic and thus require some treatment prior to its possible use as base layers;
- (6) Light variations in the degree of metamorphism of rocks highly influence the geotechnical properties of lateritic gravels used in road construction. The higher the degree of metamorphism of the parental rock, the better the geotechnical properties of the generated lateritic gravels.

**Acknowledgments** The authors express their gratitude to all the anonymous reviewers who have greatly improved the quality of this manuscript.

## References

- Adeyemi GO (1995) The influence of parent rock factor on some engineering index properties of three residual lateritic soils in south western Nigeria. *Bull Int Assoc Eng Geol* 52:3–8
- AFNOR (1991) NF P94–054: Sols: reconnaissance et essais—Détermination de la masse volumique des particules solides des sols—Méthode du pycnomètre à eau. Association Française de Normalisation, Paris
- AFNOR (1992) NF P94–057: Sols: reconnaissance et essais. Analyse granulométrique. In: Méthode par sédimentation. Association Française de Normalisation, Paris
- AFNOR (1993) NF P 94–051: Sols: reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. In: Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau. Association Française de Normalisation, Paris
- AFNOR (1996) NF P 94–056: Sols: reconnaissance et essais. Analyse granulométrique. In: Méthode par tamisage à sec après lavage. Association Française de Normalisation, Paris
- AFNOR (1997) NF P94–078: Sols: reconnaissance et essais—Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. In: Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR. Association Française de Normalisation, Paris
- AFNOR (1999) NF P94–093: Sols: Reconnaissance et essais Détermination des références de compactage d'un matériau. Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié. Association Française de Normalisation, Paris
- Bagarre E (1990) Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière. ISTED, Paris
- Bello AA, Osinubi KJ (2010) Attenuative capacity of compacted three reddish brown tropical soils. *Cont J Eng Sci* 5(2):39–54
- Bray JB, Curtis JT (1957) An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecol Monogr* 27:325–349
- CEBTP (1984) Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. Centre d'expertise du bâtiment et des travaux publics, Saint-Rémy-lès-Chevreuse, p 155
- Charman JH (1988) Laterite in road pavements. London Construction Industry Research and Information Association Special Publication 47. CIRIA, London
- Chuka OC, Moruf SB, Ewoma OS, Olatunbosun AM (2011) The Kano–Kazaure highway, north Central Nigeria: the significance of the engineering geology in construction. *Bul Eng Geol Environ* 70(1): 33–40
- Munsell color (2000) Charts. Revised washable edn. Macbeth Division of Kollmorge Corporation, Baltimore
- Davis JC (1986) Statistics and data analysis in geology. Wiley, New York
- De Graft-Johnson JWS, Bhatia HS, Hammond AA (1972) Lateritic gravel evaluation for road construction. *Journal soil mechanics and foundations division, ASCE*, 98, (SM 11), proc. Paper 9375:1245–1265
- Dercourt J, Paquet J (1999) Géologie, objets et méthodes. Cours et exercices résolus. Dunod 10<sup>ème</sup> Ed., Paris
- Direction des Etudes Générales et de la Normalisation (DEGN) (1987) Recommandation pour l'utilisation en corps de chaussées de graveleux latéritiques naturels. Recommandation 30.004-R. Ministère de l'équipement, République du Cameroun

- Djedid A, Bekkouche A, Aissa Mamoune AM (2001) Identification et prévision du gonflement de quelques sols de la région de Tlemcen (Algérie). *Bull Liaison Lab Ponts Chaussées* 233:67–75
- Duchaufour P (2001) Introduction à la science du sol: Sol, végétation, environnement, Dunod 6<sup>ème</sup> Ed., Paris
- Ekodeck GE (1984) L'altération des roches métamorphiques du Sud Cameroun et ses aspects géotechniques. PhD thesis. Université de Grenoble I, Grenoble, p 392
- Fall M, Tisot JP, Cissé IK (1994) Specification for road design using statistical data. An example of laterite or gravel lateritic soils from Senegal. *Bull Int Assoc Eng Geol* 50:17–35
- Fall M, Tisot JP, Cissé IK (1995) Stress-strain behaviour of three compacted lateritic gravel from western Senegal using the shear box machine. *Bull Int Assoc Eng Geol* 52:59–73
- Fall M, Sawangsuriya A, Benson CH, Edil TB, Bosscher PJ (2008) On the investigations of resilient modulus of residual tropical gravel lateritic soils from Senegal (West Africa). *Geotech Geol Eng* 26(1):109–111
- Frempong EM (1995) Field compaction control studies on road bases in new settlement area in Ghana. *Geotech Geol Eng* 13:227–241
- Gidigas MD (1991) Characterization and use of tropical gravels for pavement construction in West Africa. *Geotech Geol Eng* 9:219–260
- Indraratna B, Notalaya P (1991) Some engineering characteristics of a compacted lateritic residual soil. *Geotech Geol Eng* 9:125–137
- Kamgang KBV, Ekodeck GE, Njilah IK (2001) Evolution géochimique des formations latéritiques dans l'écosystème périforestier du Sud-Est Cameroun: le site de Kandara. *Afr J Sci Tech-Sci Eng Ser 2*(1): 19–32
- Kamtchueng TB, Onana VL, Fantong WY, Ueda A, Ntoulala RFD, Wongolo MHD, Ndongo GB, Ngo'o Ze A, Kamgang VKB, Ondoa JM (2015) Geotechnical, chemical and mineralogical evaluation of lateritic soils in humid tropical area (Mfou, Central-Cameroun): implications for road construction. *Geo-Engineering* 6(1). <https://doi.org/10.1186/s40703-014-0001-0>
- Kassogue M, Herbert G, Massiera M (2002) Contrôle de la qualité sur les matériaux dans les couches de chaussée (Revêtement exclu). Proceeding of the 4<sup>th</sup> transportation speciality conference. Canadian Society for Civil Engineering, 30th annual conference, Montreal, Quebec, 5–8 Jun 2002, pp 413–422
- Mahalinga-Iyer U, Williams DJ (1997) Properties and performance of lateritic soil in road pavements. *Eng Geol* 46:71–80
- Millogo Y, Karfa T, Raguilnaba O, Kalsibiri K, Blanchart P, Thomassin JH (2008) Geotechnical, mechanical, chemical and mineralogical characterization of lateritic gravels of Sapouy (Burkina Faso) used in road construction. *Constr Build Mater* 22:70–76
- Ndam NJR, Braun JJ, Meybeck M, Bedimo BJP (1998) Réactualisation des données hydroclimatiques des bassins fluviaux de la Sanaga et du Nyong (Sud Cameroun). *Géocam 2*, Presses Universitaires, Yaoundé 51–64
- Ndzié Mvindi AT, Onana VL, Ngo'o Ze A, Nyassa Ohandja H, Ekodeck GE (2017) 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. *Transp Geotech* 12:70–84
- Nwaiwu CMO, Alkali IBK, Ahmed UA (2006) Properties of ironstone lateritic gravels in relation to gravel road pavement construction. *Geotech Geol Eng* 24:283–298
- Nzabakurikiza A, Onana VL, Ngo'o Ze A, Ndzié Mvindi AT, Ekodeck GE (2017) Geological, geotechnical, and mechanical characterization of lateritic gravels from eastern Cameroon for road construction purposes. *Bull Eng Geol Environ* 76:1549–1562
- Ogunsanwo O (1988) Basic geotechnical properties, chemistry and mineralogy of some laterite soils from S.W. Nigeria. *Bull Int Assoc Eng Geol* 37:131–135
- Olinga JB (2003) Cadre géodynamique et évolution tectonométamorphique des ensembles cristallophylliens d'Awae et Ayos (Sud Cameroun). PhD thesis. Université de Yaoundé I, Yaoundé, p 159
- Onana VL, Nzabakurikiza A, Ndome Effoudou E, Likiby B, Kamgang Kabeyene V, Ekodeck GE (2015) Geotechnical, mechanical and geological characterization of lateritic gravels of Boumpial (Cameroon) used in road construction. *J Camer. Acad Sci* 1:45–54
- Onana VL, Ngo'o Ze A, Medjo Eko R, Ntoulala RFD, Nanga Bineli MT, Ngono Owoudou B, Ekodeck GE (2017) Geological identification, geotechnical and mechanical characterization of charnockite-derived lateritic gravels from southern Cameroon for road construction purposes. *Transp Geotech* 10:35–46
- Oyelami CA, Van Rooy JL (2016a) A review of the use of lateritic soils in the construction/development of sustainable housing in Africa: a geological perspective. *J Afr Earth Sci* 119:226–237
- Oyelami CA, Van Rooy JL (2016b) Geotechnical characterisation of lateritic soils from South-Western Nigeria as materials for cost-effective and energy-efficient building bricks. *Environ Earth Sci* 75:1475
- Paige-Green P, Pinard M, Netterberg F (2015) A review of specifications for lateritic materials for low volume roads. *Transp Geotech* 5:86–98
- Santoir C, Villiers JF (1995) Atlas régional du Sud Cameroun. Vol. Végétation, ORSTOM éd
- Sikali F, Djalal ME (1987) Utilisation des latérites en technique routière au Cameroun. In: Séminaire Régional sur les Latérites: Sols, Matériaux, Minerais, Douala, Cameroun, 21–27 Jan, vol 1986, pp 277–288
- Tockol I (1993) Contribution à l'étude des graveleux latéritiques dans les pays du Sahel: cas des routes non revêtues. M.Sc. Thesis. Ecole de Génie, Université de Moncton, Moncton
- Ward JH (1963) Hierarchical grouping to optimize and objective function. *J Am Stat Assoc* 58:236–244
- Wilding LP, Dress LR (1983) Spatial variability and pedology. In: Wilding LP, Smeyck N, Hall GF (eds) *Pedogenesis and soil taxonomy*. Wageningen, the Netherlands, pp 83–116