

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
FACULTE DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHE
ET FORMATION DOCTORALE
EN SCIENCES, TECHNOLOGIE
ET GEOSCIENCES



THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I
FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE SCHOOL
IN SCIENCES, TECHNOLOGY
AND GEOSCIENCES

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE DOCTORALE
EN GEOSCIENCES ET APPLICATIONS

Laboratoire de Géosciences des Formations Superficielles et Applications
Laboratory of Geosciences of Superficial Formations and Applications

CARACTERISATION PETROLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DES LATERITES DE LA REGION DU SUD-OUEST CAMEROUN

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

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

Par

NYEMB BAYAMACK Joël Fabrice

Matricule : 06X227
Master en Sciences de la Terre



Soutenue publiquement le 22 juillet 2021 devant le jury composé de :

- Président** : **EKODECK Georges Emmanuel**, *Professeur*, Université de Yaoundé I
- Rapporteurs** : **MEDJO EKO Robert**, *Professeur*, Université de Yaoundé I
: **ONANA Vincent Laurent**, *Maître de Conférences*, Université de Yaoundé I
- Membres** : **NDJIGUI Paul-Désiré**, *Professeur*, Université de Yaoundé I
: **EKOMANE Emile**, *Maître de Conférences*, Université de Yaoundé I
: **EWODO MBOUDOU Guillaume**, *Maître de Conférences*, Université de Maroua

Année académique 2020 - 2021

A Dieu Tout Puissant,

A mes chers parents Bayamack Fritz et Npale Bayamack Pauline,

A mes frères et sœurs.

« Emporte dans ta mémoire, pour le reste de ton existence, les choses positives qui ont surgi au milieu des difficultés. Elles seront une preuve de tes capacités et te redonneront confiance devant tous les obstacles. »

Paulo Coelho

AVANT-PROPOS

Le cycle de doctorat est un long chemin semé d'embûches. Au départ, l'on est plus animé d'incertitudes plus qu'autre chose, tout jeune étudiant débutant que l'on est ayant décidé d'emprunter cette voie. Ensuite, lorsqu'on acquiert la méthode, c'est encore une bataille du savoir quant au fait de rédiger et de défendre ses idées dans des articles scientifiques. Tout est question d'adaptation, mais pas de la plus simple des manières. Toutefois, il s'agit également d'une véritable aventure humaine très riche en rencontres et apprentissages divers, je ne manquerai donc pas de remercier toutes ces personnes qui m'ont accompagné tout au long de ce périple.

Mes premiers remerciements vont évidemment à mes deux encadreurs. Le Professeur Robert Medjo Eko et le Professeur Vincent Laurent Onana, un duo qui allait de soi pour diriger une thèse comme la mienne.

Merci au Professeur Robert Medjo Eko, d'avoir accepté de codiriger ce travail, malgré ses multiples occupations. Merci pour ces enseignements ô combien précieux pour moi, qui m'ont permis d'aimer la géotechnique. Sa rigueur, son enthousiasme, et son aisance sur divers sujets scientifiques sont un exemple pour moi. Les multiples discussions que mon ami Simon Zinga Ayissi et moi avons l'habitude d'avoir avec lui à son domicile, nous ont permis de percevoir en lui, toute l'humilité qui le caractérise. Bien évidemment, ces quelques mots ont du mal à exprimer toute l'estime et le respect que je lui porte. Puissiez-vous Professeur, recevoir ici, l'expression de ma sincère et profonde gratitude.

Je remercie chaleureusement le Professeur Vincent Laurent Onana, premièrement, de m'avoir fait confiance dès ma deuxième année de Master, lorsqu'il a encadré mes travaux. Tel un grand frère, c'est avec tact et discrétion, qu'il m'a tenu la main depuis mon initiation jusqu'à ce jour. Rigoureux, travailleur, patient, bon interlocuteur et bon footballeur sont les qualités qui, à mon sens, forcent toute l'admiration que je lui porte. Ses conseils tant sur le plan académique que social m'aident à trouver ma voie. J'espère que cette thèse sera à la hauteur de ses attentes.

Mes remerciements vont également à l'endroit du « fondateur », du Laboratoire de géotechnique, le Professeur Georges Emmanuel Ekodeck, pour ne pas le nommer, qui est pour moi, un modèle. Je lui suis infiniment reconnaissant pour tous les enseignements reçus et pour tous ses conseils tant sur le plan académique que personnel. Il a émis le vœu de me voir soutenir cette thèse ; ce qui a véritablement booster mon enthousiasme. Puisse le bon Dieu, faire en sorte qu'il soit là, pour voir son vœu se réaliser.

Je remercie le Docteur Louise Marie Ngo Bidjeck de m'avoir, à tout moment et à contretemps, ouvert les portes de son bureau pour des discussions scientifiques très enrichissantes, mais également de m'avoir permis de travailler tard dans la nuit dans son bureau. J'ai pu trouver en elle une confidente et une conseillère de choix tant par ses mots de réconfort que par ses délicates attentions.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit du Professeur Emile Ekomane pour ses conseils et sa disponibilité. Merci au Docteur Roger Firmin Donald Ntouala, pour toute sa disponibilité et pour les moments agréables passés au laboratoire.

Un grand merci au Docteur Elisé Sababa qui a mis à ma disposition, non seulement les résultats d'analyses pétrologiques de l'échantillon de roche volcanique, mais également toute la documentation nécessaire sur les roches basiques et ultra-basiques de la région du Sud-Ouest Cameroun. Nos discussions, des plus enrichissantes, m'ont permis d'achever ce travail.

Au corps enseignant du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, particulièrement aux professeurs Paul-Désiré Ndjigui, Véronique Kamgang Kabeyene Beyala, Dieudonné Bitom, Jean Paul Nzenti, Rose Yongue-Fouateu, Joseph Quentin Yene Atangana, Jules Rémy Ndam Ngoupayou, Pierre Kamgang, Joseph Mvondo Ondo, Jean Pierre Tchouankoué et aux Docteurs Daniel Lamilen Billa, Achile Anaba et Jean Pierre Temga, je tiens à adresser toute ma reconnaissance pour l'expérience et le savoir-faire acquis tout au long de mon cursus.

Je tiens également à témoigner toute ma gratitude à ma grande sœur Nadine Véronique Mbehna. Son apport, non seulement financier, mais également moral, a permis que cette thèse ait une fin. Puisse-t-elle recevoir ici, mes remerciements les plus fraternels.

Je tiens chaleureusement à remercier le Capitaine Jean-Pierre Fouda Many Owona, pour tout le soutien dont il a fait montre lors des descentes sur le terrain dans la région du Sud-Ouest où les troubles causés par les « ambazoniens » se faisaient ressentir.

Mes remerciements vont également à l'endroit de messieurs Philippe Nouanga, ancien Directeur du Laboratoire National de Génie Civil (Labogénie), Aaron Gwet ancien Directeur technique du Labogénie, à Camus Binyam, mon promotionnaire et frère, ainsi qu'à tout le personnel du Labogénie, de m'avoir aidé dans la réalisation des essais géotechniques.

Merci à Mlle Marie Dorine Eyenga, Secrétaire au Département des Sciences de la Terre pour l'ambiance bon enfant qu'elle sait créer au Laboratoire chaque fois qu'elle y est.

Merci à mes aînés du Laboratoire de Géologie l'Ingénieur et d'Altérologie. Je pense aux Docteurs Aloys Thierry Ndzié Mvindi, Arnaud Ngo'o Ze, ainsi qu'aux Doctorants Hervé Nyassa Ohandja, Josty Doum Motanoc, Carine Tsoungui, Cyprien Ossende et Plastini Ngami,

pour tous les conseils et toutes les discussions que j'ai pu avoir avec eux durant mon parcours académique ainsi que pour la confiance qu'ils m'ont témoigné.

Un merci particulier au Dr Arnaud Ngo'o Ze et à Plastini Ngami, mes aînés académiques, ainsi qu'à Chrispohe Enock Embom, mon cadet académique, pour avoir été là pendant les innombrables nuits blanches passées au Laboratoire. Nos discussions, parfois discordantes mais enrichissantes, m'ont permis de remettre en question certains points de vue.

Je remercie aussi mes cadets de laboratoire : Marie Thérèse Nanga Bineli, Yves Robert Bikoy, Yannick Wabo Talla, Calixte Edzimbi Mbarga, Capel Botny, pour tous les moments passés au Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et d'Altérologie et, pour les nombreux services qu'ils ont bien voulu me rendre. Que mon expérience leur serve de tremplin afin d'alléger la tâche qui sera la leur dans cette même aventure qu'ils vivront à ma suite.

Je ne saurais oublier mes camarades de promotion : Nadine Ntoh, Carole Pianta, Simon Zinga Ayissi, Nasser Ngouh Abdou, Emile Maina Pagou, Arthur Mouinbe, Bertin Engoutou, Adalbert Nlend, Camus Binyam, Valerie Mfokapoure, Simon Nkag Pierre, Tatiana Pamsy, Rose Minyem, Marie Ebobisse, Vanessa Tsinkou, Christelle Djomo, Solange Piih et Jules Alex Yughe, pour tous les moments passés ensemble pendant la préparation de ce travail.

Comment pourrais-je oublier l'aide et le soutien inconditionnel que m'ont apporté mes amis : Hervé Minsili, Alphonse Komo Bellinga, Joseph Bonny, Cédric Rano, Yvan Rano, Steve Minsili, Gilles Minsili, Raïssa Adjabe, Elvire Minlend, Nicaise Minbe, Yolande Ada, Donald Assembe, Stéphane Ekodeck et Joël Ikito. Grace à vous, j'ai pu, lorsque cela était nécessaire, m'évader pour aérer mon esprit et faire le plein d'énergie avant de me remettre à la tâche.

Je remercie chaleureusement mes frères Mardoché Tiguil, Bébé Bayamack, Bertrand Epale, Magloire Mayega, Olivier Tonye Mang, Gédéon Banyeki, Cédric Ebem, et mes sœurs Nadine Véronique Mbehna et Aude Louise Guyot, pour leur soutien permanent, leurs encouragements et leur confiance indéfectible tout au long de ce travail.

Ma reconnaissance va également à tous mes collègues de SCET Tunisie. Il s'agit notamment de Fendri Naceur, Benchikha Mohamed, Yousfir Mnaouer, Yousfi Soufiène, Johnny Bakabo Bakabo, Adama Coulibaly, Youssef Youssouf, Ali Meridja et Fadimatou, pour tous les conseils et les documents que vous avez pu me procurer.

Je remercie papa Mbehna Tonye, pour sa rigueur et ses encouragements, ses conseils et son aide, tant financière que morale. Papa, puisse ce travail être à la hauteur de tes attentes.

Que les familles Bayamack, Minsili, Mbehna, Bebe, Ekodeck et Mang, trouvent ici l'expression de ma Profonde reconnaissance pour tous les sacrifices consentis.

Je remercie mon amie de longue date Elvire Minlend, pour toutes les multiples discussions et ses encouragements, durant tant d'années. Merci pour ta présence, tes conseils, ta patience et ta disponibilité durant la préparation de cette thèse de Doctorat/Ph.D.

Je remercie les autorités administratives et traditionnelles de la région du Sud-Ouest Cameroun, ainsi que les populations villageoises, qui nous ont été d'une grande aide lors de nos multiples investigations sur le terrain.

Enfin, ma reconnaissance et ma gratitude vont à tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à ce travail et dont j'ai malheureusement oublié de citer les noms. Je leur dis merci pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.

Kellé Ndongond - Messondo

Joël Fabrice Nyemb Bayamack

TABLE DES MATIERES

Dédicace	i
Citation	ii
AVANT-PROPOS	iii
TABLE DES MATIERES	vii
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES TABLEAUX	xvii
LISTE DES ABREVIATIONS, SIGLES, ACRONYMES ET SYMBOLES	xx
RESUME	xxii
ABSTRACT	xxiii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I. GENERALITES	5
INTRODUCTION	6
I. MILIEU NATUREL	6
I.1. Localisation géographique	6
I.2. Climat	6
I.3. Géomorphologie	6
I.4. Géologie	10
I.4.1. Formations sédimentaires	10
I.4.2. Formations volcaniques	10
I.4.3. Formations gneissiques	11
I.5. Sols	11
I.6. Végétation	12
I.7. Populations et activités socio-économiques	12
II. TRAVAUX ANTERIEURS COMPLEMENTAIRES	13
II.1. Pétrologie des sols	13
II.1.1. Pétrographie	13
II.1.2. Minéralogie et géochimie	13
II.2. Paramètres géotechniques des matériaux	14
II.2.1. Paramètres physiques et paramètres de compactage	14
II.2.1.1. Poids volumique des grains solides	14
II.2.1.2. Granularité	14
II.2.1.3. Limites d'Atterberg	15

II.2.1.3.1. Limite de liquidité	15
II.2.1.3.2. Indice de plasticité.....	15
II.2.1.4. Classification.....	16
II.2.1.5. Paramètres dérivés.....	16
II.2.1.6. Essai proctor modifié.....	16
II.2.1.6.1. Teneur en eau à l'optimum proctor modifié	16
II.2.1.6.2. Densité sèche maximale	17
II.2.1.7. California Bearing Ratio.....	17
II.2.2. Paramètres mécaniques	17
II.2.2.1. Paramètres mécaniques des roches	17
II.2.2.2. Tests d'abrasion : coefficient Micro Deval et coefficient Los Angeles	17
II.3. Spécifications des latérites en construction routière	18
II.4. Dimensionnement des chaussées	20
II.4.1. Indice portant CBR	20
II.4.2. Trafic	23
II.5. Corrélations entre caractéristiques génétiques et paramètres géotechniques	23
CONCLUSION	28
CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES D'ETUDE	29
INTRODUCTION	30
I. ENQUETES BIBLIOGRAPHIQUES	30
II. METHODES D'ACQUISITION DES DONNEES POUR ANALYSES	
EXPERIMENTALES	30
II.1. Méthodes d'acquisition des données sur le terrain	30
II.1.1. Prélèvement des échantillons de roche.....	33
II.1.2. Identification des échantillons	33
II.2. Méthodes d'acquisition des données en laboratoire	33
II.2.1. Etudes pétrologiques	36
II.2.1.1. Analyses pétrographiques.....	36
II.2.1.2. Analyses minéralogiques	36
II.2.1.3. Analyses géochimiques	36
II.2.2. Essais géotechniques	37
II.2.2.1. Essais sur roche	37
II.2.2.1.1. Essai Micro Deval	37
II.2.2.1.2. Essai Los Angeles	38

II.2.2.2. Essais sur les latérites	38
II.2.2.2.1. Poids volumique des grains solides	38
II.2.2.2.2. Granulométrie	38
II.2.2.2.3. Limites d'Atterberg et indice de plasticité.....	39
II.2.2.2.4. Classification des matériaux	39
II.2.2.2.5. Paramètres dérivés.....	39
II.2.2.2.6. Essai proctor modifié.....	40
II.2.2.2.7. Portance CBR.....	40
III. METHODES D'EXPLOITATION DES DONNEES D'ANALYSES	
EXPERIMENTALES	40
III.1. Méthodes d'exploitation des données minéralogiques	40
III.2. Méthodes d'exploitation des données géochimiques.....	41
III.2.1. Quantification des processus d'altération	41
III.2.1.1. Rapports, indices et paramètres de quantification de l'altération.....	41
III.2.1.1.1. Rapport S/R	41
III.2.1.1.2. Indice d'altération chimique	41
III.2.1.1.3. Indice mafique d'altération.....	41
III.2.1.1.4. Indice d'altération de Parker	42
III.2.1.1.5. Indice de latéritisation	42
III.2.1.1.6. Perte au feu	43
III.2.1.2. Diagrammes A – CN – K et SAF	43
III.2.1.3. Approche normative.....	43
III.3. Méthodes d'exploitation des données géotechniques	45
III.4. Méthodes d'étude statistique des données	45
III.4.1. Choix de l'analyse	45
III.4.2. Analyse descriptive.....	46
III.4.3. Analyse en composantes principales	47
III.4.4. Analyse de régression	47
III.4.5. Analyse factorielle discriminante	47
III.4.6. Classification hiérarchique en composantes principales.....	48
CONCLUSION.....	48
CHAPITRE III. PETROLOGIE DES MATERIAUX.....	50
INTRODUCTION	51
I. PETROLOGIE DES ROCHES	51

I.1. Pétrologie des roches volcaniques.....	51
I.1.1. Pétrographie	51
I.1.2. Minéralogie	54
I.1.3. Géochimie	54
I.2. Pétrologie des roches sédimentaires.....	54
I.2.1. Pétrographie	54
I.2.2. Minéralogie	58
I.2.3. Géochimie	58
II. PETROLOGIE DES LATERITES.....	58
II.1. Pétrographie.....	58
II.1.1. Description macroscopique des latérites sur basaltes	58
II.1.2. Description macroscopique des latérites sur argilites	62
II.1.3. Description macroscopique des latérites sur gneiss	62
II.2. Minéralogie.....	65
II.3. Géochimie.....	65
II.4. Indices et paramètres d'altération	69
CONCLUSION.....	74
CHAPITRE IV. PROPRIETES GEOTECHNIQUES DES MATERIAUX	75
INTRODUCTION	76
I. CARACTERISATION MECANIQUE DU BASALTE.....	76
I.1. Coefficient Micro Deval	76
I.2. Coefficient Los Angeles	76
II. PARAMETRES GEOTECHNIQUES DES LATERITES	76
II.1. Poids volumique des grains solides	78
II.2. Granularité.....	78
II.3. Limites d'Atterberg et indice de plasticité	78
II.4. Paramètres dérivés	83
II.5. Classification	83
II.6. Paramètres de compactage	85
CONCLUSION.....	85
CHAPITRE V. VARIABILITE STATISTIQUE DES LATERITES.....	87
INTRODUCTION	88
I. CORRELATIONS ENTRE PARAMETRES PETROLOGIQUES	88
I.1. Corrélations entre composants minéralogiques des latérites sur basaltes	88

I.2. Corrélations entre composants minéralogiques des latérites sur argilites	88
I.3. Corrélations entre composants minéralogiques des latérites sur basaltes et des argilites	91
I.4. Corrélations entre composants géochimiques des latérites sur basaltes.....	95
I.5. Corrélations entre composants géochimiques des latérites sur argilites	95
I.6. Corrélations entre composants géochimiques des latérites sur basaltes et argilites.....	100
I.7. Corrélations entre composants minéralogiques et géochimiques des latérites sur basaltes et argilites	104
II. CORRELATIONS ENTRE PARAMETRES GEOTECHNIQUES	104
II.1. Corrélations des paramètres géotechniques des latérites sur basaltes.....	104
II.1.1. Matrice de corrélations des paramètres géotechniques des latérites sur basaltes	108
II.1.2. Analyses en composantes principales des paramètres géotechniques des latérites sur basaltes	108
II.1.3. Analyse des regressions entre paramètres géotechniques des latérites sur basaltes	108
II.2. Corrélations entre paramètres géotechniques des latérites sur argilites.....	113
II.2.1. Matrice de corrélations des paramètres géotechniques des latérites sur argilites	113
II.2.2. Analyse en composantes principales des paramètres géotechniques des latérites sur argilites	113
II.2.3. Analyse des regressions entre paramètres géotechniques des latérites sur argilites	117
II.3. Corrélations des paramètres géotechniques des latérites sur gneiss	117
II.3.1. Matrice de corrélations des paramètres géotechniques des latérites sur gneiss.....	117
II.3.2. Analyse en composantes principales des paramètres géotechniques des latérites sur gneiss.....	117
II.3.3. Analyse des regressions entre paramètres géotechniques des latérites sur gneiss	120
II.4. Corrélations entre paramètres géotechniques des latérites sur basaltes, argilites et gneiss	120
II.4.1. Matrice de corrélations entre paramètres géotechniques	120
II.4.2. Analyse en composantes principales appliquée aux latérites sur basaltes, argilites et gneiss.....	125
II.4.3. Etude des régressions simples appliquées aux latérites sur basaltes, argilites et gneiss	125
III. DISPERSION DES PARAMETRES GEOTECHNIQUES DES LATERITES	125
CONCLUSION.....	128
CHAPITRE VI. DISCUSSION.....	130
INTRODUCTION	131
I. INTENSITE DE L'ALTERATION DANS LES LATERITES SUR BASALTES ET ARGILITES	131

II. GEOTECHNIQUE DES LATERITES	135
II.1. Poids volumique des grains solides	135
II.2. Granularité.....	139
II.3. Limites d'Atterberg et indice de plasticité	139
II.4. Paramètres dérivés	140
II.5. Paramètres de compactage	140
III. INFLUENCE DES PARAMETRES MINERALOGIQUES ET GEOCHIMIQUES	
SUR LES PARAMETRES GEOTECHNIQUES	141
III.1. Corrélations entre composants minéralogiques et paramètres géotechniques	141
III.2. Corrélations entre composants géochimiques et paramètres géotechniques.....	141
III.3. Corrélations entre paramètres d'altération chimique et paramètres géotechniques	144
IV. ETUDE DE LA REGRESSION DU CBR	144
V. TYPES DE LATERITES DANS LA ZONE D'ETUDE.....	148
VI. INTERETS DES MATERIAUX EN CONSTRUCTION ROUTIERE	154
VI.1. Basalte.....	154
VI.2. Latérites dérivées des basaltes.....	154
VI.3. Latérites dérivées des argilites	159
VI.4. Latérites dérivées des gneiss	161
CONCLUSION.....	161
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	164
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	167
ANNEXES	

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Carte de localisation du secteur d'étude	7
Figure 2. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1957) appliqué aux données de la zone d'étude.....	8
Figure 3. Carte géomorphologique de la zone d'étude.....	9
Figure 4. Carte de localisation des points d'échantillonnage.....	31
Figure 5. Tranchée routière à proximité de la ville de Nguti	32
Figure 6. Puits de reconnaissance à proximité de la ville de Mamfé	32
Figure 7. Carrière de latérites dans la localité de Baroumbi	35
Figure 8. Vue partielle de la carrière de basaltes de Baroumbi	52
Figure 9. Blocs de basaltes dans la zone d'étude	52
Figure 10. Microphotographies des basaltes du secteur d'étude	53
Figure 11. Diffractogramme des rayons X du basalte de la zone d'étude	55
Figure 12. Argilite du secteur d'étude	57
Figure 13. Microphotographie de l'argilite du secteur d'étude	57
Figure 14. Diffractogramme des rayons X de l'argilite de la zone d'étude.....	59
Figure 15. Profil d'altération latéritique sur basaltes dans la zone d'étude	61
Figure 16. Profil d'altération latéritique sur argilites dans la zone d'étude.....	63
Figure 17. Profil d'altération latéritique sur gneiss dans la zone d'étude.....	64
Figure 18. Diffractogrammes des rayons X des latérites étudiées	66
Figure 19. Position des latérites dans le diagramme géochimique $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$	70
Figure 20. Courbes granulométriques moyennes des latérites étudiées	80
Figure 21. Position du mortier des latérites du secteur d'étude dans le diagramme de plasticité de Casagrande	82
Figure 22. Cercle de corrélation des composants minéralogiques des latérites sur basaltes dans la zone d'étude	89
Figure 23. Répartition des latérites sur basaltes en fonction des composants minéralogiques	89
Figure 24. Cercle de corrélation des composants minéralogiques des latérites sur argilites dans la zone d'étude	92
Figure 25. Répartition des latérites sur argilites en fonction des composants minéralogiques.....	92
Figure 26. Cercle de corrélation des composants minéralogiques des latérites sur basaltes et argilites dans la zone d'étude.....	93

Figure 27. Répartition des latérites sur basaltes et argilites en fonction des composants minéralogiques.....	94
Figure 28. Cercles de corrélation des composants géochimiques des latérites sur basaltes dans la zone d'étude.....	97
Figure 29. Répartition des latérites sur basaltes de la zone d'étude en fonction des composants géochimiques dans les plans factoriels F1-F2-F3.....	98
Figure 30. Cercle de corrélation des composants géochimiques des latérites sur argilites dans la zone d'étude.....	101
Figure 31. Répartition des latérites sur argilites de la zone d'étude en fonction des composants géochimiques dans le plan factoriel F1-F2	101
Figure 32. Cercles de corrélation des composants géochimiques des latérites sur basaltes et argilites	103
Figure 33. Répartition des latérites sur basaltes et argilites de la zone d'étude en fonction des composants géochimiques dans le plan factoriel F1-F2	105
Figure 34. Cercle de corrélation des données minéralogiques et géochimiques des latérites sur basaltes et argilites dans la zone d'étude.....	107
Figure 35. Répartition des latérites sur basalte et argilites dans la zone d'étude en fonction des composants minéralogique et géochimique sur le plan factoriel F1-F2	107
Figure 36. Cercles de corrélation des paramètres géotechniques des latérites sur basaltes dans la zone d'étude.....	110
Figure 37. Répartition des latérites sur basalte dans la zone d'étude en fonction des paramètres géotechniques sur les plans factoriels F1-F2-F3.....	111
Figure 38. Cercles de corrélation des paramètres géotechniques des latérites sur argilites dans la zone d'étude.....	115
Figure 39. Répartition des latérites sur argilites dans la zone d'étude en fonction des paramètres géotechniques sur les plans factoriels F1-F2-F3.....	116
Figure 40. Cercles de corrélation des paramètres géotechniques des latérites sur gneiss dans la zone d'étude.....	121
Figure 41. Répartition des latérites sur gneiss dans la zone d'étude en fonction des paramètres géotechniques sur les plans factoriels F1-F2-F3	122
Figure 42. Cercles de corrélation des paramètres géotechniques appliqués sur les latérites sur basaltes, argilites et gneiss dans la zone d'étude	126
Figure 43. Relation LL vs LP.....	127
Figure 44. Relation LL vs IP.....	125

Figure 45. Relation Ac vs Fines	127
Figure 46. Relation es vs IP.....	125
Figure 47. Covariation de la perte au feu (PF) et de l'indice d'altération chimique (CIA) dans les latérites de la zone d'étude.....	133
Figure 48. Covariation comparée perte au feu (PF) – Indice de latéritisation (IOL) dans les latérites de la zone d'étude	133
Figure 49. Illustration des différents degrés d'altération des latérites de la zone d'étude dans le diagramme ternaire SAF (2014)	134
Figure 50. Position comparée des différents degrés d'altération des latérites de la zone d'étude et ceux des autres auteurs dans le diagramme A – CN – K.....	134
Figure 51. Position comparée des différents degrés d'altération des latérites sur basaltes et argilites de la zone d'étude et ceux des autres auteurs dans le diagramme A – L – F	136
Figure 52. Illustration comparée des différents degrés d'altération des latérites sur basaltes et argilites de la zone d'étude dans le diagramme AF – CNK – M.....	136
Figure 53. Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les latérites sur basaltes et argilites dans le diagramme L – I – C	137
Figure 54. Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les latérites sur basaltes et argilites dans le diagramme A – I – C.....	137
Figure 55. Caractérisation de l'importance des facteurs pédogénétiques dans les latérites sur basaltes et argilites dans le diagramme carré, en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; Lixiviation potentielle....	138
Figure 56. Caractérisation de l'importance de l'altération dans les latérites sur basaltes et argilites dans le diagramme carré, en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; Altération	138
Figure 57. Courbe d'évolution de R ² en fonction du nombre de variables	147
Figure 58. Courbe comparative entre CBR réel et CBR ajusté.....	150
Figure 59. Courbe comparative entre CBR réel et CBR ajusté (Yato <i>et al.</i> , 2018)	150
Figure 60. Classification hiérarchique en composantes principales des latérites étudiées	151
Figure 61. Dendogramme des latérites étudiées.....	152
Figure 62. Diagramme (a) et histogramme des indices de niveau (b).....	156
Figure 63. Carte iso-CBR de la zone d'étude	157

Figure 64. Position des latérites LRB dans le fuseau de spécification pour couche de fondation et couche de base (CEBTP, 1984).....	158
Figure 65. Position des latérites LRA dans le fuseau de spécification pour couche de fondation et couche de base (CEBTP, 1984).....	160
Figure 66. Position des latérites LRG dans le fuseau de spécification pour couche de fondation et couche de base (CEBTP, 1984).....	162

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Précipitations et températures moyennes mensuelles de la zone d'étude	8
Tableau 2. Classification des latérites selon le CEBTP (1984)	19
Tableau 3. Classification des graveleux latéritiques	21
Tableau 4. Spécifications des graveleux latéritiques utilisés en construction routière	22
Tableau 5. Trafic moyen journalier par région (en véhicules/jours).....	24
Tableau 6. Données des travaux antérieurs sur l'étude du CBR.....	26
Tableau 7. Localisation et codification des échantillons destinés aux analyses géochimiques	34
Tableau 8. Composition minéralogique quantitative (%) des basaltes dans la zone d'étude ..	55
Tableau 9. Composition géochimique en éléments majeurs (%) des basaltes et argilites dans la zone d'étude	56
Tableau 10. Composition minéralogique quantitative (%) des l'argilites dans la zone d'étude	60
Tableau 11. Composition minéralogique quantitative (%) des latérites dans la zone d'étude	67
Tableau 12. Données d'analyses géochimiques des éléments majeurs (%) de la fraction totale des latérites étudiées	68
Tableau 13. Valeurs des indices et des paramètres géochimiques dans les latérites de la zone d'étude	71
Tableau 14. Valeurs des paramètres normatifs altérologiques des latérites dans le secteur d'étude	73
Tableau 15. Données des essais Micro Deval et Los Angeles.....	77
Tableau 16. Données des valeurs de poids volumique des grains solides des latérites étudiées	79
Tableau 17. Données d'analyses granulométriques des latérites étudiées	79
Tableau 18. Données des limites d'Atterberg et d'indice de plasticité	81
Tableau 19. Données des paramètres dérivés des latérites étudiées	84
Tableau 20. Classifications AASHTO et USCS des latérites étudiées	86
Tableau 21. Données des paramètres de compactage des latérites étudiées.....	86
Tableau 22. Données CBR des latérites étudiées.....	86
Tableau 23. Matrice de corrélation des composants minéralogiques des latérites sur basaltes dans la zone d'étude	89

Tableau 24. Matrice de corrélation des composants minéralogiques des latérites sur argilites dans la zone d'étude	90
Tableau 25. Matrice de corrélation des composants minéralogiques des latérites sur basaltes et argilites dans la zone d'étude	93
Tableau 26. Matrice de corrélation des composants géochimiques des latérites sur basaltes dans la zone d'étude	96
Tableau 27. Matrice de corrélation des composants géochimiques des latérites sur argilites dans la zone d'étude	99
Tableau 28. Matrice de corrélation des composants géochimiques (% d'oxydes) des latérites des basaltes et argilites dans la zone d'étude.....	102
Tableau 29. Matrice de corrélation des composants minéralogiques et géochimiques (% d'oxydes) des latérites sur basaltes et argilites dans la zone d'étude	106
Tableau 30. Matrice de corrélation des paramètres géotechniques des latérites sur basaltes dans la zone d'étude	109
Tableau 31. Données récapitulatives des relations entre paramètres géotechniques des latérites sur basaltes.....	112
Tableau 32. Matrice de corrélation des paramètres géotechniques des latérites sur argilites dans la zone d'étude	114
Tableau 33. Données récapitulatives des relations entre paramètres géotechniques des latérites sur argilites.....	118
Tableau 34. Matrice de corrélation des paramètres géotechniques des latérites sur gneiss dans la zone d'étude	119
Tableau 35. Données récapitulatives des relations entre paramètres géotechniques des latérites sur gneiss	123
Tableau 36. Matrice de corrélation des paramètres géotechniques des latérites dans la zone d'étude	124
Tableau 37. Valeurs du coefficient de variation des paramètres géotechniques des latérites dans le secteur d'étude.....	129
Tableau 38. Dispersion des paramètres géotechniques des latérites dans le secteur d'étude	129
Tableau 39. Matrice de corrélation entre données minéralogiques et paramètres géotechniques dans les latérites de la zone d'étude	142
Tableau 40. Matrice de corrélation entre composants géochimiques et paramètres géotechniques dans les latérites de la zone d'étude	143

Tableau 41. Matrice de corrélation entre paramètres d'altération et paramètres géotechniques dans les latérites de la zone d'étude	145
Tableau 42. Matrice de corrélation entre paramètres d'altération normatifs et paramètres géotechniques dans les latérites de la zone d'étude	146
Tableau 43. Meilleur ajustement du CBR à partir des variables Fines (< 75 μm), IP, TE-OPM et DSM.....	149
Tableau 44. Sortie de la fonction catdes appliquée à la partition de la classe 1/3	153
Tableau 45. Sortie de la fonction catdes appliquée à la partition de la classe 2/3	155
Tableau 46. Sortie de la fonction catdes appliquée à la partition de la classe 3/3	155

LISTE DES ABREVIATIONS, SIGLES, ACRONYMES ET SYMBOLES

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

AC : Activité des colloïdes

ACP : Analyse en Composantes Principales

AFNOR : Association Française de Normalisation

CHCP : Classification Hiérarchique en Composantes Principales

CBR : *California Bearing Ratio*

CIA : *Chemical Index of Alteration*

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

CV : Coefficient de variation

D : Coefficient Déval

DEGN : Direction des Etudes Générales et de la Normalisation

DNIT : *Departemento Nacional de Infraestructura de Transportes*

DSM : Densité Sèche Maximale

DVAR : Degré Virtuel d'Altération de la Roche

DVRAR : Degré Virtuel Relatif d'Altération de la Roche

EN : Norme Européenne

ESE : Essieu Standard Equivalent

ET : Ecart-type

GPS : *Global Positioning System*

Gm : Module de classement

HRB : *Highway Research Board*

IAL : Indice d'Alumine Libre

ICP : Indice de Confinement Potentiel

IFL : Indice de Fer ferrique Libre

IIP : Indice d'Induration Potentielle

ILP : Indice de Lixiviation Potentielle

IOL : *Index of Lateritisation*

IP : Indice de Plasticité

IRCP : Indice Relatif de Confinement Potentiel

IRGM : Institut de Recherches Géologiques et Minières

IRLP : Indice Relatif de Lixiviation Potentielle

IRIP : Indice Relatif d'Induration Potentielle
LA : *Los Angeles*
LABOGENIE : Laboratoire national de Génie civil
LBTP : Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics
LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LL : Limite de liquidité
LP : Limite de plasticité
LRA : Latérites dérivées des argilites
LRB : Latérites dérivées des basaltes
LRG : Latérites dérivées des gneiss
MIA : *Mafic Index of Alteration*
MDE : Micro Deval Humide
NCHRP : *National Cooperative Highway Research Program*
NF : Norme Française
OPM : Optimum proctor modifié
IP : Indice de plasticité
PK : Point Kilométrique
PF : Perte au feu
Pm : Module de Plasticité
Pp : Produit de Plasticité
PPFAL : Prédominance Potentielle des Oxyhydroxydes de Fer et d'Aluminium Libres
Ra : Rapport Altérologique
SAF : Silice-Alumine-Fer
SETRA : Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements
SRTM : *Shuttle Radar Topography Mission*
TE-OPM : Teneur en Eau à l'Optimum Proctor Modifié
USCS : *Unified Soil Classification System*
WIP : *Weathering Index of Parker*
 ϵ_s : Potentiel de gonflement
 γ_s : Poids volumique des grains solides

RESUME

La présente étude a pour but d'étudier la variabilité des propriétés génétiques et géotechniques des latérites développées sur différentes roches mères et d'établir un modèle CBR à partir des paramètres physiques, en vue de leur utilisation en construction routière. Les matériaux prélevés ont été l'objet d'études pétrologiques, géotechniques et statistiques. Après la description macroscopique des matériaux, la minéralogie a été déterminée par microscopie optique et par diffraction des rayons X. La fluorescence X a permis de déterminer les concentrations en éléments majeurs des matériaux. Le fer ferreux (FeO) a été déterminé par titrimétrie. Les études géotechniques ont porté sur les essais d'identification et de caractérisation des latérites et sur les essais mécaniques sur roche volcanique. La roche volcanique étudiée est un basalte à texture microlitique porphyrique, constitué d'olivine, de pyroxène et de feldspaths. La roche sédimentaire est une argilite composée de quartz, albite, calcite et clinocllore. La roche métamorphique est un gneiss. Sur le plan pétrographique, les latérites dérivées des basaltes (LRB) sont rouges à rouges sombres et sont plus épaisses que celles développées sur argilites (LRA) et sur gneiss (LRG). Les matériaux LRA et LRG ont une couleur jaune à jaune rougeâtre. Les matériaux LRB sont ferrugino-silico-alumineux, plus altérés que les matériaux LRA, qui sont silico-ferrugino-alumineux. Les matériaux LRA sont kaolinisés à faiblement latéritisés tandis que, les matériaux LRB sont faiblement à modérément latéritisés. L'analyse en composantes principales montre 03 groupes de paramètres géotechniques : (1) le groupe des paramètres granulométriques ; (2) le groupe des paramètres de plasticité et, (3) le groupe des paramètres California Bearing Ratio (CBR), activité des colloïdes (Ac), gravier et module de classement (Gm). Trois classes de latérites apparaissent dans la zone d'étude. Les latérites de la classe 1/3, qui sont les matériaux LRA, caractérisés par les paramètres densité sèche maximale (DSM), sable et Gm. Les latérites de la classe 2/3, associées aux matériaux LRG, se distinguent par les paramètres Gm, gravier, teneur en eau à l'optimum proctor modifié (TE-OPM) et Ac. Les latérites de la classe 3/3, constituées des matériaux LRB, sont caractérisés par les paramètres module de plasticité (Pm), gonflement potentiel (ϵ_s), produit de plasticité (Pp), l'indice de plasticité (IP), limite de liquidité (LL), mortier, squelette, limite de plasticité (LP), TE-OPM, Fines (<80 μ m) et argiles. Le meilleur ajustement du CBR par les paramètres Fines, IP, TE-OPM et DSM est donné par l'équation : $CBR = - 0,0616(< 80\mu m) + 0,0892IP - 0,1035TE-OPM + 0,9347DSM + \beta$ (constante), avec $R^2 = 0,98$. Les valeurs moyennes du coefficient Micro-Deval (MDE) des granulats basaltiques, inférieures à 32 %, couplées aux valeurs de coefficient Los Angeles (LA), inférieures à 13 %, suggèrent leur utilisation en couche de base et en couche de roulement, pour les trafics faibles à moyens T1 à T4. Les matériaux LRB sont moins denses, plus fins et de portance faible par rapport aux matériaux LRA et LRG. Les valeurs moyennes des paramètres CBR (30 – 70 %), DSM (> 1,80), Pm (> 250), Gm (<0,3 x 10⁶ esa), IP (30 – 20 %) et Fines (35 – 30 %), couplées au trafic moyen journalier sur les deux routes nationales, indiquent que les matériaux LRA et LRG sont utilisables en couche de fondation pour les trafics T1 à T4 et, en couche de base, pour les trafics T1. Les matériaux LRB sont utilisables uniquement en couche de fondation pour les trafics T1 à T4.

Mots-clés : Roches, latérites, pétrologie, propriétés géotechniques, variabilité statistique, Sud-Ouest Cameroun

ABSTRACT

The present work aims at assessing the variability of the genetical and geotechnical properties of laterites developed on different parent rocks, and to establish a CBR model from physical parameters for their use in road construction. The samples were run for petrological, geotechnical and statistical studies. After a macroscopy and microscopy description of the materials, the mineralogy was determined by optical microscopy and X-ray diffractometry. X-ray fluorescence was used to determine their major elements geochemistry. The ferrous iron (FeO) was determined by titrimetry. Geotechnical studies focused on identification and characterization tests on laterites and, mechanical tests on volcanic rocks. The volcanic rocks studied are basalts with a porphyric microlitic texture, made up of olivine, pyroxene and feldspar. The sedimentary rock is a shale composed of quartz, albite, calcite and clinocllore. The basalt derived laterites (LRB) are red to dark red and the profiles are thicker than those developed on shale derived laterites (LRS) and on gneisses derived laterites (LRG). The LRS and LRG materials are yellow to yellowish color. The LRB materials are ferrugino-silico-aluminous and more affected than the LRA silico-ferrugino-aluminous materials. The LRA materials are kaolinitized to moderately lateritized, while the LRB materials are moderately to strongly lateritized. The Principal Component Analysis shows 03 groups of geotechnical parameters: (1) The group of granulometrical parameters; (2) the group of plasticity parameters and, (3) the group of California bearing ratio (CBR), activity ratio (Ac), gravel and grading modulus (Gm) parameters. Three types of laterites are present in the area : (1) class 1/3 laterites, which are the SRL materials, characterized by maximum dry density (MDD), sand and Gm parameters ; (2) class 2/3 laterites, associated to the GRL materials, characterized by Gm, gravel, optimum moisture contents (OMC) and Ac parameters and, (3) class 3/3 laterites, made of LRB materials, characterized by plasticity modulus (Pm), swelling potential (ϵ_s), plasticity plasticity (Pp), plasticity index (PI), liquid limit (LL), mortar, skeleton, plasticity limit (PL), OMC, Fines and clays parameters. The best adjustment of the CBR by the parameters, Fines, PI, OMC and MDD is given by the equation: $CBR = - 0.0616 (< 80\mu m) + 0.0892PI - 0.1035OMC + 0.9347MDD + \beta$ (constant) with $R^2 = 0.95$. The mean values of the micro-deval (MDE) coefficient of basalt aggregates, lower than 13%, coupled with the mean values of the Los Angeles (LA) coefficient, lower than 30%, suggest their used as base layer and wearing course. LRB materials are less dense, slightly Fines, more plastic and with lower CBR values than LRA and LRG materials. The mean values of CBR (30–70%), MDD (> 1.80), Pm (> 250), Gm ($< 0.3 \times 10^6$ esa), PI (30–20%) and Fines (35–30%) parameters, coupled with mean day traffic on national roads, show that the LRA and LRG materials can be used as subbase layers for any type of traffic and, as base layers for low volume traffic. LRB materials are used as subbases for any type of traffic.

Keywords : Rocks, Laterites, Petrology, Geotechnical properties, Statistical variability, South-West Cameroon

INTRODUCTION GENERALE

Les latérites constituent une ressource naturelle très utilisée en construction civile en zone intertropicale. Ces matériaux occupent 33 % de la superficie du continent africain et se rencontrent sur toute la partie tropicale qui s'étend entre les isohyètes 750 et 1200 mm (D'Hoore, 1964). Au Cameroun, des études ont permis d'évaluer le potentiel en gisement des latérites à plus de 70 % de la superficie du pays (Anonyme, 1987 ; Sikali et Djalal, 1987). Ces matériaux résultent des processus d'altération particuliers (Bohi, 2008). Leurs propriétés géotechniques sont très variables, influencées par le climat, la géologie et le degré d'altération ou de latéritisation (Duchaufour, 2001). Ces propriétés peuvent donc différer d'une région à une autre, ou au sein d'une même aire géographique, selon la nature de la roche mère dont elles dérivent. L'utilisation des latérites nécessite un minimum de connaissances de leurs propriétés génétiques et géotechniques pour éviter les dégradations et les déformations précoces des couches de chaussées. De plus, l'utilisation systématique des latérites entraîne un épuisement des gisements de matériaux de bonne qualité (Kassogue *et al.*, 2002). Le réseau routier interurbain du Cameroun compte 122 222 km de routes (Anonyme, 2015). En fonction du type de revêtement, ce réseau est majoritairement constitué de 15 863 km de routes en terre (Anonyme, 2015). La région du Sud-Ouest Cameroun en particulier compte 385 km de routes revêtues et 1 123 km de routes en terre. La construction et/ou l'entretien de ces routes nécessite d'importants apports de matériaux latéritiques. Les latérites de la région du Sud-Ouest ont fait l'objet de plusieurs études (Ekosse, 2000 ; Ayonghe *et al.*, 2004 ; Diko *et al.*, 2011). Ces études ont montré que, malgré le caractère moyen à bon des matériaux latéritiques de cette zone (Hieng, 2003), des dégradations et des déformations sont observées sur le réseau routier, ceci à cause de la mauvaise qualité de mise en œuvre de ces matériaux et de l'insuffisance des tests géotechniques. En effet, s'agissant des tests géotechniques, il a été constaté que les latérites choisies uniquement sur la base de leurs propriétés géotechniques se sont mal comportées sur les chaussées (Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Onana *et al.*, 2015 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017). Par conséquent, il faut associer les analyses minéralogiques et chimiques aux essais géotechniques classiques (Tockol *et al.*, 1994 ; Mahalinga-Iyer et William, 1997 ; Ndzié Mvindi, 2019 ; Ngo'o Ze, 2019), afin de mettre en place des techniques plus efficaces de caractérisation de ces matériaux. Les normes de spécification qui permettent le choix des matériaux en construction routière dans les pays subsahariens placent le California Bearing Ratio (CBR) comme le paramètre incontournable pour le dimensionnement des couches de chaussées (Fall *et al.*, 1994). La connaissance de ce paramètre permet non seulement de déterminer la portance des sols, mais aussi, de déterminer les épaisseurs des assises de chaussées (Fall *et al.*, 1994). La détermination du CBR est très

laborieuse. L'essai consomme une grande quantité de matériaux (~ 25 kg), prend beaucoup de temps et d'énergie. Par conséquent, il est important de trouver les moyens de déterminer les valeurs de portance CBR à partir des paramètres physiques simples. Des tentatives d'élaboration de modèles statistiques servant à prédire les valeurs CBR ont été l'objet de plusieurs études. Des modèles de corrélations statistiques entre le CBR et la densité sèche maximale (DSM), mais rarement entre le CBR et la teneur en eau à l'optimum proctor modifié (TE-OPM) ont été proposés (Patel et Desai, 2010 ; Bhatt *et al.*, 2014 ; Yato *et al.*, 2018). Des corrélations entre le CBR et les paramètres granulométriques ont également été établies (NCHRP, 2004 ; Satyanarayana et Pavani, 2006 ; Bello, 2012 ; Alawi et Rajab, 2013 ; Yadav et Vishal, 2014). Néanmoins, il a été démontré que les modèles proposés étaient peu satisfaisants (Taskiran, 2010), probablement à cause de la grande hétérogénéité des matériaux latéritiques. Des tentatives d'élaboration de modèles sur des latérites développées sur gneiss, ont indiqué que les valeurs CBR ne se corrélaient à aucun autre paramètre géotechnique (Ndzié Mvindi *et al.*, 2017), corroborant les résultats obtenus sur les latérites de Côte d'Ivoire (Bohi, 2008) et du Sénégal (Fall, 1993). Des modèles statistiques ont été présentés sur les matériaux latéritiques développés sur granites au Sud Cameroun en vue de leur utilisation en construction routière (Yato *et al.*, 2018). L'observation de ces modèles, générés à l'aide des régressions multiparamétriques, fait intervenir un nombre élevé de paramètres (DSM, TE-OPM, limite de plasticité, indice de plasticité, gravier (%), sable (%), argile + limon (%)), et les valeurs du coefficient de détermination (R^2) obtenues sont relativement satisfaisantes ($0,2 \leq R^2 \leq 0,8$).

Le présent travail avait pour objectif principal, d'étudier la variabilité des propriétés pétrologiques et géotechniques des latérites développées sur des roches mères différentes et d'établir un modèle de détermination du CBR à partir des paramètres physiques simples en vue de leur utilisation en construction routière.

Plus spécifiquement, il s'agira dans cette étude de :

- déterminer les caractéristiques pétrographiques, minéralogiques et géochimiques des roches et des latérites étudiées ;
- déterminer les valeurs des paramètres géotechniques des roches et des latérites dérivées de leur altération ;
- corréler les paramètres géologiques, géotechniques, géochimiques et géotechniques des latérites ;
- ressortir les grandes classes de latérites dans la zone d'étude ;
- proposer une carte géotechnique des latérites de la zone d'étude en fonction du CBR.

Le présent travail, après une introduction générale comportant des références à des travaux antérieurs, comprend six chapitres.

Le premier chapitre est consacré aux généralités portant sur le milieu naturel et sur les travaux antérieurs complémentaires au thème de l'étude.

Le deuxième chapitre présente les matériels et les méthodes d'acquisition des données sur le terrain et en laboratoire. Il s'achève par la présentation des modes d'exploitation des données.

Le troisième chapitre ressort les résultats d'analyses pétrographiques, minéralogiques et géochimiques des matériaux de la zone d'étude.

Le quatrième chapitre présente les données sur les paramètres géotechniques des matériaux étudiés.

Le cinquième chapitre met l'accent sur la variabilité statistique des matériaux latéritiques de la zone d'étude.

Le sixième chapitre interprète et discute les principaux résultats et présente l'intérêt des matériaux étudiés en construction routière.

Le travail s'achève par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I.

GENERALITES

INTRODUCTION

Le présent chapitre porte sur les caractéristiques géographiques, climatiques, phytographiques, géomorphologiques, géologiques et socio-économiques de la zone d'étude. A ces caractéristiques, s'ajoute une revue complémentaire de la littérature spécifique au thème de l'étude.

I. MILIEU NATUREL

I.1. Localisation géographique

La région du Sud-Ouest Cameroun s'étend entre les latitudes 04°00' et 06°30' Nord, et les longitudes 08°00' et 10°00' Est (Fig. 1). Cette région couvre une superficie de 25 410 km² environ. Elle est délimitée au Nord par la région du Nord-Ouest, au Sud par l'Océan Atlantique, à l'Ouest par le Nigéria, et à l'Est par la région du Littoral. Les secteurs retenus dans cette zone sont ceux situés à proximité des routes nationales 8 (RN8 ; Kumba-Mamfe) et 16 (RN16 ; Loum-Mundemba). La RN8 (149 km) traverse les départements de la Mémé, du Koupé Manengouba et de la Manyu. La RN16 (112,11 km) traverse les départements du Koupé Manengouba, de la Mémé et du Ndian (Anonyme, 2015). Ces deux routes relient le reste des régions du Cameroun au Nigéria pays voisin (Fig. 1).

I.2. Climat

Les relevés météorologiques de la station de Buéa permettent de caractériser le climat de la zone d'étude. La moyenne annuelle des précipitations pour la période allant de 2007 à 2017 (Bokanda, 2020) est de 2798,40 mm (Tab. 1). Les températures de l'air varient très peu toute l'année (Fig. 2). La température moyenne pour la période 2007-2017 est de 24,50°C environ. Le climat de la région est de type équatorial à deux variantes, maritime et montagnard et à deux saisons : une courte saison sèche (décembre-janvier) et une longue saison de pluies (février à novembre).

I.3. Géomorphologie

La zone d'étude est essentiellement pénéplanée avec des altitudes variant entre 250 et 2250 m (Fig. 3). Quatre unités morphologiques sont observables (Fig. 3) :

- les zones d'altitudes comprises entre 0 et 250 m, qui représentent les bas fonds ;
- les zones d'altitudes variant entre 250 et 600 m, qui représentent les plaines ;
- les zones d'altitudes comprises entre 600 et 1000 m, qui représentent les piedmonts ;
- les zones d'altitudes comprises entre 1000 et 2250 m, qui représentent les sommets.

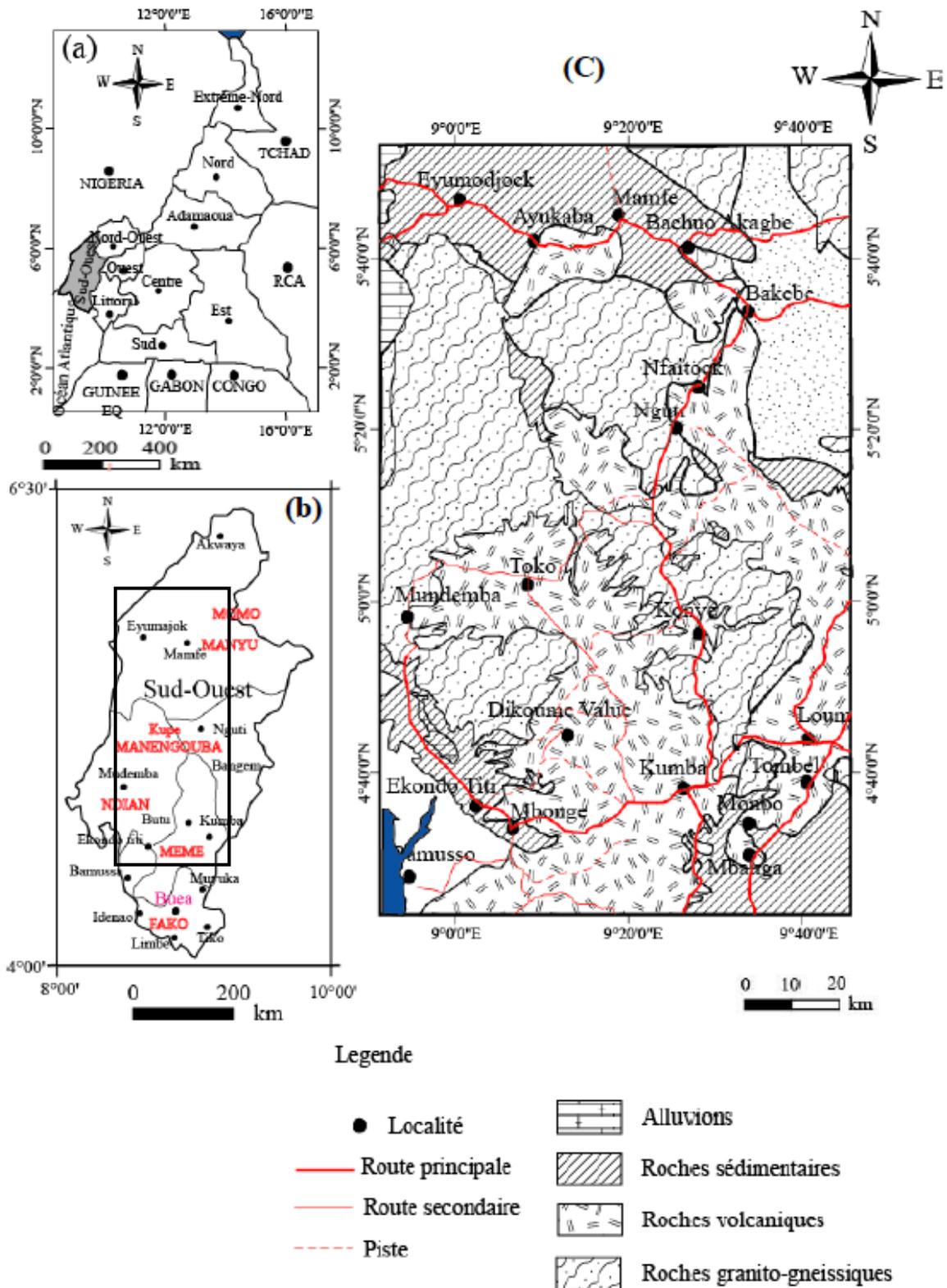


Figure 1. Carte de localisation du secteur d'étude (D'après la carte géologique de Douala-Ouest au 1/50 000 ; Dumort, 1968) : a). La région du Sud-Ouest dans le Cameroun ; b). Le secteur d'étude dans la région du Sud-Ouest ; c). Le secteur d'étude.

Tableau 1. Précipitations et températures moyennes mensuelles de la zone d'étude (Bokanda, 2020) pour la période allant de 2007 à 2017

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Ta	Pt/an
Pm (mm)	15,10	48,40	142,00	205,00	244,00	336,00	447,00	445,00	458,00	353,00	80,80	24,40	-	2798,40
Tm (°C)	24,10	25,50	25,90	26,00	25,20	24,30	23,40	23,20	23,80	24,00	24,50	23,90	24,50	-

Pm = précipitations moyennes mensuelles ; Pt = total des précipitations annuelles ;

Tm = températures moyennes mensuelles ; Ta = température moyenne annuelle

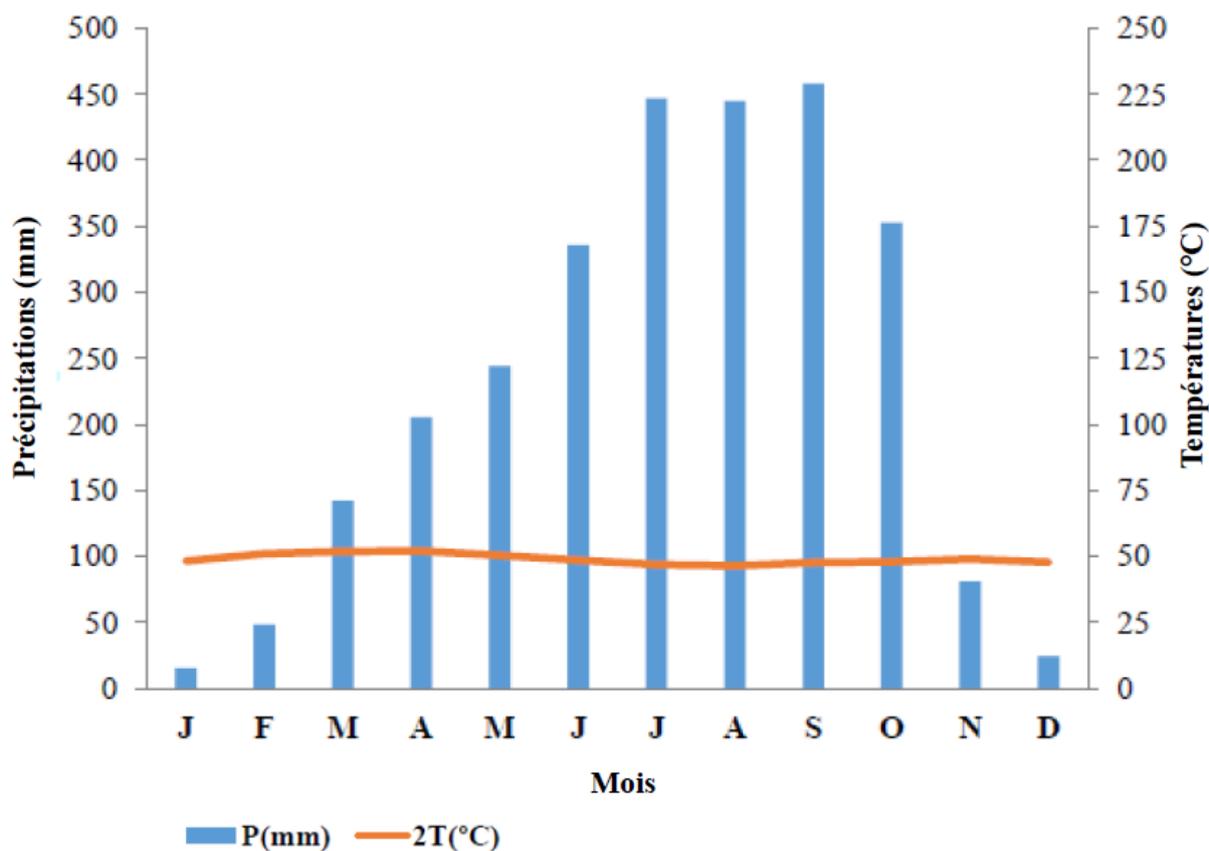


Figure 2. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957) appliqué aux données de la zone d'étude (Bokanda, 2020) pour la période 2007 - 2017

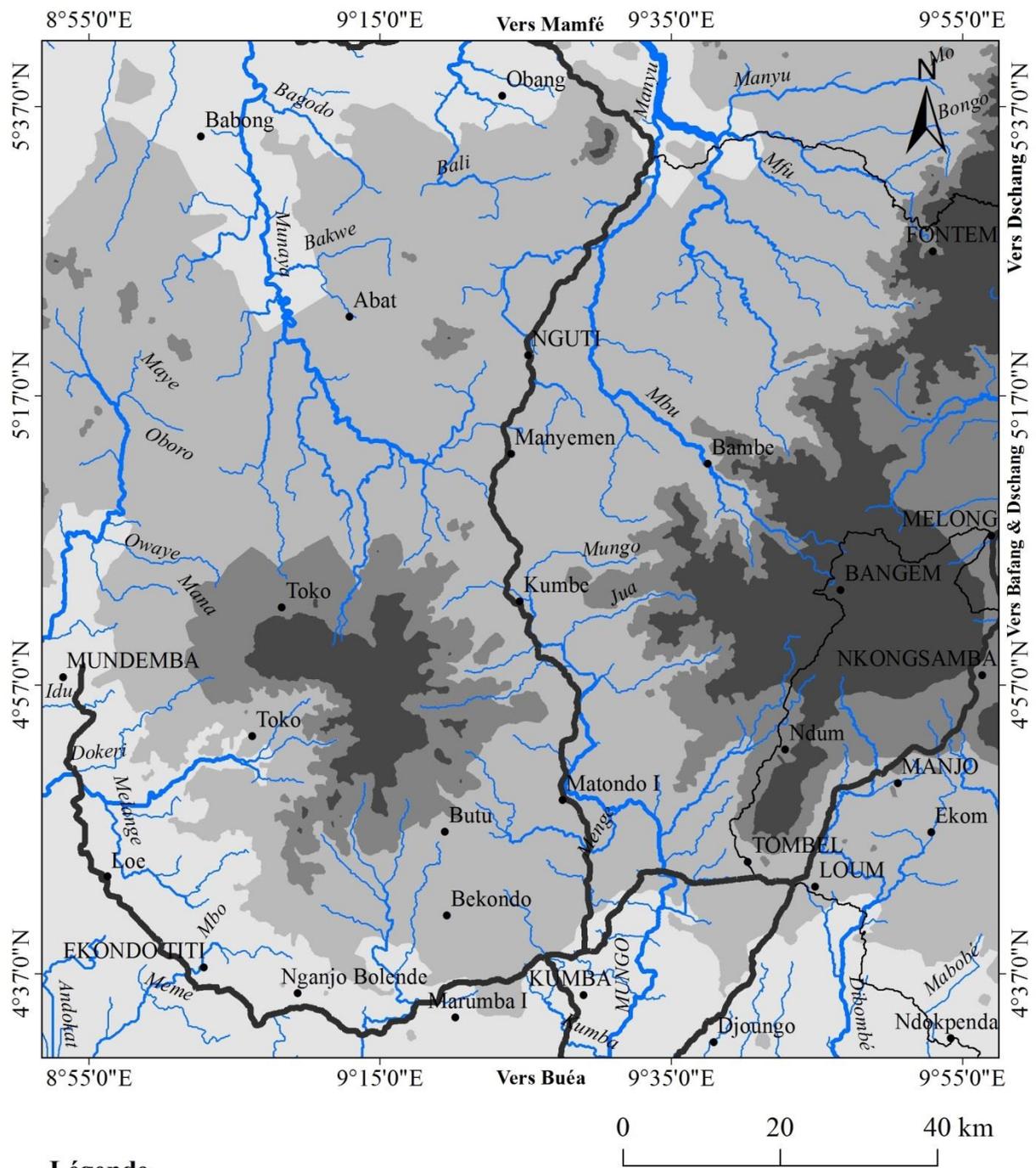


Figure 3. Carte géomorphologique de la zone d'étude (Cameroon mozaic SRTM)

Les unités morphologiques basses sont essentiellement localisées dans le bassin de Mamfé au Nord et les bassins du Ndian et de Kumba au Sud. Ces bassins sont drainés par les cours d'eau Manyu, Ndian et Mémé respectivement (Fig. 3) et appartiennent au grand bassin des fleuves côtiers (bassins du Ndian et de la Mémé) et au bassin de la Cross-River (bassin de la Manyu). Le Ndian draine le bassin sur une superficie de 1215 km² environ (Olivry, 1986). La Mémé a une superficie de 975 km² et reçoit environ 2600 mm de précipitations moyennes interannuelles. La Cross River draine environ 6 810 km².

I.4. Géologie

Trois types de formations lithologiques sont observables dans la zone d'étude. Les formations de recouvrement (sédiments et alluvions), les formations volcaniques (basaltes et trachytes) et les formations de socle (gneiss et granites). Ces différentes formations présentent les caractéristiques des roches rencontrées tout le long de la Ligne Volcanique du Cameroun. Ces roches ont été l'objet de nombreux travaux (Nkoumbou, 1990 ; Tagne-Kamga, 2003 ; Teitchou *et al.*, 2007 ; Tamen *et al.*, 2007 ; Sababa, 2015).

I.4.1. Formations sédimentaires

Les formations sédimentaires observées dans la zone d'étude sont rencontrées dans le bassin de Mamfé situé au Nord et, dans le bassin de Kumba situé au Sud. Ces formations sont essentiellement constituées de sédiments d'âges Crétacé et Cénozoïque composés de conglomérats, de grès, d'arkoses, d'argilites et de calcaires (Eyong, 2003 ; Kanouo, 2014 ; Bokanda *et al.*, 2019).

I.4.2. Formations volcaniques

Les formations volcaniques sont constituées de basaltes récents datés Quaternaire et de basaltes anciens datés Tertiaire (Nkoumbou, 1990). Les basaltes récents se composent de phénocristaux d'olivine, de pyroxène et de plagioclase. Les basaltes anciens forment le principal revêtement du socle. Ils sont constitués de phénocristaux d'olivine et de pyroxène, souvent prismés ou parfois stratifiés. A certains endroits s'observent des trachytes, des rhyolites, des phonolites et des benmoréites composés de phénocristaux de feldspaths alcalins et/ou de pyroxènes. Les lentilles sont inférieures au mètre. Les laves des volcans de Barombi Koto comprennent des picro-basaltes, des basanites, des basaltes alcalins et des hawaiiites (Tamen *et al.*, 2007).

I.4.3. Formations granito-gneissiques

Les formations de socle sont constituées de roches plutoniques et métamorphiques panafricaines (657 Ma ; Tagne-Kamga, 2003). Les roches plutoniques rencontrées dans la région sont essentiellement les granites. Deux types de granites sont observés, les granites blanchâtres et les granites rosâtres (Nkoumbou, 1990).

Les roches métamorphiques rencontrées sont les gneiss, les quartzites et les amphibolites (Sababa, 2015). Les gneiss sont rubanés ou oillés et parfois associés à des mylonites. Ils affleurent de façon sporadique dans les projections du lac Barombi-Mbo. Ces gneiss mésocrates sont caractérisés par une alternance de lits clairs quartzo-feldspatiques et de lits sombres biotitiques. Les paillettes de biotite, pouvant inclure quelques grains de grenat, sont orientées préférentiellement et confèrent à la roche une schistosité. Les quartzites, hololeucocrates, forment des bancs de dimensions réduites dans les gneiss. Ils correspondent à d'anciens accidents détritiques dans une sédimentation pélitique (Dumort, 1968). Les amphibolites se rencontrent toujours en lentilles associées aux gneiss. Ce sont des roches sombres et compactes ne présentant ni foliation, ni litage. Elles affleurent à Bakondo et à Barombi Mbo.

I.5. Sols

Les sols rencontrés dans la zone d'étude sont les sols ferrallitiques, les sols hydromorphes et les sols bruns peu évolués (Vallerie, 1995).

Les sols ferrallitiques se subdivisent en trois groupes : les sols ferrallitiques jaunes, dérivés des formations volcaniques et cristallines, abondants dans la zone d'étude et les sols ferrallitiques jaunes, dérivés des roches sédimentaires. Ces derniers sont localisés dans les bassins de Ndian, Rio del Rey, Mémé inférieure, Haute Munaya et dans le plateau de Ntale. Ces sols sont formés de matériaux sableux ou gréseux datés Crétacé au Miocène. Ils contiennent une part importante de sables fins et de sables grossiers (45 à 80,5 %). L'argile présente des teneurs comprises entre 10 et 50 %. Les teneurs en limons ne dépassent pas 10 %. Les teneurs en matière organique sont faibles en surface (2 %). Les sols ferrallitiques jaunes sur roches métamorphiques sont observés dans les bassins de la Cross River, du Haut-Mungo et du Rio del Rey. Les teneurs en argiles sont généralement élevées, 40 à 60 %. Les sables fins représentent 30 à 50 %. Les teneurs en limons ne dépassent guère 15 %. Les teneurs en matière organique sont comprises entre 2 et 3 %. A côté des sols ferrallitiques jaunes, existent les sols ferrallitiques rouges développés sur basaltes. Ces sols se rencontrent sur les basaltes anciens des plateaux de l'Ouest, des bassins de la Cross River, du Mungo et

de la Mémé. La présence de sables plus ou moins stables peut tromper sur la nature argileuse des horizons supérieurs. Les teneurs en argiles varient entre 40 et 70 % et celles des limons, entre 25 et 30 %. L'horizon de surface est faiblement humifère et peu organique. Le pH est légèrement acide.

Les sols hydromorphes côtiers sont rencontrés dans les alluvions littorales et dans les bassins de Rio del Rey et de Douala. Ces sols comprennent des sols sableux plus ou moins humifères. Les slikkes avec vase argilo-sableuse sont observées dans la tranche bathymétrique intertidale et, les tourbes ou argiles plus ou moins humifères, au niveau moyen des hautes-mers.

Les sols bruns peu évolués se développent sur un matériau volcanique récent, principalement des basaltes, et sont observés dans le pourtour du Mont Cameroun, à Kumba, Mbanga, Nkongsamba et au Nord-Est du bassin de la Cross River.

I.6. Végétation

La zone d'étude appartient au domaine de la forêt dense équatoriale et humide (Olivry, 1986). Cette forêt est caractérisée par des arbres élevés aux vastes frondaisons, aux fûts verticaux souvent munis à la base de contreforts, des arbres aux feuillages denses et de rares plantes herbacées. La mangrove s'observe au Nord-Ouest de Bamusso à la frontière nigériane en passant par Ekondo Titi et au Sud de Ndian (Mémé, Rio del Rey). Les formations à *Rhizophora racemosa* sont les plus importantes et sont pratiquement monospécifiques, surtout dans les zones de submersion importante. On distingue les espèces typiques de mangrove peu salée telles *Rhizophora harrisonii* et *Drepanocarpus*. Les forêts inondées sont peuplées par les *Arécacées* (palmiers) qui sont l'espèce dominante (Olivry, 1986).

I.7. Populations et activités socio-économiques

La population de la zone d'étude est cosmopolite et constituée majoritairement des tribus Bakossi, Bolondo et Bayangué. Les tribus telles que les Haoussas et les Ibos, venant du Nigéria sont également rencontrées. La principale activité économique est l'agriculture. Cette agriculture est traditionnelle et industrielle (cacao, café, palmier à huile). Le commerce, l'élevage et la pêche constituent les activités secondaires. Le commerce est pratiqué le long des axes bitumés dans les chefs-lieux des arrondissements. Les produits manufacturés venant du Nigéria y sont très commercialisés.

II. TRAVAUX ANTERIEURS COMPLEMENTAIRES

II.1. Pétrologie des sols

II.1.1. Pétrographie

De nombreux auteurs se sont intéressés à l'étude des manteaux d'altération en zone tropicale humide au Cameroun (Ekodeck, 1984 ; Kamgang Beyala, 1998 ; Onana *et al.*, 2007 ; Ndjigui, 2008 ; Onana, 2010 ; Nyassa Ohandja *et al.*, 2020). L'altération est de type ferrallitique et la diversité des roches dans cette zone entraîne une hétérogénéité des matériaux d'altération. Les profils types des sols ferrallitiques décrivent une succession d'horizons en trois ensembles (Tematio *et al.*, 2017) :

- un ensemble inférieur altéritique ;
- un ensemble médian gravillonnaire ;
- un ensemble supérieur argileux meuble.

II.1.2. Minéralogie et géochimie

Les minéraux argileux couramment rencontrés dans les latérites sont la kaolinite, l'halloysite, et rarement l'illite (Nyeck *et al.*, 2019). Les latérites issues des trachytes de Fongo Tongo à l'Ouest Cameroun sont composées de kaolinite, gibbsite, hématite, goethite, quartz et illite (Wouatong *et al.*, 2014). Dans les latérites dérivées des gneiss dans la région de l'Est Cameroun, les minéraux généralement rencontrés sont le quartz, la kaolinite, gibbsite, hématite, goethite et anatase (Onana *et al.*, 2015). Les latérites issues des granites de la région sus-citée sont constituées de quartz, kaolinite, gibbsite, hématite et goethite (Nzabakurikiza *et al.*, 2017). Au Centre Cameroun, les principaux minéraux présents dans les latérites développées sur les schistes et les micaschistes sont le quartz, la kaolinite, la goethite, la magnétite et la chlorite (Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Ngo'o Ze *et al.*, 2019).

Les latérites sont majoritairement constituées de SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 , qui représentent 82,00 à 86,00 % du poids total d'oxydes. Les valeurs de perte au feu (PF) sont comprises entre 6,00 et 15,00 %. Les valeurs plus élevées se rencontrent dans les matériaux développés sur amphibolites, gneiss et migmatites. Les teneurs en SiO_2 (45,56 – 79,99 %) sont élevées à l'Est du Cameroun (Onana *et al.*, 2015 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017). Par contre, elles sont modérées dans les régions du Centre et du Sud Cameroun respectivement (21 – 54,65 %) (Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Onana *et al.*, 2016). Les proportions en Al_2O_3 sont moyennes à élevées (9,00 et 27,26 %) tandis que celles en Fe_2O_3 sont modérées à fortes (7,38 et 44,18 %). Les teneurs en TiO_2 sont en moyenne égales à 1,00 %. Dans les régions du Centre, du Sud et de l'Est Cameroun, les latérites sont ferrugino-alumino-siliceuses (Onana *et*

al., 2015 ; Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Onana *et al.*, 2016 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017). Les valeurs des rapports silice/sesquioxydes (S/R ; 0,97 – 3,52) indiquent que les latérites du Sud Cameroun sont des ‘latérites vraies’ (S/R < 1,33), des ‘matériaux latéritiques’ (S/R > 1,33) et les ‘matériaux non latéritiques’ (S/R > 2 ; Onana *et al.*, 2016).

II.2. Paramètres géotechniques des matériaux

Les normes et spécifications géotechniques des latérites en construction routière ont été élaborées sur la base de retours d’expérience des chercheurs et ingénieurs de Génie Civil. De nombreux travaux ont porté principalement sur l’identification de ces matériaux, de leur place dans les systèmes de classification et de leurs propriétés mécaniques, en vue de leur sélection comme matière première d’assises de chaussée, en construction routière.

II.2.1. Paramètres physiques et paramètres de compactage

II.2.1.1. Poids volumique des grains solides

Les travaux effectués montrent que les valeurs poids volumiques des grains solides des latérites sont comprises entre 2,1 et 3,2 N/cm³ (Ola, 1980 ; Adeyemi, 1995 ; Mahalinga-Iyer et William, 1997 ; Millogo, 2008 ; Onana *et al.*, 2015 ; Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Ndzié Mvindi *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017 ; Ngo’o Ze *et al.*, 2019). Les résultats obtenus sont typiques des sols latéritiques. Ces valeurs varient entre 2,5 et 3,1 N/cm³ pour les latérites développées sur roches sédimentaires (Adeyemi, 1995 ; Nwaiwu *et al.*, 2006). Elles oscillent entre 2,26 et 3,12 N/cm³ pour celles développées sur roches volcaniques (Mahalinga-Iyer et William, 1997 ; Orense *et al.*, 2006). Pour les latérites dérivées des roches granito-gneissiques, les valeurs de ce paramètre sont comprises entre 2,1 et 3,2 N/cm³ (Ola, 1980 ; Charman, 1988 ; Ogunsanwo, 1989 ; Millogo, 2008 ; Onana *et al.*, 2015 ; Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Ndzié Mvindi *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017 ; Ngo’o Ze *et al.*, 2019).

II.2.1.2. Granularité

L’essai granulométrique est l’essai le plus important dans la détermination de la texture et des fractions granulaires qui composent les sols. Les proportions en graviers, sables, fines et argiles sont comprises respectivement entre 18,0 et 63,9 %, 19,0 et 54,0 %, 9,7 et 35 %, 3,7 et 26,0 % dans les latérites dérivées des roches sédimentaires (Adeyemi, 1995 ; Nwaiwu *et al.*, 2006 ; Okeke *et al.*, 2016). Dans les latérites issues des roches volcaniques, les teneurs en graviers, sables, fines et argiles varient entre 15,3 et 69,4 %, 7,0 et 60,3 %, 5,9 et 35,6 %, 1,9 et 24,5 % respectivement (Mahalinga-Iyer and William, 1997 ; Wouatong *et al.*,

2014 ; Hyoumbi *et al.*, 2017). Pour les latérites issues des roches de granito-gneissiques, les proportions en graviers, sables, fines et argiles oscillent entre 18,8 et 72,0 %, 11,1 et 59,80 %, 6,10 et 66,6 %, et 5,0 et 46,3 % (Bohi, 2008 ; Mengue, 2015 ; Onana *et al.*, 2015 ; Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Ndzié Mvindi *et al.*, 2017 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017 ; Ngo'o Ze *et al.*, 2019).

II.2.1.3. Limites d'Atterberg

Les variations des limites de consistance des sols dans la zone intertropicale ne présentent pas de tendance particulière. Les valeurs de limites de liquidité (LL) et de plasticité (LP) changent d'une région à une autre probablement en fonction de la nature de la roche mère, de l'altération différentielle des minéraux, de la topographie et de la pluviosité (Onana, 2010).

II.2.1.3.1. Limite de liquidité

Les valeurs de LL dans les latérites dérivées des roches sédimentaires oscillent entre 21 et 60 %, soit une moyenne de 37 % (Adeyemi, 1995 ; Nwaiwu *et al.*, 2006 ; Chuka Osadebe *et al.*, 2010 ; Abidemi, 2015 ; Okeke *et al.*, 2016). Pour celles développées sur roches volcaniques, les valeurs de ce paramètre sont comprises entre 57 et 97 %, soit une moyenne de 73 % (Wouatong *et al.*, 2014 ; Hyoumbi *et al.*, 2017). Dans les latérites dérivées des roches granito-gneissiques, les valeurs de LL varient entre 24 et 95 %, soit une moyenne de 55 % (Bohi, 2008 ; Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Ayodele et Falade, 2016 ; Ndzié Mvindi *et al.*, 2017 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017 ; Ngo'o Ze *et al.*, 2019).

II.2.1.3.2. Indice de plasticité

Les valeurs de l'indice de plasticité (IP) sont déduites de celles des LL et de LP. La valeur de IP varie non seulement en fonction de l'importance de la fraction argileuse, mais également avec la nature des minéraux argileux (Kornmann, 2009 *in* Nzeukou Nzeugang, 2015). Les valeurs de ce paramètre pour les latérites dérivées des roches sédimentaires sont comprises entre 6 et 51 %, soit une moyenne de 19 % (Adeyemi, 1995 ; Hieng, 2003 ; Nwaiwu *et al.*, 2006 ; Owoyemi et Adeyemi, 2017 ; Abidemi, 2015 ; Okeke *et al.*, 2016). Pour les latérites développées sur roches volcaniques, les valeurs de ce paramètre varient dans l'intervalle 12 – 27 %, avec une moyenne de 18 % (Mahalinga-Iyer et William, 1997 ; Wouatong *et al.*, 2014 ; Hyoumbi *et al.*, 2017). Les valeurs de IP des latérites dérivées des roches granito-gneissiques oscillent entre 9 et 55 %, soit une moyenne 27 % (Bohi, 2008 ;

Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Ayodele et Falade, 2016 ; Ndzié Mvindi *et al.*, 2017 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017 ; Ngo'o Ze *et al.*, 2019).

II.2.1.4. Classification

Les données granulométriques et celles des limites d'Atterberg permettent de classer les sols du Sud Cameroun. Les chercheurs en Afrique (Bagarre, 1990 ; Hieng, 2003 ; Millogo, 2008) ont utilisé la classification américaine des sols du *Highway Research Board* (HRB). Celle-ci, classe les sols en deux catégories : les sols grenus dont les passants au tamis de 80 μm sont inférieurs à 35 % et les sols fins pour lesquels les passants au tamis de 80 μm sont supérieurs à 35 %. Cette classification indique que les sols du Sud Cameroun utilisés en construction routière sont en majorité, des graviers et sables silteux ou argileux de classe A-2-7.

II.2.1.5. Paramètres dérivés

Les paramètres dérivés des limites d'Atterberg sont utilisés pour montrer la contribution de la plasticité et de granularité sur le comportement des matériaux (Bello et Osinubi, 2010). Les valeurs du module de classement (G_m) des latérites développées sur roches sédimentaires oscillent entre 1,71 et 2,20. Celles de l'activité des colloïdes (A_c) varient entre 0,35 et 0,87. Les valeurs du produit de plasticité (P_p) s'étalent entre 133,44 et 196,77 et celles du module de plasticité (P_m) sont comprises entre 218,78 et 293,47 (Nwaiwu *et al.*, 2006). Les valeurs de G_m des latérites dérivées des roches granito-gneissiques varient entre 0,14 et 2,57. L'activité des colloïdes présentent des valeurs comprises entre 1,03 et 3,94. Les valeurs de P_p oscillent entre 144 et 2880. Les valeurs de P_m varient entre 171 et 3000 et, celles du gonflement potentiel (ϵ_s) entre 0,002 et 0,037 (Ndzié Mvindi *et al.*, 2017 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017 ; Ngo'o Ze *et al.*, 2019).

II.2.1.6. Essai proctor modifié

II.2.1.6.1. Teneur en eau à l'optimum proctor modifié

Les valeurs de la teneur en eau à l'optimum proctor modifié (TE-OPM) des latérites dérivées des roches sédimentaires varient entre 7,0 et 23,4 %, soit une moyenne de 13 % (Nwaiwu *et al.*, 2006 ; Owoyemi et Adeyemi, 2017 ; Abidemi, 2015 ; Okeke *et al.*, 2016). Pour les latérites dérivées des roches volcaniques, les valeurs de TE-OPM sont comprises entre 15,0 et 16,0 %, soit une moyenne de 15 % (Wouatong *et al.*, 2014). Les valeurs de TE-OPM des latérites développées sur roches granito-gneissiques oscillent entre 5,8 et 74,0 %, soit une moyenne de 20,5 %.

soit une moyenne de 18 % (Bohi, 2008 ; Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Ayodele et Falade, 2016 ; Ndzié Mvindi *et al.*, 2017 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 et Onana *et al.*, 2017 ; Yato *et al.*, 2018).

II.2.1.6.2. Densité sèche maximale

Les valeurs de densité sèche maximale (DSM) des latérites dérivées des roches sédimentaires oscillent entre 1,6 et 2,3, soit une moyenne de 1,9 (Nwaiwu *et al.*, 2006 ; Chuka Osadebe *et al.*, 2010 ; Abidemi, 2015 et Okeke *et al.*, 2016). Les latérites développées sur roches volcaniques possèdent des valeurs de DSM qui varient entre 1,36 et 1,61, soit une moyenne 1,48 (Wouatong *et al.*, 2014). Celles dérivées des roches granito-gneissiques ont des valeurs comprises entre 1,6 et 2,4, soit une moyenne de 2,0 (Bohi, 2008 ; Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Ayodele et Falade, 2016 ; Ndzié Mvindi *et al.*, 2017 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017 ; Yato *et al.*, 2018).

II.2.1.7. California Bearing Ratio

Les valeurs du California Bearing Ratio (CBR) à 95 % OPM, à 04 jours d'immersion dans les latérites dérivées des roches sédimentaires sont comprises entre 10 et 63 %, soit une moyenne de 35 % (Nwaiwu *et al.*, 2006 ; Owoyemi et Adeyemi, 2017 ; Abidemi, 2015 ; Okeke *et al.*, 2016). Les valeurs de CBR des latérites développées sur roches volcaniques varient entre 29 et 50 %, soit une moyenne de 39 % (Hieng, 2003). Les latérites développées sur roches granito-gneissiques ont des valeurs d'indice CBR variant entre 10 et 70 %, soit une moyenne de 41 % (Bohi, 2008 ; Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Ndzié Mvindi *et al.*, 2017 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017 ; Yato *et al.*, 2018).

II.2.2. Paramètres mécaniques

II.2.2.1. Paramètres mécaniques des roches

II.2.2.2. Tests d'abrasion : coefficient Micro Deval et coefficient Los Angeles

Les valeurs du coefficient Los Angeles (LA) des gneiss de Yaoundé sur la fraction granulaire 3/8 est de 34,00 % en moyenne et, de 32,00 % en moyenne sur la fraction 5/15. Cette valeur moyenne de LA est de 46,63 % pour les séricitoschistes d'Ayos et de 33,68 % pour les chloritoschistes de Mbalmayo pour la classe granulaire 10/15 (Onana, 2010). Le faciès leucocrate des migmatites de Yaoundé présente des valeurs de LA de 44,00 % (6,3/10), 45,98 % (10/14), et 46,70 % (10/25). Ces valeurs moyennes de LA sont de 36,70 % (6,3/10), 36,20 % (10/14) et 40,80 % dans le faciès mélanocrate. Les valeurs de coefficients micro

Deval (MDE) et Deval (D) des migmatites de Yaoundé sont de 57,00 % et 1,40 % respectivement, pour la classe granulaire 6,3/10. Pour la classe 10/14, MDE et D ont des valeurs respectives de 29,12 % et 2,75 %.

II.3. Spécifications des latérites en construction routière

Les normes d'utilisation des latérites permettent de sélectionner ces matériaux pour un usage spécifique. Ces normes sont des règles empiriques valables aussi bien pour les routes revêtues que non revêtues (Nzabakurikiza, 2018). Les sols latéritiques utilisables en construction routière sont des latérites contenant une proportion suffisante d'éléments dont les passants au tamis de 2 mm sont supérieurs à 50 % (Karsenty, 2007 *in* Nzabakurikiza, 2018). La classification du Centre d'Expertise du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP, 1984) distingue trois familles de latérites (G1, G2 et G3) d'après leur indice de plasticité, leur pourcentage de fines et la valeur du produit de ces deux paramètres (Fines x IP) (Tab. 2). En dehors de la classification du CEBTP (1984), d'autres classifications ont été proposées en Afrique à l'instar de :

- la classification du Lyon Associates (1971) que reprend la classification génétique (Tockol, 1993). Elle est largement utilisée au Ghana et au Nigéria ;
- la classification ivoirienne qui tient compte du facteur génétique ; elle a été établie par le Laboratoire du Bâtiment et Travaux Publics (Tockol, 1993 ; Bohi, 2008).

Dans les classifications américaines HRB (*Highway Research Board*) ou AASHTO (*American Association for State Highway and Transportation Officials*), les latérites couvrent plusieurs classes. Les sols les plus graveleux sont de classes A-2-6 et A-2-7, tandis que les plus argileux (passant à 80 μm > 35 %) sont de classes A-7-5 et A-7-6. On rencontre parfois des matériaux de classes A-5 et A-6 (DEGN, 1987). L'un des paramètres importants de ces classifications est l'indice de groupe Ig (Robitaille et Tremblay, 1997) qui permet de qualifier les matériaux comme couche d'infrastructure routière.

Les classifications USCS (*Unified Soil Classification System*) et LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) considèrent les graveleux latéritiques comme des sols grenus (Bagarre, 1990). Ils se répartissent entre les classes GC (graviers argileux) et SC (sables argileux), lorsque leur granularité maximale est réduite. Des études ont montré que les graveleux latéritiques offrent un compromis providentiel aux conditions climatiques des pays tropicaux à saisons bien marquées (Bagarre, 1990). Leur plasticité assure une bonne cohésion en saison sèche et leur squelette permet que la portance reste bonne en saison de pluies

Tableau 2. Classification des latérites selon le CEBTP (1984)

Groupe	f x IP	CBR à 95%	Proctor	
			DSM	TE-OPM (%)
G1	< 250	20 – 80	2,10 – 2,50	5 – 8
G2	250 – 600	15 – 40	2,00 – 2,25	7 – 10
G3	600 – 1600	<30	1,90 – 2,20	8 – 12

f : fines (passant au tamis de 80 μm) ; *IP* : indice de plasticité ; *CBR* : California Bearing Ratio ; *DSM* : densité sèche maximale ; *TE-OPM* : teneur en eau à l'optimum proctor modifié.

(Tab. 3) (Bagarre, 1990). L'épaisseur adoptée doit être telle qu'elle ne devienne jamais inférieure à celle requise pour éviter le poinçonnement de la plate-forme. La détermination de cette épaisseur tient compte de l'usure due au trafic et de l'épaisseur minimale nécessaire. Les spécifications liées à l'utilisation des latérites en couches de chaussées sont consignées dans le tableau 4. Selon les recommandations formulées par le CEBTP (1984) et le DEGN (1987), les latérites peuvent être utilisées à différents niveaux du corps de la chaussée :

- en couche de forme pour tous les trafics ;
- en couche de fondation pour les trafics faibles à moyens de classes T1 à T3 et, pour les trafics élevés T4 et T5. Pour les classes de trafic T4 et T5, il est nécessaire de stabiliser les graveleux latéritiques avant leur utilisation en construction routière ;
- en couche de base pour les trafics T1 à T3.

D'un pays à un autre, ces spécifications sont différentes (CEBTP, 1984) et pour la plupart, provisoires.

II.4. Dimensionnement des chaussées

Le dimensionnement des chaussées en Afrique en général, et au Cameroun en particulier, s'est inspiré très largement du « Guide pratique pour le dimensionnement des chaussées dans les pays tropicaux » (CEBTP, 1984). C'est l'un, sinon, le seul document disponible parmi les documents de référence. Il prend en compte la qualité des ressources en matériaux propres au contexte local. Ce document ne pouvait pas à la fois couvrir toute la gamme de matériaux susceptibles d'être utilisés en construction routière (Nzabakurikiza, 2018) et cerner les meilleures conditions d'utilisation des matériaux dans des conditions différentes relatives au climat, au trafic et à l'économie.

Les dégradations prématurées des routes au Cameroun sont dues à plusieurs facteurs : l'insuffisance des tests géotechniques, la mauvaise qualité de mise en œuvre, le manque de personnels qualifiés.

Deux paramètres permettent de dimensionner les structures de chaussées : le CBR de la plate-forme et le trafic (CEBTP, 1984).

II.4.1. Indice portant CBR

Malgré le grand nombre d'essais réalisés depuis que les laboratoires existent, le CBR reste le meilleur paramètre permettant de différencier les sols sur la base de leur résistance au poinçonnement (CEBTP, 1984). La valeur à retenir est la portance CBR des sols mis en œuvre dans les 30 cm supérieurs de la plate-forme (Nzabakurikiza, 2018), au niveau

Tableau 3. Classification des graveleux latéritiques (Bagarre, 1990)

Paramètres de classification	GL1	GL2	GL3
% de fines	15	15 – 25	25 – 35
IP (%)	> 16	> 24	> 28
f x IP	< 250	250 – 600	600 – 1000
CBR (%)	> 30	15 – 40	< 30
DSM	> 2,10	2,00 – 2,25	1,90 – 2,20
TE-OPM (%)	5 – 8	7 – 10	8 – 12

f : fines (passant au tamis de 80 μ m) ; *IP* : indice de plasticité ; *CBR* : California Bearing Ratio ; *DSM* : densité sèche maximale ; *TE-OPM* : teneur en eau à l'optimum proctor modifié.

Tableau 4. Spécifications des graveleux latéritiques utilisés en construction routière (DEGN, 1987)

Graveleux latéritiques	Couche de base	Couche de fondation
Densité sèche OPM	2,00 min	1,90 min
Limite de plasticité (%)	35 max	70 max
Indice de portance (%)	25 max	30 max
Gonflement linéaire	0,3 % min	1 % min
Grains passant à		
38 mm	85 – 100	80 – 100
19 mm	70 – 100	65 – 100
10 mm	50 – 95	50 – 100
5 mm	40 – 90	35 – 100
2,5 mm	30 – 80	25 – 80
0,7 mm	15 – 45	15 – 56
0,8 mm	5 – 20	5 – 35
CBR après 4 jours d'imbibition pour 95 % OPM	80 min	30 min

*OPM : Optimum proctor modifié ; CBR : California bearing ratio; Min : minimum ;
Max : maximum.*

des terrassements en déblais, de la couche supérieure des remblais, du terrain naturel et d'une couche de forme.

La réalisation des chaussées sur les sols de faible portance est un problème majeur pour les ingénieurs et les spécialistes des travaux routiers. Pour la confection des remblais et des couches de forme, de faibles déformations, uniquement, peuvent être admissibles (Dupain *et al.*, 1995). La détermination de la portance du sol, c'est-à-dire sa résistance à la rupture est réalisée par l'essai CBR. En fonction du CBR, il existe sept classes de sols (S1, S2, S3, S4, S5, S6 et S7 ; DEGN, 1987). Les graveleux latéritiques correspondent aux classes S5, S6 et S7 et, les graves argileuses, aux classes S2, S3 et S4.

II.4.2. Trafic

Les classes de trafic sont définies de plusieurs façons, en fonction du degré de précision recherché et en tenant compte des charges potentielles. On distingue :

- le trafic journalier, toutes catégories de véhicules confondues ;
- le trafic cumulé de poids lourds (véhicules définis comme ayant un poids total, en charge, supérieur à 3 tonnes) ;
- le trafic cumulé, calculé selon les équivalences d'essieux tirés des essais AASHTO par Lidoble (CEBTP, 1984). Le trafic en nombre de véhicules par jour dans les régions du Cameroun (Tab. 5) montre que les routes Kumba-Mamfé (RN8) et Loum- Mumbemba (RN16) dans la région du Sud-Ouest ont un trafic moyen journalier de 258 véhicules/jour. Cette valeur élevée pourrait entraîner la dégradation rapide de ces routes après l'entretien courant.

II.5. Corrélations entre caractéristiques génétiques et paramètres géotechniques

De nombreux auteurs ont cherché des relations entre la composition minéralogique de la roche mère et le comportement géotechnique des matériaux dérivés de l'altération de celle-ci. Ces travaux avaient pour but de faciliter la prospection des gisements de latérites, (Mesida, 1987 ; Fall, 1993 ; Nkoumou *et al.*, 2004) et, de prédire leur comportement sur le chantier (Bagarre, 1990 ; Tockol, 1993 ; Onana, 2010). Des corrélations entre les caractéristiques génétiques et les paramètres géotechniques des latérites ont été établies dans de nombreux travaux (Bagarre, 1990 ; Adeyemi, 1995 ; Fall *et al.*, 1994 ; Nkoumou *et al.*, 2004 ; Bohi, 2008 ; Millogo *et al.*, 2008 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2012 ; Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Onana *et al.*, 2015 ; Onana *et al.*, 2017 ; Ndzié Mvindi *et al.*, 2017). Ces travaux montrent que l'essentiel de Fe_2O_3 est contenu dans le squelette des latérites et les chaussées doivent leur

Tableau 5. Trafic moyen journalier par région (en véhicules/jours ; Anonyme, 2015)

Région	Routes			Trafic moyen journalier
	Bitumé	Terre	Rurale	
Adamaoua	171	128	28	114
Centre	2857	1221	101	835
Est	378	440	13	211
Extrême-Nord	530	974	150	723
Littoral	4005	6422	280	3438
Nord	519	232	413	347
Nord-Ouest	998	600	320	506
Ouest	2693	571	527	879
Sud	467	349	155	330
Sud-Ouest	300	102	94	258

bonne portance à cette fraction granulométrique. Les roches mères acides, riches en quartz, produisent des graveleux latéritiques à faibles poids volumiques des grains solides. Les roches basiques, riches en ferromagnésiens, produisent des latérites plus épaisses et plus denses. Les teneurs en Fe_2O_3 et Al_2O_3 des latérites ont des conséquences sur leurs caractéristiques géotechniques, notamment, leur dureté (Ferreira et Correira, 1991 *in* Fall, 1993). Les graveleux latéritiques, avec des teneurs élevées en sesquioxydes ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$) et, faibles, en SiO_2 présentent un comportement mauvais par rapport à ceux ayant des teneurs élevées en SiO_2 et, faibles en $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ (Tockol, 1993). Cet auteur a émis l'hypothèse de déterminer le taux de silicates ou de SiO_2 , à partir duquel les graveleux latéritiques peuvent être acceptés ou rejetés. A cet effet, il a conçu un projet d'abaque complémentaire aux classifications classiques permettant de classer les matériaux latéritiques utilisés en construction routière pour les routes en terre. Des corrélations ont été établies entre la composition minéralogique et les paramètres géotechniques (Nkoumou *et al.*, 2004). Il ressort que, l'hématite renforce la densité sèche et le CBR des latérites alors que le quartz semble les diminuer. Les roches riches en minéraux ferromagnésiens et, plus particulièrement, les roches basiques produisent des latérites plus épaisses et plus dures que celles qui sont acides. Malgré ces résultats, des réserves ont été émises sur la liaison roche mère latérites dérivées. Du fait de leur diversité due à leurs facteurs de formation et à la complexité de leurs processus de formation, les latérites sont des matériaux évolutifs dont les caractéristiques physiques et géochimiques varient d'un lieu à un autre (Tockol, 1993).

Le CBR est le paramètre incontournable pour le dimensionnement des structures de chaussées (Fall *et al.*, 1994 ; Magnan et Massamba Ndiaye, 2015 ; Toll, 2015). Au cours des dernières années, les chercheurs ont utilisé les méthodes statistiques simples (Fall *et al.*, 1994 ; Takisran, 2010 ; Massamba Ndiaye, 2013 ; Toll, 2015 ; Anieka, 2017 ; Nagarej et Suresh, 2018 ; Yato *et al.*, 2018) afin de trouver une technique simple qui permet de l'évaluer. Les résultats de quelques études sont consignés dans le tableau 6. A partir de l'analyse des valeurs du T-test, les différentes caractéristiques texturales et minéralogiques des roches mères ont été jugées responsables des différences significatives observées sur les valeurs CBR des latérites au Sud-Ouest du Nigéria (Adeyemi, 1995). Les valeurs du coefficient de variation des latérites prélevées sur une distance de 39 m montrent une variation des propriétés géotechniques de ces matériaux (Adeyemi et Wahab, 2008). Les corrélations entre le CBR et d'autres paramètres physiques (Adeyemi, 1995; NCHRP, 2004; Toll, 2015; Nagarej et Suresh, 2018) ont été observées en Afrique. A partir des régressions multiparamétriques, des relations entre le CBR et d'autres paramètres physiques (Patel et Desai, 2010 ; Takisran,

Tableau 6. Données des travaux antérieurs sur l'étude du CBR

N°	Auteurs	Paramètres considérés	Equations	Valeurs des coefficients de corrélations/détermination
1	NCHRP (2004)	Sols à grave non plastique	CBR = 5 %, si $D_{60} \leq 0,01$ mm CBR = $28,09(D_{60})^2$, si $0,01 \text{ mm} \leq D_{60} \leq 30$ mm CBR = 95 %, si $D_{60} \geq 30$ mm	$R^2 = 0,84$
		Sols à grave fines et plastiques	CBR = $75/1+0,728(\omega IP)$	$R^2 = 0,67$
2	Satyanarayana et Pavani (2006)	FF = 9,0 – 34,8 %	CBRs = $-0,388F - 0,064LL - 20,38DSM$	R = 0,96
		LL = 22 – 48 %		
		DSM = 1,90 – 2,32		
		CBRs = 12,8 – 56,8 %		
3	Gregory et Cross (2007)	Sols cohérents	CBR = $0,09cu$	
		Sols non-cohérents	CBR = $100qult/6895$	
4	Vinod et Reena (2008)	C = 33 – 65 %	CBRs = $-0,889(W_{LM}) + 45,616$	R = 0,979
		LL = 38,10 – 63,00 %		
		CBRs = 8,9 – 30,4 %		
5	Patel et Desai (2010)	LL = 52,98 – 70,78 %	CBRs = $17,009 - 0,0696Ip - 0,296DSM + 0,0648TE-OPM$	%Erreur = - 2,5%
		LP = 17,09 – 26,8 %	CBRs = $43,907 - 0,093IP - 18,78DSM - 0,3081TE-OPM$	%Erreur = - 5%
		SL = 8,03 – 19,5 %		
		DSM = 1,58 – 1,73 g/cc		
		TEO = 17,23 – 24,70 %		
		IP = 24,19 – 74,78		
		CBRu = 2,80 – 8,94 %		
		CBRs = 1,54 – 4,42 %		
6	Yildirim et Gunaydin (2011)	G = 0 – 78 %	CBR = $0,2353G + 3,0798$	$R^2 = 0,86$
		S = 1 – 49 %	CBR = $-0,1805F + 18,508$	$R^2 = 0,80$
		F = 10 – 99 %	CBR = $0,22G + 0,045S + 4,739DSM + 0,122TEO$	$R^2 = 0,88$
		LL = 20 – 89 %	CBR = $0,62TE-OPM + 58,9DSM + 0,11LL + 0,53LP - 126,18$	$R^2 = 0,63$
		LP = 11 – 43 %		
		DSM = 1,21 – 2,18 g/cc		
		TE-OPM = 7,20 – 40,20 %		
7	Ndzié Mvindi <i>et al.</i> (2017)	Graveleux latéritiques de savane humide	Corrélation inverse entre CBR et < 2mm	$R^2 = 0,7$
		Graveleux latéritiques de savane sèche	Correlation entre DSM and CBR	$R^2 = 0,6$
8	Yato <i>et al.</i> (2018)	DSM, TE-OPM, IP, LP, LL, % Argile+Limon, % Sable et % Gravier et CBR	CBR = $-20,139 - 47,130 \times DSM - 2,895 \times TE-OPM - 0,091 \times LP - 0,055 \times IP + 0,049 \times \% \text{ Gravier} - 0,668 \times \% \text{ Sable} + 0,000 \times \% \text{ argile+Limon}$	$R^2 = 0,841$

F : fines (passant au tamis de 80 μ m) ; s : sable ; G : gravier ; C : compacité ; Dmax : diamètre de tamis pour lequel 60 % de tamisat traverse le tamis ; IP : indice de plasticité ; LP : limite de pasticité ; LL : limite de liquidité ; CBR : California Bearing Ratio ; DSM : densité sèche maximale ; TE-OPM : teneur en eau à l'optimum proctor modifié ; CBRs : soaked CBR ; CBRu : unsoaked California Bearing Ratio ; FF : fine fraction.

2010 ; Yato *et al.*, 2018) ont été établies. Des techniques d'intelligence artificielle ont également prédit les valeurs du paramètre CBR (Bhatt *et al.*, 2014). D'autres auteurs, se servant de régressions simples et de régressions multiples, ont pu déterminer la nature des relations qui existent entre le CBR et d'autres paramètres géotechniques (Satyanarayana et Pavani, 2006 ; Bello, 2012 ; Alawi et Rajab, 2013 ; Yato *et al.*, 2018).

CONCLUSION

La zone d'étude, se localise à proximité des routes nationales 8 (Kumba-Mamfé) et 16 (Loum-Mundemba) dans la région du Sud-Ouest Cameroun. Le climat est de type équatorial à 02 saisons inégalement réparties au cours de l'année. Le réseau hydrographique est de type dendritique. Le socle est constitué de roches volcaniques, sédimentaires et granito-gneissiques. Les latérites sont les matériaux les plus répandus dans la zone étudiée. La diversité des propriétés géotechniques et les corrélations statistiques obtenues ont amené de nombreux auteurs à étudier les latérites à une échelle locale afin de préciser les liens entre leurs caractéristiques génétiques et leurs propriétés géotechniques. Des relations entre le CBR et les autres paramètres géotechniques ont été établies afin de trouver une relation simple pour leur choix en construction routière. Le prochain chapitre présente les matériels et les méthodes retenus dans le cadre de ce travail.

CHAPITRE II.

MATERIELS ET METHODES D'ETUDE

INTRODUCTION

Le présent chapitre est axé sur la démarche, les matériels et les méthodes utilisées. A la suite des enquêtes bibliographiques, les travaux de terrain ont servi à localiser la zone d'étude, décrire les matériaux et prélever des échantillons. Les travaux en laboratoire ont porté sur les analyses pétrologiques, les essais géotechniques et les tests statistiques.

I. ENQUETES BIBLIOGRAPHIQUES

Les études bibliographiques ont consisté en l'exploitation des différentes cartes topographiques et géologiques, articles, thèses et ouvrages scientifiques, dédiés au thème d'étude.

II. METHODES D'ACQUISITION DES DONNEES POUR ANALYSES EXPERIMENTALES

II.1. Méthodes d'acquisition des données sur le terrain

Plusieurs campagnes de prospection sur le terrain ont été nécessaires pour mener à bien les études pétrologiques et géotechniques. Les travaux de terrain ont consisté en une exploration générale et en la sélection des matériaux qui ont par la suite été étudiés dans le détail. Cette phase a nécessité des sondages manuels, des fosses et autres méthodes géologiques de terrain, en vue de déterminer la nature, le type et les caractéristiques physiques des matériaux latéritiques. Les zones prospectées ont été le lieu de prélèvement des quantités suffisantes de matériaux pour les travaux en laboratoire. Les travaux de terrain ont été effectués de décembre 2015 à janvier 2016 et, de décembre 2016 à janvier 2017, à proximité des RN8 (Kumba-Mamfé) et RN16 (Mundemba-Loum). Ces travaux ont été effectués entre les latitudes 4°20' et 5°60' Nord et, les longitudes 8°80' et 9°60' Est (Fig. 4). Une centaine de sondages manuels ont été réalisés et une vingtaine de tranchées (Fig. 5) ont été décrites au cours de ces travaux. Les sondages ont consisté au fonçage de puits rectangulaires de dimensions 1,20 m x 0,8 m (Fig. 6).

Le matériel utilisé comportait un appareil récepteur GPS, des cartes topographiques, une carte géologique à l'échelle 1/50 000 (Feuille Douala-Ouest), une machette, deux pelles, une pioche, une barre-à-mine, un marker, du ruban adhésif, un décimètre, un bloc-note, et des crayons. Les prélèvements ont été effectués par grattage à l'aide d'une pelle dans les horizons argileux superficiel et gravillonnaire. Les tranchées routières ont été rafraichies à l'aide d'une machette et le prélèvement des échantillons a été effectué par simple grattage.

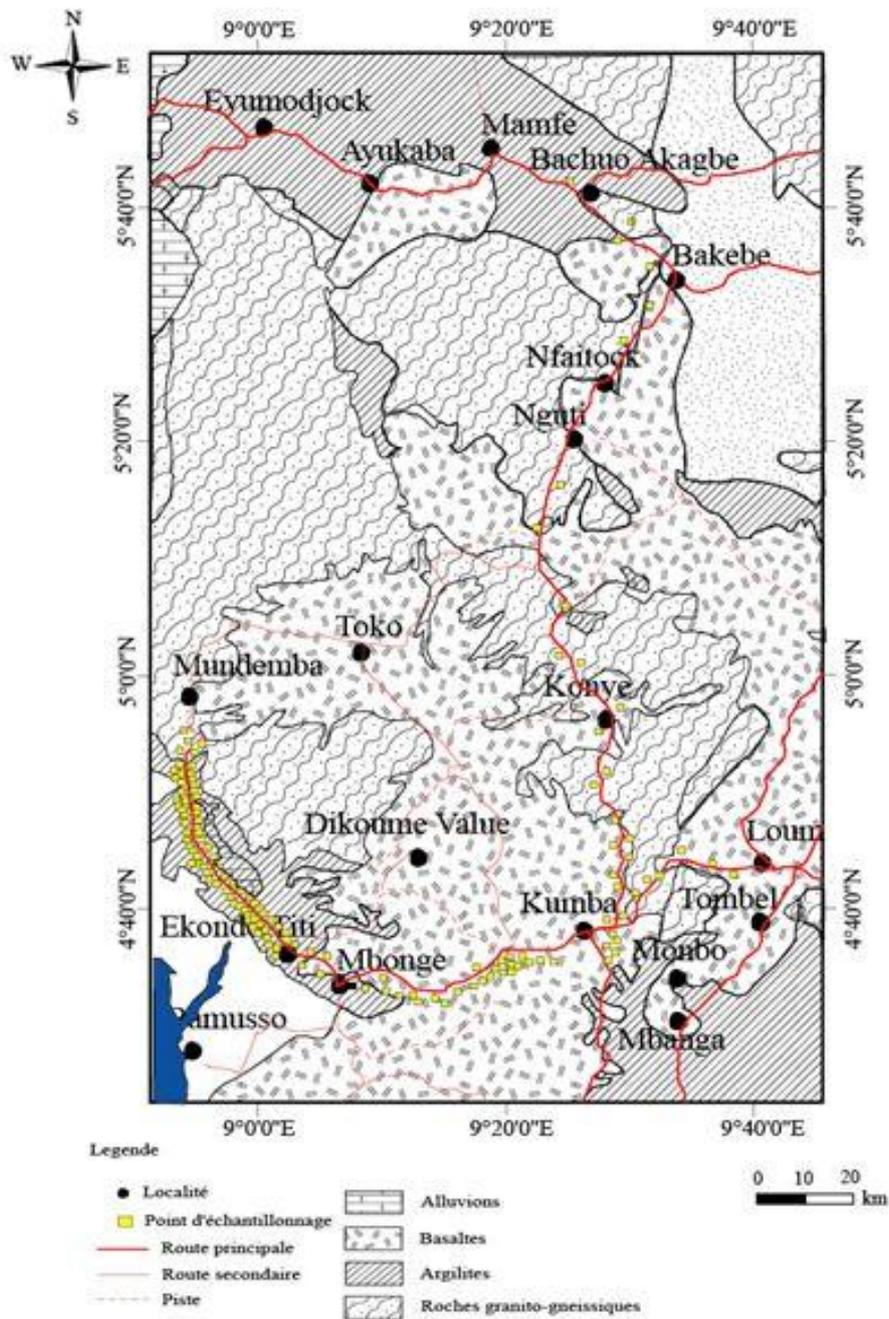


Figure 4. Carte de localisation des points d'échantillonnage (D'après la carte géologique de Douala-Ouest au 1/50 000 ; Dumort, 1968)

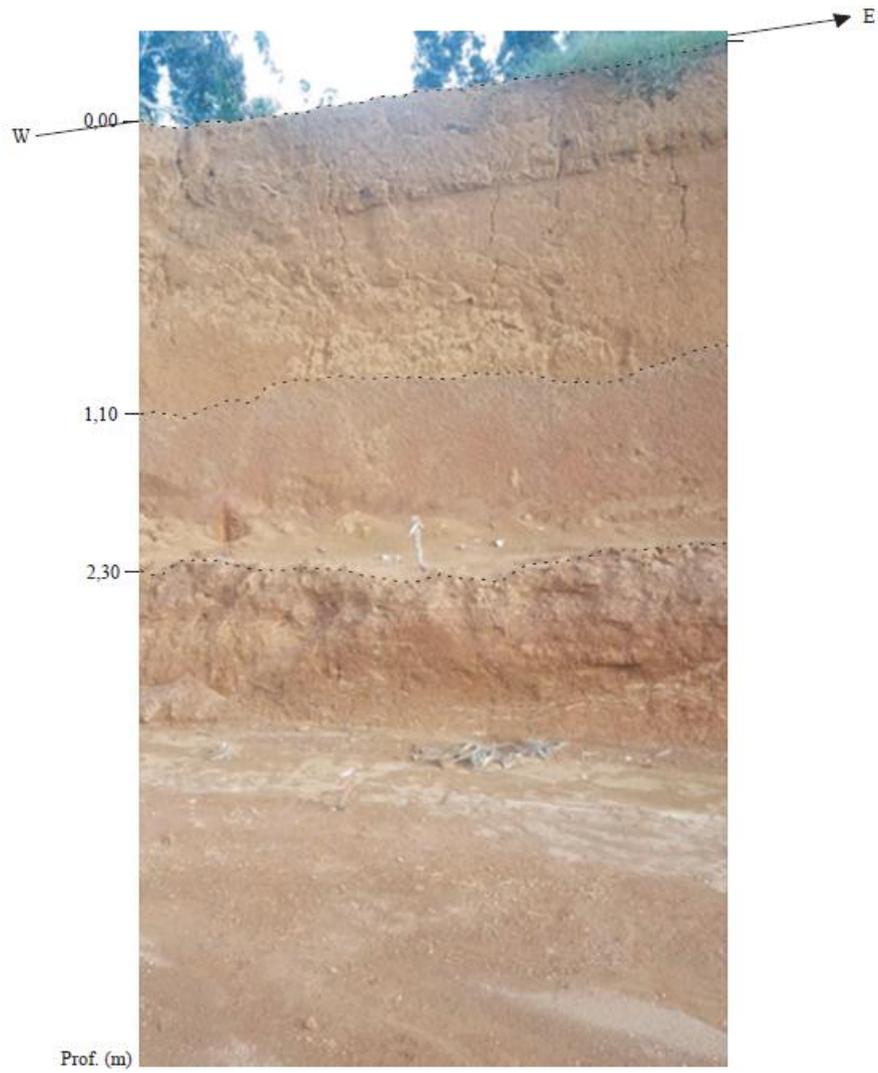


Figure 5. Tranchée routière à proximité de la ville de Nguti sur gneiss.



Figure 6. Puits de reconnaissance à proximité de la ville de Mamfé sur argilites.

Soixante dix-huit échantillons de latérites ont été prélevés sur roches volcaniques, 69 sur roches sédimentaires et, 28 sur roches granito-gneissiques (Fig. 5). Ces échantillons ont été prélevés dans les niveaux gravillonnaires et argileux superficiels, conditionnés dans des sacs, afin d'être soumis aux essais géotechniques. Une masse de 40 à 50 kg de matériaux a été prélevée à cet effet par site.

Les échantillons de latérites destinés aux études géochimiques ont été prélevés dans les niveaux gravillonnaires. Neuf échantillons ont été prélevés sur roches volcaniques et 9 échantillons sur roches sédimentaires (Tab. 7). Ces échantillons ont par la suite été conditionnés dans des sachets en plastique. La masse de l'échantillon est d'environ 100 g. Les sites de prélèvement sont des carrières de latérites situées à proximité des routes nationales RN8 et RN16 (Fig. 7).

II.1.1. Prélèvement des échantillons de roche

Le prélèvement des échantillons de roches en général, a été effectué soit à l'aide d'une massette, soit par simple ramassage dans les carrières. Environ 500 à 2 000 cm³ de volume d'échantillon de roche ont été prélevés aux fins d'études géochimiques et mécaniques.

II.1.2. Identification des échantillons

L'identification des échantillons de latérites a été effectuée à l'aide d'un marqueur indélébile. La nomenclature adoptée pour les échantillons destinés aux analyses géotechniques et statistiques comporte les deux lettres Pk (point kilométrique) auxquelles sont ajoutés les chiffres 0, 1, 2 et 3, indiquant respectivement l'ordre de récolte des échantillons. Par la suite, les échantillons sont triés et classés en fonction de leurs roches mères.

Les échantillons de latérites soumis aux analyses minéralogiques et géochimiques sont désignés par un préfixe constitué des trois premières lettres du nom de la localité où ils ont été prélevés. A certains codes d'échantillons, sont ajoutés les chiffres 1, 2 ou 3, permettant de différencier les échantillons prélevés dans une même localité (Tab. 7).

II.2. Méthodes d'acquisition des données en laboratoire

Les travaux de laboratoire ont consisté aux analyses pétrographiques, minéralogiques, géochimiques et aux essais géotechniques. Les études géotechniques ont été axées sur les essais d'identification et de caractérisation des matériaux latéritiques et, les essais mécaniques, sur les échantillons de roches.

Tableau 7. Localisation et codification des échantillons destinés aux analyses géochimiques

Roche	Localité	Codification	PK correspondant	Coordonnées géographiques	
				X	Y
LRB	Baroumbi 1	Bar 1	PK4	552524,730	510003,911
	Baroumbi 2	Bar 2	PK2	552424,146	508361,036
	Baroumbi 3	Bar 3	PK6	552943,831	512049,123
	Baroumbi 4	Bar 4	PK3	553077,943	509098,653
	Baroumbi 5	Bar 5	PK7	552357,090	513775,819
	Baroumbi 6	Bar 6	PK8	553596,000	514217,000
	Baroumbi 7	Bar 7	PK5	553446,752	510909,169
	Baroumbi 8	Bar 8	PK0	552016,000	507154,000
	Baroumbi 9	Bar 9	PK1	552222,977	507640,182
LRA	Mamfé 1	Mam 1	PK39	542063,396	507601,965
	Mamfé 2	Mam 2	PK40	540310,528	507353,917
	Behind Morduary	Be - Mo	PK32	553044,288	603818,548
	Lake pich	La - Pi	PK34	558335,965	616783,157
	Bissong Abang 1	Bi - Ab 1	PK33	558230,132	611068,146
	Antenna	Ant	PK35	553785,123	621281,083
	Bissong Abang 2	Bi - Ab 2	PK37	546482,608	630186,976
	Highway	Hig	PK38	544279,286	507585,428
	Back-Sonel	Ba - So	PK36	549710,531	625779,008

LRB : latérites dérivées des basaltes ; LRA : latérites dérivées argilites ; PK : point kilométrique.



Figure 7. Carrière de latérites dans la localité de Baroumbi sur basaltes.

II.2.1. Etudes pétrologiques

II.2.1.1. Analyses pétrographiques

Les descriptions macroscopiques et microscopiques des matériaux prélevés ont été effectuées au Département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I. La couleur des échantillons a été déterminée par comparaison visuelle à la gamme des couleurs de la charte Munsell (2000). L'épaisseur des niveaux latéritiques a été déterminée à l'aide d'un décimètre. Les matériaux ont préalablement été imbibés d'eau. Les lames minces de roches saines ont été confectionnées au Laboratoire de pétrographie de l'Institut de Recherches Géologiques et Minières (IRGM) de Nkolbisson à Yaoundé au Cameroun. Les proportions des minéraux ont été déterminées visuellement.

II.2.1.2. Analyses minéralogiques

La diffraction des rayons X (DRX) permet l'identification et la détermination semi-quantitative des principaux minéraux présents dans un échantillon. L'analyse a été effectuée sur les poudres des échantillons de roches saines et de latérites afin de déterminer leur minéralogie. Les matériaux ont été séchés à l'étuve à une température voisine de 50°C. Ils ont par la suite été broyés au Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et Altérologie du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, à l'aide d'une pulvérisette électrique de marque Fritsch.

Les analyses minéralogiques ont été réalisées à l'aide d'un PAN analytical X' PERT PRO utilisant le rayonnement $K\alpha$ de cobalt ($\lambda = 1,7890 \text{ \AA}$) au Laboratoire des Géosciences de l'Ontario Geological Survey à Sudbury (Canada). Les spectres ont été enregistrés à une vitesse de 0,01°/s sur une plage 2θ variant entre 5° et 85°C. La tension d'accélération est de 40 kv et l'intensité est de 45 mA. Le dépouillement des diffractogrammes obtenus est effectué à l'aide du logiciel Excel et des fiches PDF (Powder Diffraction File) de Brown et Brindley (1980).

II.2.1.3. Analyses géochimiques

La composition géochimique des matériaux étudiés a été déterminée par spectrométrie de fluorescence X au Laboratoire des Géosciences de l'Ontario Geological Survey à Sudbury (Canada). Afin de déterminer la perte au feu et d'éliminer les éléments volatiles et le fer oxydé, les poudres de roche et de latérites ont successivement été chauffées à 105°C sous azote et, à 1000°C, sous oxygène. Les concentrations en éléments majeurs ont été déterminées après chauffage et dilution des échantillons. Les poudres d'échantillons 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 est SY-4-0397, tandis que les normes internes au laboratoire sont MRB-29-8536, MRB-29-8537 et MRB-32-1411. La teneur en fer ferrique a été obtenue par soustraction de la teneur en fer ferreux pondéré à 1,111 à la teneur en fer total.

II.2.2. Essais géotechniques

Les essais géotechniques ont été réalisés au Laboratoire National de Génie Civil du Cameroun (Labogénie), aux Laboratoires de Génie civil de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de l'Université de Yaoundé I et de Géologie de l'Ingénieur et d'Altéologie de l'Université de Yaoundé I (Cameroun). Il s'agit notamment, des essais mécaniques sur roches tels les essais de détermination du coefficient micro Deval (MDE) et du coefficient Los Angeles (LA) et, sur les latérites, des essais d'identification et de caractérisation.

II.2.2.1. Essais sur roche

Les essais sur roches ont été effectués sur les classes granulaires 4/6,3 – 6,3/10 et 10/14. Il s'agit des essais de résistance ou tests d'abrasion qui permettent de caractériser les matériaux sous l'effet de la friction ou de l'usure. Ces essais précisent les caractéristiques intrinsèques des matériaux du point de vue routier ou ferroviaire. Ils ont été pratiqués uniquement sur les échantillons de roches volcaniques. Les roches métamorphiques n'ayant pas pu être prélevées sur le terrain, mais déduites des observations des profils d'altération sur tranchées routières.

II.2.2.1.1. Essai Micro Deval : résistance à l'usure

L'essai Micro Deval à eau (MDE) s'effectue sur des granulats choisis parmi les classes granulaires 4 à 14 mm et 25 à 50 mm, avec une charge abrasive adaptée à la classe granulaire testée. L'essai Micro Deval a été réalisé selon la norme NF EN 1097-1 (AFNOR, 1996). Dans la pratique, l'essai consiste à introduire 500 g de matériau de classe granulaire connue dans un anneau cylindrique en acier. L'ensemble est ensuite soumis à 12 000 rotations, à une vitesse de 100 tours/min. A la fin de la rotation, l'échantillon est passé au tamis de 1,6 mm,

afin d'éliminer les éléments (1,6 mm) formés durant l'essai. Le refus du tamis est ensuite séché à l'étuve à 105°C pendant 24 h avant d'être repesé. On note la masse m obtenue à la fin de l'essai. Le coefficient Micro Deval représente la perte en poids ou en masse exprimée en pourcentage. Sa valeur est donnée par la relation suivante :

$$\text{MDE} = [(500-m) / 500] \times 100 \quad (1)$$

MDE = coefficient Micro Deval

m = masse de l'échantillon sec retenu au tamis de 1,6 mm (g).

Le coefficient MDE est d'autant plus élevé que le matériau est sensible à l'usure. Par ailleurs, la corrélation suivante a été établie entre le coefficient Deval (D) et MDE (Grignac *et al.*, 1993) :

$$D \times \text{MDE} = 80 \quad (2)$$

II.2.2.1.1.2. Essai Los Angeles : résistance aux chocs

L'essai Los Angeles permet de déterminer la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. Cet essai peut se substituer à l'essai de fragmentation dynamique. Le mode opératoire est celui de la norme NF EN 1097-2 (AFNOR, 1998). Ce mode opératoire exige de charger 5 000 g de granulats (P) dans un cylindre d'acier, auxquels on ajoute des boulets sphériques de 5 cm de diamètre pesant chacun 445 g. L'échantillon est préalablement lavé, homogénéisé, tamisé et séché à l'étuve à 105°C. Après 500 révolutions du cylindre, le matériau obtenu est passé au tamis de 1,6 mm et le refus séché à l'étuve à 105°C pendant 24 h. Le poids P' de ce refus permet de calculer le coefficient Los Angeles (LA) :

$$LA = (P'/P) \times 100 \quad (3)$$

II.2.2.2. Essais sur les latérites

II.2.2.2.1. Poids volumique des grains solides

Le poids volumique des grains solides est obtenu en multipliant la densité réelle (d_r) par le poids volumique de l'eau (γ_s). Sa détermination se fait par référence à la norme NF P 94-054 (AFNOR, 1991).

II.2.2.2.2. Granulométrie

La granulométrie a été effectuée par tamisage à sec et par sédimentation. L'analyse granulométrique par tamisage consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon,

en utilisant une série de tamis emboîtés les uns dans les autres (Dupain *et al.*, 1995). Cet essai a été réalisé selon la norme NF P 94–056 (AFNOR, 1990c). L'analyse granulométrique par sédimentation consiste à laisser une suspension de particules solides se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau au repos sous l'effet de la gravité. 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 des grains de chaque diamètre. Cette analyse a été réalisée selon la norme NF P 94–057 (AFNOR, 1992) (Dupain *et al.*, 1995).

II.2.2.2.3. Limites d'Atterberg et indice de plasticité

Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol. Ces limites d'Atterberg permettent de prévoir le comportement des sols, en particulier sous l'action des variations de la teneur en eau (Dupain *et al.*, 1995). La différence entre ces deux paramètres permet de trouver la plasticité des matériaux caractérisée par l'indice de plasticité (IP).

La limite de liquidité (LL) a été déterminée selon la méthode du disque de Casagrande et, la limite de plasticité (LP), selon la méthode du rouleau. Les essais ont été réalisés selon la norme NF P 94–051 (AFNOR, 1993).

II.2.2.2.4. Classification des matériaux

Les systèmes de classification HRB (*Highway Research Board*) et USCS (*Unified Soil Classification System*) présentés en annexe ont été utilisés. Ces deux systèmes sont basés sur la granularité et sur les limites de consistance des sols. Ces classifications consistent à grouper les sols aux caractéristiques semblables.

II.2.2.2.5. Paramètres dérivés

Les paramètres dérivés permettent d'évaluer la contribution effective de la plasticité et des fines à la performance de tous les matériaux qui dépendent des proportions en fines (Charman, 1988 ; Nwaiwu *et al.*, 2006). Ces paramètres sont le module de classement (G_m), l'activité des colloïdes de Skempton (A_c), le produit de plasticité (P_p), le module de plasticité (P_m) et le gonflement potentiel (ε_s). Ils sont définis ainsi qu'il suit :

$$- G_m = [300 - (\% \leq 2 \text{ mm} + \% < 425 \mu\text{m} + \% < 75 \mu\text{m})]/100 ; \quad (4)$$

$$- P_m = IP \times \text{pourcentage des passants au tamis } 425 \mu\text{m} \text{ (Charman, 1988)} ; \quad (5)$$

$$- P_p = IP \times \text{pourcentage des passants au tamis } 75 \mu\text{m} \text{ (Charman, 1988)} ; \quad (6)$$

- $\varepsilon_s = 1 \times 10^{-5} \times PI^{2.24}$ (Millogo *et al.*, 2008) ; (7)

- $A_C = IP \times$ pourcentage des passants au tamis 2 μm . (8)

II.2.2.2.6. Essai proctor modifié

L'essai Proctor a pour objectif de déterminer la teneur en eau optimale (TEO) et la densité sèche maximale (DSM), pour un compactage normalisé d'intensité donnée. Il consiste à compacter de façon identique les échantillons d'un même sol avec des teneurs en eau différentes. On constate que la densité sèche maximale varie et passe par un maximum pour une teneur en eau déterminée dite « optimale ». Il existe deux types d'essais Proctor. Selon l'intensité de compactage utilisée, l'essai sera appelé essai Proctor normal ou essai Proctor modifié. L'essai choisi pour la présente étude est l'essai Proctor modifié car il est recommandé pour les sols pulvérulents. Cet essai a été réalisé selon la norme NF P 94-093 (AFNOR, 1999).

II.2.2.2.7. Portance CBR

Les performances exigées pour les différents éléments du corps d'une chaussée sont fonction d'un essai normalisé, l'essai CBR. Le principe de cet essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique de 19,35 cm² de section, pour le faire pénétrer à la vitesse de 1,27 mm/mn dans une éprouvette de sol. Les éprouvettes ont été immergées pendant 04 jours avant leur poinçonnement sur une presse universelle Labotest couplée à un manomètre permettant de lire la déformation de l'éprouvette en fonction de l'enfoncement du piston. Cet essai a été effectué selon la norme NF P 94-078 (AFNOR, 1997).

III. METHODES D'EXPLOITATION DES DONNEES D'ANALYSES

EXPERIMENTALES

III.1. Méthodes d'exploitation des données minéralogiques

L'exploitation des diffractogrammes des rayons X a été effectuée qualitativement et semi-quantitativement. La méthode qualitative consiste à rechercher les minéraux présents dans le matériau analysé à partir des pics émis par ces derniers. Les abaques de Brown et Brindley (1980) ont été utilisés à cet effet. La méthode quantitative adoptée est celle des aires de pics. Elle 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 :

$$P_i = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n \frac{A_p}{N_i} \quad (9)$$

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. Quantification des processus d'altération

III.2.1.1. Rapports, indices et paramètres de quantification de l'altération

III.2.1.1.1. Rapport S/R

Le rapport S/R est le rapport pondéral entre la teneur en SiO_2 contenue dans le matériau et les teneurs en sesquioxydes ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$). Ce rapport permet de définir le degré de latéritisation des matériaux dans un profil de sol :

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

III.2.1.1.2. Indice d'altération chimique

L'indice d'altération chimique (CIA ; *Chemical Weathering Index* ; Nesbitt et Young, 1982) est le plus fréquemment utilisé pour caractériser l'évolution chimique des sols ou des sédiments (Onana *et al.*, 2016 ; Nyassa Ohandja *et al.*, 2020). Le rapport molaire permettant de calculer les valeurs de ce paramètre est :

$$\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100 \quad (10)$$

où : CaO^* = quantité de CaO présente uniquement dans les silicates.

Cet indice permet d'évaluer la mobilité des cations (Ca^{2+} , Na^+ et K^+) par rapport à Al^{3+} . Un matériel frais, non altéré, présentera un CIA faible (~ 50 %). Les valeurs élevées de CIA (> 80 %) indiquent une altération intense du matériau étudié. Sa valeur maximale est égale à 100 %.

III.2.1.1.3. Indice mafique d'altération

L'indice mafique d'altération (MIA : *Mafic Index of Alteration*) vient en complément

à l'indice d'altération chimique car, il étend l'équation de CIA, pour inclure les éléments mafiques Mg et Fe (Babechuck *et al.*, 2014). En effet, beaucoup de minéraux ferromagnésiens sont sensibles aux intempéries, entraînant une perte en Mg dans les profils d'altération. Le devenir du fer lors de l'altération de la plupart des minéraux mafiques est lié aux réactions d'oxydoréduction. En milieu oxydant, le fer est généralement retenu par la formation d'oxydes ou hydroxydes de fer ferrique (Fe^{3+}) hautement insolubles (Driese, 2004). Le fer total est considéré comme élément immobile avec Al. Le calcul de MIA (Babechuck *et al.*, 2014) est donné par la relation :

$$\text{MIA}_{(O)} = 100 \times [(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_{3(T)}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_{3(T)} + \text{MgO} + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \quad (11)$$

II.2.1.1.4. Indice d'altération de Parker

L'indice d'altération de Parker (WIP) s'applique mieux à un profil d'altération développé sur une roche felsique hétérogène. Il prend en compte les cations basiques, les éléments les plus mobiles, ce qui permet d'obtenir un contraste important entre les valeurs calculées pour la roche et celle du profil d'altération. La contrepartie de n'utiliser que les cations est que le WIP peut rapidement tomber à zéro ou ne plus évoluer dans les profils très altérés à l'instar des bauxites ou des ferricrètes. Les données sont en pourcentages molaires.

$$\text{WIP} = 100 \times [(2\text{Na}_2\text{O}/0,35) + (\text{MgO}/0,90) + (2\text{K}_2\text{O}/0,25) + (\text{CaO}/0,70)] \quad (12)$$

L'indice WIP prend en compte la mobilité individuelle des cations (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ et K^+) en fonction de la force de leur liaison avec les atomes d'oxygène. Il est supérieur à 100 pour un matériel frais et descend à zéro lorsqu'il n'y a plus de cations.

III.2.1.1.5. Indice de latéritisation

La connaissance des indices CIA et MIA ne permet pas à elle seule de mesurer les étapes de l'altération chimique. Une autre approche est basée sur la quantification du phénomène de latéritisation (Babechuk *et al.*, 2014). Au cours de ce phénomène, la dissolution du quartz, la formation de la kaolinite et l'enrichissement des oxydes de fer, sont les processus dominants ayant principalement comme conséquence une perte relative en Al, Si et Fe. La latéritisation caractérisée par l'indice de latéritisation (IOL : Index of Laterisation) est définie en utilisant les oxydes SiO_2 , Al_2O_3 et $\text{Fe}_2\text{O}_{3(T)}$ comme l'indique l'équation :

$$IOL = 100 \times [(Al_2O_3 + Fe_2O_{3(T)}) / (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_{3(T)})] \quad (13)$$

Les données des oxydes sont en pourcentages massiques.

L'indice IOL complète le diagramme ternaire SAF (Babechuk *et al.*, 2014).

III.2.1.1.6. Perte au feu

La teneur en éléments volatiles d'un échantillon, mesurée par la perte au feu, est proportionnelle à la quantité de minéraux hydratés. Pendant l'altération chimique, les minéraux primaires magmatiques, en grande partie anhydres, sont remplacés, par les phyllosilicates (smectites, illites et kaolinites). La perte au feu est un paramètre utile pour évaluer le degré d'altération (Duzgoren-Aydin et Aydin, 2003 *in* Ndzié Mvindi, 2019), bien que la minéralogie contrôle en fin de compte le degré d'hydratation (Duzgoren-Aydin *et al.*, 2002).

III.2.1.2. Diagrammes A – CN – K et SAF

Le diagramme ternaire A – CN – K ($Al_2O_3 - CaO^* + Na_2O - K_2O$) permet de suivre l'évolution des plagioclases et des feldspaths potassiques, de mesurer la vitesse de conservation des matériaux d'altération alumineux et d'identifier les effets de l'enrichissement en potassium dans les matériaux (Fedo *et al.*, 1995). Le diagramme ternaire SAF ($SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_{3(T)}$) permet d'illustrer les différents degrés de l'altération au sein des matériaux. A ces diagrammes s'associent CIA et IOL, afin de pouvoir déterminer d'une part le degré de kaolinitisation et, d'autre part, le degré de latéritisation des matériaux.

III.2.1.3. Approche normative

L'approche normative est un moyen globalisant et sans invariant, qui s'affranchit de la référence à la roche mère (Ekodeck et Kamgang 2002, 2011). La méthode débouche sur la détermination de 07 paramètres altérologiques des roches silicatées qui sont de trois types :

- les paramètres d'enrichissement : il s'agit de prédominance (PPFAL) des indices d'alumine (IAL) et de fer ferrique (IFL), et (2) l'indice d'induration potentielle (IIP) dont les formule sont les suivantes :

$$PPFAL = \frac{(Gibb + Boeh + Cor)}{Goethite + Hematite} \quad (14)$$

$$IAL = \frac{(Gibb + Boeh + Cor)}{Gibb + Boeh + Cor + Goe + Hem + Co} \times 100 \quad (15)$$

$$IFL = \frac{(Goe + Hem)}{Gibb + Boe + Cor + Goe + Hem + Co} \times 100 \quad (16)$$

$$IIP = \frac{(\text{Oxydes} + \text{Hydroxydes de } Fe^{3+}, Al^{3+}, Mn^{2+})}{\text{Tous les minéraux}} \times 100 \quad (17)$$

Boeh : boehmite ; 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 :

$$Co = \%aT - (\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3) \quad (18)$$

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

%Al₂O₃ : teneur initiale en alumine,

%Fe₂O₃ : teneur initiale en fer ferrique ;

- les paramètres d'appauvrissement du milieu d'altération prenant en compte l'appauvrissement des éléments mobiles sous l'effet de l'hydrolyse et de la lixiviation, avec formation de nouvelles phases minérales. Il s'agit de IRLP et DVRAR :

$$ILP = \frac{(Gibb + Boeh)100 + (Kand)75 + (Sil.al Ca.alc)50 + (Sil.al FeMg)25}{Gibb + Boeh + Cor + Sil} \quad (19)$$

$$DVAR = \frac{[(Gibb + Boeh + Si.am)100 + (Kndt)75] + ss[(c-a)50 + (f-m)25]}{(Gibb + Boeh + Cor + ss + sp)} \quad (20)$$

Boeh : boehmite ; Kand : kandites ; Sil : silicates ; Sil.al : silicates d'altération ;

Ca.alc : calcoalcalins ; FeMg : ferromagnésiens ;

- les paramètres de caractérisation du milieu : il s'agit de IRP ou degré virtuel d'hydromorphie.

$$ICP = \frac{(\text{Silicates} - \text{Kandites})}{Gibb + Cor + \text{Silicates}} \times 100 \quad (21)$$

Les données obtenues peuvent être analysées à l'aide de diagrammes d'interprétation et de caractérisation tels que les diagrammes triangulaires et/ou carrés (Ekodeck et Kamgang 2002, 2011). Ces diagrammes permettent des caractérisations ponctuelles, des études comparatives, évolutives et prospectives dans des domaines aussi variés que la géologie appliquée au génie civil ou la recherche minière.

III.3. Méthodes d'exploitation des données géotechniques

L'exploitation des résultats d'analyses géotechniques passe par l'utilisation des abaques spécifiques (abaque de plasticité de Casagrande, abaques de spécification des matériaux dans les fuseaux granulométriques pour couches de base et couches de fondation en construction routière). Cette exploitation compare également les résultats obtenus aux spécifications définies par les normes AFNOR (Association Française de Normalisation) et par les documents de référence tels, le guide de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux (CEBTP, 1984) et les directives et recommandations des études générales au Cameroun (DEGN, 1987, 1988).

III.4. Méthodes d'étude statistique des données

Les latérites étudiées proviennent de l'altération météorique de 03 types de roches mères. Ces roches mères sont les basaltes, les argilites et les gneiss.

Les latérites dérivées des basaltes sont encodées LRB, celles issues des argilites, LRA et, celles provenant des gneiss, LRG. Les analyses statistiques des individus, échantillons de latérites soumis aux essais géotechniques et analyses pétrologiques, et des variables, paramètres géotechniques et pétrologiques, ont été effectuées.

Pour les individus, il s'agit de :

- 175 échantillons de latérites soumis aux essais géotechniques ;
- 18 échantillons soumis aux analyses géochimiques.

Pour les variables, elles sont représentées par :

- 18 paramètres géotechniques qui sont : poids spécifique (γ_s), graviers (> 5 mm), sables ($0,075-2$ mm), fines (< 80 μ m), argiles (< 2 μ m), squelette (< 2 mm), mortier (< 425 μ m), LL, LP, indice de plasticité (IP), Gm, Pm, Pp, Ac, ϵ_s , TE-OPM, DSM et CBR ;
- 06 paramètres minéralogiques : quartz, kaolinite, hématite, gibbsite, anatase et muscovite ;
- 12 paramètres géochimiques et 5 paramètres d'altération : SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O_{3(T)}, FeO, MgO, MnO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅, PF, CIA, PIA, MIA_(O), WIP et S/R.

III.4.1. Choix de l'analyse

Les matériaux latéritiques dans la présente étude, sont considérés comme des individus actifs et, les paramètres (géotechniques et géochimiques), comme des variables actives. Etant donné que toutes les variables sont quantitatives, la méthode statistique adoptée est l'analyse en composantes principales (ACP) réalisée à partir des logiciels Spadv55 et XLSTAT version

2014.5.03. L'objectif de l'ACP est de revenir à un espace n , de dimension réduite, en déformant le moins possible la réalité. Il s'agit d'obtenir le résumé le plus pertinent possible des données initiales (Baccini, 2010).

III.4.2. Analyse descriptive

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

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

$$\text{Moyenne} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (22)$$

$$\text{Variance} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (23)$$

$$\text{Ecart - type} = \sqrt{\text{variance}} \quad (24)$$

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

Le coefficient de variation (CV) est une mesure relative de la dispersion des données. Il est donnée par la formule :

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

Rarement utilisé, il a cependant des propriétés importantes. Le coefficient de variation (1) ne dépend pas des unités choisies, (2) permet d'apprécier la représentativité de la moyenne par rapport à l'ensemble des données, (3) permet d'apprécier l'homogénéité d'une série d'observations : une valeur de CV inférieure à 15 % traduit une bonne homogénéité de cette distribution et (4) peut être utilisé pour comparer deux séries d'observations dont les moyennes sont des ordres de grandeur très différents car, dans ce cas, la comparaison des variations peut conduire à des conclusions erronées.

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

III.4.3. Analyse en composantes principales

L'ACP est la méthode de base de l'analyse des données. Elle permet de s'intéresser à la structure d'ensemble des individus observés sans toutefois chercher à déduire des lois normales pour la population dont l'analyse est issue (Fall, 1993). L'ACP affine les résultats obtenus après l'analyse descriptive, dégage les assemblages (régressions) sur les individus et les variables. Elle établit également les corrélations statistiquement significatives entre les différents paramètres et/ou variables. L'un des résultats de l'ACP est le cercle de corrélations qui permet d'interpréter les composantes principales et de repérer rapidement les groupes de caractères liés entre eux ou opposés.

III.4.4. Analyse de régression

L'analyse de la régression est une méthode statistique pour la modélisation paramétrique des suites de variables aléatoires indépendantes et non stationnaires. Elle est utilisée pour décrire et analyser les relations entre les données. Elle s'intéresse à la détermination des facteurs significatifs, à la prédiction/simulation des variables et à la détection des changements. Le principe de la régression linéaire est de modéliser une variable dépendante quantitative Y , au travers d'une combinaison linéaire de p variables explicatives quantitatives, X_1, X_2, \dots, X_p . Le modèle déterministe, ne prenant pas en compte d'aléa, s'écrit pour une observation i (Ndzié Mvindi, 2019). Afin de mesurer l'adéquation géométrique du modèle aux données le coefficient de détermination R^2 est déterminé. Le coefficient de détermination ou la proportion de variance expliquée est une mesure de corrélation entre les variables explicatives et les réponses. Plus le R^2 est proche de 1, plus le modèle représente bien les données. Les valeurs de R^2 inférieures à 1, entraînent des tendances de corrélation.

III.4.5. Analyse factorielle discriminante

L'analyse factorielle discriminante (AFD) est une méthode descriptive et explicative, apparentée à l'ACP. Elle s'applique à des données quantitatives sur lesquelles une typologie ou partition est déjà définie. L'AFD permet de produire une structure permettant la mise en évidence de liens hiérarchiques entre individus ou groupes d'individus.

Dans la présente étude, la nature de la roche a été retenue comme paramètre qualitatif qui permettra de discriminer les variables quantitatives afin d'obtenir des partitions des latérites. Seulement, il s'agit d'être extrêmement prudent pour cette modalité. Car, concernant la nature de la roche parentale ayant généré les matériaux latéritiques, il s'agit d'être très critique car en zone sédimentaire, un profil latéritique peut naître d'un apport allochtone ou autochtone.

III.4.6. Classification hiérarchique en composantes principales

La classification hiérarchique en composantes principales (CHCP) a pour objectif de répartir les éléments en groupes, c'est-à-dire d'établir une partition de cet ensemble (Chessel *et al.*, 2004). Chaque groupe devant être le plus homogène possible. Dans la classification hiérarchique, on ne se contente pas d'une simple partition, mais on cherche une hiérarchie des parties qui constituent un arbre binaire appelé « dendrogramme ». Le principe de la CHCP est de rassembler des individus selon un critère de ressemblance défini au préalable qui s'exprimera sous la forme d'une matrice de distances. Cette matrice exprime la distance existant entre les individus pris deux à deux. Deux observations identiques auront une distance nulle. Plus les 02 observations seront dissemblables, plus la distance sera importante. La CHCP va ensuite rassembler les individus de manière interactive afin de produire un dendrogramme ou arbre de classification. La classification est ascendante car elle part des observations individuelles. Elle est hiérarchique parcequ'elle produit des classes ou groupes de plus en plus vastes, incluant des sous-groupes en leur sein. En découpant cet arbre à une certaine hauteur choisie, on produira la partition désirée.

CONCLUSION

Les travaux de terrain ont permis de localiser, d'identifier et de collecter les matériaux rocheux et latéritiques situés à proximité des routes nationales 8 (Kumba - Mamfé) et 16 (Loum - Mumdemba) au Sud-Ouest Cameroun. Dix huit échantillons de latérites issues de roches volcaniques et sédimentaires ont été collectés aux fins d'analyses géochimiques en laboratoire. Cent soixante quinze échantillons de latérites dérivés de roches volcaniques, sédimentaires et granito-gneissiques ont été prélevés en vue des essais géotechniques. Les travaux en laboratoire ont porté sur les analyses pétrographiques, minéralogiques et géochimiques d'une part et, d'autre part, sur les essais d'identification et de caractérisation des matériaux. Les études statistiques ont été menées sur les variables et/ou individus afin de trouver les assemblages entre les paramètres, et de regrouper les latérites en classes présentant

des caractéristiques géotechniques similaires. L'étude de la régression multiparamétrique du CBR a marqué la fin des investigations de laboratoire. Les analyses et essais effectués, tant sur le terrain qu'en laboratoire, ont abouti à des résultats qui sont consignés dans les prochains chapitres.

CHAPITRE III.

PETROLOGIE DES MATERIAUX

INTRODUCTION

Le présent chapitre a pour objet l'étude pétrologique des roches et des latérites de la zone d'étude. Il s'agit de l'étude pétrographique, minéralogique et géochimique des roches volcaniques et sédimentaires d'une part et, d'autre part, de celles des latérites.

I. PETROLOGIE DES ROCHES

I.1. Pétrologie des roches volcaniques

I.1.1. Pétrographie

La roche a été prélevée dans la carrière de Barombi (Fig. 8) dans la ville de Kumba. Elle affleure sous forme de blocs de dimensions variables. Elle est sombre, massive (Fig. 9) et présente quelques taches blanches (5 %), probablement des feldspaths. La partie sombre représente plus de 80 % de la roche. Les minéraux observables à l'œil sont les minéraux ferromagnésiens (amphiboles et pyroxènes) et l'olivine.

Au microscope polarisant, la roche étudiée présente une texture microlitique porphyrique (Fig. 10). Elle est caractérisée par la présence des phénocristaux de plagioclase, de pyroxène, d'olivine et de minéraux opaques noyés dans une mésostase.

L'olivine (10 – 20 %) se présente en phénocristaux (> 1 mm) et en microcristaux disséminés dans la mésostase (Fig. 10). Les phénocristaux sont automorphes et parfois altérés. Ils sont parcourus par de nombreuses craquelures irrégulières souvent subparallèles qui constituent le point de départ de leur altération en iddingsite ou en serpentine. Les microcristaux sont sub-automorphes et se présentent en prismes, en sections losangiques ou rectangulaires, et ont une taille comprise entre 0,4 et 1 mm. Les olivines sont également présentes dans la mésostase, en petits cristaux carrés ou losangiques (< 0,2 mm), automorphes à sub-automorphes.

Les plagioclases, abondants dans la roche (25 – 35 %), représentent l'essentiel des microlites. Leurs formes sont variables. Les phénocristaux sont automorphes, de tailles comprises entre 1 et 1,3 mm. A certains endroits, ces phénocristaux sont regroupés en amas et présentent quelques fois des inclusions opaques.

Les pyroxènes représentent environ 5 à 10 % des minéraux de la roche. Les phénocristaux présentent des formes sub-automorphes. Ces phénocristaux renferment des inclusions d'opaques, d'olivine et de microlites de plagioclases. L'altération des pyroxènes va du cœur vers la périphérie.

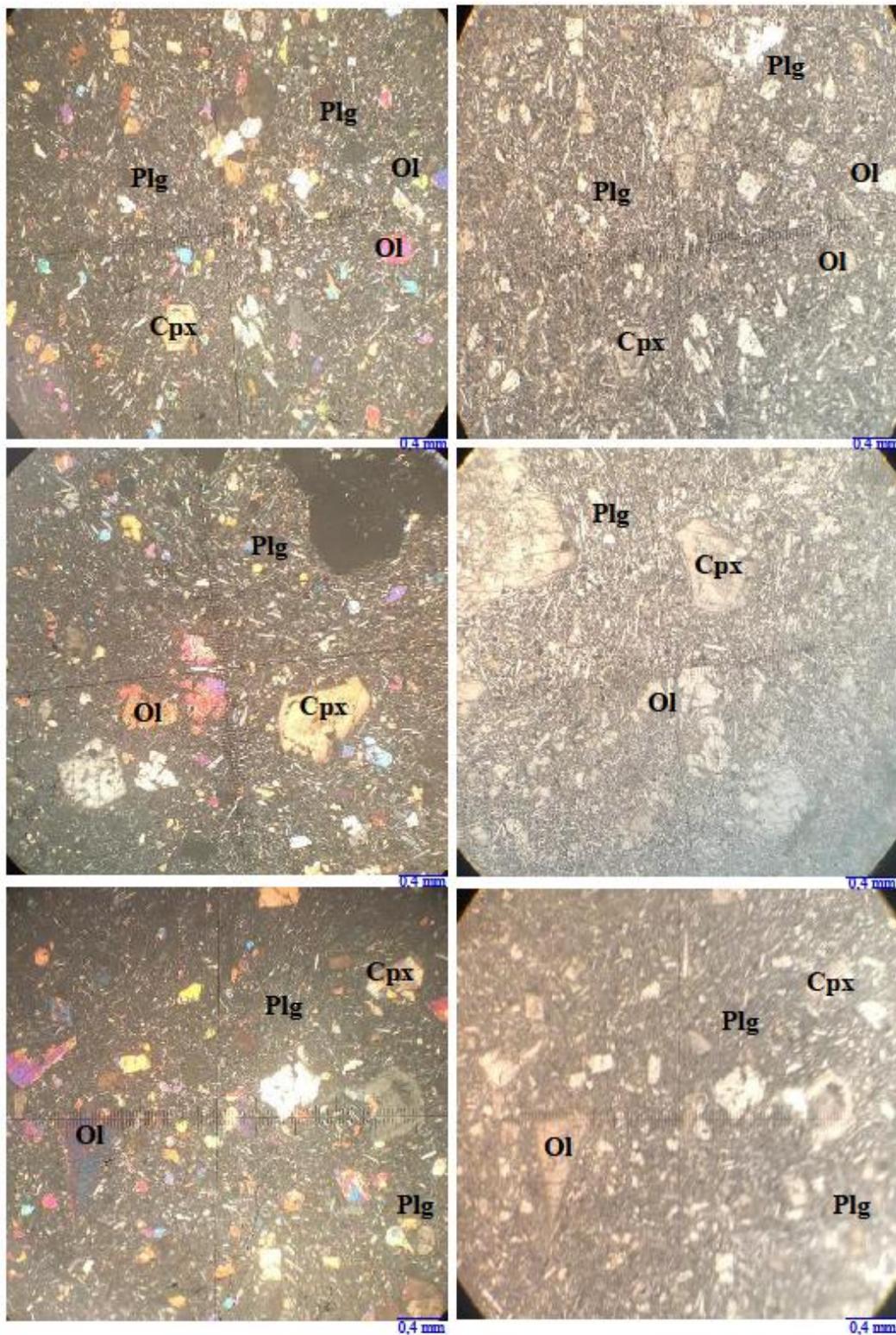
La biotite se présente sous forme de paillettes sombres. Les cristaux de biotite sont parfois déformés et se retrouvent en inclusions dans les amphiboles. Les minéraux opaques



Figure 8. Vue partielle de la carrière de basaltes de Baroumbi



Figure 9. Blocs de basaltes dans la zone d'étude



(a) LPA

(b) LPNA

Plg : Plagioclase ; Ol : Olivine ; Cpx : Clinopyroxène (Abréviation d'après Whitney et Evans, 2010)

Figure 10. Microphotographies des basaltes du secteur d'étude

(12 %) sont des granules disséminés dans la pâte. Leur taille est comprise entre 0,05 et 0,10 mm. Le plus souvent, ils sont en inclusion dans d'autres minéraux. La mésostase est très finement cristallisée et de couleur grise. On y rencontre par ordre d'abondance les plagioclases, l'olivine, les pyroxènes et les opaques. La roche est un basalte.

I.1.2. Minéralogie

Les analyses qualitatives et quantitatives du diffractogramme (Fig. 11) montrent que le basalte étudié est constitué de plagioclases (26 %), d'olivines (14 %), de pyroxènes (20 %), de biotite (3 %), d'amphibole (12 %) et de serpentine (4 %). Les résultats de l'analyse quantitative à partir des aires des pics principaux et secondaires des minéraux identifiés sont présentés dans le tableau 8.

I.1.3. Géochimie

Les résultats d'analyses chimiques sont consignés dans le tableau 9. La teneur en SiO₂ est de 41,5 % dans le basalte étudié. Les teneurs en Al₂O₃ (11,76 %) et TiO₂ (2,19 %) sont relativement importantes. Les teneurs en Fe₂O₃ (10,03 %), MgO (7,20 %), CaO (7,97 %) sont modérées. La teneur en PF est de 15,46 %. Les teneurs en Na₂O (1,45 %) sont faibles. Les autres oxydes ont des teneurs inférieures à 1 %. Les teneurs en SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃ représentent 63,29 % du poids total des oxydes de la roche.

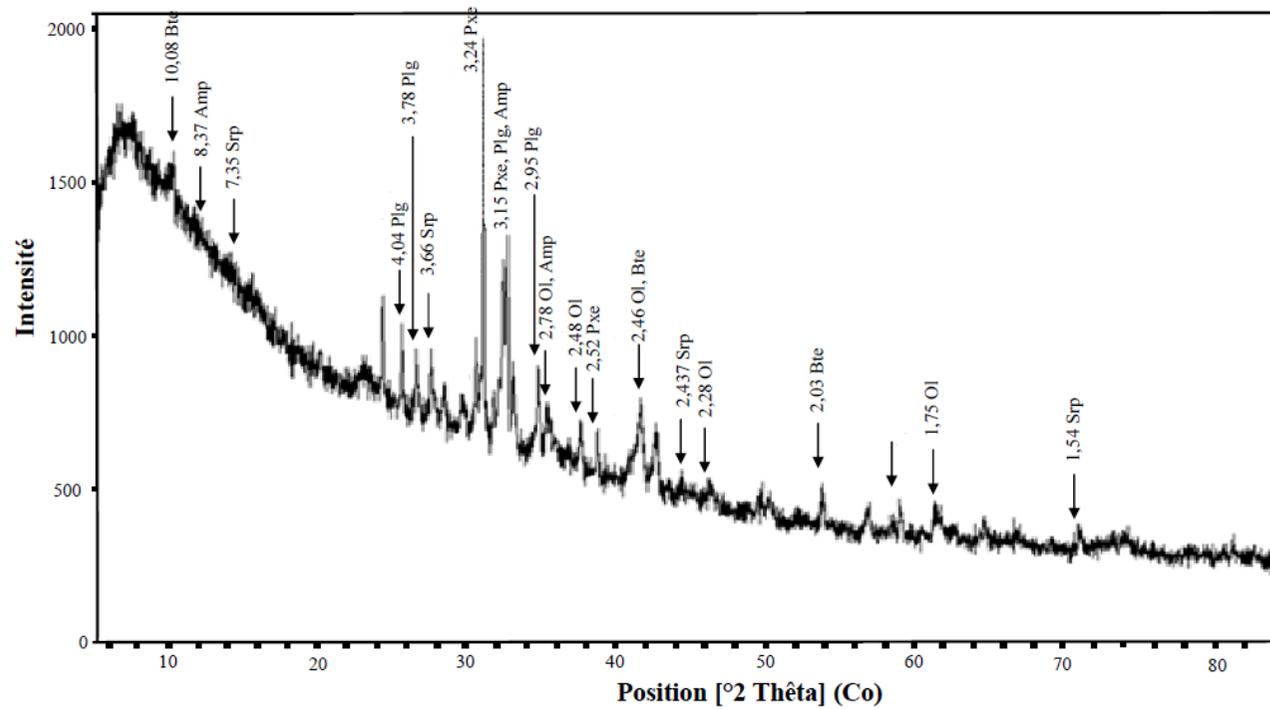
La teneur en SiO₂ couplée à la somme des teneurs en Na₂O + K₂O (2,2 %) montrent que le basalte étudié est alcalin. Le basalte de la zone d'étude a une valeur de CIA de 42,1 %. Le basalte des tronçons Kumba-Mamfé et Loum-Mundemba a une valeur de S/R de 3,89.

I.2. Pétrologie des roches sédimentaires

Les données des roches sédimentaires du présent travail ont été tirées des travaux de Bokanda *et al.* (2019) et Bokanda (2020).

I.2.1. Pétrographie

La roche dans les zones Kumba-Mamfé et Loum-Mundemba est gris sombre et massive. Sa texture est constituée de grains moyens à fins avec des minéraux indiscernables à l'œil nu. Aucune lamination n'est observée (Fig. 12). Au microscope (Fig. 13), la roche étudiée est composée de grains de quartz et de feldspaths, anguleux à très anguleux (25 – 35 %). La taille de ces minéraux est inférieure à 0,08 mm. Les proportions de calcite varient entre 20 et 25 %. Les micas, biotite et muscovite, représentent 15 à 20 %.



Plg : plagioclase ; Bte : Biotite ; Pxe : pyroxène ; Srl : Serpentine ; Ol : Olivine ; Amp : Amphibole (Abréviation d'après Whitney et Evans, 2010).

Figure 11. Diffractogramme des rayons X du basalte de la zone d'étude

Tableau 8. Composition minéralogique semi-quantitative (%) des basaltes dans la zone d'étude

Phases cristallines	Olivine	Pyroxène	Amphibole	Plagioclase	Biotite	Serpentine
Composition minéralogique quantitative par la mesure des intensités relatives (%)	12	19	10	23	3	4

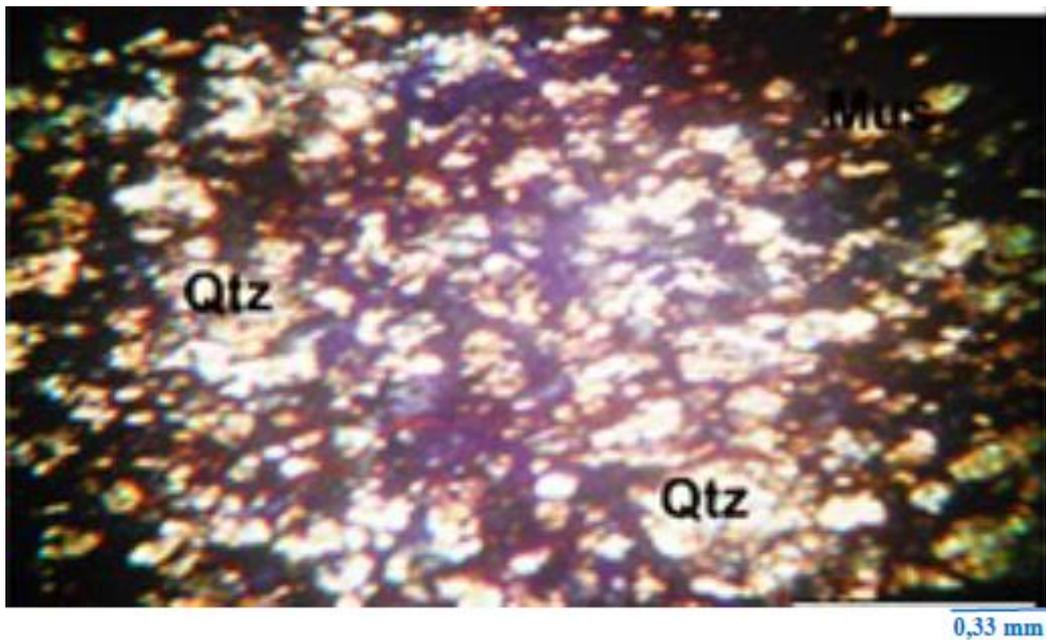
Tableau 9. Composition géochimique en éléments majeurs (%) des basaltes et argilites dans la zone d'étude

Oxydes	<i>Ld</i>	Basalte	Argilite
SiO ₂	0,04	41,5	58,68
TiO ₂	0,01	2,19	0,56
Al ₂ O ₃	0,02	11,76	14,92
Fe ₂ O ₃	0,01	10,03	5,59
MnO	0,002	0,145	0,37
MgO	0,01	7,2	2,77
CaO	0,006	7,966	3,41
Na ₂ O	0,02	1,45	2,73
K ₂ O	0,01	0,75	3,49
P ₂ O ₅	0,002	0,621	0,47
PF	0,05	15,46	12,28
Total	-	83,61	92,98
S/R	-	3,89	5,40
CIA (%)	-	42,1	52,8

Ld : limite de détection ; *PF* : perte au feu ; *CIA* : indice d'altération chimique ; *S/R* : rapport silice / sesquioxydes.



Figure 12. Argilite du secteur d'étude (Photo d'après Bokanda, 2020)



Qtz : quartz ; Mus : muscovite (Abréviation d'après Whitney et Evans, 2010)

Figure 13. Microphotographie de l'argilite du secteur d'étude (Microphotographie d'après Bokanda, 2020)

La biotite est parfois oxydée ou chloritisée. La matière organique est observée en association avec les minéraux argileux et la calcite (35 – 40 %). La roche étudiée a une microstructure clastique iso-granulaire et stratifiée. Cette roche est une argilite.

I.2.2. Minéralogie

L'analyse qualitative et quantitative des diffractogrammes des rayons X (Fig. 14) montre que l'argilite étudiée est constituée de quartz (53 %), d'albite (17 %), de calcite (10 %), Muscovite (13 %) et de clinochlore (6 %) (Tab. 10).

I.2.3. Géochimie

Les données géochimiques des éléments majeurs sont consignées dans le tableau 9. Les argilites étudiées présentent des teneurs relativement élevées en SiO₂ (58,68 %), modérées en Al₂O₃ (14,92 %) et en PF (12,28 %). Les teneurs en Fe₂O₃ (5,59 %), CaO (3,41 %), MgO (2,77 %), Na₂O (2,73 %) et K₂O (3,49 %) sont faibles. Les autres oxydes ont des teneurs inférieures à 1 %. Les teneurs moyennes en SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃ représentent 79,18 % du poids total des oxydes de la roche. La valeur de CIA de l'argilite étudiée est de 52,8 %. La valeur de S/R est de 5,40.

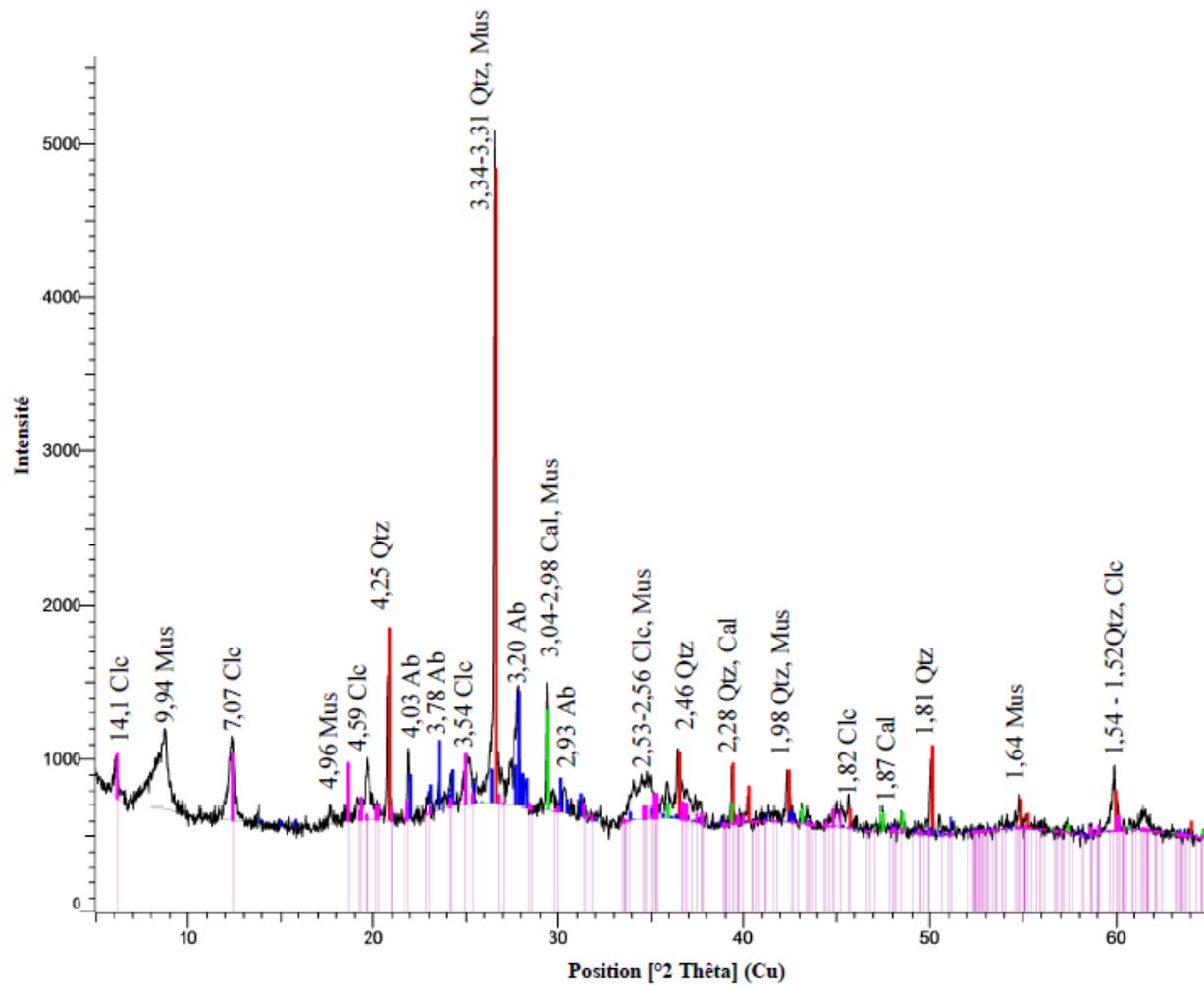
II. PETROLOGIE DES LATERITES

II.1. Pétrographie

II.1.1. Description macroscopique des latérites sur basaltes

L'observation du profil d'altération des matériaux latéritiques développés sur basaltes (LRB ; Fig. 15) présente, du bas vers le haut, un niveau allotéritique, un niveau gravillonnaire et une mince couche humifère. Ce profil présente une couleur d'ensemble rouge à rouge sombre et une épaisseur de 5,5 m.

Le niveau allotéritique est épais de 3,00 m. Trois types de matériaux sont identifiables de la base au sommet. A la base, s'observe un matériau rouge-jaunâtre (5YR 5/8) dont l'épaisseur est de 0,45 m. Cette partie présente des taches jaunes (10YR 7/8) centimétriques à pluri-centimétriques. Ces taches représentent environ 30 % de ce niveau. La texture de ce matériau est argilo-sableuse et, sa structure, polyédrique. Dans la partie médiane de l'allotérite, s'observe un matériau ayant conservé les caractéristiques du matériau sous-jacent, excepté, les proportions élevées des taches jaunes qui représentent environ 60 % du volume du niveau. Ce matériau a une épaisseur de 1,2 m. Au sommet de l'allotérite se trouve un matériau argilo-sableux épais de 1,35 m. Des taches blanchâtres



Qtz : quartz ; Ab : albite ; Cal : calcite ; Clc : clinochlore ; Mus : muscovite (Abréviation d'après Whitney et Evans, 2010).

Figure 14. Diffractogramme des rayons X de l'argilite de la zone d'étude (d'après Bokanda, 2020)

Tableau 10. Composition minéralogique quantitative (%) de l'argilite dans la zone d'étude

Phases cristallines	Quartz	Albite	Calcite	Muscovite	Clinochlore
Composition minéralogique quantitative par la mesure des intensités relatives (%)	53	17	10	13	5

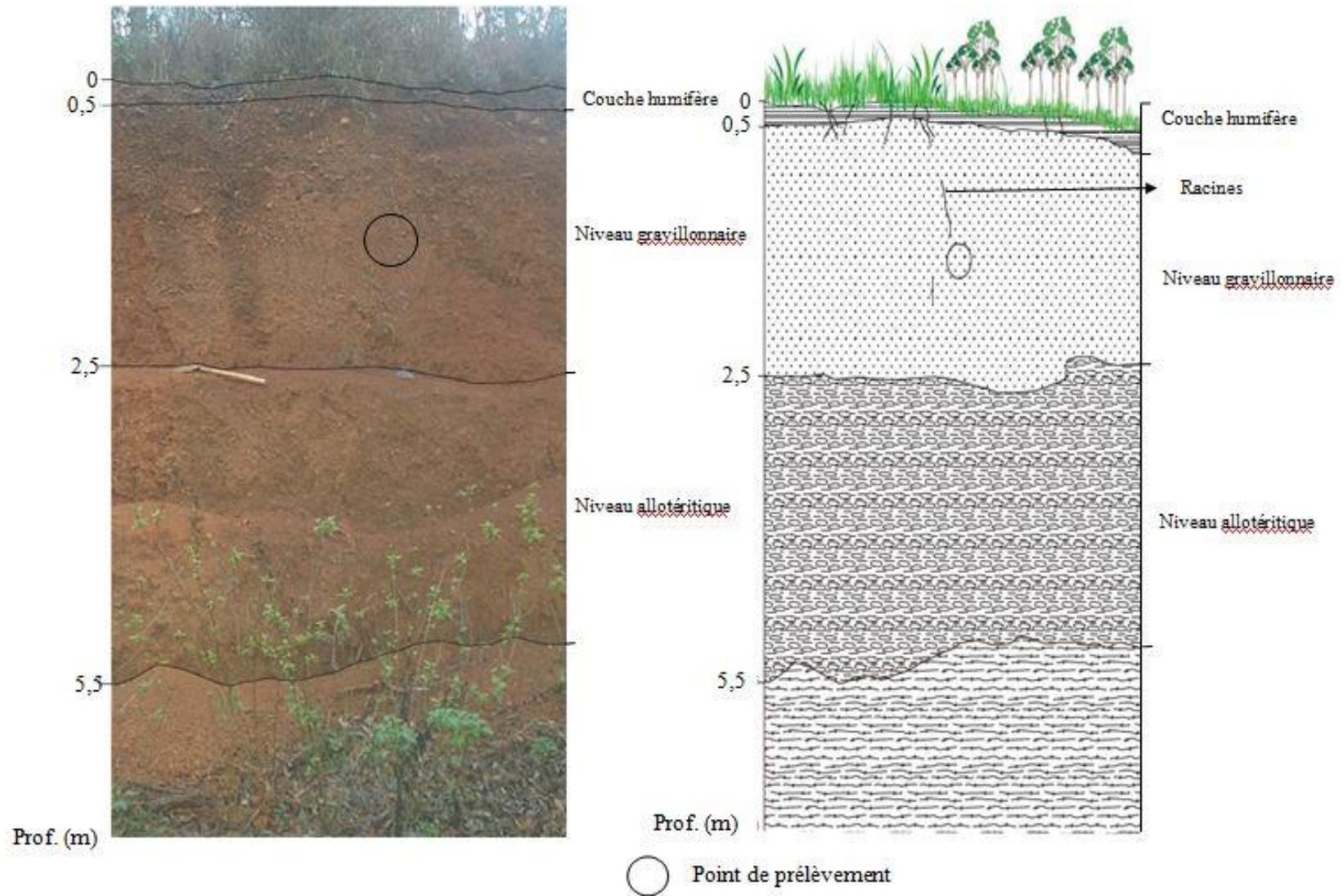


Figure 15. Profil d'altération latéritique sur basaltes dans la zone d'étude

et jaunâtres occupent près de 60 % du matériau. La structure y est polyédrique. Des racines centimétriques à millimétriques sont observables dans ce niveau. La transition avec le niveau gravillonnaire qui le surmonte est diffuse.

Le niveau gravillonnaire est épais de 2 m et comprend 02 types d'éléments grossiers :

- les nodules millimétriques à centimétriques (50 – 55 %) emballés dans une matrice argileuse rougeâtre contenant des taches de couleur jaune pâle à jaune (5Y 7/5). Ces nodules sont plus ou moins arrondis et présentent un cortex rouge sombre (10R 8/2) ;

- les nodules centimétriques à décimétriques (10 – 15 %) à cortex rouge (2,5 YR 4/8) sont emballés dans une matrice argilo-sableuse rougeâtre. A la base de ce niveau s'observe des nodules friables qui ont conservé la structure de la roche parentale. Des fragments de quartz centimétriques (10 – 15 %) et des grains de quartz millimétriques, en quantité importantes, sont identifiables dans une matrice argileuse rouge.

Une mince couche humifère de 0,5 m d'épaisseur et de couleur brune, recouvre le niveau gravillonnaire.

II.1.2. Description macroscopique des latérites sur argilites

Le profil d'altération étudié sur argilites (LRA ; Fig. 16) présente du bas vers le haut, un niveau nodulaire et un niveau argileux superficiel. Ce profil a une couleur d'ensemble jaune (10YR 6/6) et une épaisseur de 3,4 m.

Le niveau nodulaire a une épaisseur de 0,9 m et une couleur jaune rougeâtre (7,5YR 7/8). Sa structure est polyédrique et, la texture de la matrice est argilo-sableuse. Cette matrice argilo-sableuse constitue 10 à 20 % du volume du niveau. Les nodules sont arrondis à sub-arrondis et de tailles centimétriques à millimétriques. Ces nodules représentent 50 à 70 % du volume du niveau. Des grains de quartz et de feldspaths sont visibles. Ces minéraux sont arrondis à sub-arrondis et, de tailles millimétriques. Le passage avec le niveau qui le surmonte est diffus.

Le niveau argileux superficiel est épais de 2,50 m et sa couleur est jaunâtre (10YR 6/6). Sa structure est polyédrique et sa texture est argilo-sableuse. Des racines de tailles centimétriques à millimétriques y sont observables.

II.1.3. Description macroscopique des latérites sur gneiss

La figure 17 présente un exemple d'une tranchée routière dans la localité de Nguti où les latérites développées sur roches gneissiques affleurent. Cette tranchée présente du bas vers

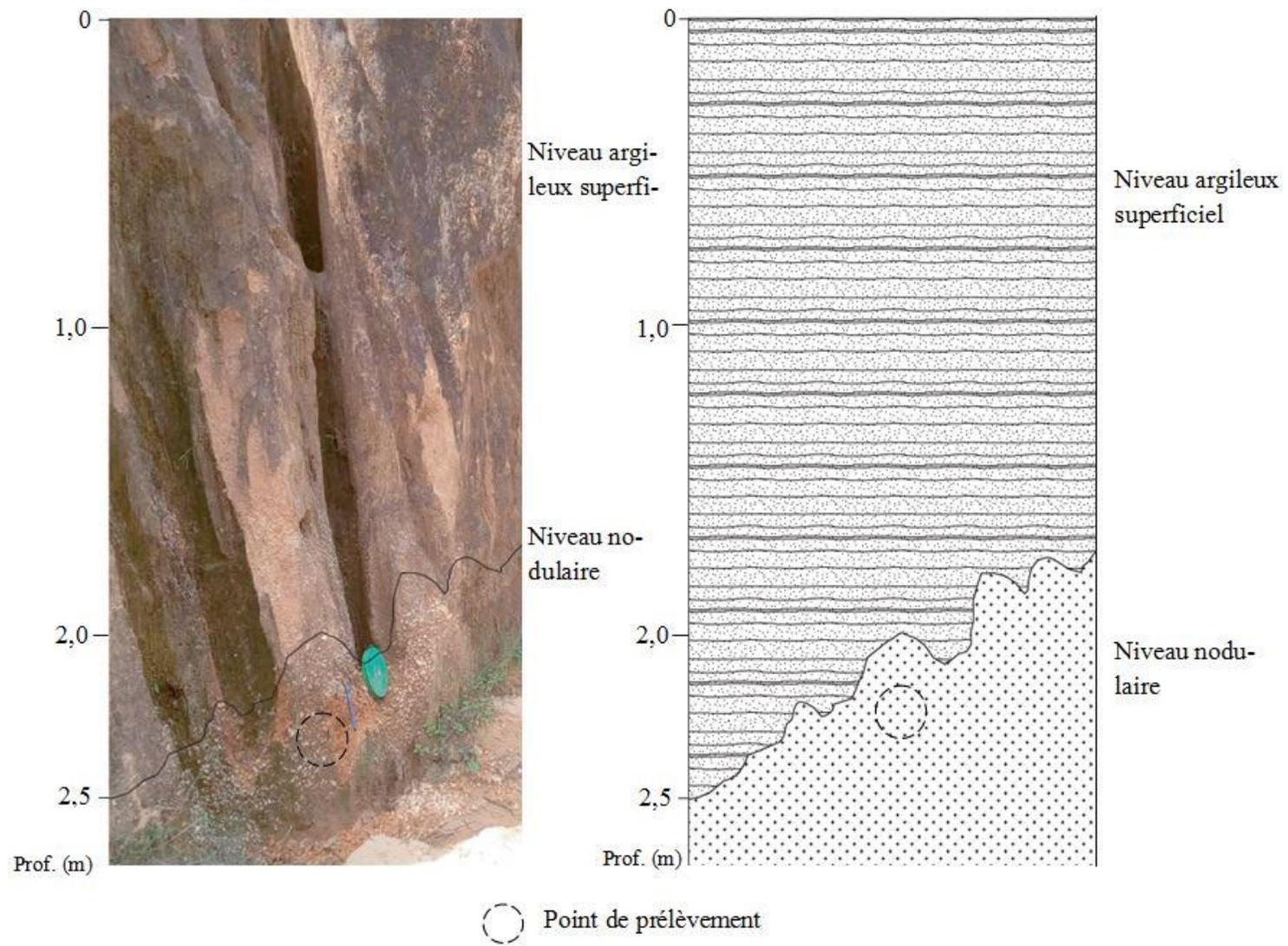


Figure 16. Profil d'altération latéritique sur argilites dans la zone d'étude

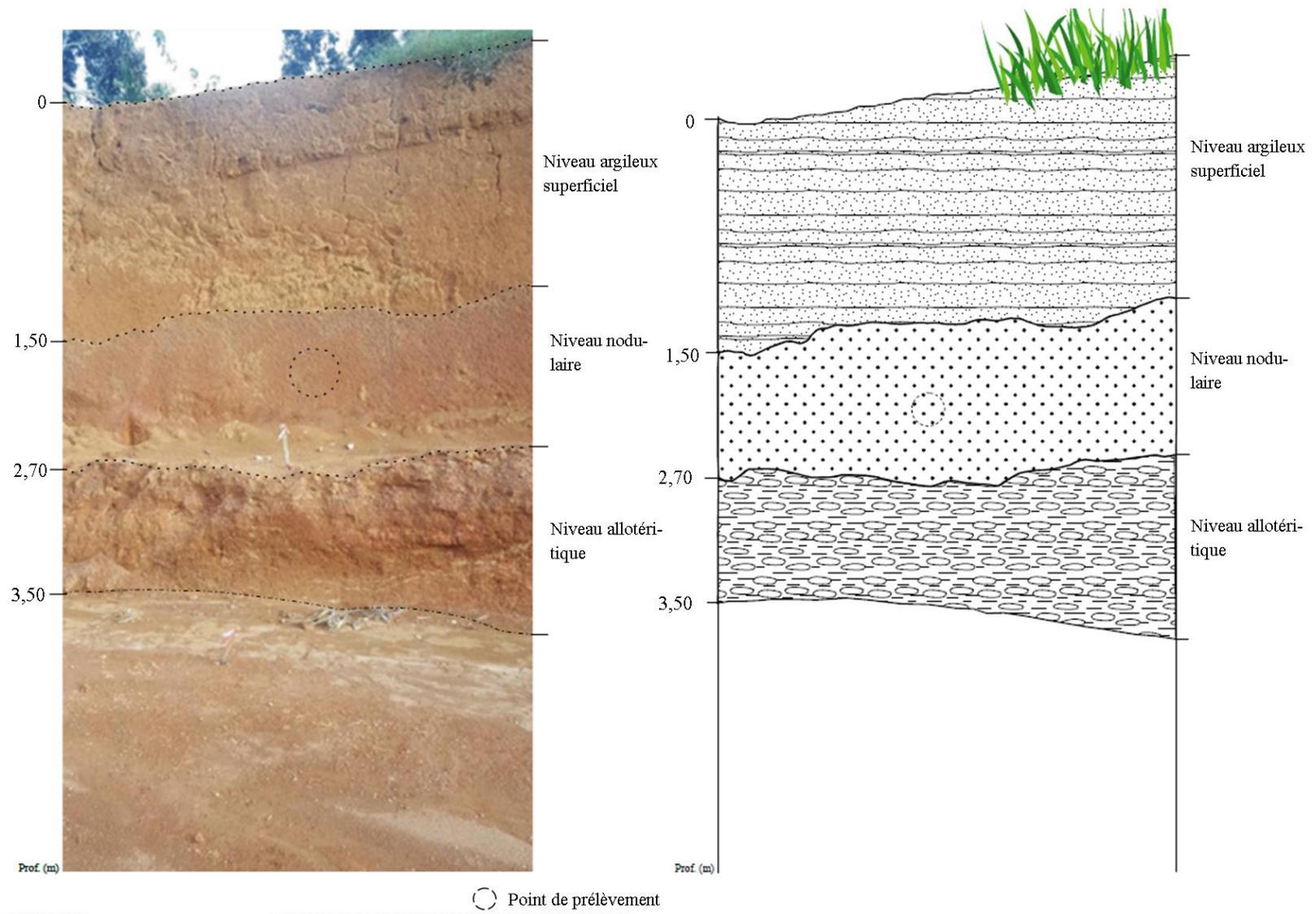


Figure 17. Profil d'altération latéritique sur gneiss dans la zone d'étude

le haut, un niveau allotéritique, un niveau nodulaire et un niveau argileux superficiel. L'épaisseur visible du profil d'altération est de 3,50 m.

Le niveau allotéritique est constitué d'un matériau de texture argilo-sableuse à structure polyédrique. Ce niveau est épais d'environ 0,8 m. Sa couleur est bariolée (5YR 5/8). Des taches rougeâtres (45 – 65 %), jaunâtres (15 – 25 %) et blanchâtres y sont observables. L'alternance, par endroits, de bandes rosâtres, jaunâtres et blanchâtres rappelle la structure partiellement conservée de la roche mère. La présence du quartz est également observable par endroits. La transition avec le niveau qui le surmonte est nette.

Le niveau nodulaire présente une couleur brun rougeâtre (7,5YR 7/8). La matrice a une texture argilo-sableuse et, elle emballe des nodules millimétriques à centimétriques de formes variées. Ces nodules représentent environ 70 % du volume de ce niveau. Son épaisseur est de 1,20 m et, sa structure est polyédrique particulière. La limite avec le niveau supérieure est nette et ondulée.

Le niveau argileux superficiel a une épaisseur de 1,50 m. Sa texture est argilo-sableuse et sa structure est polyédrique. Ce niveau a une couleur jaunâtre (10YR 8/6). Des galeries et des racines millimétriques, verticales à subhorizontales, sont observables. Ce niveau est colonisé à son sommet par une végétation constituée d'herbes, d'arbustes et d'arbres.

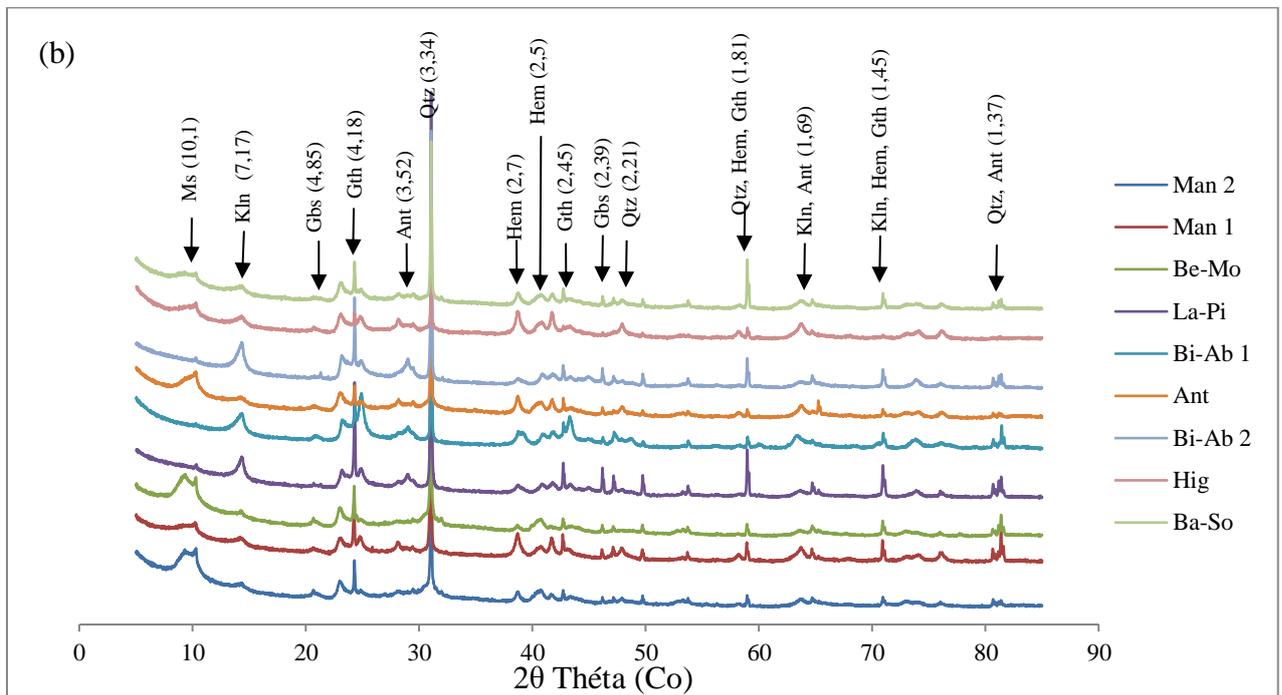
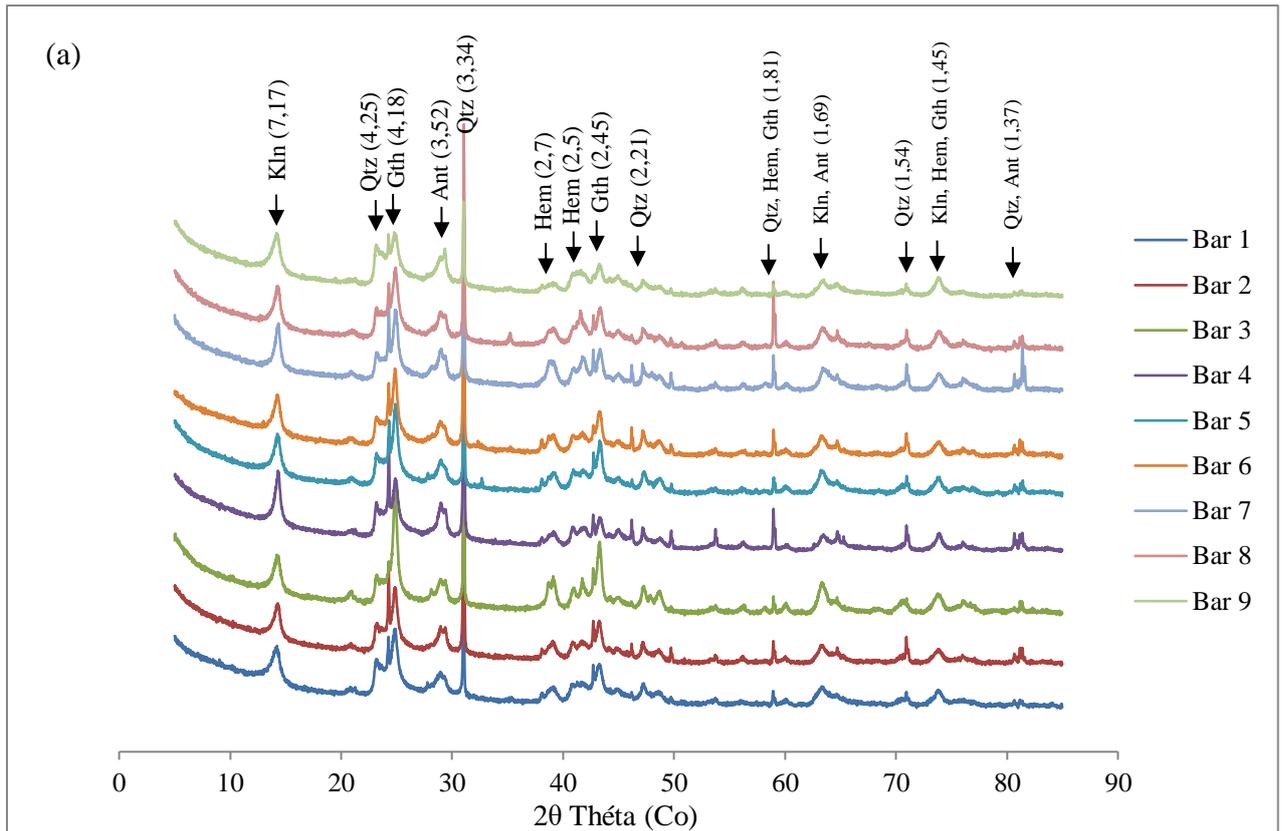
II.2. Minéralogie

Le diffractogramme de la figure 18 présente la composition minéralogique des latérites dérivées des basaltes et des argilites. Les données d'analyses quantitatives sont présentées dans le tableau 11. L'analyse des spectres de diffraction des rayons X (Fig. 18) montre que les latérites dérivées des basaltes (LRB) sont constituées de quartz (34,1 – 62,7 %), kaolinite (7,5 – 17,1 %), goethite (16,9 – 37,0 %), hématite (4,8 – 11,9 %) et anatase (5,4 – 11,5 %).

Les latérites dérivées des argilites sont composées de quartz (29,4 – 70,4 %), kaolinite (3,9 – 10,3 %), goethite (10,8 – 17,9 %), hématite (3,0 – 18,9 %), anatase (3,1 – 5,6 %), gibbsite (2,9 – 9,7 %) et muscovite (3,8 – 13,4 %). Dans les échantillons Man 2 et Be-Mo, l'anatase est absente tandis que, dans les matériaux La-Pi et Bi-Ab 2, la muscovite et la gibbsite ont totalement disparu. La muscovite est absente dans le matériau Bi-Ab 1.

II.3. Géochimie

L'analyse géochimique des éléments majeurs des latérites dérivées des basaltes et des argilites est présentée dans le Tableau 12.



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

Figure 18. Diffractogrammes des rayons X des latérites étudiées : (a) des latérites des basaltes ; (b) des latérites des argillites de la zone d'étude

Tableau 11. Composition minéralogique quantitative (%) des latérites dans la zone d'étude

Roches	Echantillon	Quartz	Kaolinite	Goethite	Hématite	Anatase	Gibbsite	Muscovite
LRB	Bar 1	43,7	14,6	27,2	7,8	6,8	-	-
	Bar 2	62,4	7,5	19,4	5,4	5,4	-	-
	Bar 3	34,1	11,1	37,0	11,9	5,9	-	-
	Bar 4	62,7	9,6	16,9	4,8	6,0	-	-
	Bar 5	47,0	12,1	26,5	7,6	6,8	-	-
	Bar 6	51,5	11,3	23,7	7,2	6,2	-	-
	Bar 7	48,3	13,3	21,7	10,0	6,7	-	-
	Bar 8	56,6	10,8	18,9	8,0	5,7	-	-
	Bar 9	41,6	17,1	21,6	8,2	11,5	-	-
	Moyenne	49,8	12,0	23,6	7,9	6,8	-	-
LRA	Mam 1	63,8	6,7	12,4	6,7	3,8	2,9	3,8
	Mam 2	61,2	3,9	12,6	5,8	-	5,8	10,7
	Be-Mo	63,9	5,1	10,8	5,1	-	5,1	10,1
	La-Pi	70,4	7,0	16,1	3,0	3,5	-	-
	Bi-Ab 1	56,3	7,4	17,0	6,7	5,2	7,4	-
	Ant	43,7	4,9	15,5	9,9	4,9	7,7	13,4
	Bi-Ab 2	63,5	10,3	15,9	4,8	5,6	-	-
	Hig	29,4	7,1	17,9	18,9	4,6	9,7	12,4
	Ba-So	59,4	6,3	14,8	5,5	3,1	4,7	6,3
	Moyenne	56,8	6,5	14,8	7,4	4,4	6,2	9,4

LRB : latérites dérivées des roches basaltes ; LRA : latérites dérivées des roches argilites

Tableau 12. Données d'analyses géochimiques des éléments majeurs (%) de la fraction totale des latérites étudiées

Oxydes	Ld	LRB															LRA														
		Bar 1	Bar 2	Bar 3	Bar 4	Bar 5	Bar 6	Bar 7	Bar 8	Bar 9	Min	Max	Moy	ET	CV	Mam 1	Mam 2	Be - Mo	La - Pi	Bi - Ab 1	Ant	Bi - Ab 2	Hig	Ba - So	Min	Max	Moy	ET	CV		
SiO ₂	0,04	28,40	34,77	21,22	54,91	27,96	31,94	39,31	34,90	32,41	21,22	54,91	33,98	9,39	27,62	47,12	46,18	51,96	66,29	46,14	41,39	61,59	34,59	49,80	34,59	66,29	49,74	10,31	20,73		
TiO ₂	0,01	2,96	2,61	2,05	2,03	2,61	2,40	2,08	3,09	4,01	2,03	4,01	2,65	0,64	24,15	0,77	1,07	1,04	0,79	0,89	1,06	1,01	0,98	1,07	0,79	1,07	0,99	0,10	10,16		
Fe ₂ O _{3t}	0,01	32,13	30,76	43,27	19,01	34,04	32,72	31,34	29,99	24,10	19,01	43,27	30,82	6,67	21,65	27,19	18,12	12,49	12,02	25,12	25,02	9,88	31,54	20,27	9,88	31,54	19,31	7,62	39,49		
Al ₂ O ₃	0,02	20,61	16,55	18,09	13,85	19,65	17,96	15,03	17,42	23,59	13,85	23,59	18,08	2,94	16,27	12,77	18,39	18,41	12,46	15,80	17,17	16,35	17,19	15,22	12,46	18,41	16,37	1,95	11,88		
FeO	0,06	0,50	0,35	0,41	0,21	0,21	0,11	0,38	0,47	0,17	0,11	0,50	0,31	0,14	44,98	0,13	0,25	0,31	0,23	0,17	0,38	0,55	0,18	0,47	0,17	0,55	0,32	0,14	43,60		
MnO	0,002	0,08	0,46	0,03	0,05	0,06	0,07	0,15	0,05	0,06	0,03	0,46	0,11	0,14	122,35	0,04	0,04	0,03	0,01	0,04	0,04	0,01	0,05	0,05	0,01	0,05	0,03	0,01	40,37		
MgO	0,01	0,27	0,17	0,11	0,13	0,16	0,29	0,11	0,17	0,26	0,11	0,29	0,19	0,07	37,74	0,84	1,87	1,93	0,25	0,13	1,55	0,20	1,06	1,09	0,13	1,93	1,01	0,75	73,85		
CaO	0,006	0,05	0,06	0,05	0,04	0,13	0,20	0,05	0,01	0,10	0,01	0,20	0,08	0,06	75,90	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,07	0,01	0,07	0,02	0,02	82,63		
Na ₂ O	0,02	0,05	0,05	0,05	0,05	0,11	0,14	0,05	0,04	0,07	0,04	0,14	0,07	0,03	50,45	0,06	0,09	0,09	0,05	0,05	0,07	0,06	0,07	0,07	0,05	0,09	0,07	0,02	22,58		
K ₂ O	0,01	0,07	0,09	0,08	0,13	0,14	0,16	0,12	0,09	0,16	0,07	0,16	0,12	0,03	29,70	1,78	3,78	3,95	0,57	0,22	3,14	0,50	2,37	2,19	0,22	3,95	2,09	1,50	71,98		
P ₂ O ₅	0,002	0,49	0,81	0,62	0,36	0,73	0,67	0,55	0,56	0,61	0,36	0,81	0,60	0,13	22,17	0,19	0,16	0,11	0,08	0,19	0,20	0,08	0,22	0,19	0,08	0,22	0,15	0,06	36,59		
PF		14,76	13,33	13,80	9,14	14,08	12,87	10,15	12,33	14,19	9,14	14,76	12,74	1,91	15,02	8,92	10,16	9,98	7,46	11,37	10,22	9,29	11,21	10,05	7,46	11,37	9,97	1,22	12,21		
Total		100	99,9	99,6	99,81	99,8	99,6	99,2	98,8	99,6	98,8	100	99,58	0,37	0,37	99,79	99,97	100,07	100,02	99,99	99,98	99,01	99,37	100,15	99,01	100,15	99,82	0,40	0,41		

Ld : limite de détection ; CV : Coefficient de Variation ; ET : Ecart-Type ; LRB : latérites dérivées des basaltes ; LRA : latérites dérivées des argilites ; PF : perte au feu

Les latérites sur basaltes présentent des teneurs modérées à élevées en SiO_2 (21,22 – 54,91 %), soit une moyenne de 33,98 %. Les teneurs en Fe_2O_3 sont modérées à élevées (19,01 – 43,27 %), soit une moyenne de 30,82 %. Les valeurs de Al_2O_3 sont comprises entre 13,85 et 23,59 %, pour une moyenne de 18,08 %. Les teneurs en TiO_2 varient entre 2,03 et 4,01 %, pour une moyenne de 2,65 %. La perte au feu (PF) présente des valeurs qui oscillent entre 9,14 et 14,76 %, soit une moyenne de 12,74 %. MgO , MnO , CaO , Na_2O , K_2O , FeO et P_2O_5 présentent des teneurs inférieures à 1 %. SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 représentent en moyenne 83 % en poids total de ces latérites.

Les valeurs de SiO_2 des latérites dérivées des argilites sont comprises entre 34,59 et 66,29 %, pour une moyenne de 49,74 %. Fe_2O_3 présentent des teneurs faibles à modérées (9,88 – 31,54 %) avec une moyenne de 19,31 %. Al_2O_3 présente des teneurs comprises entre 12,46 et 18,41 %, soit une moyenne de 16,37 %. Les teneurs en TiO_2 varient entre 0,79 et 1,07 %, avec une moyenne de 0,99 %. La perte au feu présente des teneurs qui oscillent entre 7,46 et 11,37 %, pour une moyenne de 9,97 %. Les valeurs de K_2O sont comprises entre 0,22 et 3,95 %, soit une moyenne de 2,09 %. Les teneurs en MgO varient entre 0,13 et 1,93 %, avec une moyenne de 1,01 %. Les autres oxydes présentent des teneurs inférieures à 1 %. SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 représentent en moyenne 85 % en poids total de ces latérites.

La teneur moyenne en TiO_2 dans les latérites dérivées des basaltes (2,65 %) est environ 3 fois plus élevée que celle des latérites développées sur les argilites (0,66 %).

Le diagramme ternaire $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ (Fig. 19) montre un regroupement des latérites étudiées par zone. Les latérites dérivées des basaltes sont dans l'ensemble ferrugino-silico-alumineuses, par contre, celles développées sur argilites sont silico-ferrugino-alumineuses. Les latérites sur basaltes sont plus ferrugineuses et possèdent des valeurs de PF plus élevées (12,74 %) que celles sur argilites (9,97 %).

II.4. Indices et paramètres d'altération

Les valeurs des indices et des paramètres permettant de caractériser l'altération sont consignées dans le tableau 13.

Dans les latérites dérivées des basaltes, les valeurs du rapport S/R sont comprises entre 0,79 et 3,59, soit une moyenne de 1,63. Cette valeur moyenne comprise entre 1,33 et 2, atteste que les latérites sur basaltes sont des matériaux latéritiques. Les valeurs de CIA varient entre 94,6 et 99,0 % dans les latérites dérivées des basaltes, pour une moyenne de 97,7 %. Ces valeurs proches de 100 % suggèrent une disparition des éléments mobiles dans ces latérites et matérialisent la présence de la kaolinite et de la gibbsite (Nyassa Ohandja *et al.*, 2020). Les

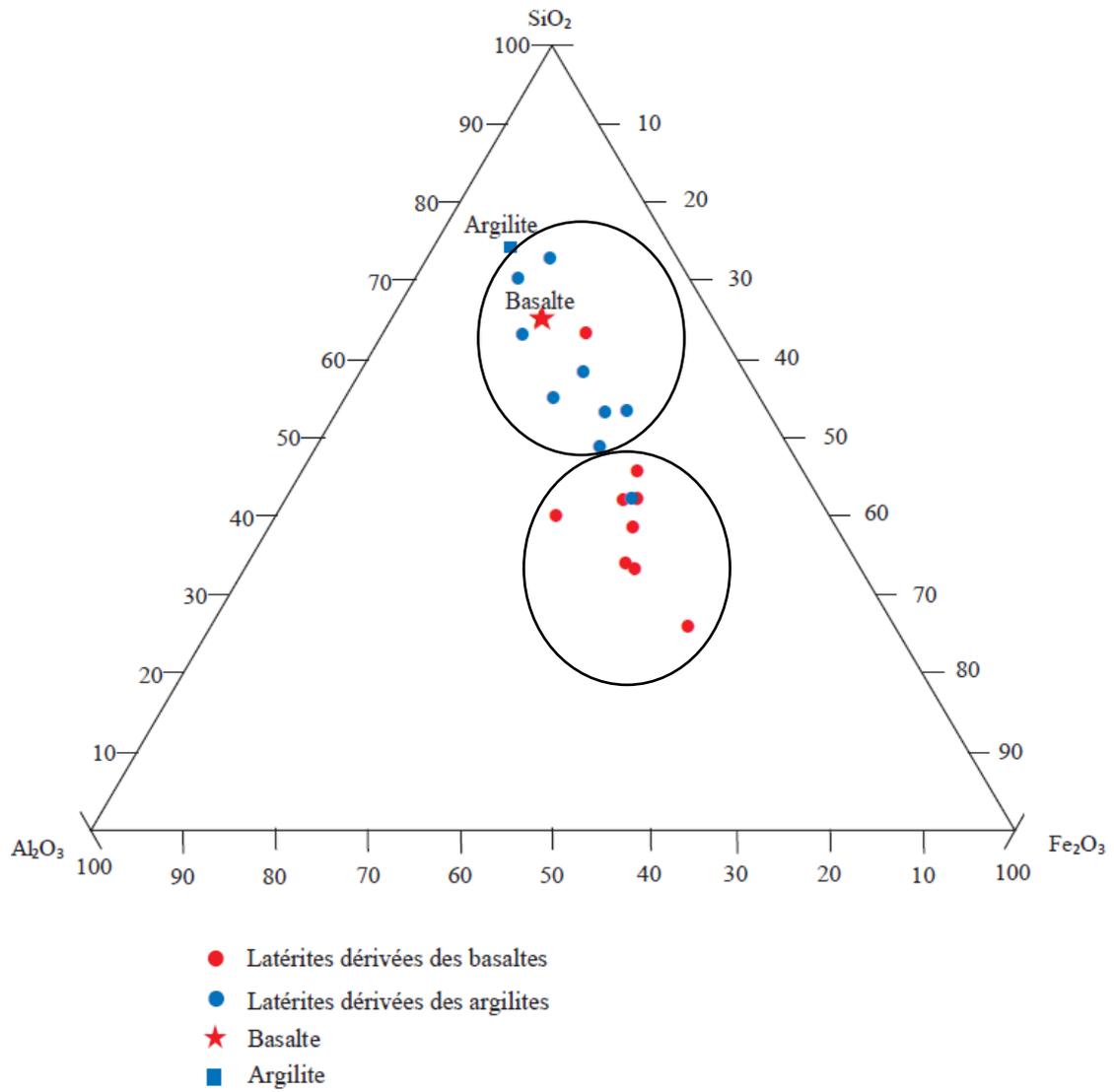


Figure 19. Position des latérites dans le diagramme géochimique $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$

Tableau 13. Valeurs des indices et des paramètres géochimiques dans les latérites de la zone d'étude

	Matériaux	S/R	CIA (%)	MIA _(o) (%)	PF (%)	IOL (%)	WIP
Roches	Basalte	3,89	42,07	34,6	15,46	34,4	139,86
	Argilite	5,4	52,8	47,6	12,28	25,9	174,69
LRB	Bar 1	1,17	98,84	96,45	14,76	49,34	3,19
	Bar 2	1,63	98,44	96,82	13,33	40,43	2,89
	Bar 3	0,79	94,61	94,52	13,8	54,23	15,33
	Bar 4	3,59	97,91	96,71	9,14	27,57	2,58
	Bar 5	1,15	97,45	96,34	14,08	48,85	4,94
	Bar 6	1,4	96,59	94,26	12,87	43,92	6,19
	Bar 7	1,91	98,08	97,15	10,15	35,97	2,94
	Bar 8	1,62	98,97	97,29	12,33	41,22	2,56
	Bar 9	1,41	98,32	96,35	14,19	48,6	4,21
	Min	0,79	94,61	94,26	9,14	27,57	2,56
	Max	3,59	98,97	97,29	14,76	54,23	15,33
	Moy	1,63	97,69	96,21	12,74	43,35	4,98
	Ecart-type	0,80	1,36	1,09	1,91	8,13	4,07
	CV	49,31	1,40	1,13	15,02	18,76	81,71
LRA	Mam 1	2,66	85,89	80,35	8,92	29,61	25,6
	Mam 2	2,62	81,13	71,76	10,16	35,52	48,49
	Be-Mo	3,35	80,50	71,03	9,98	32,88	46,99
	La-Pi	5,6	96,05	94,21	7,46	26,99	6,5
	Bi-Ab 1	2,47	97,9	96,82	11,37	33,12	3,85
	Ant	2,12	82,86	74,36	10,22	36,91	44,13
	Bi-Ab 2	4,62	96,03	94,63	9,29	27,53	6,22
	Hig	1,58	86,35	80,07	11,21	41,2	37,34
	Ba-So	3,01	85,4	78,63	10,05	30,9	29,18
	Min	1,58	80,50	71,03	7,46	26,99	3,85
	Max	5,60	97,90	96,82	11,37	41,20	48,49
	Moy	3,11	88,01	82,43	9,85	32,74	27,59
	Ecart-type	1,26	6,81	10,17	1,19	4,61	18,21
	CV	40,49	7,74	12,34	12,09	14,09	66,01

LRB: laterites dérivées des basaltes ; LRA : latérites dérivées des argilites ; PF : perte au feu ; CIA = $100 \times [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^ + Na_2O + K_2O)]$, Nesbitt et Young (1982) ; MIA = $100 \times [Al_2O_3 + Fe_2O_{3(T)} / (Al_2O_3 + Fe_2O_{3(T)} + MgO + CaO^* + Na_2O + K_2O)]$, Babechuk et al. (2014) ; IOL = $100 \times [Al_2O_3 + Fe_2O_{3(T)} / (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_{3(T)})]$, Babechuk et al. (2014) ; WIP = $100 \times [2Na_2O/0,35 + MgO/0,90 + 2K_2O/0,25 + CaO/0,70]$, Parker (1970); CV: coefficient de variation.*

valeurs de $MIA_{(O)}$ oscillent entre 94,3 et 97,3 %, soit une moyenne de 96,2 %. Ces valeurs moyennes proches de 100 % indiquent une évacuation totale des éléments labiles dans les latérites (Babechuk *et al.*, 2014). Les valeurs de PF sont comprises entre 9,1 et 14,8 %, pour une moyenne de 12,74 %. Les valeurs de IOL varient entre 27,57 et 54,23 %, soit une moyenne de 43,35 %. Les valeurs de l'indice d'altération de Parker (WIP) oscillent entre 2,6 et 15,3 %, pour une moyenne de 5,0 %.

Dans les latérites dérivées des argilites, les valeurs du rapport S/R varient entre 1,58 et 5,60, soit une moyenne de 3,11. Cette valeur moyenne, supérieure à 2, indique que ces latérites sont des matériaux « non latéritiques ». Les valeurs de CIA oscillent entre 80,5 et 97,9 %, soit une moyenne de 88,0 %. Les valeurs de $MIA_{(O)}$ varient entre 71,0 et 96,8 %, soit une moyenne de 82,4 %. Les valeurs de PF dans ces matériaux sont comprises entre 7,5 et 11,4 %, pour une moyenne de 9,8 %. Les valeurs de IOL varient entre 27,0 et 41,2 %, soit une moyenne de 32,7 %. Les valeurs de WIP oscillent entre 3,9 et 48,5 %, pour une moyenne de 27,6 %.

En général, les valeurs maximales des indices et des paramètres de quantification de l'altération sont observées dans les latérites dérivées des basaltes, exceptés pour les valeurs de WIP, où les valeurs maximales sont rencontrées dans les latérites développées sur argilites.

Les résultats d'analyses géochimiques ont également permis la détermination des paramètres normatifs altérologiques (Tab. 14). Les paramètres déterminés sont l'indice relatif de lixiviation potentielle (IRLP), le degré virtuel relatif d'altération de la roche (DVRAR), l'indice relatif d'induration potentielle (IRIP) et l'indice relatif de confinement potentiel (IRCP).

Dans les matériaux LRB, les valeurs de DVRAR (A) varient entre 41,7 et 73,9 %, soit une moyenne de 53,3 %. Les valeurs de l'IRLP (L) sont comprises entre 73,9 et 96,3 %, soit une moyenne de 87,8 %. Les valeurs de l'IRIP (I) oscillent entre 39,6 et 66,4 %, pour une moyenne de 53,8 %. Les valeurs de l'IRCP (C) sont comprises entre 3,1 et 10,3 %, pour une moyenne de 5,7 %.

Dans les matériaux LRA, les valeurs de DVRAR (A) oscillent entre 32,3 et 46,0 %, pour une moyenne de 39,6 %. Les valeurs de l'IRLP (L) varient entre 36,5 et 95,2 %, pour une moyenne de 68,7 %. Les valeurs de l'IRIP (I) sont comprises entre 11,1 et 51,2 %, soit une moyenne de 34,1 %, tandis que celles de l'IRCP (C) oscillent entre 9,1 et 95,2 %, soit une moyenne de 56,5 %.

En général, les valeurs maximales des paramètres normatifs de quantification de l'altération s'observent dans les matériaux LRB, excepté, les valeurs de IRCP (C) qui

Tableau 14. Valeurs des paramètres normatifs altérologiques des latérites dans le secteur d'étude

Matériaux	Echantillon	DVRAR (A)	IRLP (L)	IRIP (I)	IRCP (C)
Roches	Picro-basalte	10,22	36,50	11,51	95,15
	Argilite	9,58	35,25	6,35	100,00
	Min	9,58	35,25	6,35	95,15
	Max	10,22	36,50	11,51	100,00
	Moy	9,90	35,88	8,93	97,58
	CV	4,57	2,46	40,86	3,51
LRB	Bar 1	53,32	96,28	66,42	5,72
	Bar 2	45,79	95,82	59,22	6,09
	Bar 3	73,85	73,85	48,41	3,10
	Bar 4	73,85	73,85	48,41	3,10
	Bar 5	45,05	92,31	39,62	6,40
	Bar 6	46,46	92,35	61,77	10,33
	Bar 7	41,65	82,47	46,87	4,87
	Bar 8	44,08	94,50	58,48	5,58
	Bar 9	55,44	89,16	54,87	6,09
	Min	41,65	73,85	39,62	3,10
	Max	73,85	96,28	66,42	10,33
	Moy	53,28	87,84	53,79	5,70
	CV	23,38	10,19	15,86	37,46
LRA	Mam 1	32,25	66,91	40,82	62,54
	Mam 2	43,54	57,68	29,48	79,90
	Be-Mo	42,28	56,51	22,14	82,24
	La-Pi	38,40	86,16	29,39	26,42
	Bi-Ab 1	35,61	95,18	51,17	9,09
	Ant	42,86	60,77	38,47	74,07
	Bi-Ab 2	34,32	90,66	33,69	17,84
	Hig	46,04	67,87	50,05	61,04
	Ba-So	40,83	36,50	11,51	95,15
	Min	32,25	36,50	11,51	9,09
	Max	46,04	95,18	51,17	95,15
	Moy	39,57	68,69	34,08	56,48
	CV	11,84	27,53	37,51	54,99

DVRAR (A) : degré virtuel relatif d'altération de la roche ; IRLP (L) : indice relatif de lixiviation potentielle ; IRIP (I) : indice relatif d'induration potentielle ; IRCP (C) : indice relatif de confinement potentiel ; LRB : latérites dérivées des basaltes ; LRA : latérites dérivées des argilites

sont plus élevées dans les matériaux LRA.

CONCLUSION

La roche volcanique étudiée est un basalte à texture microlitique porphyrique constituée d'olivine, de pyroxène et de feldspaths. La roche sédimentaire est une argilite composée de quartz, d'albite, de calcite et de clinocllore. Les LRB sont rouges à rouges sombres et leur épaisseur est comprise entre 5,5 et 7 m. Les profils d'altération dérivés des argilites et des gneiss sont jaunes à jaunes rougeâtres et leurs épaisseurs varient entre 2,5 et 6,5 m. En plus de la muscovite et de la gibbsite présentes uniquement dans les LRA, les latérites étudiées sont constitués de quartz, de kaolinite, de goethite d'hématite et d'anatase. Les teneurs en SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 sont plus élevées dans les LRB, ferrugino-silico-alumineuses, et qualifiables « de matériaux latéritiques ». Les valeurs de CIA, $\text{MIA}_{(O)}$ et IOL révèlent que les LRB sont plus altérées que les LRA. Les LRA sont « des matériaux non latéritiques » et sont silico-ferrugino-alumineuses. Excepter le rapport S/R dont les valeurs sont plus élevées dans les LRA, les autres indices et paramètres d'altération ont des valeurs plus élevées dans les latérites dérivées des basaltes. La caractérisation géotechnique des matériaux étudiés est l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE IV.

PROPRIETES GEOTECHNIQUES

DES MATERIAUX

INTRODUCTION

Le présent chapitre donne quelques caractéristiques mécaniques du basalte et ressort une identification géotechnique complète des matériaux latéritiques. Les caractérisations physiques et mécaniques des argilites et des gneiss n'ont pas été effectuées à cause de la situation trouble dans les localités de Mamfé et Nguti où ces roches affleurent.

I. CARACTERISATION MECANIQUE DU BASALTE

I.1. Coefficient Micro Deval

Quatre éprouvettes ont été confectionnées. Pour chaque éprouvette, trois classes granulométriques (10/14, 6,3/10 et 4/6,3) ont servi à la détermination du coefficient Micro Deval (MDE). Les résultats sont consignés dans le tableau 15. Les valeurs moyennes des coefficients MDE sont :

$$MDE_{10/14} = 6,0 \%,$$

$$MDE_{6,3/10} = 8,5 \%,$$

$$MDE_{4/6,3} = 12,0 \%.$$

Les valeurs des coefficients MDE varient entre 6,0 et 12,0 %. Elles décroissent au fur et à mesure que la classe granulaire augmente.

I.2. Coefficient Los Angeles

Les valeurs de LA des granulats du basalte sont comprises entre 9 et 19 %. Les valeurs moyennes de ce coefficient sont de 9,25 %, 11,0 %, 13,0 % et 15,5 % respectivement pour les classes granulaires LA_{10/25}, LA_{10/14}, LA_{6,3/10} et LA_{4/6,3}.

Les granulats du basalte ont des valeurs de LA qui décroissent avec la granularité du matériau.

II. PARAMETRES GEOTECHNIQUES DES LATERITES

Les données ayant servi à la caractérisation géotechnique des latérites étudiées sont consignées en annexe. Elles ont permis la détermination des paramètres physiques telles le poids volumique des grains solides, la granularité, les limites d'Atterberg, les paramètres dérivés (G_m, P_m, P_p, activité A_c et ε_s) et des paramètres de compactage (DSM, TE-OPM et CBR).

Tableau 15. Données des essais Micro Deval et Los Angeles

Localisation		Classe granulaire	LA (%)	MDE (%)
X	Y			
529793	451304	10/25	8,00	-
		10/14	14,00	5,00
		6/10	17,00	8,00
		4/6,3	19,00	12,00
Moyenne			14,50	8,33
521428	446166	10/25	10,00	-
		10/14	11,00	7,00
		6/10	13,00	10,00
		4/6,3	14,00	13,00
Moyenne			12,00	10,00
534550	468041	10/25	9,00	-
		10/14	10,00	6,00
		6/10	13,00	7,00
		4/6,3	16,00	11,00
Moyenne			12,00	8,00
526469	630344	10/25	10,00	-
		10/14	9,00	6,00
		6/10	11,00	9,00
		4/6,3	13,00	12,00
Moyenne			10,75	9,00

LA : Los Angeles ; MDE : Micro-Deval à eau.

II.1. Poids volumique des grains solides

Les valeurs de poids volumique des grains solides (γ_s) des matériaux LRB varient entre 2,26 et 2,87 N/cm³, soit une moyenne de 2,72 N/cm³ (Tab. 16).

Les valeurs de γ_s des matériaux LRA oscillent entre 2,50 et 2,80 N/cm³, pour une moyenne de 2,72 N/cm³.

Les valeurs de γ_s des matériaux LRG sont comprises dans l'intervalle 2,60 – 2,90 N/cm³, soit une moyenne de 2,74 N/cm³. La valeur minimale du poids volumique des grains solides (γ_s) obtenue (2,60 N/cm³) correspond à la borne inférieure (2,60 et 3,20 N/cm³) définie par Charman (1988) sur les latérites de la zone équatoriale.

II.2. Granularité

Dans les matériaux LRB (Tab. 17), les valeurs des teneurs en graviers varient entre 15,3 et 69,4 %. Les teneurs en sables sont comprises entre 18,2 et 60,3 %. Les teneurs en fines oscillent entre 5,9 et 35,6 % et, celles en argiles, entre 1,9 et 24,5 %. Les valeurs des teneurs en squelette oscillent entre 14,0 et 75,0 % et celles des mortiers entre 9,6 et 54,0 %. Le fuseau granulométrique (Fig. 20) des fines s'intègre parfaitement dans l'intervalle défini dans les latérites en Afrique (10 – 35 %) (Bagarre, 1990).

Dans les matériaux LRA, les valeurs de teneurs en graviers sont comprises entre 18,0 et 63,9 %. Les teneurs en sables varient entre 19,0 et 54,0 %, celles en fines, entre 9,7 et 35,0 % et, celles en argiles, entre 3,7 et 26,0 %. Les valeurs des teneurs en squelette varient entre 17,5 et 65,0 %, tandis que celles en mortier sont comprises entre 13,3 et 42,0 %.

Les teneurs en graviers des matériaux LRG oscillent dans l'intervalle 21,0 – 57,1 %. Les teneurs en sables varient entre 19,3 et 53,0 %, celles en fines, entre 11,0 et 34,0 %, tandis que celles en argiles sont comprises dans l'intervalle 4,0 – 22,6 %. Les teneurs en squelette varient entre 26,3 et 67,0 % et celles du mortier entre 17,0 et 43,4 %.

Les courbes granulométriques moyennes des latérites LRB, LRA et LRG sont consignées dans la figure 28. Ces courbes sont presque similaires.

II.3. Limites d'Atterberg et indice de plasticité

Les valeurs de LL des matériaux LRB sont comprises entre 39 et 95 %. La valeur moyenne est de 66 % (Tab. 18). Les valeurs de IP varient entre 11 et 46 %, soit une moyenne de 29 %. Les matériaux LRB sont plastiques à fortement plastiques (Fig. 21).

Dans les matériaux LRA, les valeurs de LL oscillent entre 42 et 93 %, soit une valeur moyenne de 61 %. Les valeurs de IP oscillent entre 12 et 49 %, soit une moyenne de 27 %.

Tableau 16. Données des valeurs de poids volumique des grains solides des latérites étudiées

Poids volumique des grains solides	Statistiques	LRB	LRA	LRG
γ_s (N/cm ³)	Minimum	2,26	2,50	2,60
	Moyenne	2,72	2,72	2,74
	Maximum	2,87	2,80	2,90

Tableau 17. Données d'analyses granulométriques des latérites étudiées

Granularité	Statistiques	LRB	LRA	LRG
Graviers (%)	Minimum	15,3	18,0	21,0
	Moyenne	37,1	36,2	41,96
	Maximum	69,4	63,9	57,10
Sables (%)	Minimum	18,2	19,0	19,3
	Moyenne	36,1	37,5	34,1
	Maximum	60,3	54,0	53,0
Squelette (%)	Minimum	14,0	17,5	26,3
	Moyenne	43,5	41,8	44,9
	Maximum	75,0	65,0	67,0
Mortier (%)	Minimum	9,6	13,3	17,0
	Moyenne	33,3	32,1	31,3
	Maximum	54,0	42,0	43,4
Fines (%)	Minimum	5,9	9,7	11,0
	Moyenne	26,8	26,3	23,9
	Maximum	35,6	35,0	34,0
Argiles (%)	Minimum	1,9	3,7	4,0
	Moyenne	14,8	16,2	12,5
	Maximum	24,5	26,0	22,6

LRB : latérites dérivées des basaltes ; LRA : latérites dérivées des argilites ; LRG : latérites dérivées des gneiss ; γ_s : poids volumique des grains solides.

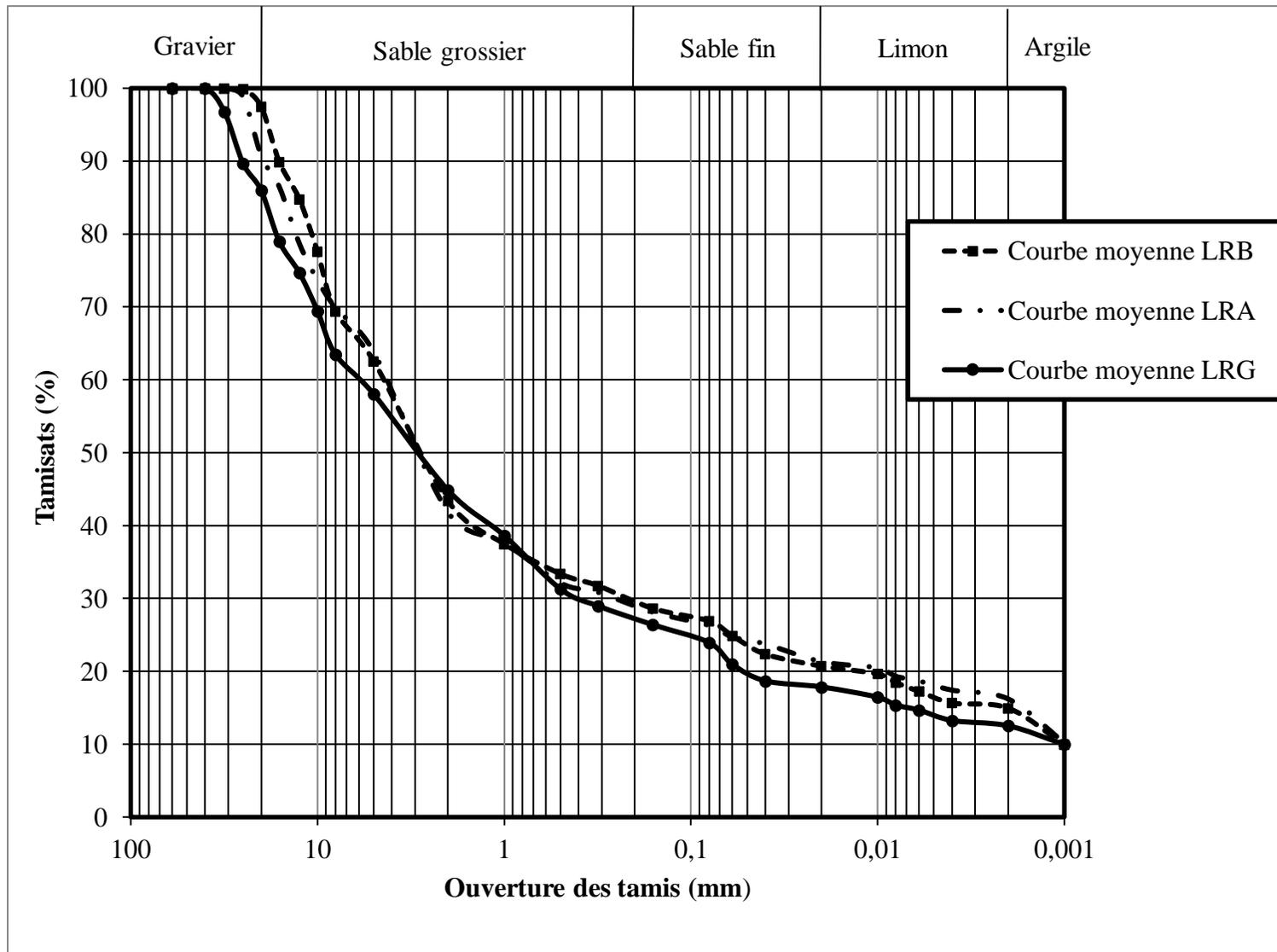


Figure 20. Courbes granulométriques moyennes des latérites étudiées

Tableau 18. Données des limites d'Atterberg et d'indice de plasticité

Limites d'Atterberg et IP	Statistiques	LRB	LRA	LRG
LL (%)	Minimum	39	42	27
	Moyenne	66	62	64
	Maximum	95	93	94
LP (%)	Minimum	20	17	10
	Moyenne	38	35	36
	Maximum	55	48	48
IP (%)	Minimum	11	12	12
	Moyenne	29	27	28
	Maximum	46	49	46

LRB : latérites dérivées des basaltes ; LRA : latérites dérivées des argilites ; LRG : latérites dérivées des gneiss ; LL : limite de liquidité ; LP : limite de plasticité ; IP : indice de plasticité.

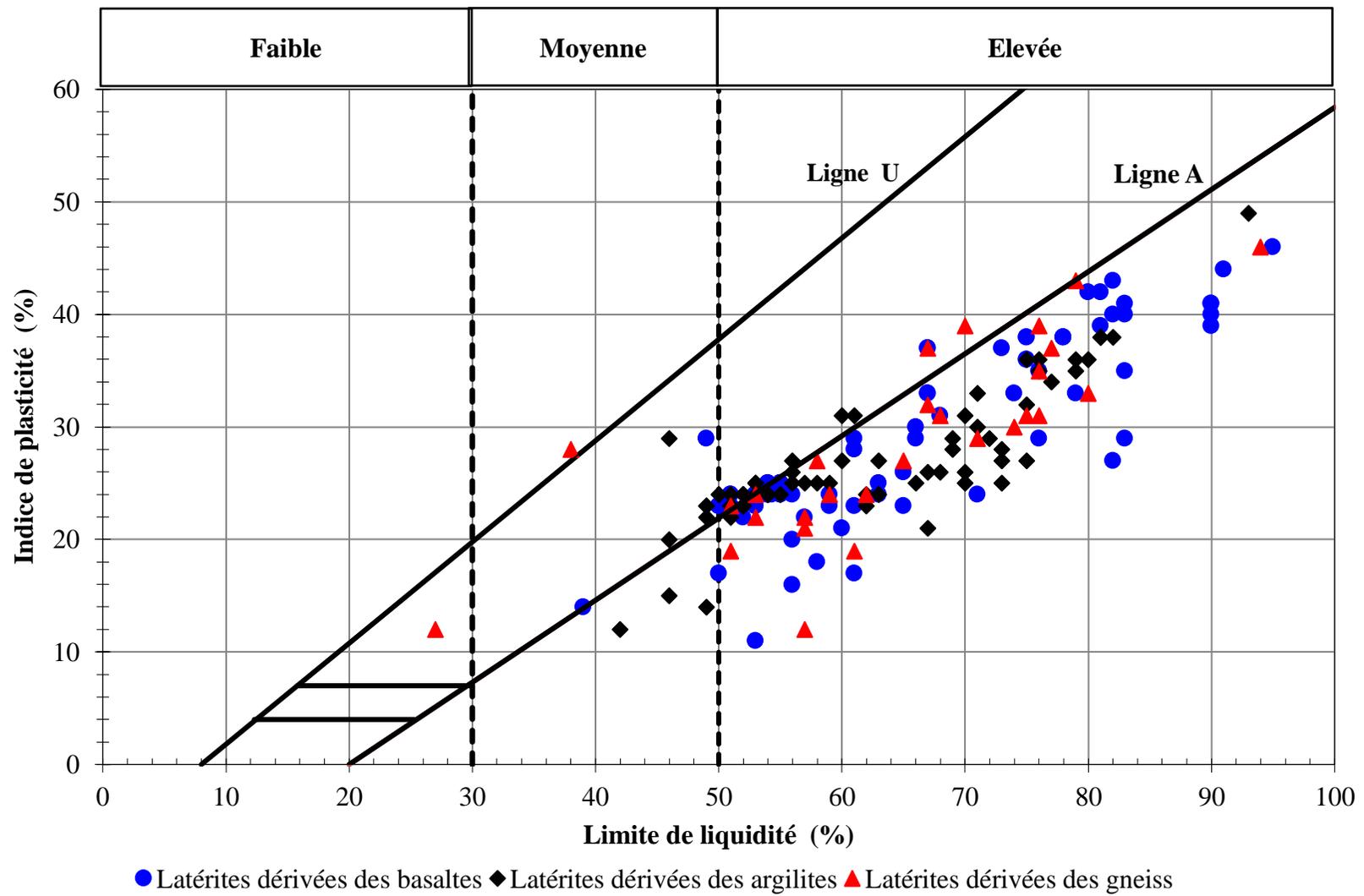


Figure 21. Position du mortier des latérites du secteur d'étude dans le diagramme de plasticité de Casagrande

Les valeurs de LL des matériaux LRG sont comprises entre 27 et 94 %, soit une valeur moyenne de 64 %. Les valeurs de IP sont comprises entre 12 et 46 %. La valeur moyenne de ce paramètre est de 28 %.

La position des échantillons dans le diagramme de plasticité de Casagrande montre que les matériaux sont plastiques à fortement plastiques (Fig. 21).

II.4. Paramètres dérivés

Les valeurs des paramètres dérivés sont présentées dans le tableau 19. Les valeurs de Gm des matériaux LRB de la zone étudiée sont comprises entre 1,38 et 2,67, soit une moyenne de 1,97. Les valeurs de Pm varient entre 134,40 et 2376,00. La valeur moyenne de Pm est de 1005,45. Les valeurs du produit de plasticité (Pp) oscillent entre 82,50 et 1472,00, soit une moyenne de 800,30. Les valeurs de Ac varient entre 1,01 et 9,60, soit une moyenne de 2,29, supérieure à 1,25, indiquent que ces matériaux sont actifs. Les valeurs de ε_s sont comprises entre 0,00 et 0,05, soit une moyenne de 0,02. Ces valeurs de ε_s , couplées à celles de IP, indiquent que matériaux LRB ont un potentiel de gonflement élevé. Ce qui n'est pas le cas, car les minéraux gonflants (smectites, montmorillonites) sont absents dans ces matériaux.

Les valeurs de Gm des matériaux LRA varient entre 1,60 et 2,60, soit une moyenne de 2,00. Ces valeurs s'intègrent dans l'intervalle défini dans les latérites développées sur roches sédimentaires au Nigéria (Nwaiwu *et al.*, 2006). La valeur moyenne de Gm s'insère dans la fourchette des normes Brésiliennes (DNIT, 2007). Les valeurs de Pm oscillent entre 159,60 et 1512,00, soit une moyenne de 867,78. Les valeurs de Pp varient entre 116,40 et 1292,00. Les valeurs Ac varie entre 0,70 et 6,10, soit une moyenne de 1,90. Cette valeur moyenne, supérieure à 1,5, montre que les matériaux dérivés des argilites sont actifs. La valeur de ε_s est comprise entre 0,00 et 0,10. La valeur moyenne de ce paramètre est de 0,01.

Dans les matériaux LRG, la valeur de Gm varie entre 1,70 et 2,30, soit une moyenne de 2,00. Les valeurs de Gm oscillent entre 204,00 et 1605,80, soit une moyenne de 920,54. Les valeurs en Pp sont comprises entre 132,00 et 1248,00, soit une moyenne de 706,26. Les valeurs de Ac sont comprises entre 1,10 et 5,20. La valeur moyenne est de 2,48. Les valeurs de ε_s varient entre 0,00 et 0,10, soit une moyenne de 0,004.

II.5. Classification

La classification HRB indique que les matériaux LRB, LRA et LRG sont des graviers bien ou mal gradués (A-1-a), des sables grossiers bien ou mal gradués (A-1-b) et des graviers

Tableau 19. Données des paramètres dérivés des latérites étudiées

Paramètres		LRB	LRA	LRG
Gm	Minimum	1,38	1,60	1,70
	Moyenne	1,96	2,00	2,00
	Maximum	2,67	2,60	2,30
Pm	Minimum	134,40	159,60	204,00
	Moyenne	1005,45	867,78	920,54
	Maximum	2376,00	1512,00	1605,80
Pp	Minimum	82,50	116,40	132,00
	Moyenne	800,30	705,76	706,26
	Maximum	1472,00	1292,00	1248,00
Ac	Minimum	1,01	0,70	1,10
	Moyenne	2,29	1,90	2,48
	Maximum	9,60	6,10	5,20
ϵ_s	Minimum	0,00	0,00	0,00
	Moyenne	0,02	0,00	0,00
	Maximum	0,05	0,10	0,10

LRB : latérites dérivées des basaltes ; LRA : latérites dérivées des argilites ; LRG : latérites dérivées des gneiss ; Gm : module de classement ; Pm : module de plasticité ; Pp : produit de plasticité ; Ac : activité des colloïdes ; ϵ_s : gonflement potentiel.

- $Gm = [300 - (\% \leq 2 \text{ mm} + \% < 425 \mu\text{m} + \% < 75 \mu\text{m})]/100$; (1)

- $Pm = IP \times \text{pourcentage des passants au tamis } 425 \mu\text{m}$ (Charman, 1988) ; (2)

- $Pp = IP \times \text{pourcentage des passants au tamis } 75 \mu\text{m}$ (Charman, 1988) ; (3)

- $\epsilon_s = 1 \times 10^{-5} \times PI^{2.24}$ (Millogo *et al.*, 2008) ; (4)

- $Ac = IP \times \text{pourcentage des passants au tamis } 2 \mu\text{m}$. (5)

et sables silteux ou argileux (A-2-7) (Tab. 20).

La classification USCS regroupe les matériaux LRB en sables limoneux (SM), sables argileux (SC), graviers limoneux (GM), sables mal gradués-sables argileux (SP-SC) et graviers mal gradués-graviers argileux (GP-GC). Elle classe les matériaux LRA en sables limoneux (SM), sables argileux (SC), graviers limoneux (GM) et, en un mélange de graviers mal gradués et graviers argileux (GP-GC). Les matériaux LRG appartiennent aux mêmes classes que ceux développés sur argilites.

II.6. Paramètres de compactage

Les valeurs de TE-OPM des matériaux LRB varient entre 9,0 et 25,0 %, soit une moyenne de 15,01 % (Tab. 21). Les valeurs de DSM oscillent entre 1,57 et 2,11, soit une moyenne de 1,89. Les valeurs CBR à 95 % OPM après 04 jours d'immersion sont comprises entre 18 et 65 %. La valeur moyenne de CBR est de 38 % (Tab. 22).

Les valeurs de TE-OPM des matériaux LRA sont comprises entre 7,0 et 20,0 %, soit une moyenne de 12,8 % (Tab. 22). Les valeurs de DSM varient entre 1,46 et 2,14, soit une moyenne de 1,94. Les valeurs de CBR à 95 % OPM varient entre 21 et 65 %, soit une moyenne de 40 %.

Les valeurs de TE-OPM des matériaux LRG sont comprises entre 7,0 et 24,3 %, soit une moyenne de 14,05 %. Les valeurs de DSM oscillent entre 1,61 et 2,17, soit une moyenne de 1,92. Les valeurs de CBR matériaux LRG sont comprises entre 20 et 77 %. La valeur moyenne est de 41 %.

CONCLUSION

Les valeurs des paramètres MDE et LA des basaltes de la zone d'étude sont inversement proportionnelles à la classe granulaire. Plus les matériaux sont grossiers, plus les valeurs de MDE et LA sont faibles. Les latérites dérivées des basaltes sont moins denses que celles développées sur argilites et sur gneiss. Les matériaux latéritiques dérivés des basaltes sont plus fins et plus plastiques que ceux développés sur argilites et sur gneiss. En général, les latérites développées sur les trois types de roches sont plastiques à fortement plastiques. La valeur moyenne de DSM des matériaux sur argilites est supérieure à celles des matériaux sur basaltes et sur gneiss, tandis que, la valeur de TE-OPM est faible par rapport à celle des matériaux développés sur basaltes et gneiss. Les matériaux latéritiques dérivés des argilites et gneiss ont une portance plus élevée que celle des latérites sur basaltes. Ces données ont été l'objet d'une étude statistique, objet du prochain chapitre.

Tableau 20. Classifications AASHTO et USCS des latérites étudiées

Classification	Statistique	LRB	LRA	LRG
AASHTO	Minimum	A-1-b	A-1-b	A-1-b
	Moyenne	A-2-7	A-2-7	A-2-7
	Maximum	A-2-7	A-2-7	A-2-7
USCS	Minimum	SP-SC	SP-SC	SP-SC
	Moyenne	SM	SM	SM
	Maximum	GM	GM	GM

Tableau 21. Données des paramètres de compactage des latérites étudiées

Paramètres de compactage	Statistique	LRB	LRA	LRG
TE-OPM (%)	Minimum	9,0	7,0	7,0
	Moyenne	15,1	12,8	14,05
	Maximum	25,0	20,0	24,3
DSM	Minimum	1,57	1,46	1,61
	Moyenne	1,89	1,94	1,92
	Maximum	2,11	2,14	2,17

Tableau 22. Données CBR des latérites étudiées

		LRB	LRA	LRG
CBR (%)	Minimum	38	40	20
	Moyenne	18	21	41
	Maximum	65	65	77

LRB : latérites dérivées des basaltes ; LRA : latérites dérivées des argilites ; LRG : latérites dérivées des gneiss ; AASHTO : American Association for State Highway and Transportation Officials ; USCS : Unified Soil Classification System ; TE-OPM : teneur en eau à l'optimum proctor modifié ; DSM : densité sèche maximale ; CBR : california bearing ratio à 95% OPM.

CHAPITRE V.

VARIABILITE STATISTIQUE

DES LATERITES

INTRODUCTION

Le présent chapitre étudie les relations qui existent entre les paramètres minéralogiques, géochimiques et géotechniques des latérites étudiées. Une analyse en composantes principales de ces paramètres permet de trouver les relations qui existent entre les variables d'une part et, les latérites d'autre part. Enfin, une étude des régressions permet de connaître la nature de ces relations.

I. CORRELATIONS ENTRE PARAMETRES PETROLOGIQUES

La matrice de corrélation présente les relations bi-variées entre deux variables quantitatives. L'intérêt est uniquement porté sur les minéraux, les oxydes et les paramètres qui influencent le plus le comportement géotechnique des latérites.

I.1. Corrélations entre composants minéralogiques des latérites sur basaltes

Cette étude statistique a été réalisée sur 05 variables tirés de l'analyse semi-quantitative et, sur 09 individus (échantillons de matériaux LRB). La matrice de corrélation (Tab. 23) montre des corrélations positives fortes entre kaolinite et anatase (0,84) et, entre goethite et hématite (0,75). Le quartz est fortement corrélié à la goethite (-0,85) et à l'hématite (-0,84).

L'ACP retient les axes factoriels F1 et F2 et sur le plan F1-F2. Ces deux axes (F1 et F2) expriment à 92,89 % la variance cumulée (Fig. 22) de l'information contenue dans le jeu de données. Les contributions des axes F1 et F2 sont de 61,99 % et 30,90 %, respectivement. La position des minéraux, proche de la périphérie du cercle de corrélation, suggère que ces minéraux interviennent dans la classification des latérites étudiées. L'axe F1 oppose le quartz à l'anatase, la kaolinite, l'hématite et la goethite. Le biplot du nuage des points variables/individus (Fig. 23) oppose le groupe Bar 4, Bar 8, Bar 6, Bar 2 et le quartz au groupe Bar 1, Bar 3, Bar 5, Bar 7, l'anatase, la kaolinite, l'hématite et la goethite.

I.2. Corrélations entre composants minéralogiques des latérites sur argilites

L'étude statistique a été effectuée sur 07 variables et sur 09 individus. La matrice de corrélation (Tab. 24) montre que la gibbsite est positivement corréliée à la goethite (0,77) et à l'hématite (0,75), tandis que, le quartz est négativement corrélié à l'hématite (-0,96) et à la gibbsite (-0,85).

L'analyse du cercle de corrélation montre que les deux premiers axes factoriels expriment un pourcentage d'environ 80,00 % de la variance cumulée. Les contributions des

Tableau 23. Matrice de corrélation des composants minéralogiques des latérites sur basaltes dans la zone d'étude

Variables	Quartz	Kaolinite	Goethite	Hématite	Anatase
Quartz	1				
Kaolinite	-0,66	1			
Goethite	-0,85	0,19	1		
Hématite	-0,84	0,40	0,75	1	
Anatase	-0,43	0,84	-0,06	0,12	1

p-value = 5 %

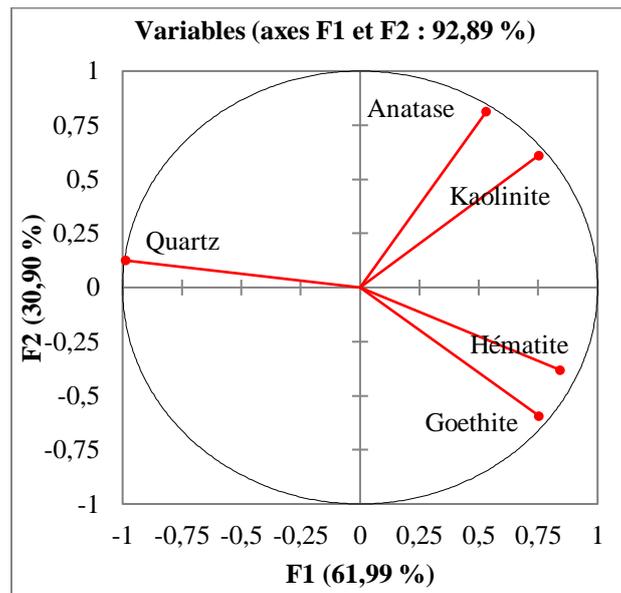


Figure 22. Cercle de corrélation des composants minéralogiques des latérites sur basaltes dans la zone d'étude

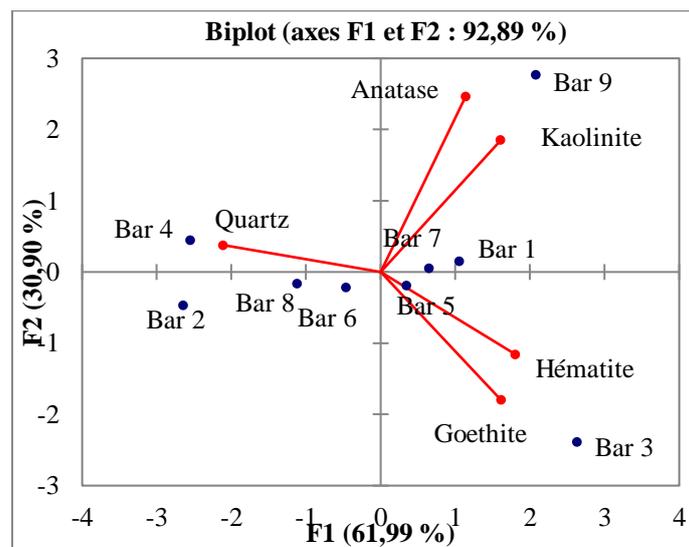


Figure 23. Répartition des latérites sur basaltes en fonction des composants minéralogiques

Tableau 24. Matrice de corrélation des composants minéralogiques des latérites sur argilites dans la zone d'étude

Variables	Quartz	Kaolinite	Goethite	Hématite	Anatase	Gibbsite	Muscovite
Quartz	1						
Kaolinite	0,05	1					
Goethite	-0,68	0,52	1				
Hématite	-0,96	0,00	0,59	1			
Anatase	-0,16	0,45	0,42	0,09	1		
Gibbsite	-0,85	0,10	0,77	0,75	0,55	1	
Muscovite	-0,63	-0,21	0,37	0,49	0,58	0,84	1

p-value = 5 %

axes F1 et F2 sont de 57,76 et 22,24 %, respectivement. Le cercle de corrélation des variables (Fig. 24) montre 03 groupes de paramètres minéralogiques : (1) le groupe des paramètres kaolinite, anatase et goethite, (2) le groupe des paramètres hématite, muscovite et gibbsite et, (3) le groupe du paramètre quartz. Le biplot des variables/individus (Fig. 25) montre que les matériaux Bar 1, Bar 9, Bar 3, Bar 2 et quartz sont opposés aux matériaux Bar 7, Bar 5, Bar 6, Bar 8, anatase, goethite, kaolinite, muscovite et hématite.

I.3. Corrélations entre composants minéralogiques des latérites sur basaltes et des argilites

Dans cette étude, 07 paramètres ou variables tirés de l'analyse semi-quantitative sont mesurés. Pour les données des individus, les observations sont effectuées sur 18 individus (09 échantillons de latérites LRB et 09 échantillons latérites LRA).

L'observation de la matrice de corrélation (Tab. 25) montre :

- des corrélations positives moyennes à fortes entre : kaolinite et goethite (0,66), hématite et gibbsite (0,64), gibbsite et muscovite (0,84) ;
- des corrélations négatives fortes entre quartz et hématite (-0,88) ;
- des corrélations négatives moyennes entre quartz et goethite (-0,64) et, entre quartz et gibbsite (-0,59).

En général, les minéraux riches en oxyhydroxydes de fer (hématite) et d'aluminium (gibbsite) sont liés par des relations normales, tandis que le quartz est lié à ces oxyhydroxydes de fer et d'aluminium par des relations inverses.

L'analyse en composantes principales est basée sur deux axes factoriels (F1 et F2) et le plan F1-F2. Les deux premiers axes (F1 et F2) expriment un pourcentage d'environ 77 % de l'information contenue dans le jeu de données. Les contributions des axes F1 et F2 sont de 49,05 et 27,58 % respectivement. Le cercle de corrélation des variables (Fig. 26) montre 03 groupes de paramètres minéralogiques : (1) le groupe des paramètres kaolinite, anatase et goethite ; (2) le groupe des paramètres hématite, gibbsite et muscovite et, (3) le groupe des paramètres quartz. Les variables des groupes (1) et (2) sont séparées de celles du groupe (3) par l'axe F1. Ce constat est confirmé par les relations inverses liant le quartz à la gibbsite, à la goethite et à l'hématite. Le quartz, la kaolinite, la goethite et la gibbsite, proches de la périphérie du cercle de corrélation, indiquent que ces minéraux interviennent majoritairement dans la classification des latérites de la zone d'étude. Le nuage des individus montre que l'axe F2 oppose les latérites LRB aux latérites LRA (Fig. 27). Les matériaux LRB sont caractérisés par la kaolinite, l'anatase et la goethite, tandis que, les matériaux LRA sont caractérisés

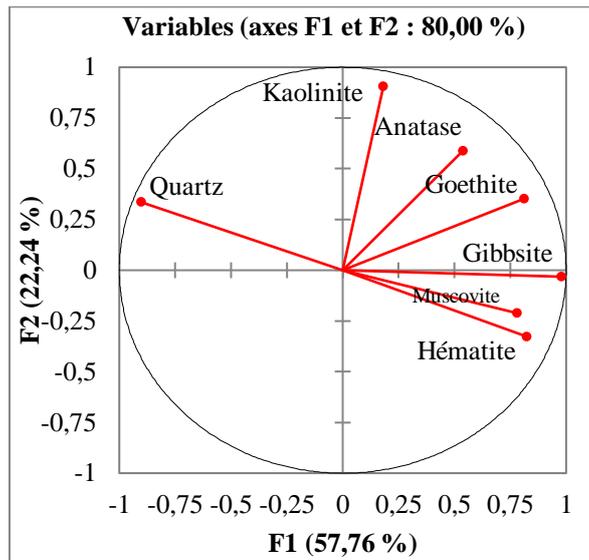


Figure 24. Cercle de corrélation des composants minéralogiques des latérites sur argilites dans la zone d'étude

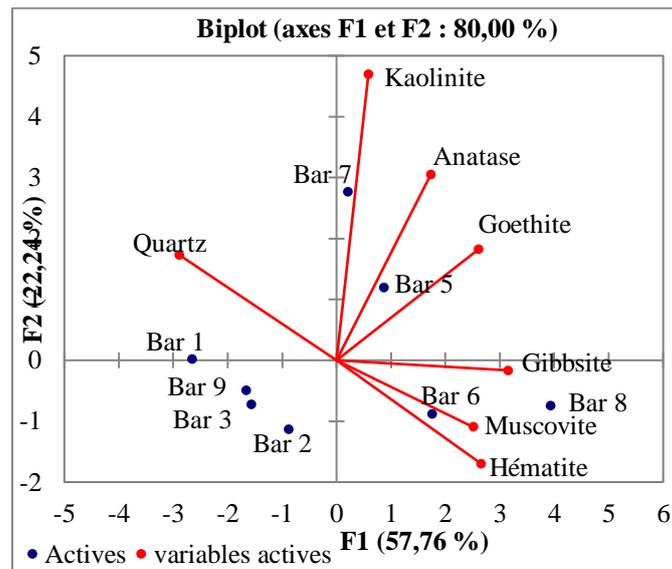


Figure 25. Répartition des latérites sur argilites en fonction des composants minéralogiques

Tableau 25. Matrice de corrélation des composants minéralogiques des latérites sur basaltes et argilites dans la zone d'étude

	Quartz	Kaolinite	Goethite	Hématite	Anatase	Gibbsite	Muscovite
Quartz	1						
Kaolinite	-0,42	1					
Goethite	-0,64	0,66	1				
Hématite	-0,88	0,13	0,36	1			
Anatase	-0,39	0,77	0,38	0,09	1		
Gibbsite	-0,59	0,04	0,19	0,64	0,11	1	
Muscovite	-0,44	-0,07	0,09	0,42	0,21	0,84	1

p-values = 5 %

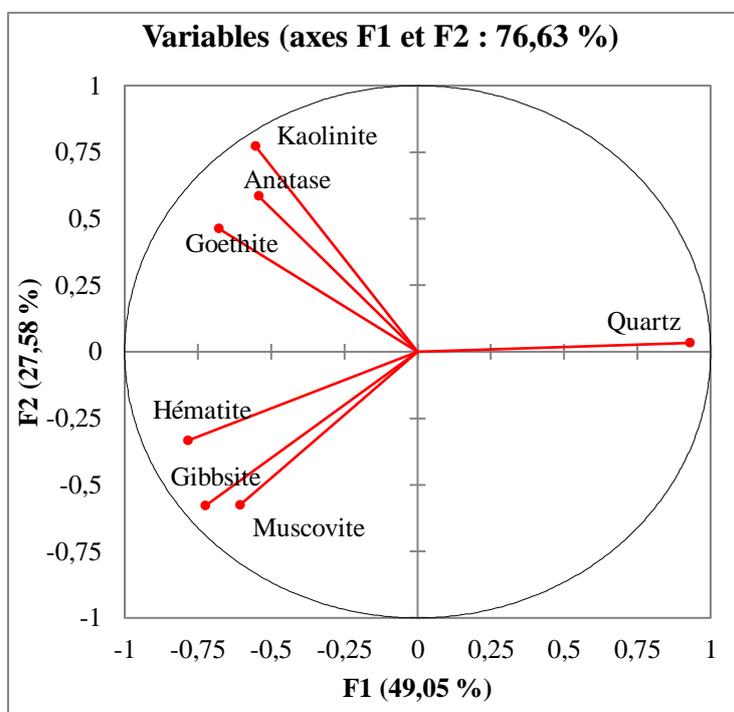


Figure 26. Cercle de corrélation des composants minéralogiques des latérites sur basaltes et argilites dans la zone d'étude

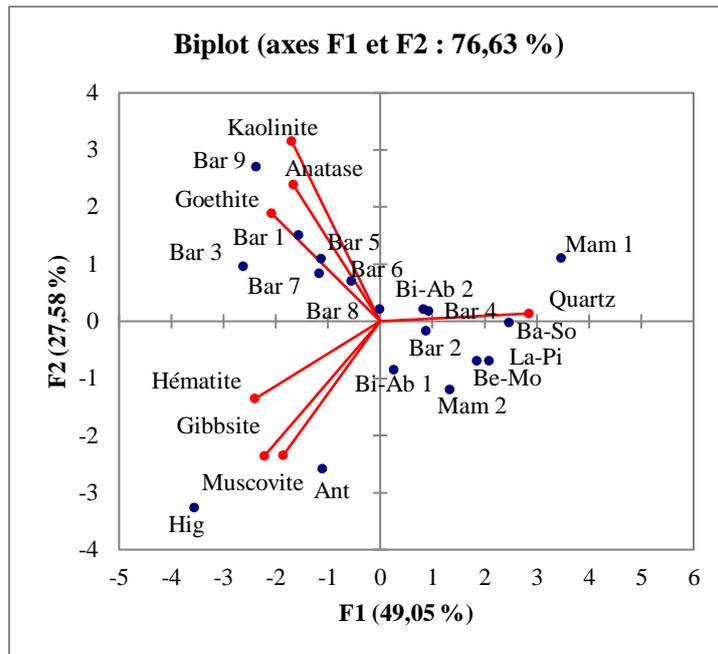


Figure 27. Répartition des latérites sur basaltes et argilites en fonction des composants minéralogiques

par le quartz.

I.4. Corrélations entre composants géochimiques des latérites sur basaltes

Dans cette étude, 12 paramètres géochimiques ont été retenus. Les observations sont effectuées sur 9 échantillons de latérites (individus).

La matrice de corrélation montre des corrélations positives fortes (Tab. 26) entre Al_2O_3 vs MgO (0,73), Al_2O_3 vs PF (0,86), CaO vs Na_2O (0,98), CaO vs K_2O (0,71) et TiO_2 vs Al_2O_3 (0,88). SiO_2 est corrélée négativement avec Fe_2O_3 (-0,80), Al_2O_3 (-0,73) et PF (-0,90). FeO est corrélée négativement avec CaO (-0,76), Na_2O (-0,74) et K_2O (-0,94).

Les trois premiers axes F1 (41,54 %), F2 (26,49 %) et F3 (17,53 %) expriment à 85,56 % l'information totale du nuage des variables et/ou des individus. Les plans factoriels F1-F2, F1-F3 et F2-F3 expliquent bien l'analyse factorielle. Les paramètres SiO_2 , PF, K_2O , CaO et Na_2O , proches de la périphérie du cercle de corrélation (Fig. 28), interviennent majoritairement dans la classification des latérites étudiées. Le cercle de corrélation présente 03 groupes de paramètres géochimiques : (1) le groupe des paramètres PF, Al_2O_3 , MgO , P_2O_5 , TiO_2 et Fe_2O_3 ; (2) le groupe des paramètres CaO , Na_2O et K_2O et, (3) le groupe des paramètres SiO_2 . Le biplot des variables et/ou des individus du plan F1-F2 (Fig. 29) montre que les matériaux Bar 4, Bar 7, Bar 8, Bar 3 et les oxydes SiO_2 , MnO et FeO , sont opposés aux matériaux Bar 6, Bar 9, Bar 5, Bar 1 et les oxydes Fe_2O_3 , PF, Al_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 , MgO , CaO , Na_2O et K_2O .

I.5. Corrélations entre composants géochimiques des latérites sur argilites

L'analyse statistique a été réalisée sur 12 paramètres géochimiques et sur 09 échantillons de latérites.

La matrice de corrélation montre des corrélations positives (Tab. 27) :

- fortes entre les paramètres : Fe_2O_3 vs P_2O_5 (0,95) ; MnO vs P_2O_5 (0,95) ; MgO vs Na_2O (0,94) ; Na_2O vs K_2O (0,95) ;

- moyennes à fortes entre : TiO_2 vs Al_2O_3 (0,77) ; TiO_2 vs MgO (0,73) ; TiO_2 vs Na_2O (0,77) ; TiO_2 vs K_2O (0,72) ; Al_2O_3 vs MgO (0,74) ; Al_2O_3 vs Na_2O (0,81) ; Al_2O_3 vs K_2O (0,74) ; Fe_2O_3 vs MnO (0,86).

- SiO_2 est corrélée négativement avec Fe_2O_3 (-0,90), MnO (-0,92), P_2O_5 (-0,91) et PF (-0,87).

L'ACP des paramètres géochimiques montre que les deux premiers axes factoriels expriment à 77,80 %, l'information totale du nuage des variables et/ou des individus.

Tableau 26. Matrice de corrélation des composants géochimiques des latérites sur basaltes dans la zone d'étude

Variables	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PF
SiO ₂	1											
TiO ₂	-0,51	1										
Al ₂ O ₃	-0,73	0,88	1					N = 9				
Fe ₂ O ₃	-0,80	-0,08	0,18	1								
FeO	-0,14	0,03	-0,12	0,28	1							
MnO	-0,03	-0,16	-0,27	0,18	0,21	1						
MgO	-0,57	0,55	0,71	0,19	-0,21	-0,22	1					
CaO	-0,40	-0,01	0,32	0,33	-0,76	-0,17	0,57	1				
Na ₂ O	-0,39	-0,09	0,25	0,38	-0,74	-0,27	0,47	0,98	1			
K ₂ O	0,08	0,07	0,19	-0,24	-0,94	-0,38	0,17	0,71	0,70	1		
P ₂ O ₅	-0,64	0,17	0,27	0,63	-0,18	0,59	0,14	0,45	0,42	0,10	1	
PF	-0,90	0,68	0,86	0,52	0,07	0,06	0,69	0,34	0,29	-0,11	0,56	1

PF : perte au feu ; p-value = 5 %

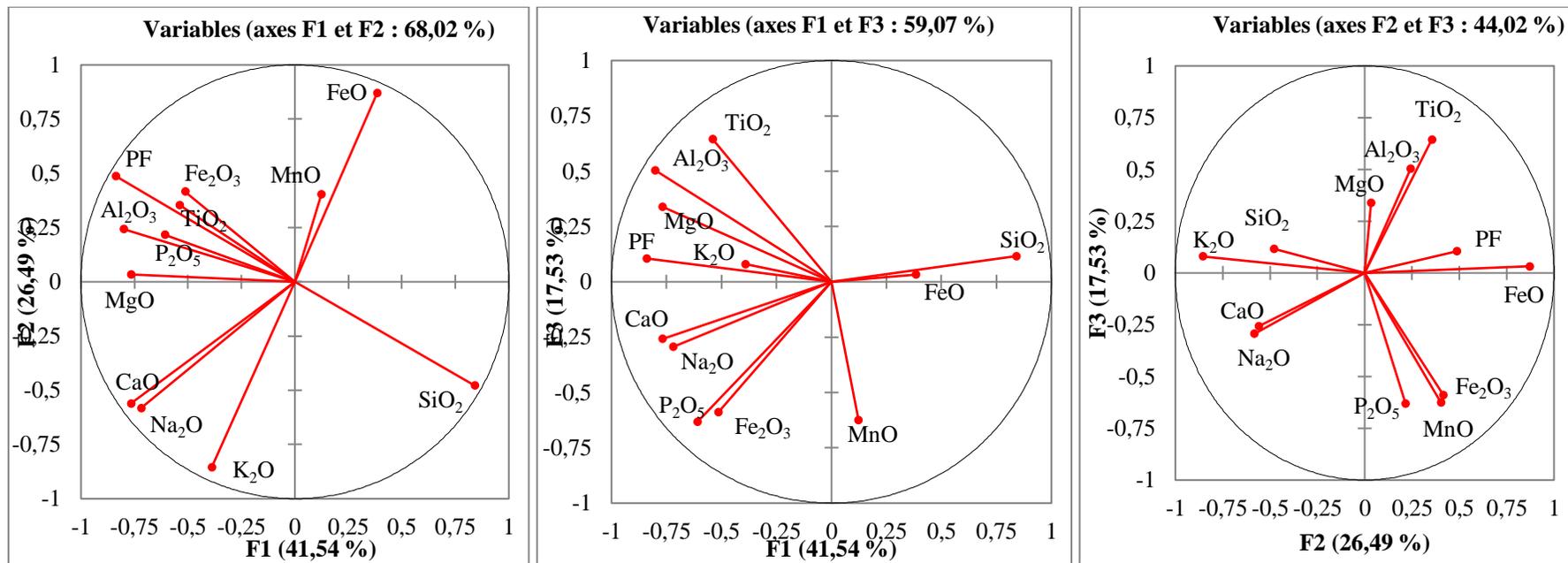


Figure 28. Cercles de corrélation des composants géochimiques des latérites sur basaltes dans la zone d'étude

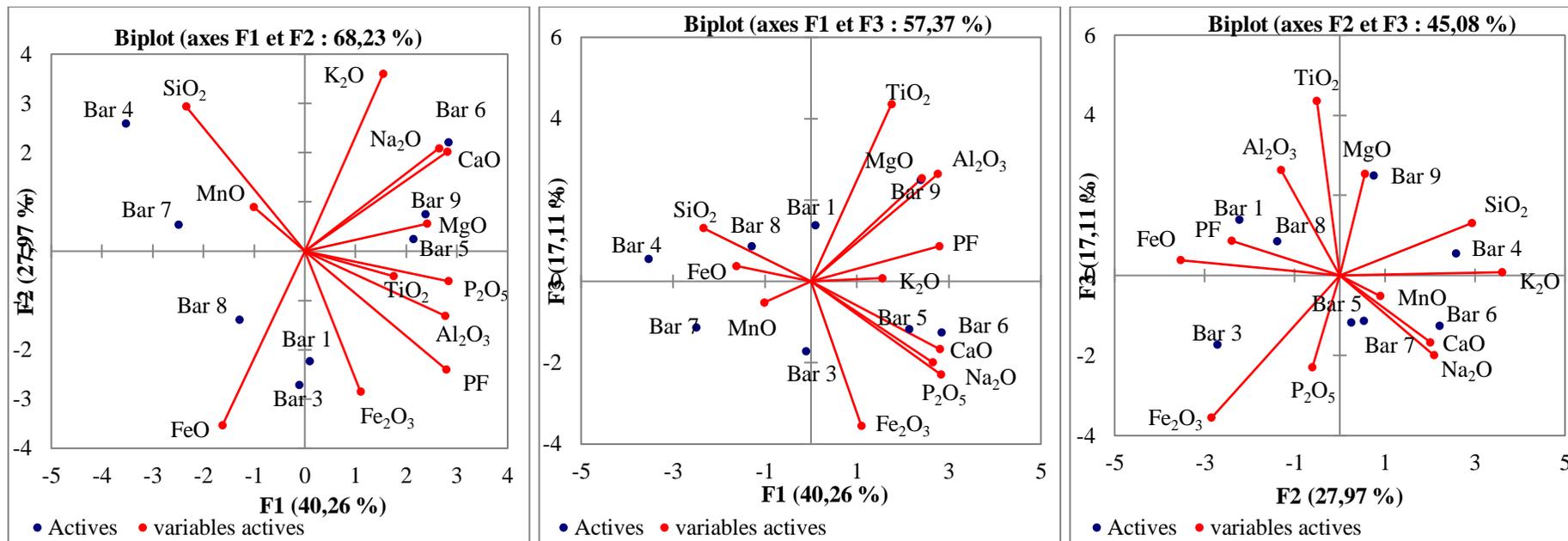


Figure 29. Répartition des latérites sur basaltes de la zone d'étude en fonction des composants géochimiques dans les plans factoriels F1-F2-F3

Tableau 27. Matrice de corrélation des composants géochimiques des latérites sur argilites dans la zone d'étude

Variables	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PF
SiO ₂	1											
TiO ₂	-0,46	1										
Al ₂ O ₃	-0,60	0,77	1									
Fe ₂ O ₃	-0,90	0,11	0,22	1								
FeO	0,36	0,50	0,02	-0,47	1							
MnO	-0,92	0,47	0,46	0,86	-0,30	1						
MgO	-0,47	0,73	0,74	0,11	-0,02	0,46	1					
CaO	-0,09	0,48	-0,07	0,05	0,45	0,39	0,27	1				
Na ₂ O	-0,36	0,77	0,81	-0,04	0,06	0,35	0,94	0,27	1			
K ₂ O	-0,48	0,72	0,74	0,12	-0,03	0,45	1,00	0,26	0,95	1		
P ₂ O ₅	-0,91	0,32	0,29	0,95	-0,31	0,95	0,25	0,27	0,09	0,25	1	
PF	-0,87	0,44	0,64	0,76	-0,25	0,83	0,25	0,03	0,25	0,25	0,80	1

PF : perte au feu ; p-value = 5 %

Les contributions des axes F1 et F2 sont de 51,36 et 26,44 %, respectivement. Les paramètres Fe_2O_3 , PF, MnO, MgO, TiO_2 , Na_2O et SiO_2 interviennent dans la classification des latérites étudiées car, proches de la périphérie du cercle de corrélation (Fig. 30). Trois groupes de paramètres géochimiques sont observables : (1) le groupe des paramètres MnO, PF, P_2O_5 et Fe_2O_3 ; (2) le groupe des paramètres Al_2O_3 , K_2O , MgO, TiO_2 , Na_2O et CaO et, (3) le groupe des paramètres FeO et SiO_2 . Le biplot des variables et/ou individus (Fig. 31) montre que les matériaux Bi-Ab 1, La-Pi, Bi-Ab 2 et les oxydes SiO_2 , FeO sont opposés aux matériaux Hig, Ant, Ba-So, Mam2, Be-Mo et aux oxydes Fe_2O_3 , PF, MnO, MgO, Na_2O , CaO, Al_2O_3 , P_2O_5 et K_2O .

I.6. Corrélations entre composants géochimiques des latérites sur basaltes et argilites

Douze paramètres géochimiques ont été retenus. Les observations sont effectuées sur 18 échantillons de latérites.

La matrice de corrélation montre des corrélations positives (Tab. 28) :

- fortes entre les paramètres MgO vs K_2O (0,99) ;
- moyennes à fortes entre : TiO_2 vs P_2O_5 (0,84) ; TiO_2 vs Al_2O_3 (0,66) ; TiO_2 vs PF (0,78) ; Al_2O_3 vs PF (0,79) ; MnO vs P_2O_5 (0,56) ; CaO vs P_2O_5 (0,62) ; CaO vs PF (0,51) ; Al_2O_3 vs PF (0,72) ; Fe_2O_3 vs PF (0,75) et P_2O_5 vs PF (0,80).

De fortes corrélations négatives s'observent entre SiO_2 vs Fe_2O_3 (-0,92) et SiO_2 vs PF (-0,90). SiO_2 est moyennement à fortement corrélié à TiO_2 (-0,65) ; Al_2O_3 (-0,64) ; P_2O_5 (-0,78). TiO_2 est moyennement corrélié à K_2O (-0,60) et MgO (-0,52), tandis que P_2O_5 est corrélié à MgO (-0,57) et K_2O (-0,63).

En général, SiO_2 est inversement lié aux oxyhydroxydes de fer et d'aluminium, et à PF. PF présente des corrélations positives avec les oxyhydroxydes de fer et d'aluminium. Ces observations confirment les corrélations obtenues sur les composants minéralogiques dans la zone d'étude.

L'analyse des cercles de corrélation montre que les trois premiers axes factoriels expriment 78,44 % de la variance cumulée (Fig. 32). Les contributions des axes F1, F2 et F3 sont de 46,66, 19,48 et 12,30 %, respectivement. Le cercle de corrélation du plan F1-F2, montre 03 groupes de paramètres géochimiques : (1) le groupe des paramètres Al_2O_3 , CaO, PF, Fe_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 , (2) le groupe des paramètres SiO_2 et FeO et, (3) le groupe des paramètres K_2O et MgO. La position de SiO_2 , PF et TiO_2 , proches de la périphérie du cercle de corrélation (F1-F2), suggère que ces paramètres interviennent majoritairement dans

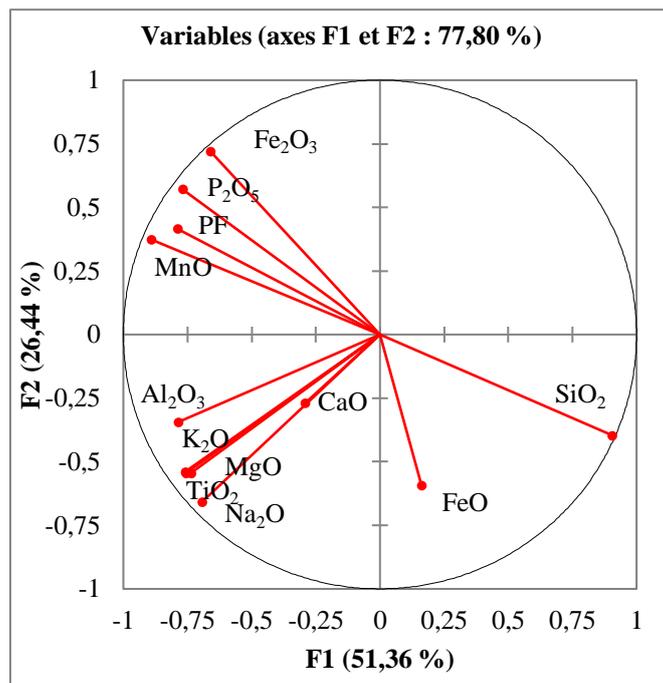


Figure 30. Cercle de corrélation des composants géochimiques des latérites sur argilites dans la zone d'étude

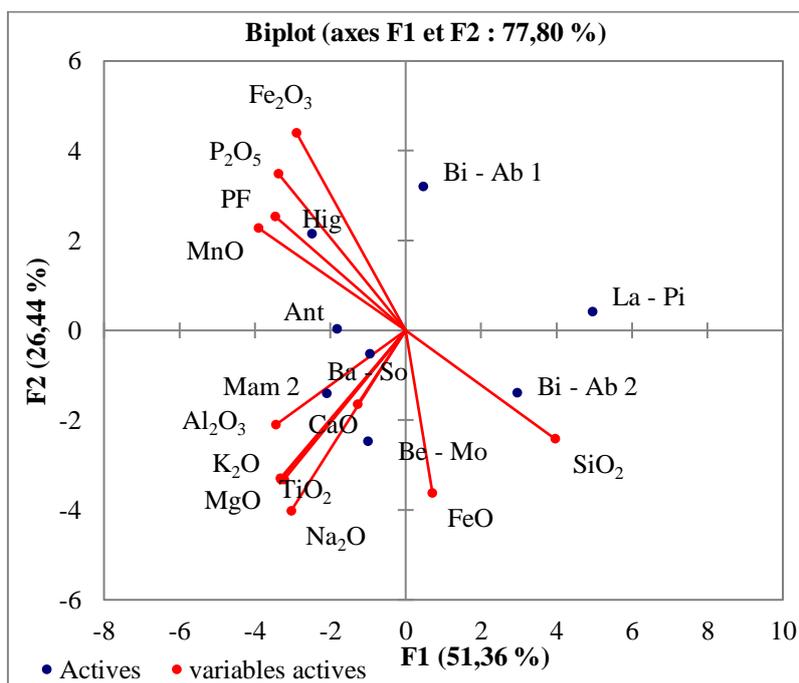


Figure 31. Répartition des latérites sur argilites de la zone d'étude en fonction des composants géochimiques dans le plan factoriel F1-F2

Tableau 28. Matrice de corrélation des composants géochimiques (% d'oxydes) des latérites des basaltes et argilites dans la zone d'étude

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	FeO	P ₂ O ₅	PF
SiO ₂	1											
TiO ₂	-0,65	1										
Al ₂ O ₃	-0,64	0,66	1									
MgO	0,23	-0,52	0,05	1								
MnO	-0,25	0,32	0,00	-0,23	1							
CaO	-0,47	0,49	0,37	-0,26	0,11	1						
Na ₂ O	-0,18	0,02	0,34	0,32	-0,17	0,74	1					
K ₂ O	0,29	-0,60	-0,03	0,99	-0,26	-0,32	0,27	1				
Fe ₂ O ₃	-0,92	0,47	0,29	-0,37	0,27	0,41	0,04	-0,41	1			
FeO	0,01	0,07	0,06	-0,05	0,09	-0,35	-0,44	-0,05	-0,06	1		
P ₂ O ₅	-0,79	0,84	0,45	-0,57	0,56	0,62	0,14	-0,63	0,75	-0,02	1	
PF	-0,90	0,78	0,79	-0,35	0,30	0,51	0,18	-0,43	0,72	0,07	0,80	1

PF : perte au feu ; p-value = 5 %

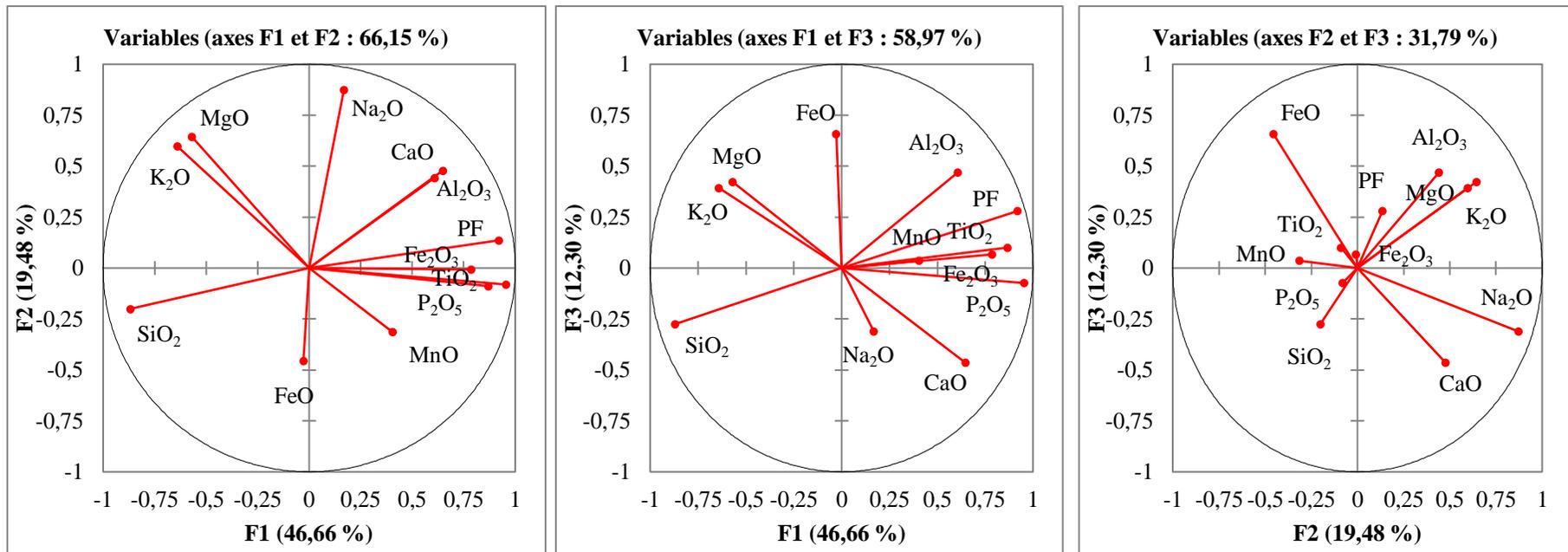


Figure 32. Cercles de corrélation des composants géochimiques des latérites sur basaltes et argilites

la classification des latérites étudiées. Les corrélations qui existent entre Al_2O_3 , PF et Fe_2O_3 , sont confirmées par leurs positions sur le cercle de corrélation (Fig. 40). L'axe F1 sépare les latérites LRB et les latérites LRA (Fig. 33). Les matériaux LRB sont caractérisés par les paramètres K_2O , MgO , SiO_2 et FeO , tandis que les matériaux LRA sont représentés par les paramètres Al_2O_3 , CaO , PF, Fe_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 , MnO et Na_2O .

I.7. Corrélations entre composants minéralogiques et géochimiques des latérites sur basaltes et argilites

Les corrélations positives moyennes à fortes s'observent entre TiO_2 vs kaolinite (0,82), SiO_2 vs quartz (0,77), TiO_2 vs goethite (0,57), TiO_2 vs anatase (0,79), Al_2O_3 vs PF (0,79), Al_2O_3 vs kaolinite (0,52), Al_2O_3 vs anatase (0,79), Fe_2O_3 vs PF (0,72), Fe_2O_3 vs goethite (0,78), Fe_2O_3 vs hématite (0,61), PF vs kaolinite (0,62), PF vs goethite (0,74), PF vs anatase (0,61) (Tab. 29).

Les corrélations négatives :

- moyennes à fortes s'observent entre SiO_2 vs kaolinite (-0,50), SiO_2 vs goethite (-0,76), SiO_2 vs hématite (-0,58), Fe_2O_3 vs quartz (-0,71), PF vs quartz (-0,61).

En général, ces corrélations viennent confirmer les corrélations obtenues antérieurement. SiO_2 est négativement liée aux minéraux riches en oxyhydroxyde de fer (goethite et hématite) et PF, tandis que, ces oxyhydroxydes de fer sont corrélés positivement à PF.

L'analyse en composantes principales a retenu les deux premiers axes factoriels F1 et F2. Ces deux axes expriment 73 % de variance totale expliquée. Les contributions des axes F1 et F2 sont de 53,05 et 20,25 %, respectivement (Fig. 34). La représentation des variables et des individus dans le plan factoriel permet de constater que l'axe F1 oppose les latérites sur basaltes à celles sur argilites (Fig. 35). Ce regroupement est fonction de la nature des roches mères. Les matériaux LRB sont caractérisés par la gibbsite, l'hématite, la goethite, l'anatase, Al_2O_3 , PF, Fe_2O_3 et TiO_2 , tandis que les matériaux LRA sont représentés par le quartz et SiO_2

II. CORRELATIONS ENTRE PARAMETRES GEOTECHNIQUES

II.1. Corrélation des paramètres géotechniques des latérites sur basaltes

La présente étude a été réalisée sur 18 paramètres géotechniques et sur 78 échantillons de latérites.

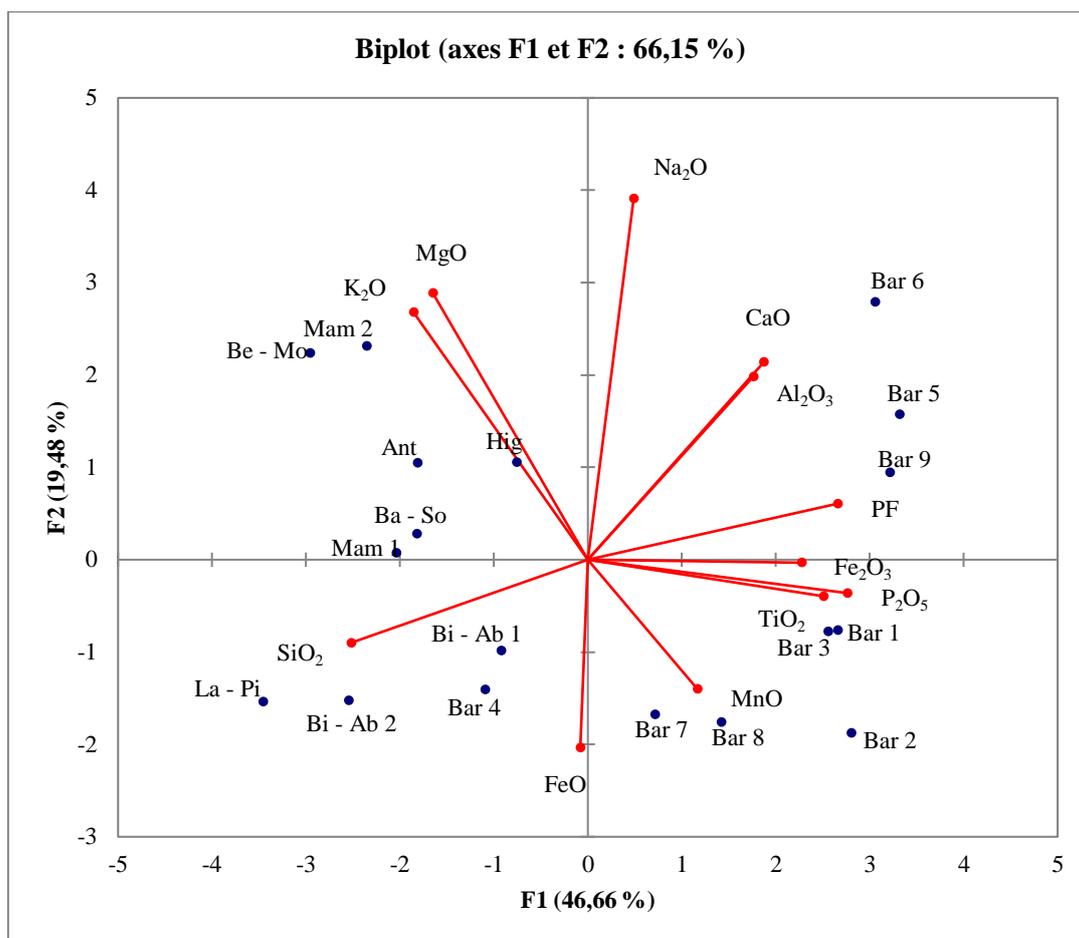


Figure 33. Répartition des latérites sur basaltes et argilites de la zone d'étude en fonction des composants géochimiques dans le plan factoriel F1-F2

Tableau 29. Matrice de corrélation des composants minéralogiques et géochimiques (% d'oxydes) des latérites sur basaltes et argilites dans la zone d'étude

Variables	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	PF	Quartz	Kaolinite	Goethite	Hématite	Anatase	Gibbsite	Muscovite
SiO ₂	1											
TiO ₂	-0,65	1										
Al ₂ O ₃	-0,64	0,66	1									
Fe ₂ O ₃	-0,92	0,47	0,29	1								
PF	-0,90	0,78	0,79	0,72	1							
Quartz	0,77	-0,35	-0,56	-0,71	-0,61	1						
Kaolinite	-0,50	0,82	0,53	0,41	0,62	-0,42	1					
Goethite	-0,76	0,57	0,42	0,78	0,74	-0,64	0,66	1				
Hématite	-0,59	0,06	0,25	0,61	0,32	-0,88	0,13	0,36	1			
Anatase	-0,46	0,79	0,79	0,20	0,61	-0,39	0,77	0,38	0,09	1		
Gibbsite	-0,23	0,02	0,22	0,20	0,20	-0,59	0,04	0,19	0,64	0,11	1	
Muscovite	-0,16	0,04	0,36	0,02	0,14	-0,44	-0,07	0,09	0,42	0,21	0,84	1

PF : perte au feu ; p-value = 5 %

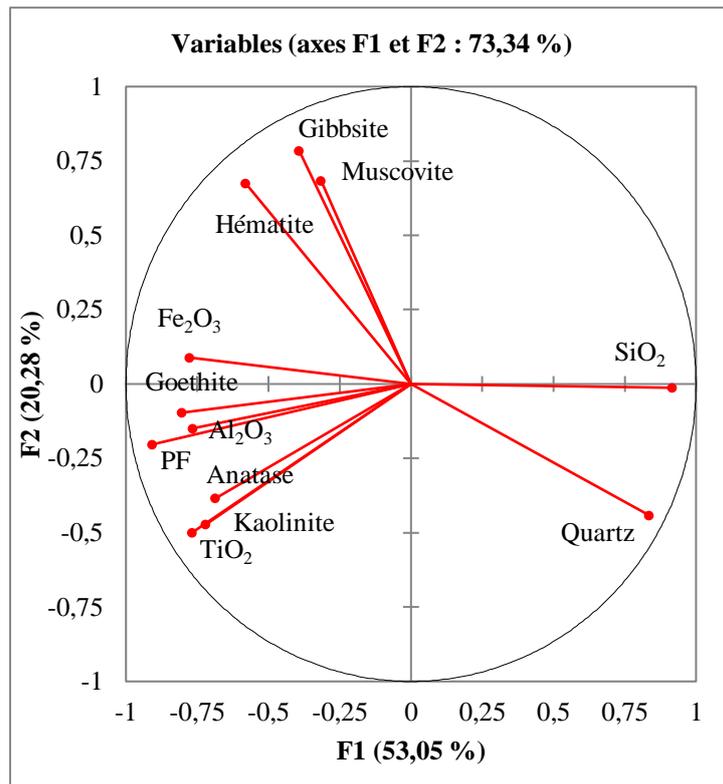


Figure 34. Cercle de corrélation des données minéralogiques et géochimiques des latérites sur basaltes et argillites dans la zone d'étude

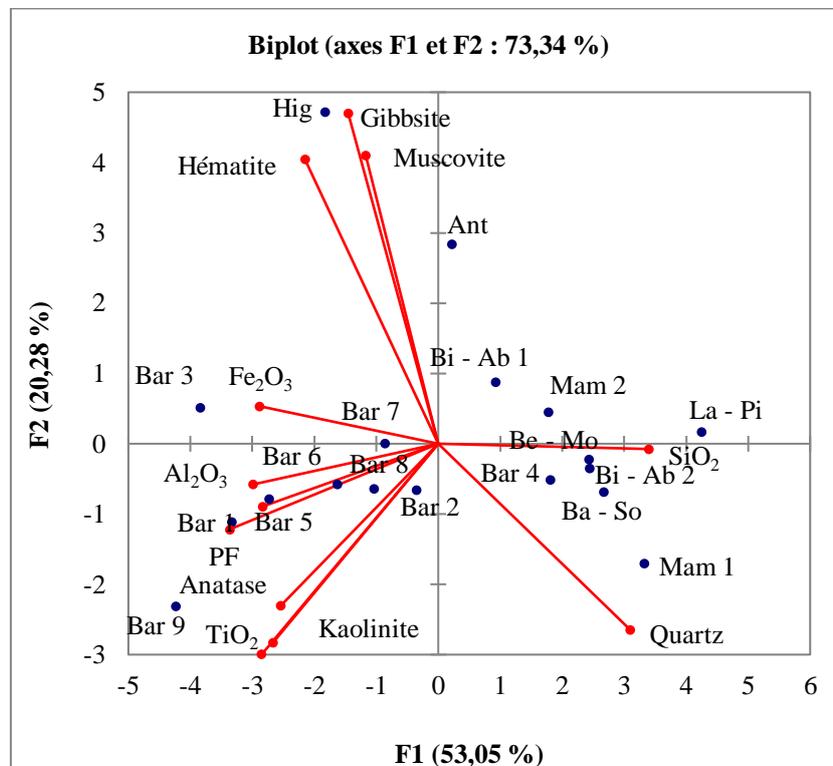


Figure 35. Répartition des latérites sur basalte et argillites dans la zone d'étude en fonction des composants minéralogique et géochimique sur le plan factoriel F1-F2

II.1.1. Matrice de corrélation des paramètres géotechniques des latérites sur basaltes

La matrice de corrélation montre des corrélations positives (Tab. 30) :

- fortes entre : IP vs Pm (0,91), IP vs ε_s (0,99), Pm vs Pp (0,94) et Pm vs ε_s (0,91) ;
- moyennes à fortes entre : Fines vs Argiles (0,87), Fines vs squelette (0,62), Fines vs mortier (0,80), Fines vs Pp (0,61), Fines vs Pp (0,77), argile vs mortier (0,69), argile vs Pm (0,58), argile vs Pp (0,72), squelette vs mortier (0,88), squelette vs Pm (0,72), squelette vs Pp (0,64), mortier vs IP (0,61), mortier vs Pm (0,85), mortier vs Pp (0,81), LL vs LP (0,89), LL vs IP (0,87), LL vs Pm (0,79), LL vs Pp (0,75), LL vs ε_s (0,88), IP vs Pp (0,88) et Pp vs ε_s (0,87).

Cette matrice présente également des corrélations négatives :

- fortes entre : squelette vs Gm (-0,94) et mortier vs Gm (-0,97) ;
- moyennes à fortes entre : gravier vs sable (-0,82), gravier vs squelette (-0,72), gravier vs mortier (-0,64), Fines vs Gm (-0,83), Fines vs Ac (-0,75), Argiles vs Gm (-0,67), Argiles vs Ac (-0,72), Gm vs Pm (-0,79), Gm vs Pp (-0,78) et TE-OPM vs DSM (-0,84).

II.1.2. Analyses en composantes principales des paramètres géotechniques des latérites sur basaltes

L'ACP montre que les 03 premiers axes F1 (43,51 %), F2 (21,36 %) et F3 (10,62 %) expriment à 75,49 % l'information totale du nuage des variables et/ou des individus. Les plans factoriels F1-F2, F1-F3 et F2-F3 expliquent bien l'analyse factorielle. Le plan F1-F2 montre que les paramètres Pp, Pm, LL, Gm, Fines, mortier, IP et ε_s expliquent bien les propriétés géotechniques des latérites étudiées car ils sont proches de la périphérie du cercle de corrélation (Fig. 36). Ce cercle de corrélation montre 03 groupes de paramètres géotechniques : (1) le groupe des paramètres Gm, gravier, Ac et TE-OPM, (2) le groupe des paramètres LP, LL, ε_s , IP, Pm, Pp et CBR et, (3) le groupe des paramètres mortier, squelette, argiles, Fines, sable, γ_s et DSM. Les paramètres LP, LL, ε_s , IP, Pm, Pp et CBR sont opposés aux paramètres mortier, squelette, argiles, Fines, sable, γ_s et DSM par l'axe F2. La position des échantillons dans le biplot des variables et/ou individus (Fig. 37) montre que les paramètres des groupes (2) et (3) interviennent majoritairement dans la classification des latérites étudiées.

II.1.3. Analyse des regressions entre paramètres géotechniques des latérites sur basaltes

Les relations qui existent entre les paramètres géotechniques dérivées des basaltes sont présentées dans le tableau 31. Le sable et le squelette sont liés au gravier par une relation

Tableau 30. Matrice de corrélation des paramètres géotechniques des latérites sur basaltes dans la zone d'étude

Variables	γ_s	Gravier	Sable	Fines	Argiles	Squelette	Mortier	LL	LP	IP	Gm	Pm	Pp	Ac	ε_s	TE-OMC	DSM	CBR
γ_s	1																	
Gravier	-0,23	1																
Sable	0,21	-0,82	1															
Fines	0,09	-0,54	-0,04	1														
Argiles	0,00	-0,39	-0,13	0,87	1													
Squelette	0,19	-0,72	0,44	0,62	0,43	1												
Mortier	0,18	-0,64	0,21	0,80	0,69	0,88	1											
LL	0,02	-0,07	-0,11	0,29	0,31	0,44	0,52	1										
LP	-0,05	0,06	-0,11	0,05	0,09	0,24	0,25	0,84	1									
IP	0,08	-0,17	-0,08	0,43	0,43	0,49	0,61	0,87	0,46	1								
Gm	-0,18	0,70	-0,27	-0,83	-0,67	-0,94	-0,97	-0,46	-0,21	-0,55	1							
Pm	0,13	-0,40	0,07	0,61	0,58	0,72	0,85	0,79	0,43	0,91	-0,79	1						
Pp	0,08	-0,37	-0,08	0,77	0,72	0,64	0,81	0,75	0,37	0,88	-0,78	0,94	1					
Ac	-0,07	0,44	-0,01	-0,75	-0,72	-0,35	-0,49	0,12	0,20	0,02	0,53	-0,17	-0,32	1				
ε_s	0,07	-0,14	-0,09	0,38	0,40	0,47	0,59	0,88	0,49	0,99	-0,53	0,91	0,87	0,05	1			
TE-OMC	-0,12	0,39	-0,24	-0,32	-0,22	-0,10	-0,14	0,35	0,40	0,22	0,18	0,12	0,04	0,49	0,28	1		
DSM	0,18	-0,36	0,26	0,24	0,18	0,09	0,12	-0,26	-0,35	-0,10	-0,15	-0,08	-0,03	-0,41	-0,17	-0,84	1	
CBR	0,31	-0,02	0,10	-0,12	-0,08	-0,07	-0,08	0,17	0,20	0,09	0,09	0,03	0,01	0,17	0,09	-0,05	0,11	1

N = 78

P-value = 5 % ; γ_s : poids spécifique ; LL : limite de liquidité ; LP : limite de plasticité ; IP : indice de plasticité ; Gm : module de classement ; Pm : module de plasticité ; Pp : produit de plasticité ; Ac : activité des colloïdes ; ε_s : gonflement potentiel ; TE-OPM : teneur en eau à l'optimum proctor modifié ; DSM : densité sèche maximale ; CBR : californian bearing ratio à 95% OPM.

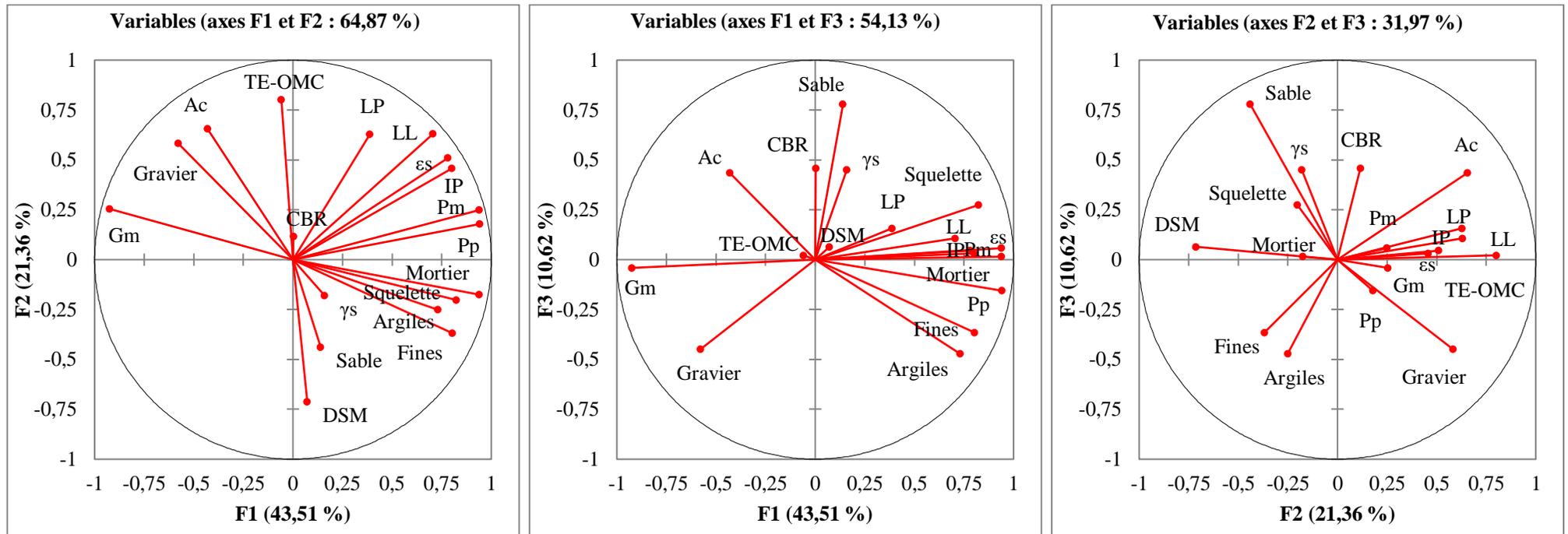


Figure 36. Cercles de corrélation des paramètres géotechniques des latérites sur basaltes dans la zone d'étude

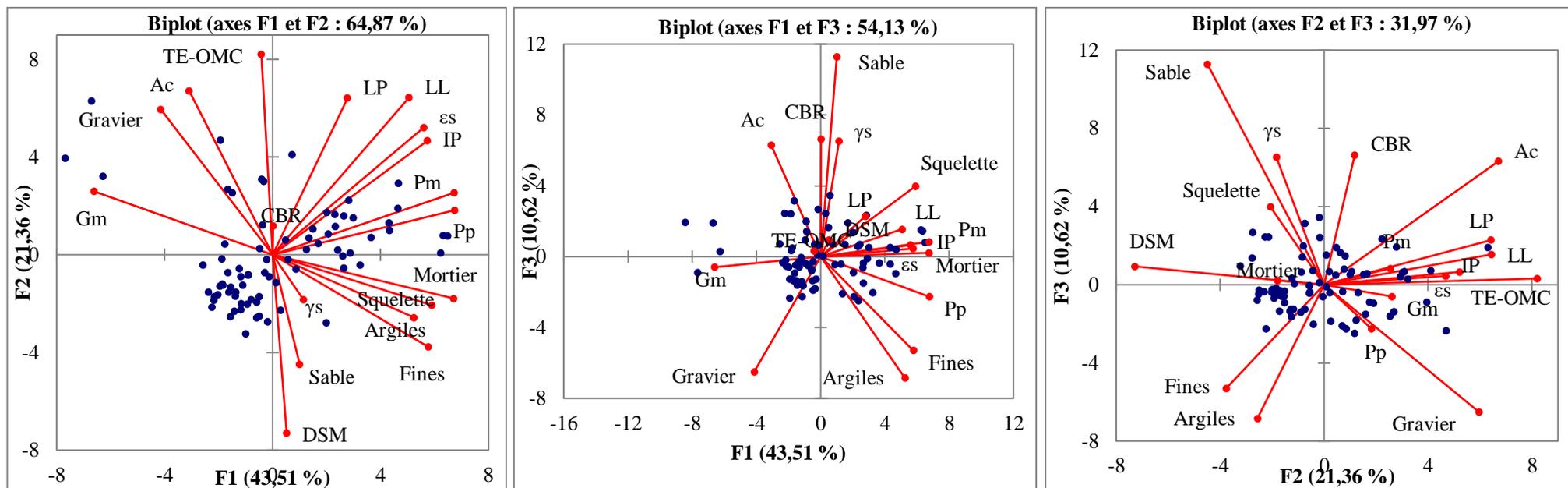


Figure 37. Répartition des latérites sur basalte dans la zone d'étude en fonction des paramètres géotechniques sur les plans factoriels F1-F2-F3

Tableau 31. Données récapitulatives des relations entre paramètres géotechniques des latérites sur basaltes

N°	Relations	Type (N = 78)	Equation	Coefficient de détermination	Domaine d'étude
1	Sable-Gravier	Linéaire	Sable = -0,6938Gravier + 61,832	R ² = 0,674	Gravier ∈ [15,30; 69,40]
2	Argiles-Fines	Linéaire	Argiles = 0,7272Fines - 4,6922	R ² = 0,7563	Fines ∈ [5,90; 35,60]
3	Squelette-Gravier	Linéaire	Squelette = -0,7555Gravier + 71,507	R ² = 0,5216	Gravier ∈ [15,30; 69,40]
4	Mortier-Fines	Linéaire	Mortier = 0,9888Fines + 6,8102	R ² = 0,6459	Fines ∈ [5,90; 35,60]
5	Mortier-Argiles	Polynomiale 3	Mortier = 0,0086Argiles ³ - 0,377Argiles ² + 5,8656Argiles + 1,354	R ² = 0,5477	Argile ∈ [1,90; 24,50]
6	LP-LL	Linéaire	LP = 0,4692LL + 5,861	R ² = 0,7054	LL ∈ [39,00; 95,00]
7	Gm-Gravier	Polynomiale 3	Gm = 9E-06Gravier ³ - 0,0009Gravier ² + 0,0414Gravier + 1,2075	R ² = 0,5259	Gravier ∈ [15,30; 69,40]
8	Gm-Fines	Linéaire	Gm = -0,0312Fines + 2,8006	R ² = 0,6913	Fines ∈ [5,90; 35,60]
9	Gm-Argiles	Polynomiale 3	Gm = -0,0003Argiles ³ + 0,0126Argiles ² - 0,1943Argiles + 2,9954	R ² = 0,5447	Argile ∈ [1,90; 24,50]
10	Gm-Squelette	Linéaire	Gm = -0,0193Squelette + 2,8039	R ² = 0,8877	Squelette ∈ [14,00; 75,00]
11	Gm-Mortier	Linéaire	Gm = -0,0297Mortier + 2,9529	R ² = 0,9468	Mortier ∈ [9,60; 54,00]
12	Pp-Gm	Linéaire	Pp = -1549,4Gm + 4048,4	R ² = 0,6291	Gm ∈ [1,38; 2,66]
13	Pp-Fines	Linéaire	Pp = 40,22Fines - 277,92	R ² = 0,5867	Fines ∈ [5,90; 35,60]
14	Pp-Argile	Linéaire	Pp = 45,243Argile + 130,64	R ² = 0,519	Argile ∈ [1,90; 24,50]
15	Pp-Mortier	Linéaire	Pp = 34,588Mortier - 352,11	R ² = 0,6568	Mortier ∈ [9,60; 54,00]
16	Pp-IP	Linéaire	Pp = 35,06IP - 218,92	R ² = 0,7804	IP ∈ [11,00; 46,00]
17	DSM-TE-OPM	Linéaire	DSM = -0,2663TE-OPM + 22,917	R ² = 0,7001	TE-OPM ∈ [9,00; 25,00]

linéaire. Les argiles, le mortier, Gm et Pp sont liés aux Fines par une relation linéaire. Le mortier et Pp sont liés par une relation linéaire. Gm est lié aux graviers et argiles par une relation polynomiale d'ordre 3. Le mortier et les argiles sont également liés par une relation polynomiale d'ordre 3. DSM et TE-OPM sont liées par une relation linéaire.

II.2. Corrélation entre paramètres géotechniques des latérites sur argilites

L'étude a été réalisée sur 18 paramètres géotechniques et sur 69 échantillons de latérites.

II.2.1. Matrice de corrélation des paramètres géotechniques des latérites sur argilites

La matrice de corrélation réalisée sur les latérites LRA est consignée dans le tableau 32. Des corrélations positives fortes existent entre Fines et argiles (0,93) et entre IP et ε_s (0,98). Des corrélations positives moyennes à bonnes s'observent entre Fines et mortier (0,67), Fines et Pp (0,69), argiles et Pp (0,64), squelette et mortier (0,68), mortier et Pm (0,69), mortier et Pp (0,63), LL et LP (0,89), LL et IP (0,84), LL et Pm (0,76), LL et ε_s (0,82), IP et Pm (0,86), IP et Pp (0,72), Pm et Pp (0,86), Pm et ε_s (0,79) et Pp et ε_s (0,66).

Une corrélation forte négative s'observe entre mortier et Gm (-0,93). Des corrélations négatives moyennes à fortes existent entre gravier et sable (-0,81), Fines et Gm (-0,65), Fines et Ac (-0,76), argiles et Ac (-0,79), squelette et Gm (-0,84), Gm et Pm (-0,63), Gm et Pp (-0,60) et, TE-OPM et DSM (-0,65).

II.2.2. Analyse en composantes principales des paramètres géotechniques des latérites sur argilites

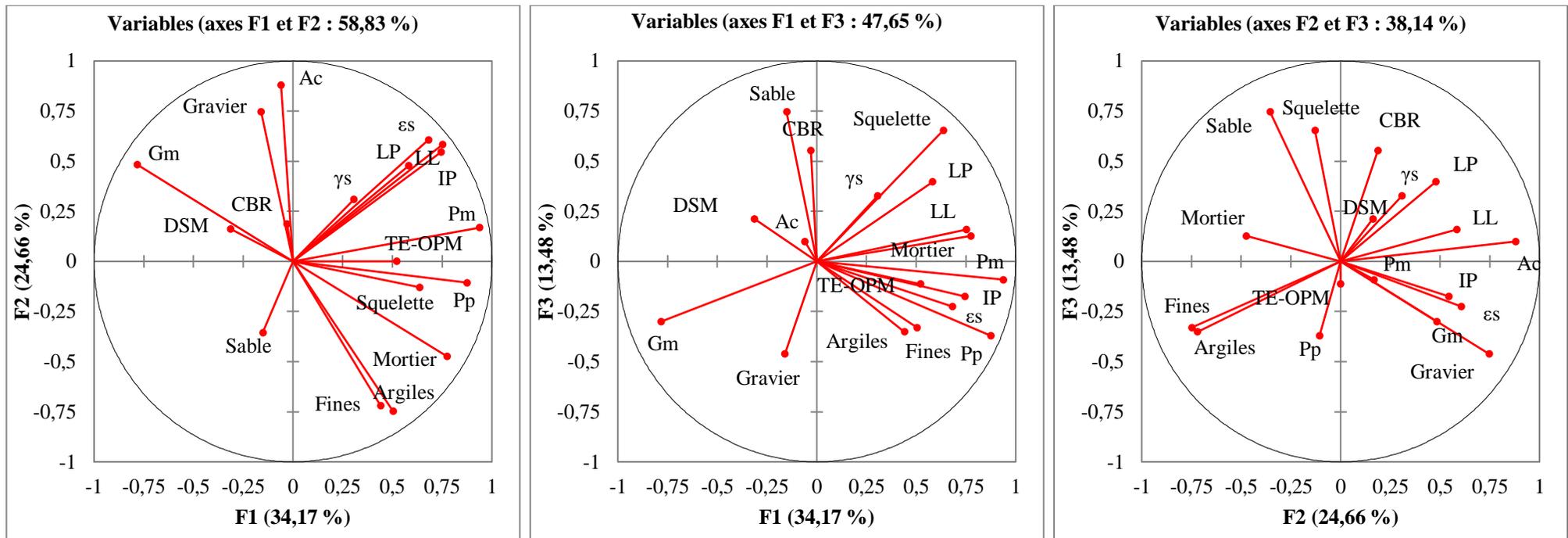
L'analyse en composantes principales des paramètres géotechniques des latérites sur LRA montre que les 03 premiers axes factoriels expriment à 72,31 %, l'information totale du nuage des variables et/ou des individus. Les contributions des axes F1, F2 et F3 sont de 34,17, 24,66 et 13,48 %, respectivement. Le plan factoriel F1-F2 est bien représentatif de l'analyse factorielle. La position des paramètres argiles, mortier, Pm, LL, IP, ε_s et Gm, proche de la périphérie du cercle de corrélation (Fig. 38), montrent qu'ils expliquent bien les propriétés géotechniques des latérites étudiées. Ce cercle de corrélation présente 03 groupes de paramètres géotechniques : (1) le groupe des paramètres Gm, DSM, CBR, Gravier et Ac, (2) le groupe des paramètres ε_s , γ_s , LP, LL, IP, Pm et TE-OPM et, (3) le groupe des paramètres Pp, squelette, mortier, argiles et Fines. Les paramètres des groupes (1) et (2) sont séparés des paramètres du groupe (3) par l'axe factoriel F2. Le biplot des variables et/ou individus (Fig. 39) montre que les paramètres granulométriques et ceux de plasticité interviennent

Tableau 32. Matrice de corrélation des paramètres géotechniques des latérites sur argilites dans la zone d'étude

Variables	γ_s	Gravier	Sable	Fines	Argiles	Squelette	Mortier	LL	LP	IP	Gm	Pm	Pp	Ac	ϵ_s	TE-OPM	DSM	CBR	
γ_s	1																		
Gravier	0,09	1																	
Sable	-0,03	-0,81	1																
Fines	-0,10	-0,49	-0,11	1															
Argiles	-0,08	-0,43	-0,13	0,93	1														
Squelette	0,26	-0,43	0,39	0,16	0,06	1													
Mortier	0,10	-0,45	0,07	0,67	0,58	0,68	1												
LL	0,41	0,23	-0,20	-0,09	-0,10	0,47	0,28	1											
LP	0,39	0,16	-0,06	-0,18	-0,17	0,53	0,24	0,89	1										
IP	0,32	0,25	-0,31	0,04	0,02	0,25	0,26	0,84	0,51	1									
Gm	-0,14	0,56	-0,21	-0,65	-0,54	-0,84	-0,93	-0,32	-0,32	-0,24	1								
Pm	0,27	-0,02	-0,22	0,35	0,30	0,51	0,69	0,76	0,50	0,86	-0,63	1							
Pp	0,16	-0,10	-0,34	0,69	0,64	0,28	0,63	0,54	0,27	0,72	-0,60	0,86	1						
Ac	0,14	0,53	-0,10	-0,76	-0,79	-0,02	-0,41	0,42	0,28	0,47	0,41	0,13	-0,20	1					
ϵ_s	0,27	0,33	-0,36	-0,03	-0,04	0,18	0,17	0,82	0,50	0,98	-0,15	0,79	0,66	0,52	1				
TE-OPM	0,03	-0,01	-0,12	0,20	0,12	0,32	0,36	0,35	0,33	0,27	-0,37	0,40	0,35	0,03	0,28	1			
DSM	0,09	0,04	0,10	-0,23	-0,17	-0,16	-0,24	-0,12	-0,17	-0,03	0,25	-0,17	-0,19	0,16	-0,07	-0,65	1		
CBR	0,35	0,05	0,08	-0,21	-0,13	0,22	-0,07	0,21	0,39	-0,07	-0,03	-0,10	-0,18	-0,01	-0,07	-0,22	0,33	1	

N = 69

P-value = 5 % ; γ_s : poids spécifique ; LL : limite de liquidité ; LP : limite de plasticité ; IP : indice de plasticité ; Gm : module de classement ; Pm : module de plasticité ; Pp : produit de plasticité ; Ac : activité des colloïdes ; ϵ_s : gonflement potentiel ; TE-OPM : teneur en eau à l'optimum proctor modifié ; DSM : densité sèche maximale ; CBR : california bearing ratio à 95% OPM



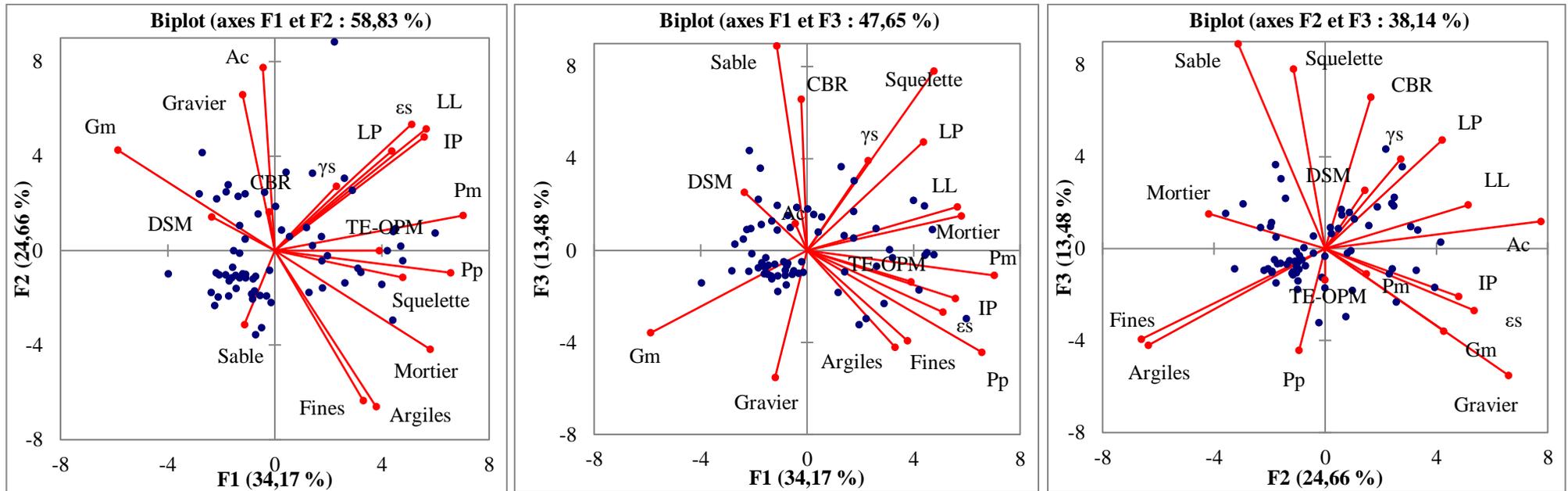


Figure 39. Répartition des latérites sur argilites dans la zone d'étude en fonction des paramètres géotechniques sur les plans factoriels F1-F2-F3

majoritairement dans la classification des latérites étudiées.

II.2.3. Analyse des regressions entre paramètres géotechniques des latérites sur argilites

Le tableau 33 présente les relations qui existent entre les paramètres géotechniques dérivées des argilites. Le sable est lié au gravier par une relation linéaire. Les argiles et Ac sont liées aux Fines par une relation linéaire. LP, IP, Pp et ϵ_s sont liés à LL par une relation linéaire. Le mortier est lié aux Fines et au squelette par des relations polynomiales d'ordre 3 et 2, respectivement. Gm, Pp et Ac sont est liés aux Fines et au squelette par des relations polynomiales d'ordre 3 et 2, respectivement.

II.3. Corrélation des paramètres géotechniques des latérites sur gneiss

Dans la présente étude, 18 paramètres géotechniques (variables) ont été retenus. Les observations ont été effectuées sur 28 échantillons de latérites (individus).

II.3.1. Matrice de corrélation des paramètres géotechniques des latérites sur gneiss

La matrice de corrélation montre des corrélations positives (Tab. 34) :

- fortes entre : IP et ϵ_s , Pm et Pp ;
- moyennes à fortes entre : Fines et argile (0,83), Fines et mortier (0,84), Fines et Pm (0,70), Fines et Pp (0,82), argile et mortier (0,76), argile et Pp (0,61), squelette et mortier (0,75), squelette et Pm (0,73), squelette et Pp (0,63), mortier et Pm (0,84), mortier et Pp (0,78), LL et LP (0,81), LL et IP (0,80), LL et Pm (0,70), LL et Pp (0,67), LL et Ac (0,78), IP et Pm (0,89), IP et Pp (0,87), Pm et ϵ_s (0,85), Pp et ϵ_s (0,86) et, DSM et CBR (0,64).

Des corrélations négatives :

- fortes s'observent entre : mortier et Gm (-0,95) et TE-OPM et DSM (-0,94) ;
- moyennes à fortes existent entre : gravier et sable (-0,75), gravier et (-0,62), Fines et Gm (-0,85), argile et Gm (-0,73), argile et Ac (-0,65), squelette et Gm (-0,88), Gm et Pm (-0,84), Gm et Pp (-0,82) et Pm et CBR (-0,61).

II.3.2. Analyse en composantes principales des paramètres géotechniques des latérites sur gneiss

L'ACP montre que les axes F1 (46,78 %), F2 (17,68 %) et F3 (13,92 %) expriment un pourcentage de 78,38 % de l'information totale du nuage des points. Le plan factoriel retenu, est

Tableau 33. Données récapitulatives des relations entre paramètres géotechniques des latérites sur argilites

N°	Relations	Type (N = 69)	Equation	Coefficient de détermination	Domaine d'étude
1	Sable-Gravier	Linéaire	Sable = -0,714Gravier + 63,355	R ² = 0,6635	Gravier € [18,00; 63,90]
2	Argile-Fines	Linéaire	Argiles = 0,8958Fines - 7,3511	R ² = 0,8735	Fines € [9,70; 35,00]
3	Mortier-Fines	Polynomiale 3	Mortier = 0,0048Fines ³ - 0,3517Fines ² + 8,7334Fines - 42,789	R ² = 0,5394	Fines € [9,70; 35,00]
4	Mortier-Squelette	Polynomiale 2	Mortier = -0,0132squelette ² + 1,5434squelette - 8,3084	R ² = 0,5497	Squelette € [17,50; 65,00]
5	LP-LL	Linéaire	LP = 0,5636LL + 0,2044	R ² = 0,8004	LL € [42,00; 93,00]
6	IP-LL	Linéaire	IP = 0,4364LL - 0,2044	R ² = 0,7062	LL € [42,00; 93,00]
7	Gm-Fines	Polynome 3	Gm = -0,0002Fines ³ + 0,0123Fines ² - 0,3005Fines + 4,5109	R ² = 0,532	Fines € [9,70; 35,00]
8	Gm-Fines	Linéaire	Gm = -0,0147squelette + 2,6105	R ² = 0,7052	Squelette € [17,50; 65,00]
9	Gm-mortier	Linéaire	Gm = -0,0297mortier + 2,9515	R ² = 0,8724	Mortier € [13,30; 42,00]
10	Pm-IP	Linéaire	Pp = 35,334IP - 78,658	R ² = 0,7336	IP € [12,00; 49,00]
11	Pm-LL	Linéaire	Pp = 16,26LL - 137,94	R ² = 0,5762	LL € [42,00; 93,00]
12	Pp-Fines	Polynomiale 3	Pp = 0,1561Fines ³ - 10,605Fines ² + 254,52Fines - 1519,7	R ² = 0,5289	Fines € [9,70; 35,00]
13	Pp-Pm	Linéaire	Pp = 0,7132Pm + 86,868	R ² = 0,7462	Pm € [159,60; 1512,00]
14	Ac-Fines	Linéaire	Ac = -0,1446Fines + 5,6961	R ² = 0,5773	Fines € [9,70; 35,00]
15	Ac-Squelette	Polynomiale 2	Ac = 0,0102squelette ² - 0,4659squelette + 6,5048	R ² = 0,7116	Squelette € [17,50; 65,00]
16	Es-LL	Linéaire	Es = 0,0006LL - 0,0232	R ² = 0,6741	LL € [42,00; 93,00]
17	Es-IP	Linéaire	Es = 0,0015IP - 0,0228	R ² = 0,9507	IP € [12,00; 49,00]
18	Es-Pm	Linéaire	Pm = 3E-05Es - 0,0085	R ² = 0,6296	Es € [0,003; 0,061]

Tableau 34. Matrice de corrélation des paramètres géotechniques des latérites sur gneiss dans la zone d'étude

Variables	γ_s	Gravier	Sable	Fines	Argiles	Squelette	Mortier	LL	LP	IP	Gm	Pm	Pp	Ac	ε_s	TE-OPM	DSM	CBR
γ_s	1																	
Gravier	-0,05	1																
Sable	0,29	-0,75	1															
Fines	-0,30	-0,52	-0,17	1														
Argiles	-0,23	-0,44	-0,13	0,83	1													
Squelette	-0,35	-0,62	0,31	0,53	0,44	1												
Mortier	-0,50	-0,52	-0,05	0,84	0,76	0,75	1											
LL	-0,55	-0,10	-0,17	0,38	0,19	0,39	0,44	1										
LP	-0,32	0,02	-0,14	0,15	0,03	0,11	0,18	0,81	1									
IP	-0,57	-0,19	-0,14	0,46	0,28	0,53	0,53	0,80	0,30	1								
Gm	0,42	0,63	-0,06	-0,85	-0,73	-0,88	-0,95	-0,45	-0,16	-0,57	1							
Pm	-0,66	-0,36	-0,14	0,70	0,55	0,73	0,84	0,70	0,25	0,89	-0,84	1						
Pp	-0,55	-0,36	-0,22	0,82	0,61	0,63	0,78	0,67	0,22	0,87	-0,82	0,95	1					
Ac	-0,15	0,23	0,08	-0,44	-0,65	-0,04	-0,33	0,33	0,08	0,46	0,27	0,13	0,05	1				
ε_s	-0,58	-0,07	-0,25	0,42	0,23	0,44	0,45	0,78	0,29	0,98	-0,49	0,85	0,86	0,48	1			
TE-OPM	-0,35	0,13	-0,50	0,45	0,31	0,05	0,21	0,30	0,24	0,24	-0,24	0,29	0,43	-0,21	0,35	1		
DSM	0,47	-0,14	0,50	-0,43	-0,29	-0,05	-0,23	-0,35	-0,27	-0,29	0,24	-0,33	-0,45	0,12	-0,39	-0,94	1	
CBR	0,41	0,31	0,06	-0,53	-0,36	-0,35	-0,44	-0,35	-0,05	-0,51	0,48	-0,56	-0,61	-0,05	-0,50	-0,57	0,64	1

P-value = 5 % ; γ_s : poids spécifique ; LL : limite de liquidité ; LP : limite de plasticité ; IP : indice de plasticité ; Gm : module de classement ; Pm : module de plasticité ; Pp : produit de plasticité ; Ac : activité des colloïdes ; ε_s : gonflement potentiel ; TE-OPM : teneur en eau à l'optimum proctor modifié ; DSM : densité sèche maximale ; CBR : californian bearing ratio à 95% OPM

le plan F1-F2, car il est bien représentatif de l'analyse factorielle. Les paramètres Gm, ϵ_s , IP, Pp, Pm, mortier, Fines, squelette et argiles sont assez bien représentés, car ils sont proches de la périphérie du cercle de corrélation (Fig. 40). L'observation du cercle de corrélation montre 04 groupes de paramètres géotechniques : (1) le groupe des paramètres Gm, gravier et Ac, (2) le groupe des paramètres LP, TE-OPM, LL, ϵ_s , IP, Pp et Pm, (3) le groupe des paramètres Fines, mortier, squelette et argile et, (4) le groupe des paramètres CBR, γ_s , DSM et sable. L'axe factoriel F1 sépare les paramètres des groupes (1) et (4) aux paramètres des groupes (2) et (3) tandis que, l'axe F2 sépare les paramètres des groupes (1) et (2) aux paramètres des groupes (3) et (4) (Fig. 41).

II.3.3. Analyse des regressions entre paramètres géotechniques des latérites sur gneiss

Le tableau 35 présente les relations qui existent entre les paramètres géotechniques dérivées des gneiss. Le sable est lié au gravier par une relation linéaire. L'argile, le mortier, Gm et Pp, sont liés aux Fines par une relation linéaire. LP et Pp sont liés à LL par des relations linéaire et polynomiale d'ordre 4 respectivement. Le mortier et Gm sont liés aux argiles par une relation linéaire. Gm et Pm sont liés au squelette de manière linéaire, tandis que Pp est lié au squelette par une relation polynomiale d'ordre 4. DSM est lié fortement à TE-OPM par une relation linéaire.

II.4. Corrélations entre paramètres géotechniques des latérites sur basaltes, argilites et gneiss

L'analyse statistique a été réalisée sur 175 échantillons de latérites et sur 18 paramètres géotechniques ; soit 78 échantillons LRB, 69 LRA et 28 LRG.

II.4.1. Matrice de corrélations entre paramètres géotechniques

La matrice de corrélation réalisée sur l'ensemble des latérites du secteur d'étude est consignée dans le Tableau 36.

De fortes corrélations positives existent entre Fines et argile (0,87), squelette et mortier (0,80), mortier et Pp (0,82), LL et LP (0,85), LL et IP (0,85), LL et ϵ_s (0,84), IP et Pm (0,89), IP et Pp (0,84), IP et ϵ_s (0,98), Pm et ϵ_s (0,87), Pm et Pp (0,93) et Pp et ϵ_s (0,82).

De bonnes corrélations s'observent entre gravier et Gm (0,64), Fines et mortier (0,77), Fines et Pm (0,55), Fines et Pp (0,75), argile et mortier (0,63), argile et Pp (0,63), squelette et mortier (0,80), squelette et Pm (0,66), squelette et Pp (0,54), mortier et IP (0,51), mortier et Pp (0,77), LL et Pm (0,76) et, entre LL et Pp (0,68).

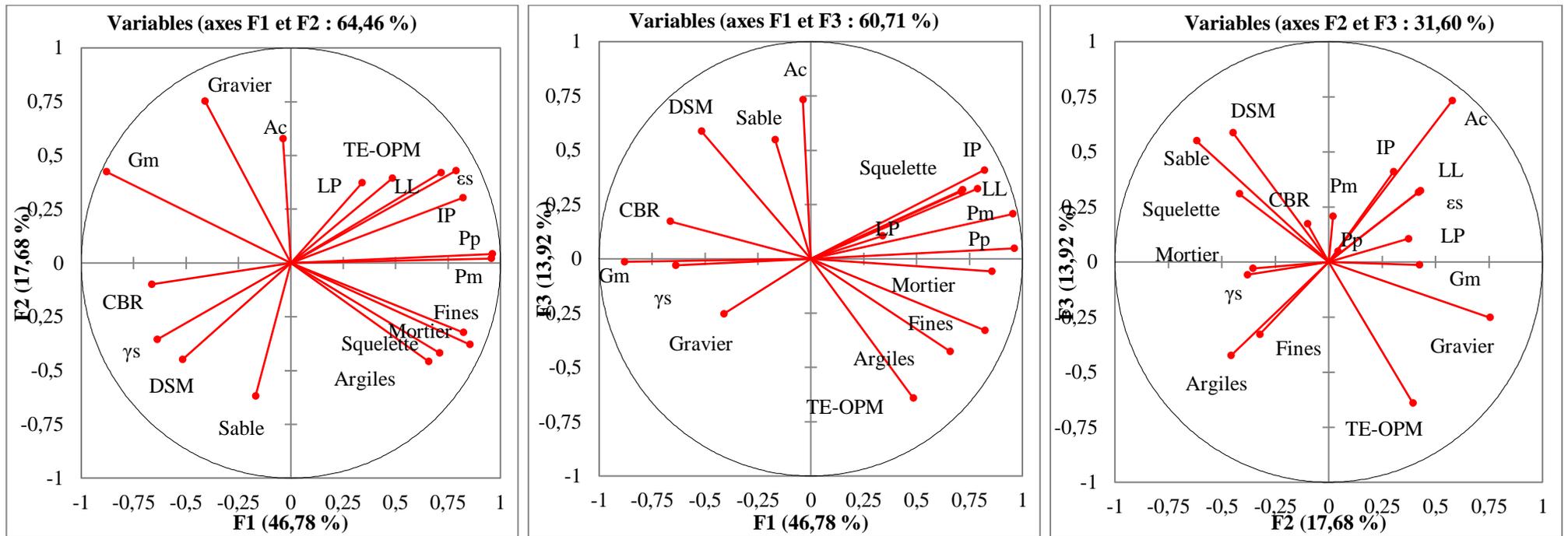


Figure 40. Cercles de corrélation des paramètres géotechniques des latérites sur gneiss dans la zone d'étude

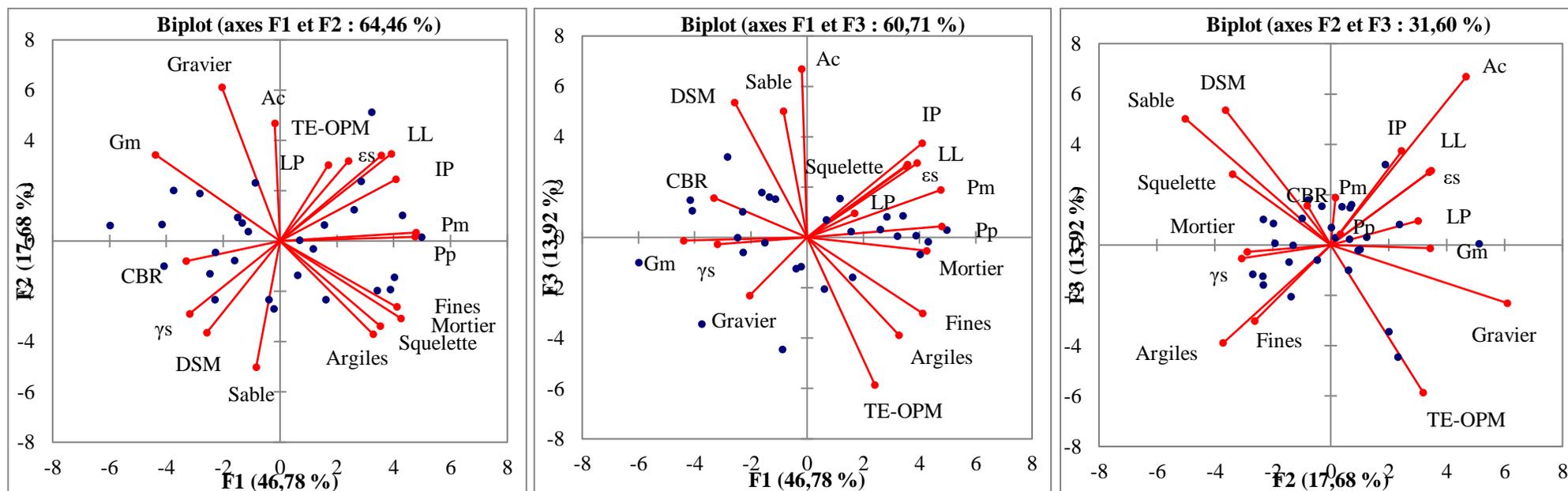


Figure 41. Répartition des latérites sur gneiss dans la zone d'étude en fonction des paramètres géotechniques sur les plans factoriels F1-F2-F3

Tableau 35. Données récapitulatives des relations entre paramètres géotechniques des latérites sur gneiss

N°	Relations	Type (N = 28)	Equation	Coefficient de détermination	Domaine d'étude
1	Sable-Gravier	Linéaire	Sable = -0,646Gravier + 61,191	R ² = 0,5581	Gravier ∈ [21,00; 57,10]
2	Argile-Fines	Linéaire	Argile = 0,5483Fines - 0,6095	R ² = 0,6903	Fines ∈ [11,00; 34,00]
3	Mortier-Fines	Linéaire	Mortier = 0,8709Fines + 10,434	R ² = 0,7018	Fines ∈ [11,00; 34,00]
4	Mortier-Argile	Linéaire	Mortier = 1,2046Argile + 16,208	R ² = 0,5847	Argile ∈ [4,00; 22,60]
5	LP-LL	Linéaire	LP = 0,5102LL + 3,0163	R ² = 0,658	LL ∈ [27,00; 94,00]
6	IP-LP	Linéaire	IP = 0,4898LP - 3,0163	R ² = 0,6394	LP ∈ [10,00; 48,00]
7	Gm-Fines	Linéaire	Gm = -0,0261Fines + 2,6232	R ² = 0,7203	Fines ∈ [11,00; 34,00]
8	Gm-argile	Linéaire	Gm = -0,034argile + 2,4243	R ² = 0,5327	Argile ∈ [4,00; 22,60]
9	Gm-Squelette	Linéaire	Gm = -0,0194Squelette + 2,868	R ² = 0,7764	Squelette ∈ [26,30; 67,00]
10	Gm-Mortier	Linéaire	Gm = -0,0282mortier + 2,8806	R ² = 0,9096	Mortier ∈ [17,00; 43,40]
11	Pm-Gm	Linéaire	Pm = -1627,5Gm + 4173,7	R ² = 0,7139	Gm ∈ [1,66; 2,34]
12	Pm-IP	Linéaire	Pm = 40,9IP - 243,65	R ² = 0,7985	IP ∈ [12,00; 46,00]
13	Pm-mortier	Linéaire	Pm = 47,68mortier - 571,68	R ² = 0,7022	Mortier ∈ [17,00; 43,40]
14	Pm-squelette	Linéaire	Pm = 30,993squelette - 469,85	R ² = 0,5356	Squelette ∈ [26,30; 67,00]
15	Pm-Fines	Polynomiale 3	Pm = -0,2265Fines ³ + 14,908Fines ² - 263,44Fines + 1839,1	R ² = 0,5186	Fines ∈ [11,00; 34,00]
16	Pp-Fines	Linéaire	Pp = 40,54Fines - 264,82	R ² = 0,6678	Fines ∈ [11,00; 34,00]
17	Pp-squelette	Polynomiale 4	Pp = -0,0074squelette ⁴ + 1,2986squelette ³ - 83,044squelette ² + 2296,5squelette - 22754	R ² = 0,5781	Squelette ∈ [26,30; 67,00]
18	Pp-mortier	Linéaire	Pp = 37,191mortier - 457,67	R ² = 0,6075	Mortier ∈ [17,00; 43,40]
19	Pp-LL	Polynomiale 4	Pp = -0,0008LL ⁴ + 0,1953LL ³ - 16,853LL ² + 617,35LL - 7620,5	R ² = 0,5145	LL ∈ [27,00; 94,00]
20	Pp	Linéaire	Pp = 33,288IP - 241,26	R ² = 0,7521	IP ∈ [12,00; 46,00]
21	Pp	Linéaire	Pp = -1320,3Gm + 3345,3	R ² = 0,668	Gm ∈ [1,66; 2,34]
22	Pp	Linéaire	Pp = 0,7972Pm - 27,548	R ² = 0,9035	Pm ∈ [204,00; 1605,00]
23	DSM-TE-OPM	Linéaire	DSM = -0,0282TE-OPM + 2,313	R ² = 0,8846	TE-OPM ∈ [7,00; 24,30]

Tableau 36. Matrice de corrélation des paramètres géotechniques des latérites dans la zone d'étude

Variables	γ_s	Gravier	Sable	Fines	Argile	Squelette	Mortier	LL	LP	IP	Gm	Pm	Pp	Ac	ε_s	TE-OPM	DSM	CBR	
γ_s	1																		
Gravier	-0,09	1																	
Sable	0,14	-0,81	1																
Fines	-0,05	-0,53	-0,07	1															
Argile	-0,07	-0,44	-0,09	0,87	1														
Squelette	0,14	-0,58	0,38	0,44	0,26	1													
Mortier	0,04	-0,56	0,13	0,77	0,63	0,80	1												
LL	0,05	0,03	-0,16	0,18	0,12	0,44	0,44	1											
LP	0,05	0,09	-0,10	0,00	-0,03	0,32	0,24	0,85	1										
IP	0,03	-0,04	-0,17	0,32	0,23	0,43	0,51	0,85	0,45	1									
Gm	-0,07	0,64	-0,21	-0,77	-0,60	-0,90	-0,96	-0,42	-0,24	-0,48	1								
Pm	0,03	-0,28	-0,05	0,55	0,44	0,66	0,82	0,76	0,41	0,89	-0,77	1							
Pp	-0,02	-0,29	-0,18	0,75	0,63	0,54	0,77	0,68	0,31	0,84	-0,75	0,93	1						
Ac	-0,01	0,45	-0,05	-0,69	-0,74	-0,19	-0,43	0,26	0,21	0,23	0,44	-0,03	-0,20	1					
ε_s	0,02	0,02	-0,21	0,26	0,19	0,39	0,47	0,84	0,46	0,98	-0,43	0,87	0,82	0,27	1				
TE-OPM	-0,13	0,22	-0,27	0,02	-0,05	0,06	0,07	0,36	0,35	0,26	-0,06	0,25	0,24	0,27	0,32	1			
DSM	0,20	-0,18	0,26	-0,07	-0,02	-0,03	-0,07	-0,25	-0,28	-0,14	0,06	-0,18	-0,20	-0,15	-0,21	-0,82	1		
CBR	0,33	0,10	0,07	-0,27	-0,15	-0,05	-0,18	0,02	0,17	-0,14	0,17	-0,17	-0,23	0,06	-0,13	-0,29	0,35	1	

N = 175

p-value = 5 % ; γ_s : poids spécifique ; LL : limite de liquidité ; LP : limite de plasticité ; IP : indice de plasticité ; Gm : module de classement ; Pm : module de plasticité ; Pp : produit de plasticité ; Ac : activité des colloïdes ; ε_s : gonflement potentiel ; TE-OPM : teneur en eau à l'optimum proctor modifié ; DSM : densité sèche maximale ; CBR : californian bearing ratio à 95% OPM.

Les fortes corrélations négatives existent entre : gravier et sables (-0,81), Fines et Gm (-0,85), squelette et Gm (-0,90), mortier et Gm (-0,96) et, DSM et TE-OPM (-0,95).

Les corrélations moyennes lient : gravier et fines (-0,53), gravier et squelette (-0,58), gravier et mortier (-0,56), fine et Gm (-0,77), fine et Ac (-0,69), argile et Ac (-0,65), argile et Gm (-0,60) et, IP et Gm (-0,48).

II.4.2. Analyse en composantes principales appliquée aux latérites sur basaltes, argilites et gneiss

L'ACP des paramètres géotechniques de l'ensemble des latérites de la zone d'étude montre que les 03 premiers axes factoriels expriment à 70,63 %, l'information totale du nuage des variables et/ou des individus. Les contributions des axes F1, F2 et F3 sont de 39,46, 20,17 et 11,00 %, respectivement. Le plan factoriel F1-F2, est bien représentatif de l'analyse factorielle. Les paramètres mortier, Fines, Pm, Pp, IP, ϵ_s , LL et Gm expliquent bien les propriétés géotechniques des latérites étudiées. Ces paramètres sont proches de la périphérie du cercle de corrélation (Fig. 42). Le cercle de corrélation des variables (Fig. 42) montre 03 groupes de paramètres géotechniques : (1) le groupe des paramètres granulométriques sable, γ_s , Fines, argile, squelette et mortier, (2) le groupe des paramètres de plasticité Pm, Pp, LL, IP, ϵ_s , LP et TE-OPM et, (3) le groupe des paramètres Ac, gravier, CBR et Gm. Les paramètres des groupes (1) et (2) sont séparés de ceux du groupe (3) par l'axe F1, tandis que, l'axe F2 sépare les groupes (2) et (3) du groupe (1).

II.4.3. Etude des régressions simples appliquées aux latérites sur basaltes, argilites et gneiss

L'analyse des régressions des variables indique que les sables sont liés aux graviers par une relation linéaire. Cette relation s'observe également entre argiles et Fines. Le mortier est lié aux Fines et aux argiles par une relation linéaire. LP et IP sont liés à LL par des relations linéaires (Figs. 43 et 44). Gm est lié aux paramètres squelette (<2 mm) et mortier (<425 μm) par des relations linéaires. Pm est lié aux paramètres IP et LL par une relation linéaire. Pp est lié à Pm par une relation linéaire. Ac est liée aux paramètres Fines (<75 μm) (Fig. 45) et argiles (<2 μm) par une relation linéaire. ϵ_s est lié aux paramètres IP (Fig. 46), LL et Pm par une relation linéaire.

III. DISPERSION DES PARAMETRES GEOTECHNIQUES DES LATERITES

La dispersion des paramètres géotechniques des latérites est représentée par le

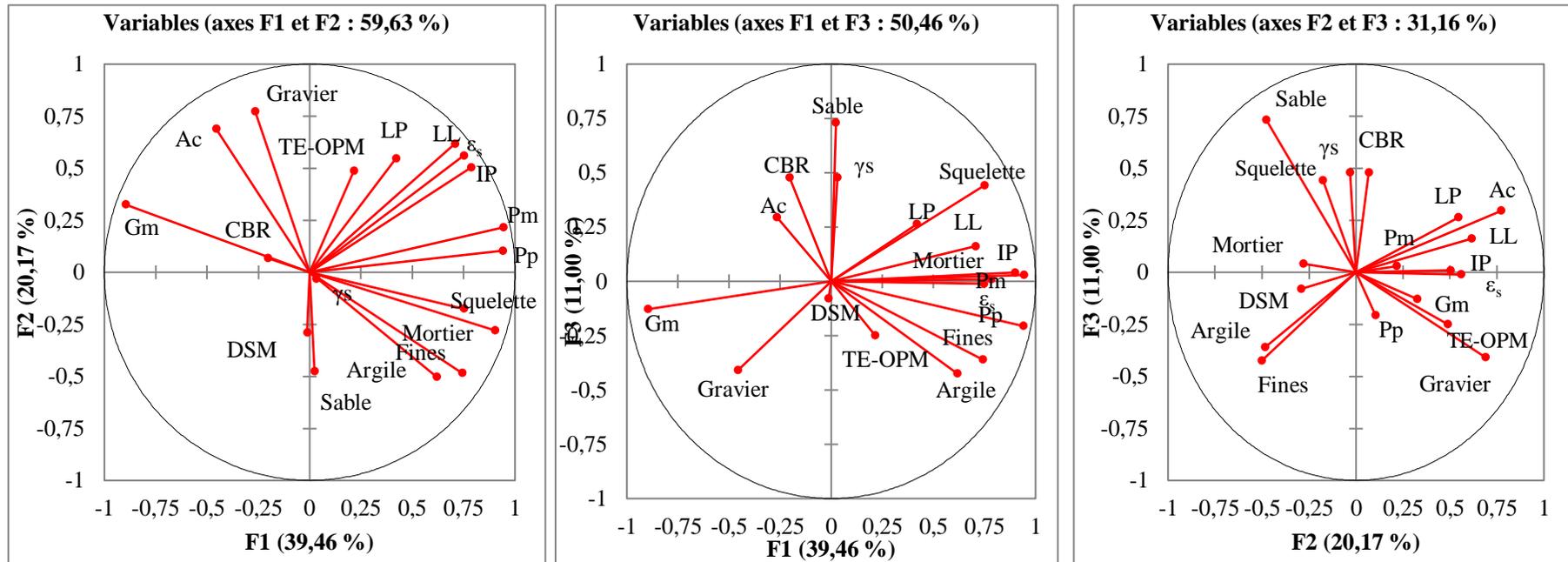


Figure 42. Cercles de corrélation des paramètres géotechniques appliqués sur les latérites sur basaltes, argilites et gneiss dans la zone d'étude

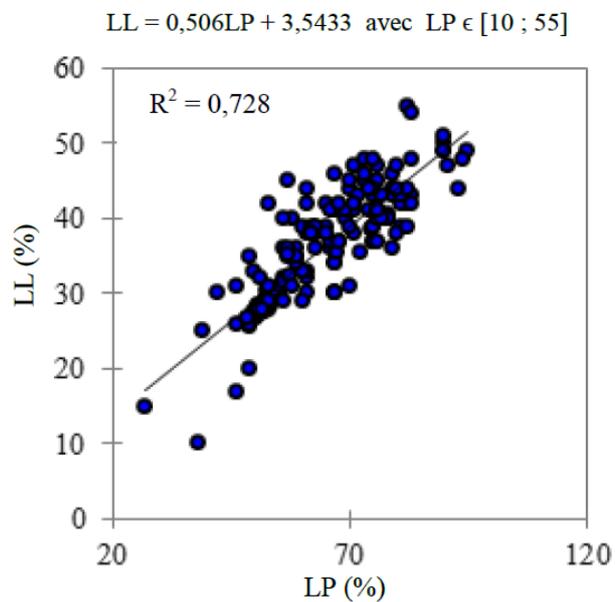


Figure 43. Relation LL vs LP

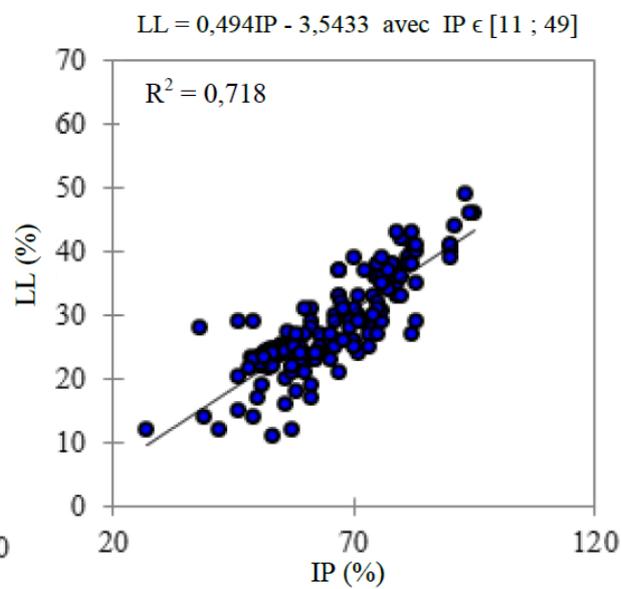


Figure 44. Relation LL vs IP

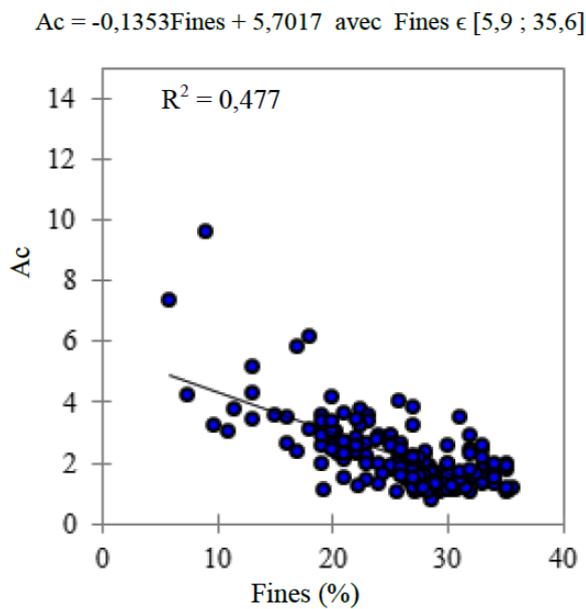


Figure 45. Relation Ac vs Fines

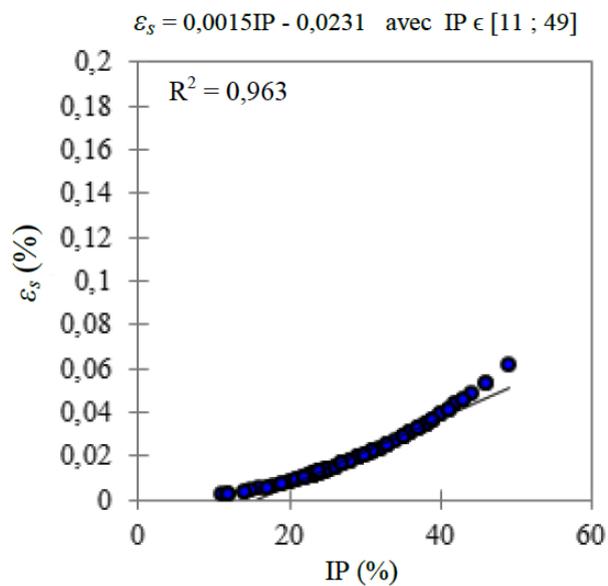


Figure 46. Relation ε_s vs IP

coefficient de variation. Les résultats sont consignés dans les tableaux 37 et 38. Ces résultats montrent que les paramètres géotechniques des latérites LRB et LRG sont plus dispersés que ceux des latérites LRA (Tab. 37). Les paramètres Pp et Pm présentent des coefficients de variation élevés dans les latérites LRB et LRG (39,93 – 44,37 % et 45,98 – 42,07 %), tandis que, dans les latérites LRA (28,85 et 28,42 %), ces paramètres ont des valeurs de coefficient de variation modérées (Tab. 38). Le mortier a des valeurs de coefficient de variation modérées (22,47 et 21,75 %) dans les latérites LRB et LRG, tandis que dans les latérites LRA, les valeurs du coefficient de variation sont faibles (14,58 %).

CONCLUSION

Les matrices de corrélations des composants minéralogiques et géochimiques des latérites dérivées des basaltes et argilites montrent que les minéraux riches en oxyhydroxydes de fer et d'aluminium sont corrélés positivement entre eux, et, négativement avec le quartz. Al_2O_3 , Fe_2O_3 et PF sont en relation normale entre eux et, en relation inverse avec SiO_2 . L'ACP montre que les latérites sur basaltes sont opposées aux latérites sur argilites. Les latérites sur basaltes sont caractérisées par l'hématite, la gibbsite, la goethite, l'anatase, Fe_2O_3 , Al_2O_3 , PF, TiO_2 , tandis que, les latérites sur argilites sont caractérisées par le quartz et SiO_2 . Les matrices de corrélation des paramètres géotechniques montrent que les paramètres granulométriques sont positivement corrélés entre eux. Ces paramètres sont également corrélés aux paramètres de plasticité. Les paramètres de compactage, TE-OPM et DSM sont inversement corrélés. L'ACP montre 03 groupes de paramètres géotechniques : (1) le groupe des paramètres Fines, argile, squelette, mortier, sable et γ_s , (2) le groupe des paramètres Pp, Pm, LL, IP, ϵ_s , LP et TE-OPM et (3) le groupe des paramètres CBR, Ac, gravier et Gm. Les paramètres géotechniques des latérites sur basaltes et gneiss sont plus dispersés que ceux des latérites sur argilites.

Tableau 37. Valeurs du coefficient de variation des paramètres géotechniques des latérites dans le secteur d'étude

	CV LRB	CV LRA	CV LRG
γ_s	2,81	2,79	2,32
Gravier	28,7	24,58	23,11
Sable	24,93	20,75	24,6
Fines	22,7	19,71	27,33
Argile	34,37	30,66	34,49
Squelette	25,62	20,41	20,38
Mortier	22,47	14,58	21,75
LL	20,01	18,61	21,49
LP	20,03	20,68	24,26
IP	27,7	22,32	29,73
Gm	11,63	7,69	10,06
Pm	44,37	28,42	42,07
Pp	39,93	28,85	45,98
Ac	56,94	52,02	38,64
ϵ_s	64,3	824,62	62,08
TE-OPM	22,8	18,15	32,52
DSM	5,79	5,13	7,17
CBR	20,07	17,35	34,76

CV : coefficient de variation ; *LRB* : latérites des basaltes ; *LRA* : latérites des argilites ;
LRG : latérites des gneiss

Tableau 38. Dispersion des paramètres géotechniques des latérites dans le secteur d'étude

CV (%)	LRB	LRA	LRG
Variation faible < 15	γ_s , Gm, DSM	γ_s , Gm, mortier , DSM	γ_s , Gm, DSM
Variation modérée 15 – 35	Gravier, sable, fines, argile, squelette, mortier , LL, LP, IP, TE-OPM, DSM, CBR	Gravier, sable, fines, argile, squelette, LL, LP, IP, TE- OPM, CBR, Pm , Pp , CBR	Gravier, sable, fines, argile, squelette, mortier , LL, LP, IP, TE-OPM, DSM, CBR
Variation élevée > 35	Pm , Pp , Ac, ϵ_s ,	Ac, ϵ_s ,	Pm , Pp , Ac, ϵ_s ,

γ_s : poids spécifique ; *LL* : limite de liquidité ; *LP* : limite de plasticité ; *IP* : indice de plasticité ; *Gm* : module de classement ; *Pm* : module de plasticité ; *Pp* : produit de plasticité ; *Ac* : activité des colloïdes ; *ϵ_s* : gonflement potentiel ; *TE-OPM* : teneur en eau à l'optimum proctor modifié ; *DSM* : densité sèche maximale ; *CBR* : californian bearing ratio à 95% OPM

CHAPITRE VI.

DISCUSSION

INTRODUCTION

Le présent chapitre discute les principaux faits d'observation et d'analyse minéralogique, géochimique et géotechnique. L'intensité de l'altération dans les matériaux étudiés y est discutée. Des relations entre les caractéristiques minéralogiques et géochimiques et, les propriétés géotechniques sont établies. Une régression multiparamétrique du CBR est effectuée, afin d'établir les relations qui existent entre ce paramètre et d'autres paramètres géotechniques. A la fin, le chapitre précise l'intérêt des matériaux étudiés en construction routière.

I. INTENSITE DE L'ALTERATION DANS LES LATÉRITES SUR BASALTES ET ARGILITES

Les latérites développées sur basaltes diffèrent de celles dérivées des argilites et gneiss par leur épaisseur, leur couleur et leur texture. Les matériaux d'altération sur basaltes, sont plus épais que ceux dérivés des gneiss, qui à leur tour sont plus épais que ceux développés sur argilites. Les nodules du niveau gravillonnaire sur basaltes sont plus grossiers que ceux du niveau gravillonnaire sur argilites. Les Latérites dérivées des argilites et des gneiss sont jaunes à jaunes rougeâtres, tandis que ceux développés sur basaltes sont rouges à rouges sombres. Ces observations corroborent celles effectuées sur les matériaux d'altération de la région du Sud-Ouest Cameroun (Diko *et al.*, 2011). La couleur rouge est attribuable à la présence de l'hématite, tandis que la couleur jaune indique la présence de la goethite (Ekosse *et al.*, 2002). La kaolinite, la gibbsite, la goethite et le quartz sont les minéraux qui apparaissent dans les cortèges minéralogiques des latérites développées sur basaltes et argilites. Les teneurs en hématite et en goethite dans ces latérites se justifient par les proportions en Fe_2O_3 . Ces minéraux caractérisent les sols ferrallitiques sous climat tropical humide (Bayiga *et al.*, 2011).

Les latérites dérivées des basaltes sont ferrugino-silico-alumineux, tandis que celles dérivées des argilites sont silico-ferrugino-alumineuses. Ces observations corroborent celles effectuées sur les latérites dérivées des basaltes de l'Ouest Cameroun (Hyoumbi *et al.*, 2017) et, sur celles dérivées des roches sédimentaires dans le bassin côtier de Douala (Ndome *et al.*, 2014). Les teneurs modérées en Al_2O_3 et Fe_2O_3 sont liées à la composition minéralogique des différentes roches parentales. Les teneurs en SiO_2 diminuent des roches saines aux latérites tandis que, les teneurs en Al_2O_3 et en Fe_2O_3 augmentent. Ce comportement est différent de celui observé dans les latérites sur pyroxénites du Sud Est-Cameroun (Ebah Abeng, 2013), du Brésil (Colin *et al.*, 1990) et, de celui des latérites sur roches ultrabasiques de Nouvelle-

Calédonie (Traoré *et al.*, 2006). La teneur moyenne en Fe_2O_3 dans les latérites dérivées des basaltes (30,82 %) est due aux proportions élevées des nodules ferrugineux dans ces matériaux.

Le diagramme binaire PF en fonction de CIA permet d'apprécier les transformations minéralogiques dans les latérites du Sud-Ouest Cameroun. Les latérites étudiées sont caractérisées majoritairement par des minéraux résistants à l'altération (Fig. 47). Les latérites dérivées des argilites contiennent des minéraux résistants plus à l'altération que celles développées sur basaltes. Les latérites dérivées des basaltes présentent des teneurs en kaolinite plus élevées que celles développées sur argilites. La goethite et l'hématite y sont également plus abondantes. Ces minéraux sont en relation avec PF. Ces relations sont confirmées par les corrélations fortes à moyennes positives entre PF et Al_2O_3 et, entre PF et Fe_2O_3 . Le processus pédogénétique prédominant dans les latérites dérivées des argilites est la kaolinitisation tandis que, dans celles développées sur basaltes, la kaolinitisation et la latéritisation prédominent (Fig. 48). Ces processus d'altération sont confirmés par le diagramme $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$ (SAF) qui différencie les matériaux kaolinitisés, latéritisés et bauxitisés. Les latérites développées sur argilites sont kaolinitisées à faiblement latéritisées, alors que celles développées des basaltes sont faiblement à modérément latéritisées (Fig. 49). Cette évolution du processus de latéritisation dans les latérites sur basaltes étudiées est différente des observations effectuées sur les latérites dérivées des basaltes dans la région de l'Ouest Cameroun (Wouatong *et al.*, 2014) et, des roches carbonatées et en Chine (Xiao Wei *et al.*, 2014). En effet, les latérites sur basaltes de l'Ouest Cameroun présentent les plus bas niveaux de latéritisation, tandis que ceux de Chine montrent des niveaux élevés. Cette évolution est par contre similaire à celle rencontrée dans les migmatites (Nzabakurikiza *et al.*, 2012), charnockites (Onana *et al.*, 2017), chloritoschistes (Onana *et al.*, 2016) et granites (Ndzé Mvindi, 2019), en zone de Plateau sud camerounais.

Le diagramme A – CN – K de Nesbitt et Markovics (1997) montre que l'évacuation en Ca et Na est plus accentuée dans les latérites dérivées sur basaltes que dans celles sur argilites (Fig. 50). La position des latérites dérivées des basaltes au sommet du pôle A atteste que l'enrichissement en K est nul, tandis que, dans les latérites sur argilites, cet enrichissement en K est faible. L'intensité de l'altération des latérites sur basaltes du Sud-Ouest Cameroun, est similaire à celle des latérites dérivées des basaltes de Bidar en Inde (Babechuk *et al.*, 2014), et à l'Ouest Cameroun (Hyoubi *et al.*, 2017). Cette évolution est cependant différente de celle observée dans les latérites issues des basaltes de Chhindwara en Inde (Babechuk *et al.*, 2014). Le diagramme A – L – F montre une diminution très importante

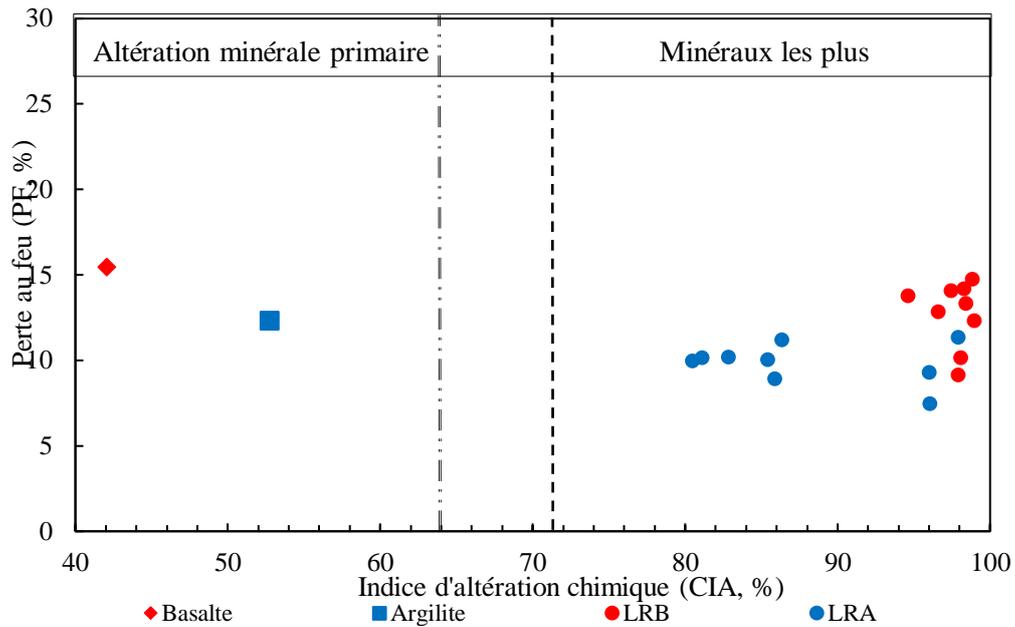


Figure 47. Covariation de la perte au feu (PF) et de l'indice d'altération chimique (CIA) dans les latérites de la zone d'étude dans le diagramme de Babechuk *et al.* (2014)

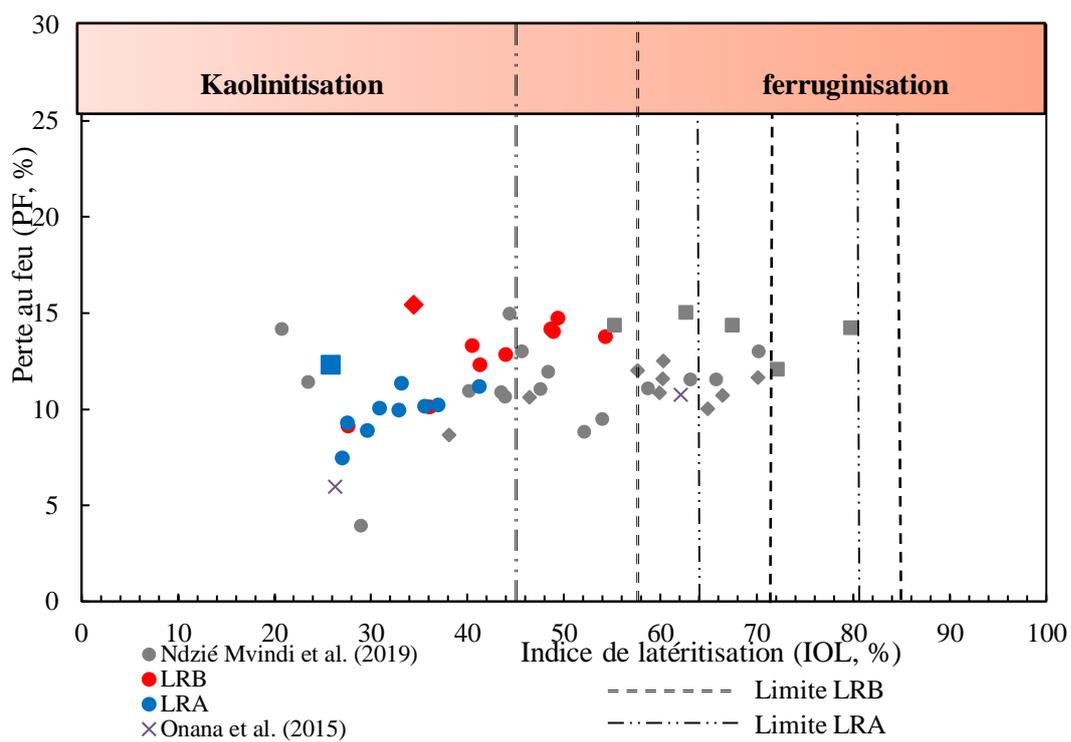


Figure 48. Covariation comparée perte au feu (PF) – Indice de latéritisation (IOL) dans les latérites de la zone d'étude dans le diagramme de Babechuk *et al.* (2014)

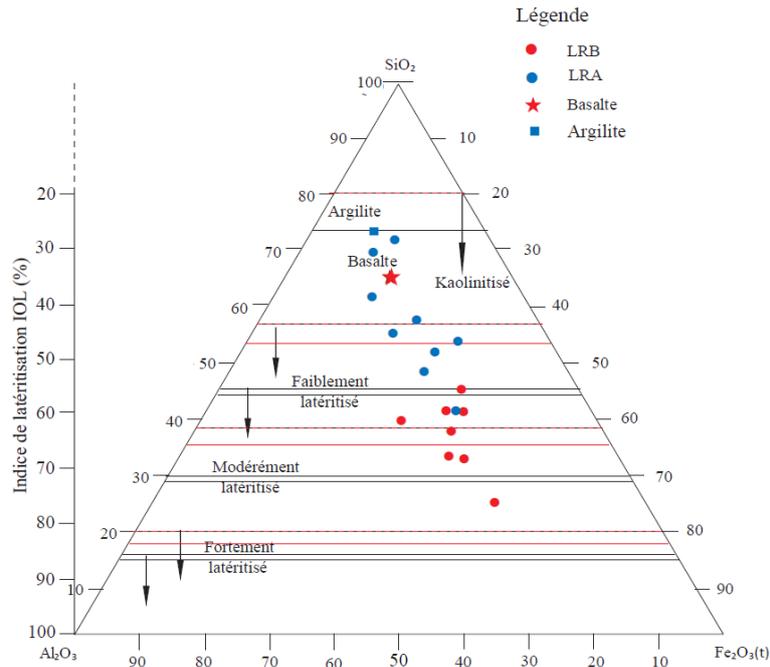
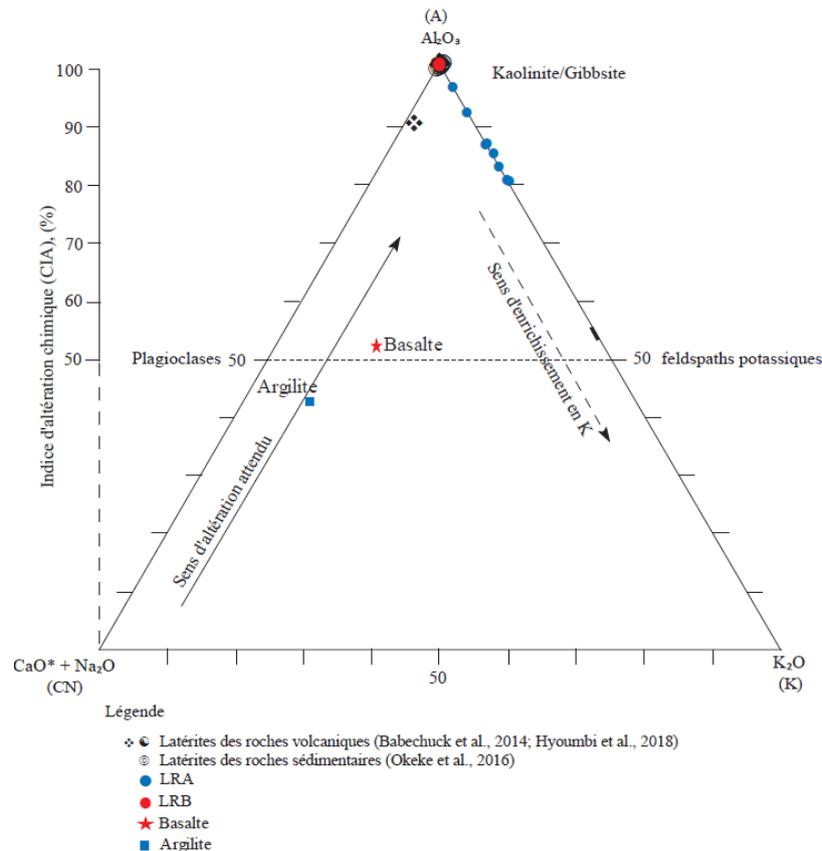


Figure 49. Illustration des différents degrés d'altération des latérites de la zone d'étude dans le diagramme ternaire SAF ($\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3(t)$) de Babechuk *et al.* (2014)



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

Figure 50. Position comparée des différents degrés d'altération des latérites de la zone d'étude et ceux des autres auteurs dans le diagramme molaire $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}$ (A – CN – K) de Nesbitt et Young (1982)

des éléments labiles et une latéritisation globalement modérée à forte des latérites étudiées (Fig. 51). Ces observations sont similaires à celles effectuées sur les matériaux latéritiques en zone de Plateau sud camerounais (Nzabakurikiza *et al.*, 2012 ; Ebah Abeng, 2013 ; Onana *et al.*, 2016 ; Onana *et al.*, 2017 ; Ndzié Mvindi, 2019). La position des latérites étudiées dans le diagramme AF – CNK – M (Fig. 52), montre que la dissolution des feldspaths (pertes en Ca, Na et K) est proportionnelle à celle des minéraux mafiques (pertes en Mg) dans les latérites dérivées des basaltes. Ce phénomène est contrasté dans les latérites sur argilites.

Les valeurs des paramètres altérologiques montrent que la lixiviation et l'induration prédominent dans les latérites sur basaltes, tandis que le duo lixiviation-confinement prévaut dans les latérites sur argilites (Fig. 53). Le diagramme A – I – C (Fig. 54) montre que le duo altération-induration prévaut dans les latérites sur basaltes, alors que l'altération et le confinement prédominent dans les latérites sur argilites. Ces faits sont en contradiction avec les observations effectuées dans les latérites du Plateau sud camerounais (Onana, 2010 ; Ndzié Mvindi, 2019). Les diagrammes carrés des figures 55 et 56 traduisent le caractère modéré à franc de la ferrallitisation dans les latérites du Sud-Ouest Cameroun. Les latérites sur basaltes sont fortement à très fortement ferrugineuses (Fig. 55), tandis que les latérites sur argilites sont faiblement à moyennement ferrugineuses. Les latérites sur argilites sont faiblement alumineuses, tandis que celles sur basaltes sont moyennement à fortement alumineuses (Fig. 56). La monosiallisation et l'allitisation prévalent dans les latérites sur basaltes, tandis que la bisiallisation et la monosiallisation prédominent dans les latérites sur argilites. Ceci est dû à la position topographique haute de la ville de kumba, où les latérites sur basaltes ont été prélevées. Les latérites sur basaltes sont sujettes à un phénomène de cuirassement potentiel. L'altération, faible à moyenne, dans les latérites étudiées (Fig. 56), est cependant plus poussée dans les latérites sur basaltes à cause probablement de la composition minéralogique de la roche

II. GEOTECHNIQUE DES LATERITES

II.1. Poids volumique des grains solides

La valeur moyenne de poids volumique des grains solides (γ_s) des latérites dérivées des basaltes (2,72 N/cm³) est similaire à celle rencontrée en zone équatoriale humide (Ola, 1980 ; Ogunsanwo, 1989 ; Adeyemi, 1995 ; Onana, 2010 ; Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Onana *et al.*, 2017).

La valeur moyenne de γ_s , des latérites dérivées des argilites (2,72 N/cm³) est proche de celle obtenue sur les latérites dérivées des grès et des roches sédimentaires au Sud-Ouest

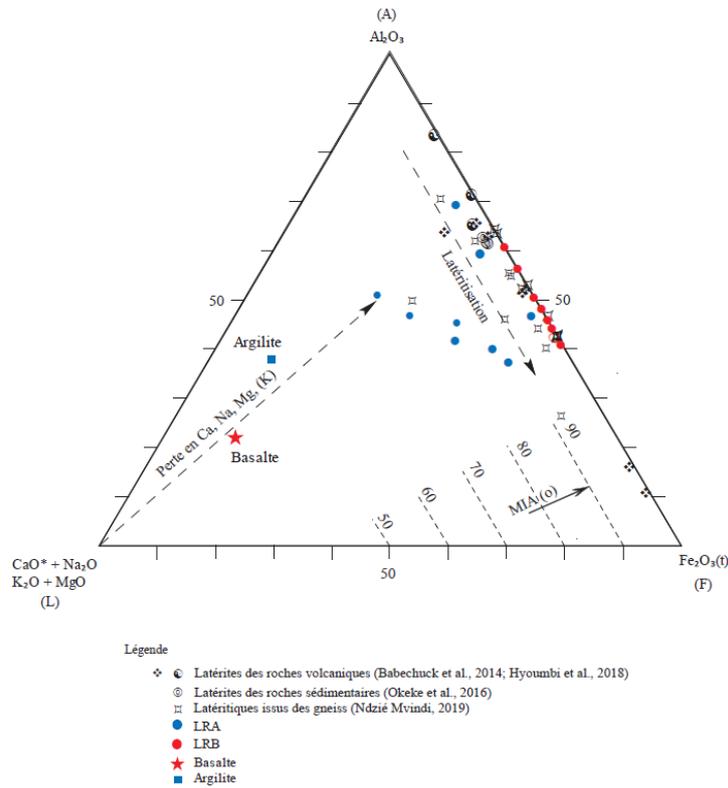
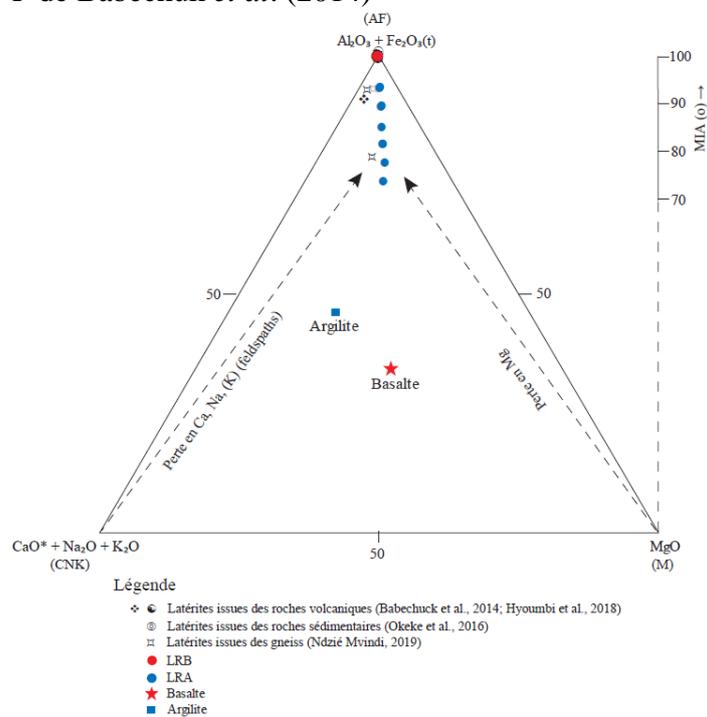


Figure 51. Position comparée des différents degrés d'altération des latérites sur basaltes et argilites de la zone d'étude et ceux des autres auteurs dans le diagramme molaire A – L – F de Babechuck *et al.* (2014)



*Les données des certains auteurs sont masquées par celles de la présente étude au niveau du sommet Al₂O₃

Figure 52. Illustration comparée des différents degrés d'altération des latérites sur basaltes et argilites de la zone d'étude dans le diagramme AF – CNK – M de Babechuck *et al.* (2014)

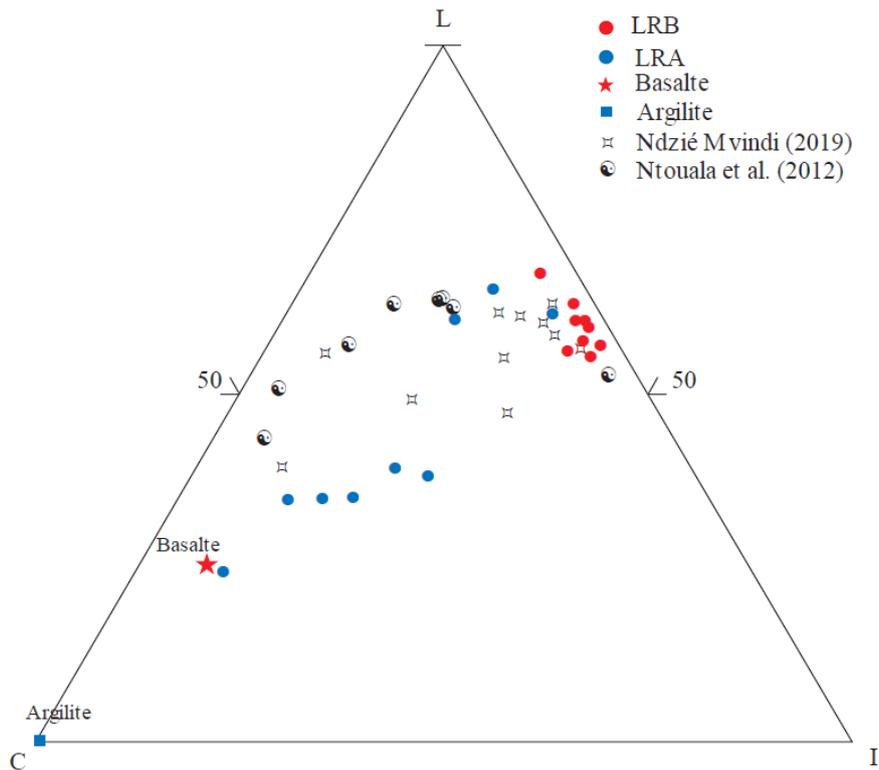


Figure 53. Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les latérites sur basaltes et argilites dans le diagramme L – I – C d'Ekodeck et Kamgang (2002, 2011) ; L : Lixiviation ; I : Induration ; C : Confinement

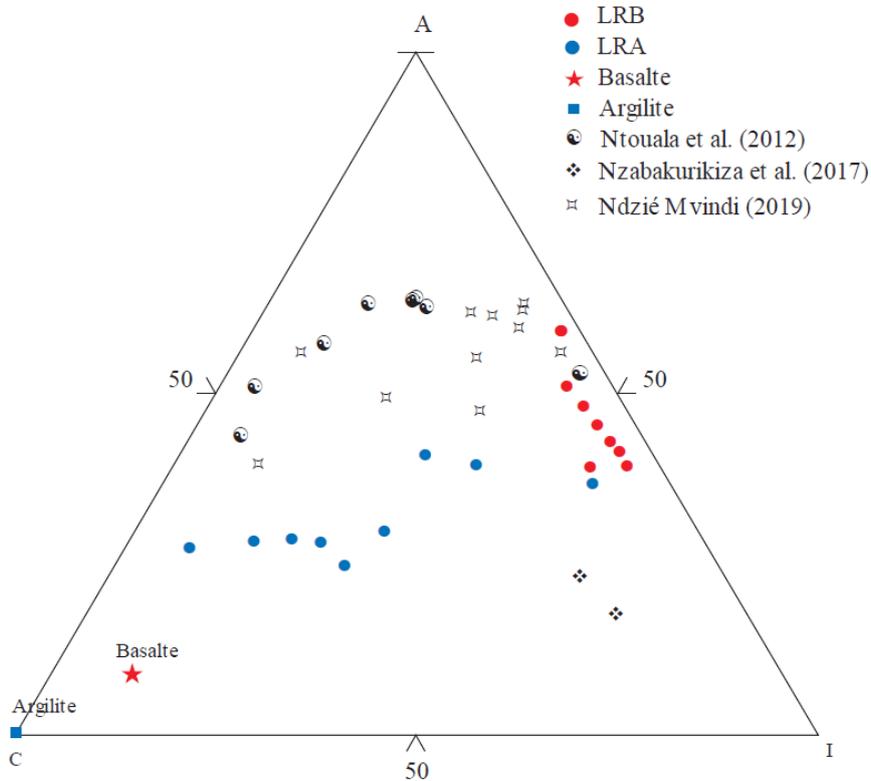


Figure 54. Caractérisation de l'intervention des facteurs pédogénétiques dans les latérites sur basaltes et argilites dans le diagramme A – I – C d'Ekodeck et Kamgang (2002, 2011) ; A : Altération ; I : Induration ; C : Confinement

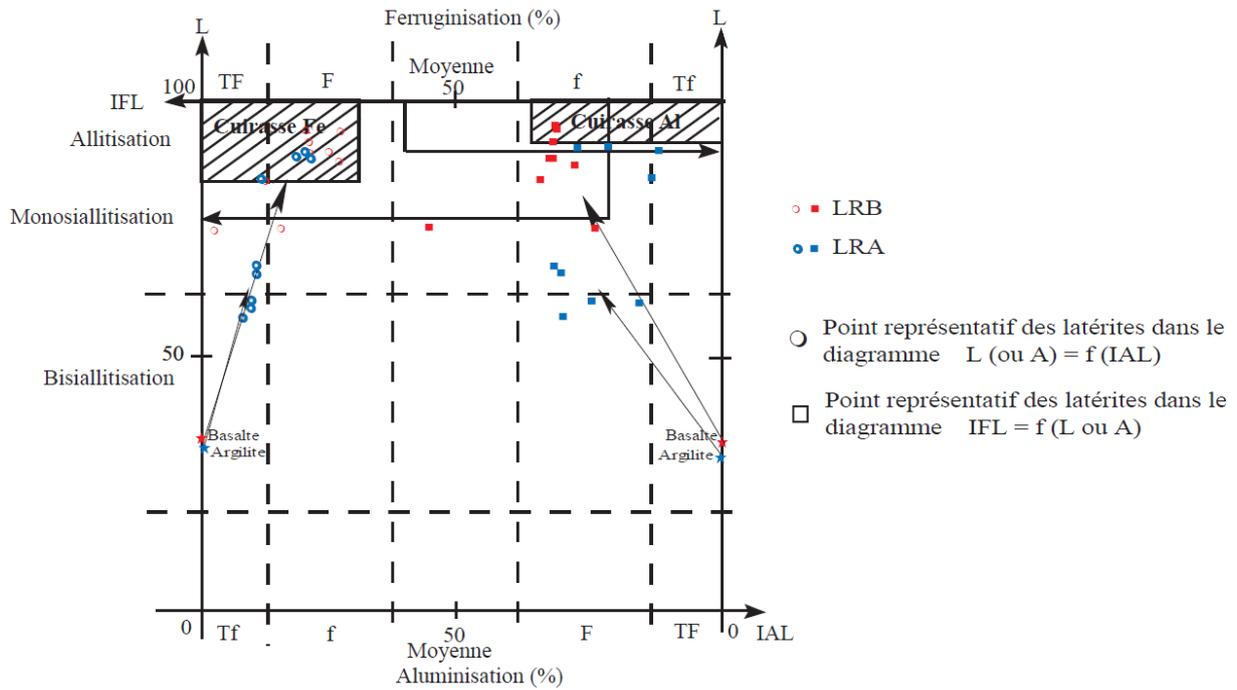


Figure 55. Caractérisation de l'importance des facteurs pédogénétiques dans les latérites sur basaltes et argilites dans le diagramme carré d'Ekodeck et Kamgang (2002, 2011), en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; Lixiviation potentielle

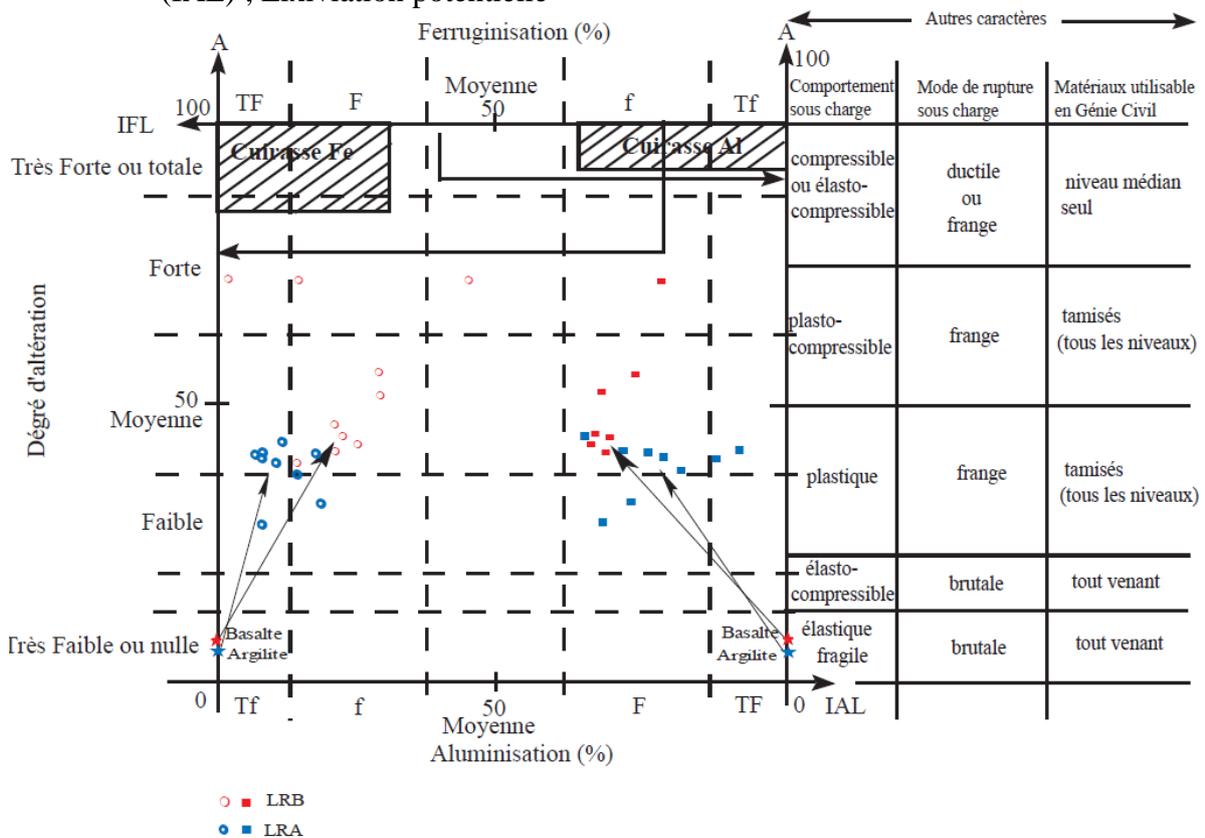


Figure 56. Caractérisation de l'importance de l'altération dans les latérites sur basaltes et argilites dans le diagramme carré d'Ekodeck et Kamgang (2002, 2011), en fonction de la libération des oxyhydroxydes de fer (IFL) et d'aluminium (IAL) ; Altération

et au Nord-Ouest du Nigéria (2,61 – 2,79 N/cm³; Adeyemi, 1995 ; Nwaiwu *et al.*, 2006).

Dans les latérites dérivées des gneiss, la valeur minimale de ce paramètre (2,60 N/cm³) correspond à la borne inférieure (2,60 et 3,20 N/cm³) définie par Charman (1988) sur les latérites de la zone équatoriale. La valeur moyenne de γ_s dans les latérites étudiées est supérieure à celle rencontrée en zone de savane humide (2,63 N/cm³), mais inférieure à celle des latérites rencontrées en savane sèche au Centre Cameroun (2,81 N/cm³; Ndzié Mvindi, 2019).

II.2. Granularité

Les teneurs en fines obtenues dans les latérites développées sur basaltes (5,9 et 35,6 %) sont différentes de celles trouvées dans les latérites dérivées des basaltes dans la région de l'Ouest Cameroun (Wouatong *et al.*, 2014). La valeur moyenne de ce paramètre (26,8 %) est supérieure à celle obtenue sur les latérites du Burkina Faso (10,5 % ; Millogo *et al.*, 2008).

La granularité obtenue dans les latérites développées sur argilites est similaire à celle des latérites du Nord-Ouest et du Sud-Est du Nigéria, qui sont plus enrichies en graviers (28,2 – 42,0 %) et en sables (42,1 – 47,8 % ; Nwaiwu *et al.*, 2006 ; Okeke *et al.*, 2016). Par contre, cette granularité est différente de celle des latérites dérivées des grès du Sud-Ouest du Nigéria, qui sont plus enrichies en sables (40 – 49 %) et limons (32 – 41 % ; Adeyemi, 1995).

La granularité des latérites dérivées des gneiss dans la zone d'étude est différente de celle des latérites développées sur les mêmes roches dans la zone Obala-Mbandjock, qui sont plus fines (14 – 60 %) et, plus sableuses (21 – 41 % ; Ndzié Mvindi, 2019).

II.3. Limites d'Atterberg et indice de plasticité

Les valeurs moyennes de LL et IP (66 et 29 %) sont supérieures à celles des latérites développées sur basaltes au Nigéria (60 – 26 % ; Abidemi, 2015) et à l'Ouest du Cameroun et au Sud-Est du Nigéria (27 – 7 % ; Wouatong *et al.*, 2014 ; Abidemi, 2015 ; Hyoumbi *et al.*, 2017).

Dans les latérites dérivées des argilites, les valeurs de ces paramètres (61 et 27 %) sont supérieures à celles des latérites développées sur roches sédimentaires au Nigéria (60 – 21 % ; Adeyemi, 1995 ; Nwaiwu *et al.*, 2006 ; Chuka Osadebe *et al.*, 2010).

Les latérites dérivées des gneiss sont plus plastiques (IP = 28 %) que ceux du Burkina Faso (IP = 15 % ; Millogo *et al.*, 2008) et ceux de la zone de savane humide dans la région du Centre Cameroun (IP = 20 et 23 % ; Ndzié Mvindi, 2019).

II.4. Paramètres dérivés

L'activité des latérites dérivées des basaltes ($A_{C_{moy}} = 2,29$) de la zone d'étude est différente des observations effectuées sur les latérites du Nigéria (Nwaiwu *et al.*, 2006).

Les valeur moyenne de Gm, dans les latérites dérivées des argilites s'intègrent dans l'intervalle défini pour les latérites développées sur roches sédimentaires au Nigéria (Nwaiwu *et al.*, 2006). La valeur moyenne de Gm (2,00) s'insère dans la fourchette des normes Brésiliennes (DNIT, 2007).

Dans les latérites dérivées des gneiss, la valeur moyenne de Gm est supérieure à celle développée sur les migmatites (762) et des gneiss en zone de savane (510), dans les régions de l'Est et du Centre Cameroun (Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Ndzié Mvindi, 2019). Cependant, elle est inférieure à celle trouvée dans les latérites issues des charnokites au Sud Cameroun (Onana *et al.*, 2017).

II.5. Paramètres de compactage

Dans les latérites dérivées des basaltes, la valeur moyenne de DSM (1,80) est supérieure à celle obtenue à l'Ouest Cameroun (1,61 ; Wouatong *et al.*, 2014). La valeur moyenne de CBR (38 %) est similaire à celle trouvée dans la région du Centre Cameroun (10 – 67 % ; Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Ndzié Mvindi *et al.*, 2017) et de Côte d'Ivoire (11 – 65 % ; Bohi, 2008). Cependant, les valeurs de ce paramètre sont faibles comparées à celles obtenues au Congo (49 – 63 % ; Bagarre, 1990) et à l'Est-Cameroun (61 – 72 % ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2016).

Les valeurs de TE-OPM dans les latérites développées sur argilites sont similaires à celles obtenues au Sud-Est du Nigéria (12,9 % ; Abidemi, 2015). La valeur moyenne de ce paramètre (12,8 %) est supérieure à celle trouvée (9,3 %) dans les latérites des roches sédimentaires de la même zone (Okeke *et al.*, 2016). La valeur moyenne de DSM (1,94) dans les latérites dérivées des argilites est similaire à celle obtenue dans les latérites des roches sédimentaires du Nigéria (~1,90 ; Chuka Osadebe *et al.*, 2010 ; Abidemi, 2015 ; Okeke *et al.*, 2016). La valeur moyenne de CBR (40 %) est supérieure à celles des latérites développées sur grès au Nigéria (24 – 36 % ; Chuka Osadebe *et al.*, 2010 ; Okeke *et al.*, 2016).

Dans les latérites dérivées des gneiss, la valeur moyenne de TE-OPM (14,05 %) est supérieure à celle obtenue dans les latérites dérivées des granites de Sénégal (11,3 % ; Magnan et Masamba Ndiaye, 2015), des migmatiques de la région de l'Est Cameroun (11,9 % ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017) et des roches métamorphiques de la région du Centre Cameroun (11,8 et 12,8 % ; Ngo'o Ze *et al.*, 2019). Les valeurs de DSM sont faibles par

rapport à celles observées dans les latérites en Afrique intertropicale (Ola, 1980 ; Magnan et Masamba Ndiaye, 2015 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017 ; Ndzié Mvindi, 2019 ; Ngo'o Ze *et al.*, 2019). La valeur moyenne de CBR est comprise dans les fourchettes définie au Togo (19 – 57 %) et au Burkina Faso (19 – 49 % ; Bagarre, 1990). Elle est cependant inférieure à celle obtenue au Sénégal (60 – 84 % ; Fall *et al.*, 1994), au Congo (49 – 63% ; Bagarre, 1990) et au Centre Cameroun (62 et 50 % ; Ngo'o Ze *et al.*, 2019).

III. INFLUENCE DES PARAMETRES MINERALOGIQUES ET GEOCHIMIQUES SUR LES PARAMETRES GEOTECHNIQUES

III.1. Corrélations entre composants minéralogiques et paramètres géotechniques

Les paramètres physico-mécaniques et génétiques sont les critères majeurs pour le choix des latérites en Génie civil. La matrice de corrélation entre paramètres physico-mécaniques et paramètres génétiques montre que la kaolinite est positivement corrélée (0,51) à la teneur en eau à l'optimum proctor modifié (TE-OPM) et, négativement corrélée (-0,56) à la densité sèche maximale (DSM) (Tab. 39). La teneur moyenne en kaolinite est plus élevée (12,0 %) dans les latérites LRB que dans latérites LRA (6,5 %). La valeur moyenne de TE-OPM augmente avec les teneurs en kaolinite. DSM est négativement corrélée à la goethite (-0,45) et à l'anatase (-0,55). La relation entre DSM et goethite a également été observée dans les latérites de la région du Centre Cameroun (Ndzié Mvindi, 2019). L'évolution inverse des valeurs de DSM avec celles de la teneur en goethite est la même que celle observée entre DSM vs kaolinite. La gibbsite et la muscovite sont corrélées négativement à TE-OPM (-0,61 et -0,58, respectivement) et, positivement à DSM (0,46 et 0,45, respectivement). Ces minéraux existent uniquement dans les matériaux LRA. Les teneurs en hématite dans les matériaux étudiés ne sont corrélées à aucun paramètre. Ces observations diffèrent des résultats obtenus sur les latérites du Sénégal (Nkoumou *et al.*, 2004) et du Centre Cameroun (Ndzié Mvindi, 2019).

III.2. Corrélations entre composants géochimiques et paramètres géotechniques

La matrice de corrélation obtenue entre les données d'analyses géochimiques et les paramètres géotechniques est présentée dans le tableau 40. Le poids volumique des grains solides (γ_s) n'est corrélé à aucun paramètre géochimique. Cette observation est différente du constat fait dans les latérites du Sénégal, de l'Inde, du Nigéria et du Centre Cameroun (Fall *et al.*, 1997 ; Sunil et Krishnappa, 2012 ; Adebesei *et al.*, 2013 ; Ayodele et Falade, 2016 ; Ndzié Mvindi, 2019). Les teneurs en Fe_2O_3 sont positivement corrélées aux paramètres

Tableau 39. Matrice de corrélation entre données minéralogiques et paramètres géotechniques dans les latérites de la zone d'étude

	Quartz	Kaolinite	Goethite	Hématite	Anatase	Gibbsite	Muscovite	γ_s	Fines	LL	IP	TE-OPM	DSM	CBR
Quartz	1													
Kaolinite	-0,42	1												
Goethite	-0,64	0,66	1											
Hématite	-0,88	0,13	0,36	1										
Anatase	-0,48	0,87	0,58	0,23	1									
Gibbsite	-0,19	-0,68	-0,49	0,41	-0,50	1								
Muscovite	-0,16	-0,69	-0,51	0,36	-0,60	0,84	1							
γ_s	-0,15	-0,21	-0,28	0,12	-0,18	0,50	0,53	1						
Fines	-0,37	-0,02	0,23	0,31	-0,07	0,25	0,21	0,19	1					
LL	-0,27	0,12	0,32	0,10	0,23	-0,17	0,06	0,20	-0,04	1				
IP	-0,14	0,11	0,38	-0,03	0,15	-0,13	-0,22	-0,14	0,31	0,32	1			
TE-OPM	-0,03	0,53	0,39	-0,06	0,45	-0,61	-0,58	-0,21	-0,50	0,30	-0,08	1		
DSM	0,31	-0,56	-0,45	-0,32	-0,55	0,46	0,45	0,27	0,23	-0,14	0,23	-0,68	1	
CBR	-0,23	-0,23	-0,12	0,22	-0,05	0,52	0,35	0,72	0,05	0,37	-0,01	0,02	0,15	1

p-value = 5 % ; γ_s : poids volumique des grains solides ; LL : limite de liquidité ; IP : indice de plasticité ; TE-OPM : teneur en eau à l'optimum proctor modifié ; DSM : densité sèche maximale ; CBR : California bearing ratio

Tableau 40. Matrice de corrélation entre composants géochimiques et paramètres géotechniques dans les latérites de la zone d'étude

Variables	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	PF	γ _s	Gravier	Sable	Fines	Argile	Squelette	Mortier	LL	IP	Gm	Pm	Pp	Gs	TE- OPM	DSM	CBR	
SiO ₂	1																					
TiO ₂	-0,65	1																				
Al ₂ O ₃	-0,66	0,61	1																			
Fe ₂ O ₃	-0,90	0,46	0,34	1																		
PF	-0,92	0,76	0,77	0,70	1																	
γ _s	0,07	0,01	0,15	-0,06	0,02	1																
Gravier	-0,43	0,33	0,12	0,47	0,22	-0,51	1															
Sable	0,63	-0,41	-0,28	-0,66	-0,39	0,35	-0,93	1														
Fines	-0,47	-0,05	0,21	0,56	0,22	0,13	0,17	-0,45	1													
Argile	-0,33	-0,21	0,06	0,43	0,07	0,10	0,20	-0,43	0,93	1												
Squelette	-0,14	0,16	-0,05	0,19	0,16	0,22	-0,47	0,33	0,18	-0,06	1											
Mortier	-0,52	0,12	0,20	0,56	0,38	0,02	0,05	-0,31	0,75	0,59	0,57	1										
LL	-0,38	0,47	0,21	0,35	0,29	0,03	0,11	-0,25	0,02	-0,14	0,3767	0,25	1									
IP	-0,04	-0,18	-0,13	0,10	-0,05	-0,08	-0,03	-0,07	0,24	0,12	0,53	0,52	0,36	1								
Gm	0,46	-0,10	-0,10	-0,54	-0,32	-0,20	0,15	0,13	-0,72	-0,55	-0,73	-0,93	-0,32	-0,48	1							
Pm	-0,28	-0,11	0,03	0,32	0,19	-0,04	-0,07	-0,10	0,51	0,34	0,65	0,86	0,28	0,84	-0,78	1						
Pp	-0,42	-0,17	0,16	0,49	0,22	0,14	-0,01	-0,27	0,86	0,75	0,42	0,86	0,21	0,61	-0,83	0,82	1					
Gs	-0,04	-0,18	-0,13	0,10	-0,05	-0,08	-0,03	-0,07	0,24	0,12	0,53	0,52	0,36	0,90	-0,48	0,84	0,61	1				
TE-OPM	-0,45	0,75	0,29	0,33	0,52	-0,32	0,36	-0,36	-0,18	-0,32	0,16	0,00	0,42	-0,02	-0,04	-0,08	-0,20	-0,02	1			
DSM	0,54	-0,57	-0,18	-0,54	-0,47	0,46	-0,60	0,56	0,01	0,00	0,22	0,12	-0,21	0,27	-0,11	0,35	0,23	0,27	-0,62	1		
CBR	0,00	0,04	0,07	0,01	0,03	0,75	-0,15	0,01	0,10	0,17	-0,14	-0,06	0,17	-0,07	-0,03	-0,09	0,14	-0,07	-0,18	0,31	1	

N = 18

p-value = 5 % ; γ_s : poids spécifiques des grains solides ; LL : limite de liquidité ; IP : indice de plasticité ; Gm : module de classement ; Pm : module de plasticité ; Pp : produit de plasticité ; ε_s : gonflement potentiel ; TE-OPM : teneur en eau optimale ; DSM : densité sèche maximale ; CBR : California bearing ratio

granulométriques graviers (0,51 %), fines (0,56 %) et mortier (0,56 %). Dans les matériaux étudiés, les teneurs en Fe_2O_3 sont plus élevées dans les matériaux LRB (30,82 %) que dans les matériaux LRA (19,31 %). Cependant, les teneurs en Fe_2O_3 , sont corrélées négativement (-0,66) au mortier. La densité sèche maximale est négativement corrélée à TiO_2 (-0,70), Fe_2O_3 (-0,61) et PF (-0,51). La relation inverse entre DSM et Fe_2O_3 est différente de celle observée dans les latérites du Sénégal, du Nigéria et du Centre Cameroun (Fall *et al.*, 1997 ; Akpokodje et Hudec, 1994 ; Nkoumou *et al.*, 2004 ; Ndzié Mvindi, 2019). Ceci est dû à la nature de la roche mère, différente de celles des auteurs sus-cités. Plus les valeurs de DSM augmentent, plus les teneurs en TiO_2 , Fe_2O_3 et PF diminuent. La corrélation positive, observée entre SiO_2 et DSM, montre que les valeurs de DSM augmentent avec les teneurs en SiO_2 . Les teneurs en SiO_2 des matériaux LRA (49,74 %) sont supérieures à celles des matériaux LRB (33,98 %). Cependant, il a été établi que les matériaux avec des teneurs élevées en sesquioxides ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$) et, faibles en SiO_2 , se sont mal comportés en corps de chaussées par rapport à ceux ayant des teneurs élevées en SiO_2 et faibles en $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ (Tockol, 1993).

III.3. Corrélations entre paramètres d'altération chimique et paramètres géotechniques

L'indice d'altération chimique (CIA) est positivement corrélé (0,70) à TE-OPM et, négativement (-0,64) à DSM (Tab. 41). Les valeurs DSM augmentent avec la diminution des valeurs de CIA. Les valeurs de CIA des matériaux LRA sont faibles par rapport à celles des matériaux LRB. Ceci suggère que les matériaux LRA sont plus denses que les matériaux LRB. L'indice d'altération mafique ($\text{MIA}_{(o)}$) est négativement corrélé (-0,63) à DSM. Une corrélation positive (0,57) s'observe entre l'indice relatif d'induration potentielle (IRIP) et TE-OPM, tandis qu'une corrélation négative (-0,62) s'observe entre IRIP et DSM (Tab. 42). Ceci montre que l'induration augmente avec TE-OPM et diminue avec DSM. Cette observation est due à la nature du basalte, plus riche en ferromagnésiens que l'argilite et à l'intensité du drainage dans la localité de Kumba.

IV. ETUDE DE LA REGRESSION DU CBR

Le CBR est un paramètre incontournable pour le dimensionnement des couches de chaussées (Fall *et al.*, 1994). Dans les matériaux étudiés, le CBR n'est corrélé directement à aucun paramètre. Une étude de sa régression a donc été effectuée dans le but d'expliquer la relation que ce paramètre a avec les autres paramètres. Il revient donc spécifiquement à déduire les données CBR à partir des 15 autres paramètres. La figure 57 récapitule l'évolution des valeurs du coefficient de détermination (R^2) en fonction du nombre de variables retenues

Tableau 41. Matrice de corrélation entre paramètres d'altération et paramètres géotechniques dans les latérites de la zone d'étude

Variables	CIA	MIA(o)	PF	IOL	WIP	γ_s	Gravier	Sable	Fines	Argile	Squelette	Mortier	LL	IP	Gm	Pm	Pp	ϵ_s	TE- OPM	DSM	CBR	
CIA	1																					
MIA(o)	0,98	1																				
PF	0,59	0,51	1																			
IOL	0,51	0,46	0,89	1																		
WIP	-0,94	-0,98	-0,41	-0,33	1																	
γ_s	-0,33	-0,42	0,10	0,08	0,49	1																
Gravier	0,39	0,38	0,34	0,50	-0,31	-0,23	1															
Sable	-0,33	-0,31	-0,44	-0,70	0,21	0,13	-0,86	1														
Fines	-0,13	-0,15	0,17	0,36	0,21	0,19	-0,29	-0,23	1													
Argile	-0,19	-0,17	0,02	0,31	0,23	0,08	-0,10	-0,39	0,92	1												
Squelette	0,14	0,17	0,03	-0,04	-0,21	0,01	-0,67	0,40	0,53	0,28	1											
Mortier	0,16	0,18	0,24	0,31	-0,16	-0,03	-0,29	-0,14	0,81	0,64	0,79	1										
LL	0,13	0,10	0,20	0,34	-0,04	0,20	0,19	-0,17	-0,04	-0,10	0,03	0,06	1									
IP	0,15	0,20	0,08	0,14	-0,23	-0,14	-0,01	-0,15	0,31	0,23	0,47	0,62	0,32	1								
Gm	-0,07	-0,09	-0,14	-0,19	0,08	-0,06	0,51	-0,08	-0,83	-0,63	-0,90	-0,95	-0,02	-0,52	1							
Pm	0,18	0,22	0,21	0,27	-0,22	-0,06	-0,14	-0,18	0,62	0,47	0,68	0,89	0,22	0,90	-0,81	1						
Pp	0,03	0,04	0,22	0,37	0,00	0,09	-0,18	-0,27	0,85	0,75	0,60	0,89	0,17	0,75	-0,84	0,92	1					
ϵ_s	0,18	0,22	0,13	0,18	-0,24	-0,11	-0,01	-0,17	0,34	0,24	0,48	0,65	0,32	0,99	-0,54	0,92	0,78	1				
TE-OPM	0,70	0,63	0,44	0,35	-0,59	-0,21	0,61	-0,35	-0,50	-0,46	-0,44	-0,37	0,30	-0,08	0,49	-0,21	-0,33	-0,05	1			
DSM	-0,64	-0,63	-0,52	-0,59	0,56	0,27	-0,74	0,63	0,23	0,10	0,42	0,25	-0,14	0,23	-0,36	0,23	0,23	0,20	-0,68	1		
CBR	-0,15	-0,18	0,09	0,19	0,25	0,72	-0,03	0,00	0,05	0,10	-0,19	-0,16	0,37	-0,01	0,13	-0,09	0,05	-0,02	0,02	0,15	1	

N = 18

p-value = 5% ; CIA : indice d'altération chimique ; MIA_(o) : indice mafique d'altération en milieu oxydant ; PF : perte au feu ; IOL : indice de latéritisation WIP : indice d'altération de Parker ; γ_s : poids volumiques des grains solides ; LL : limite de liquidité ; IP : indice de plasticité ; Gm : module de classement ; Pm : module de plasticité ; Pp : produit de plasticité ; ϵ_s : gonflement potentiel ; TE-OPM : teneur en eau à l'optimum proctor modifié ; DSM : densité sèche maximale ; CBR : California bearing ratio

Tableau 42. Matrice de corrélation entre paramètres d'altération normatifs et paramètres géotechniques dans les latérites de la zone d'étude

Variables	DVRAR (A)	IRLP (L)	IRIP (I)	IRCP (c)	γ_s	Gravier	Sable	Fines	Argile	Squelette	Mortier	LL	IP	Gm	Pm	Pp	ϵ_s	TE-OPM	DSM	CBR	
DVRAR (A)	1																				
IRLP (L)	-0,08	1																			
IRIP (I)	0,40	0,75	1																		
IRCP ©	-0,26	-0,89	-0,74	1																	
γ_s	0,20	-0,33	-0,03	0,36	1																
Gravier	0,24	0,20	0,37	-0,30	-0,23	1															
Sable	-0,24	-0,14	-0,40	0,24	0,13	-0,86	1														
Fines	-0,01	-0,12	0,05	0,13	0,19	-0,29	-0,23	1													
Argile	-0,03	-0,20	0,02	0,19	0,08	-0,10	-0,39	0,92	1												
Squelette	-0,02	0,13	-0,02	-0,19	0,01	-0,67	0,40	0,53	0,28	1											
Mortier	-0,10	0,19	0,16	-0,18	-0,03	-0,29	-0,14	0,81	0,64	0,79	1										
LL	0,23	-0,01	0,15	-0,08	0,20	0,19	-0,17	-0,04	-0,10	0,03	0,06	1									
IP	-0,14	0,15	-0,03	-0,19	-0,14	-0,01	-0,15	0,31	0,23	0,47	0,62	0,32	1								
Gm	0,04	-0,08	-0,06	0,11	-0,06	0,51	-0,08	-0,83	-0,63	-0,90	-0,95	-0,02	-0,52	1							
Pm	-0,12	0,21	0,10	-0,21	-0,06	-0,14	-0,18	0,62	0,47	0,68	0,89	0,22	0,90	-0,81	1						
Pp	-0,05	0,03	0,07	-0,05	0,09	-0,18	-0,27	0,85	0,75	0,60	0,89	0,17	0,75	-0,84	0,92	1					
ϵ_s	-0,13	0,19	0,02	-0,21	-0,11	-0,01	-0,17	0,34	0,24	0,48	0,65	0,32	0,99	-0,54	0,92	0,78	1				
TE-OPM	0,25	0,64	0,57	-0,69	-0,21	0,61	-0,35	-0,50	-0,46	-0,44	-0,37	0,30	-0,08	0,49	-0,21	-0,33	-0,05	1			
DSM	-0,35	-0,42	-0,62	0,54	0,27	-0,74	0,63	0,23	0,10	0,42	0,25	-0,14	0,23	-0,36	0,23	0,23	0,20	-0,68	1		
CBR	0,12	-0,14	0,13	0,17	0,72	-0,03	0,00	0,05	0,10	-0,19	-0,16	0,37	-0,01	0,13	-0,09	0,05	-0,02	0,02	0,15	1	

N = 18

p-value = 5 % ; DVRAR : degré virtuel relatif d'altération de la roche ; IRLP : indice relatif de lixiviation potentiel ; IRIP : indice relatif d'induration potentiel ; IRCP : indice relatif de confinement potentiel ; γ_s : poids volumiques des grains solides ; LL : limite de liquidité ; IP : indice de plasticité ; Gm : module de classement ; Pm : module de plasticité ; Pp : produit de plasticité ; ϵ_s : gonflement potentiel ; TE-OPM : teneur en eau à l'optimum proctor modifié ; DSM : densité sèche maximale ; CBR : California bearing ratio

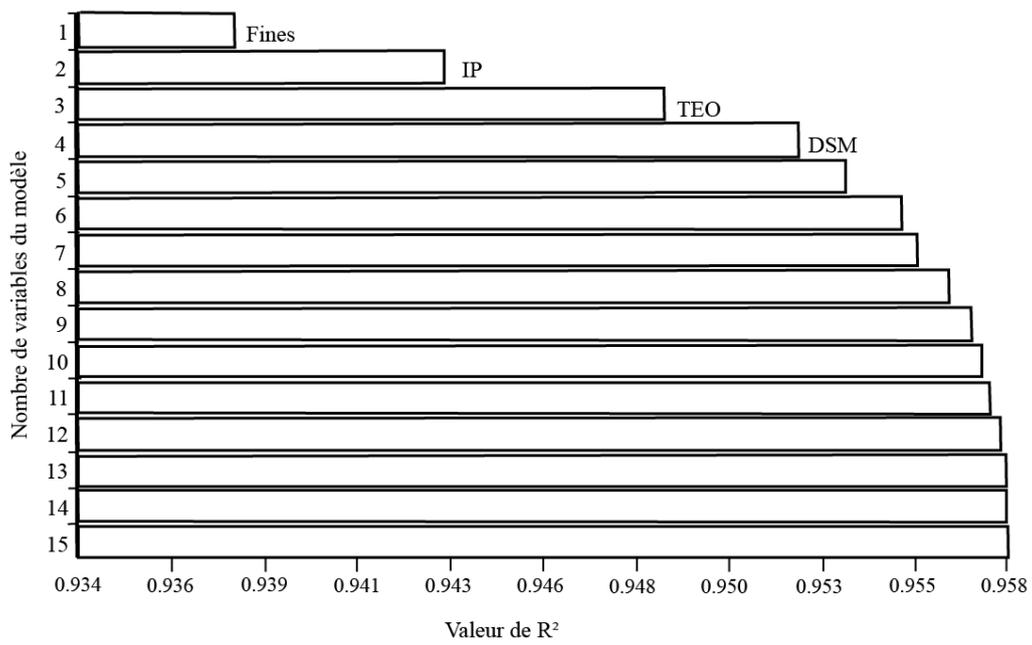


Figure 57. Courbe d'évolution de R² en fonction du nombre de variables

pour le modèle. Le coefficient de détermination s'interprète comme la part de variance expliquée par le modèle. C'est un coefficient qui permet de déterminer la qualité de l'ajustement. Il présente des valeurs variant entre 0 et 1. Après l'augmentation de quatre variables, R^2 n'augmente plus significativement, car les autres variables ajoutées sont fortement corrélées les unes aux autres (Fig. 57). Le meilleur ajustement du CBR par quatre paramètres avec un $R^2 = 0,95$, est celui expliqué par les paramètres Fines ($<75 \mu\text{m}$), IP, TE-OPM et DSM (Tab. 43). Cette valeur de R^2 est supérieure à celles observées dans les latérites du Sénégal, de Côte d'Ivoire, du Centre et du Sud Cameroun (Fall *et al.*, 1994 ; Bohi, 2008 ; Ndzié Mvindi *et al.*, 2017 ; Yato *et al.*, 2018). La meilleure régression avec les variables Fines, IP, TE-OPM et DSM, est donnée par l'équation :

$$\text{CBR} = -0,0616 (< 75\mu\text{m}) + 0,0892\text{IP} - 0,1035\text{TE-OPM} + 0,9347\text{DSM} + \beta (\text{constante}) \quad R^2 = 0,95 \quad (26)$$

Dans le modèle proposé, la comparaison entre les valeurs de CBR estimées et les valeurs de CBR réelles est presque parfaite (Fig. 58). ; Fig. 59). Ce modèle est différent et plus affiné (~90 %) de celui établi sur les latérites de la région du Sud Cameroun, car il prend en compte 04 paramètres avec un $R^2 = 0,95$. Contrairement à celui proposé dans la région du Sud, qui ne prenait en compte 07 paramètres pour un R^2 compris entre 0,2 et 0,8 (Yato *et al.*, 2018 ; Fig. 59).

V. TYPES DE LATÉRITES DANS LA ZONE D'ÉTUDE

La classification hiérarchique en composantes principales (CHCP) des individus permet de représenter les latérites étudiées en classes homogènes. Dans cette classification, les latérites d'une même classe présentent des valeurs semblables pour tous les individus analysés. Trois classes ou types de latérites ont été définis (Fig. 60). Il s'agit des latérites des classes 1/3, 2/3 et 3/3. Ceci est confirmé par l'étude du dendrogramme qui a pour but de confirmer la CHCP et le nombre de classes qui existent dans la zone d'étude (Fig. 61). Le dendrogramme réalisé confirme l'existence des trois classes avec un pourcentage faible (5 %) pour les latérites de la classe 2/3, par rapport à celles des classes 1/3 et 3/3.

La classe 1/3 est constituée de 103 latérites, majoritairement, les latérites dérivées des argilites (Fig. 60). Les latérites de cette classe sont caractérisées principalement par les paramètres DSM, sable et Gm (Tab. 44).

La classe 2/3 est constituée de 11 latérites. Elle comprend majoritairement les latérites associées aux gneiss (Fig. 60). Cette classe est caractérisée par les paramètres

Tableau 43. Meilleur ajustement du CBR à partir des variables Fines (< 75 µm), IP, TE-OPM et DSM

4 Variables + Constante, DDL (Student) = 168				
Ajustement 1				
R² = 0,952 F (R²) = 836,7585 Proba = 0,0000 V - Test = 22,22				
Variable	V-Test	Proba	Student	Coefficient
Fines (< 75 µm) (%)	3,40	0,001	3,47	-0,0616
IP (%)	4,79	0	4,97	0,0892
TE-OPM (%)	5,45	0	5,71	-0,1035
DSM	21,83	0	52,14	0,9347
Ajustement 2				
R² = 0,951 F (R²) = 822,9482 Proba = 0,0000 V - Test = 22,16				
Variable	V-Test	Proba	Student	Coefficient
Fines (< 75 µm) (%)	2,99	0,003	3,03	-0,0534
IP (%)	4,59	0	4,74	0,0852
TE-OPM (%)	5,43	0	5,69	-0,1042
DSM	21,87	0	52,43	0,9387
Ajustement 1				
R² = 0,951 F (R²) = 810,9456 Proba = 0,0000 V - Test = 22,11				
Variable	V-Test	Proba	Student	Coefficient
Fines (< 75 µm) (%)	4,83	0	5,01	0,1173
IP (%)	2,56	0,010	2,59	-0,0610
TE-OPM (%)	5,23	0	5,46	-0,1002
DSM	21,68	0	51,04	0,9372

*IP : indice de plasticité ; TE-OPM : teneur en eau à l'optimum proctor modifié ;
DSM : densité sèche maximale*

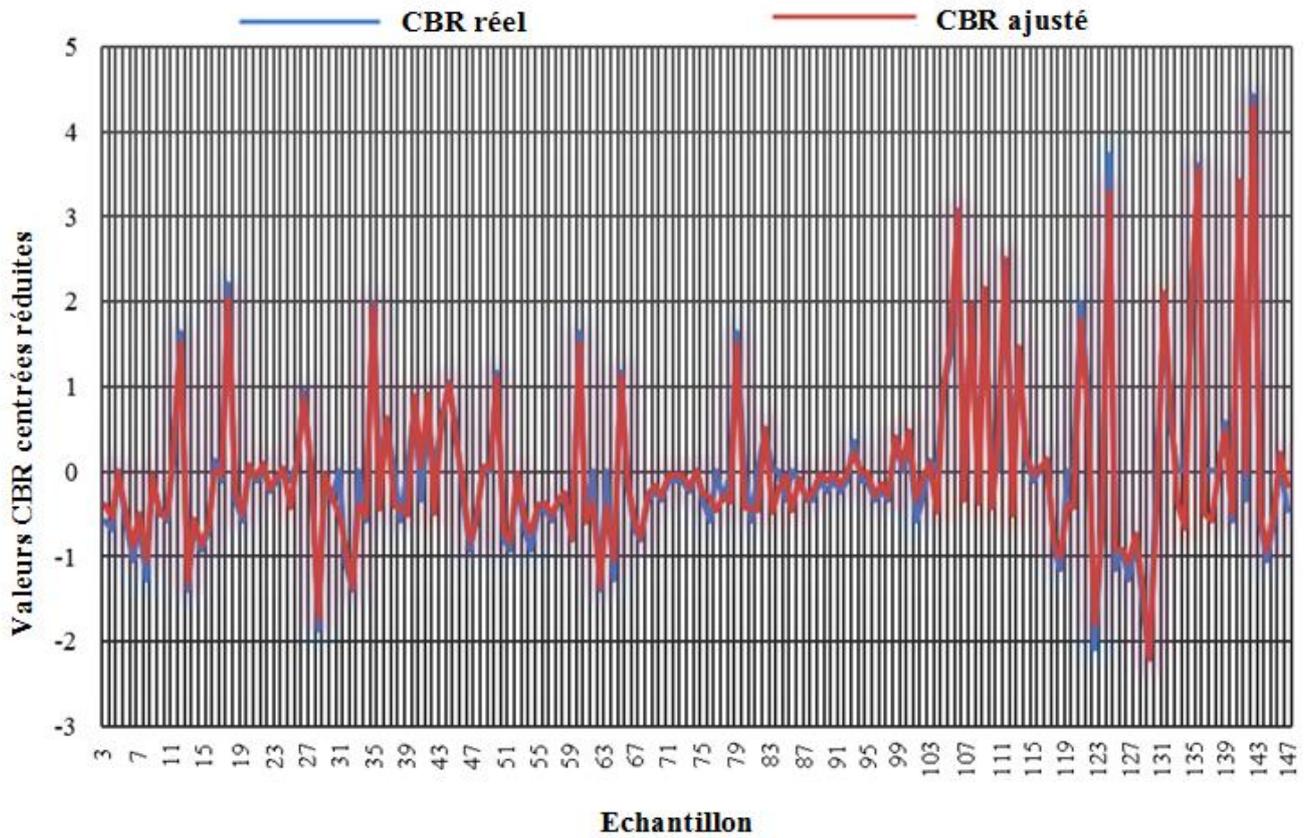


Figure 58. Courbe comparative entre CBR réel et CBR ajusté

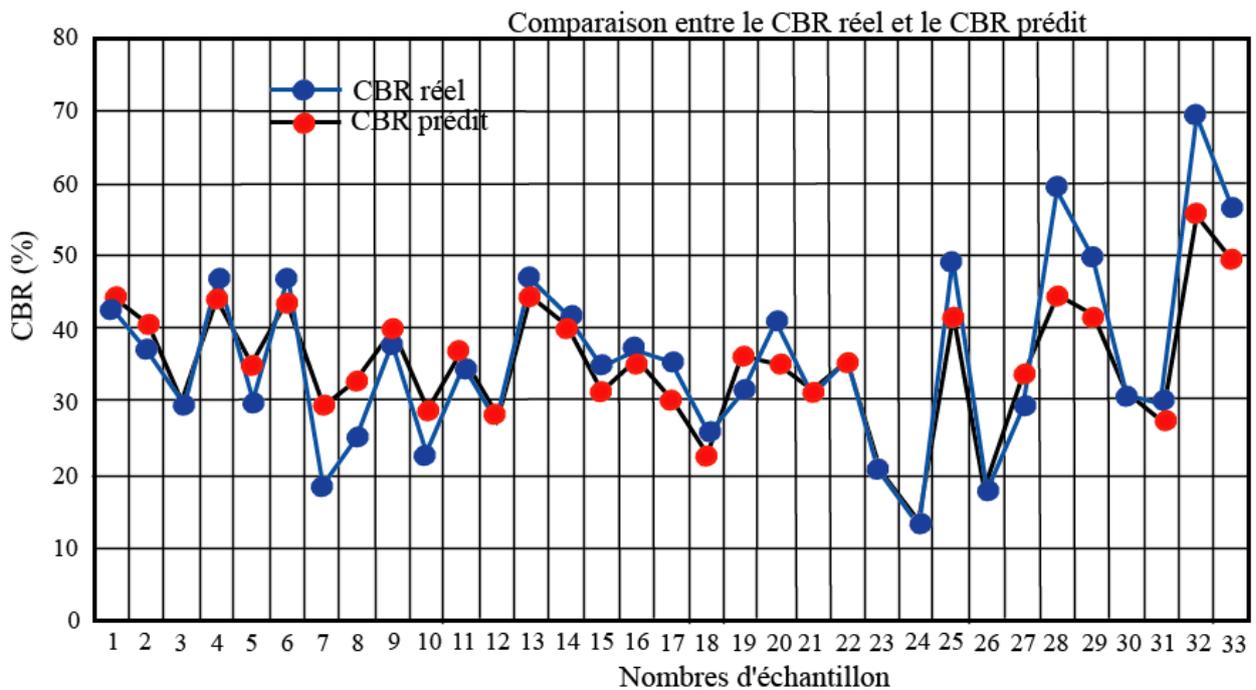


Figure 59. Courbe comparative entre CBR réel et CBR ajusté (Yato *et al.*, 2018)

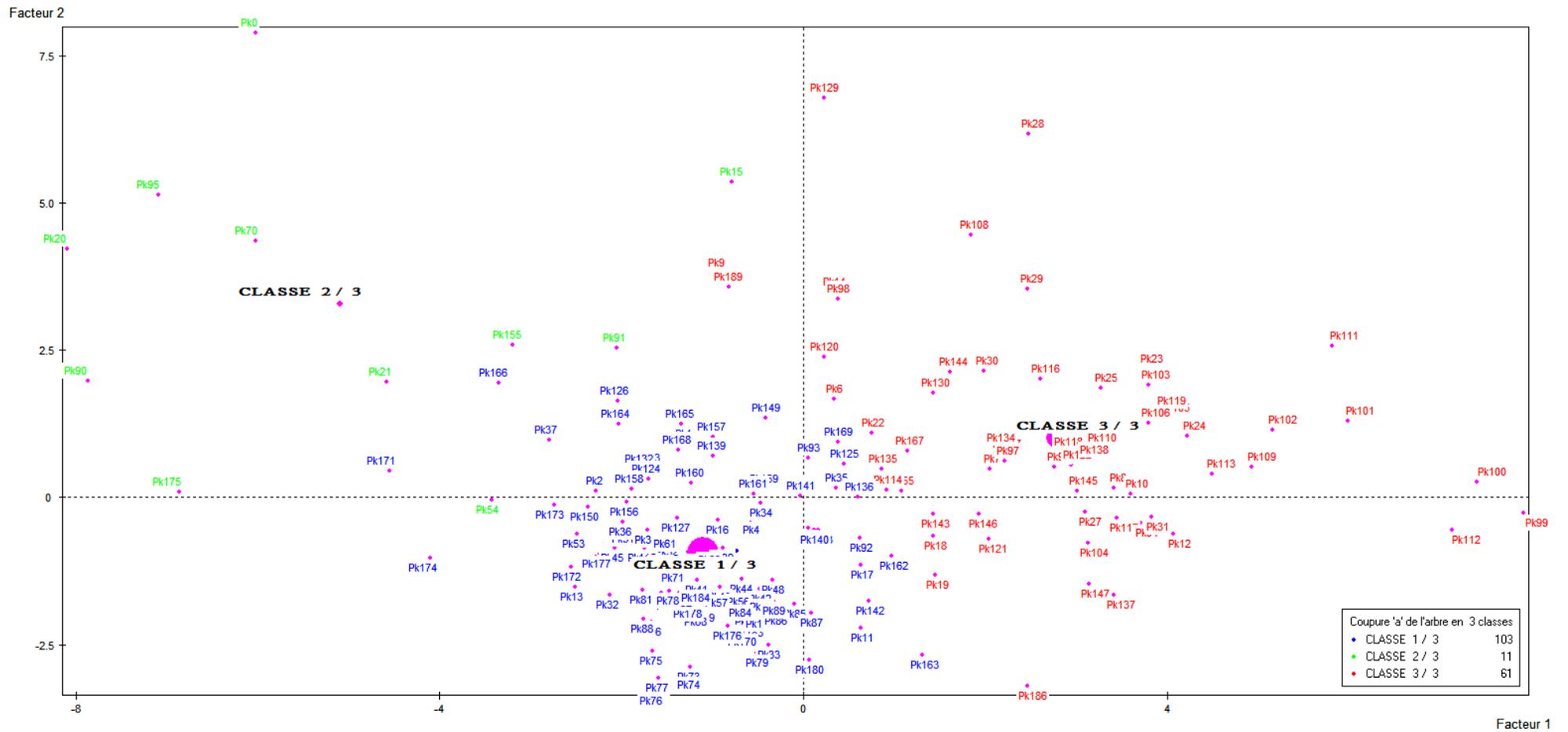


Figure 60. Classification hiérarchique en composantes principales des latérites étudiées

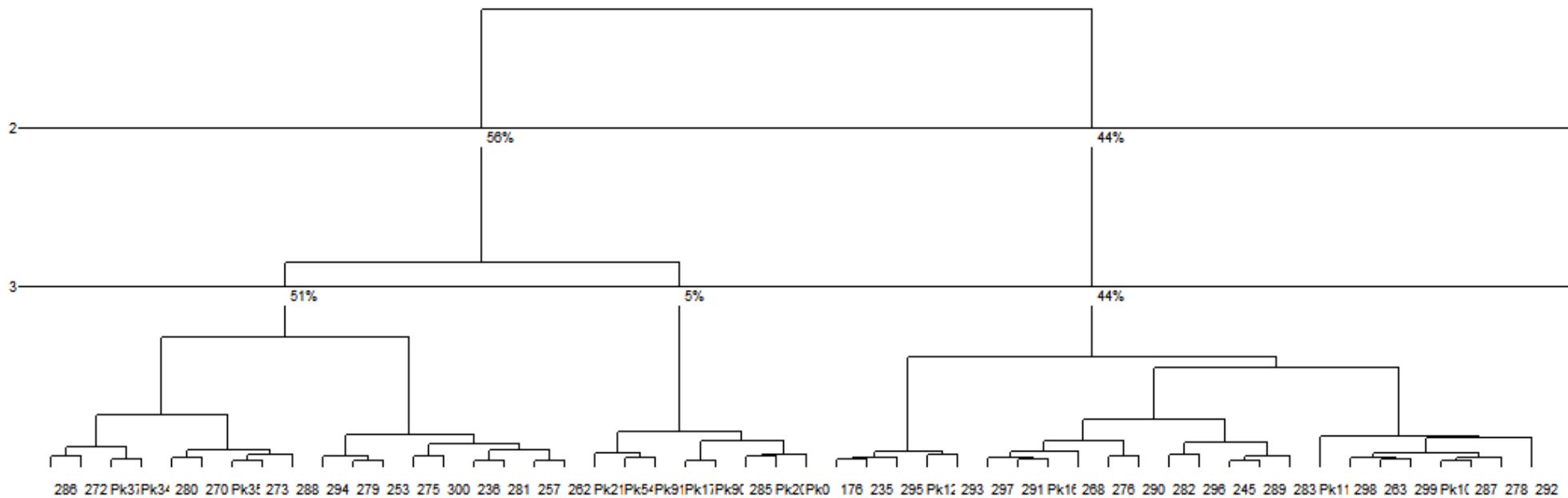


Figure 61. Dendrogramme des latérites étudiées

Tableau 44. Sortie de la fonction catdes appliquée à la partition de la classe 1/3

Variable	V-Test	Probabilité	Moyenne		Ecart-Type	
			Classe	Générale	Classe	Générale
DSM	7,51	0,000	0,52	0,10	0,66	0,88
Sable	4,53	0,000	0,29	0,00	0,86	1,00
Gm	3,31	0,000	0,21	0,00	0,5	1,00
Gravier	-2,89	0,002	-0,18	0,00	0,75	1,00
Squelette	-3,24	0,001	-0,31	-0,12	0,63	0,96
Ac	-3,48	0,000	-0,22	0,00	0,77	1,00
Mortier	-3,62	0,000	-0,2	0,02	0,51	1,00
LP	-6,5	0,000	-0,41	0,00	0,86	1,00
Pp	-6,94	0,000	-0,44	0,00	0,42	1,00
IP	-7,44	0,000	-0,59	-0,15	0,41	0,92
Pm	-7,45	0,000	-0,47	0,00	0,32	1,00
TE-OPM	-7,85	0,000	-0,55	-0,10	0,6	0,92
ε_s	-8,17	0,000	-0,52	0,00	0,35	1,00
LL	-8,19	0,000	-0,81	-0,28	0,62	1,00

LL : limite de liquidité ; IP : indice de plasticité ; LP : limite de plasticité ; Gm : module de classement ; Pm : module de plasticité ; Pp : produit de plasticité ; Ac : activité des colloïdes de Skempton ; ε_s : gonflement potentiel ; TE-OPM : teneur en eau à l'optimum proctor modifié ; DSM : densité sèche maximale ; CBR : California bearing ratio

Gm, gravier, TE-OPM et Ac (Tab. 45).

Les latérites de la classe 3/3 sont constituées de 61 échantillons, majoritairement, des latérites dérivées des basaltes. Ces matériaux sont principalement caractérisés par les paramètres Pm, ϵ_s , Pp, IP, LL, mortier, squelette, LP, TE-OPM, fines et argiles (Tab. 46).

L'histogramme des indices de niveau (Fig. 62), avec une courbe non rectiligne, montre que la classification hiérarchique a été bien réalisée.

La présence de ces familles de latérites dans la zone d'étude est confirmée par la carte iso-CBR (Fig. 63). Cette carte montre que les zones ayant les valeurs de CBR comprises entre 24 – 39 % et 39 – 48 %, sont les latérites dérivées des 03 types de roches et celles ayant les valeurs de CBR (39 – 60 %) sont celles dérivées des basaltes. Les zones aux valeurs élevées de CBR (60 – 70 %) recouvrent les argilites et les gneiss.

VI. INTERETS DES MATERIAUX EN CONSTRUCTION ROUTIERE

VI.1. Basalte

Les granulats basaltiques dans la zone d'étude présentent un comportement élastique fragile et une rupture brutale sous charge. Ils peuvent être utilisés comme matériaux tout venant après concassage et pour les enduits superficiels. Les valeurs de coefficient Micro Deval de ces granulats, inférieures à 13 % pour les classes granulaires testées, montrent que ces roches sont utilisables en couche de base et en couche de roulement, pour tout type de trafic (DEGN, 1987 ; CEBTP, 1984). Les valeurs limites recommandées de coefficient LA sont de 45 % pour les trafics T1/T3 et, de 30 % pour les trafics T4/T5 (CEBTP, 1984). Les valeurs de coefficient Los Angeles des basaltes étudiés, inférieures à 32 %, confirment l'utilisation de ces roches en couche de base et en couche de roulement, pour les trafics faibles à moyens T1, T3 et T4.

VI.2. Latérites dérivées des basaltes

Les valeurs de poids volumique des grains solides (γ_s) des latérites dérivées des basaltes montrent que ces matériaux ont des performances moyennes à bonnes en construction routière (Nwaiwu *et al.*, 2006). Environ 96 % des latérites étudiées ont des valeurs de poids volumique des grains solides supérieures à 2,50 N/cm³ et, 33 % ont des valeurs de γ_s supérieures à 2,75 N/cm³. Ces matériaux ont un comportement moyen à bon en construction routière. La position des courbes granulométriques des matériaux LRB étudiés dans les fuseaux de spécification (CEBTP, 1984 ; Fig. 64) suggère leur utilisation en couche de fondation et en couche de base, pour tous types de trafic. La valeur moyenne de IP (29 %),

Tableau 45. Sortie de la fonction catdes appliquée à la partition de la classe 2/3

Variable	V-Test	Probabilité	Moyenne		Ecart-Type	
			Classe	Générale	Classe	Générale
Gm	7,61	0,000	2,23	0,00	0,87	1,00
Gravier	6,95	0,000	2,04	0,00	0,78	1,00
TE-OPM	4,95	0,000	1,24	-0,10	1,22	0,92
Ac	4,77	0,000	1,4	0,00	2,15	1,00
LL	-3,41	0,000	-1	-0,28	1,16	1,01
ε_s	-3,30	0,008	-0,97	0,00	0,78	1,00
Sable	-3,35	0,000	-0,98	0,00	0,89	1,00
IP	-4,61	0,000	-1,4	-0,15	0,95	0,92
Pm	-5,31	0,000	-1,56	0,00	0,58	1,00
Argile	-5,46	0,000	-1,6	0,00	0,87	1,00
DSM	-5,74	0,000	-1,39	0,10	1,22	0,88
Pp	-5,75	0,000	-1,68	0,00	0,68	1,00
Squelette	-6,19	0,000	-1,85	-0,12	0,71	0,96
Fines	-6,97	0,000	-1,74	0,12	0,94	0,91
Mortier	-7,30	0,000	-2,11	0,02	0,86	1,00

Tableau 46. Sortie de la fonction catdes appliquée à la partition de la classe 3/3

Variable	V-Test	Probabilité	Moyenne		Ecart-Type	
			Classe	Générale	Classe	Générale
Pm	10,41	0,000	1,08	0,00	0,81	1,00
ε_s	10,12	0,000	1,05	0,00	0,91	1,00
Pp	10,10	0,000	1,05	0,00	0,74	1,00
IP	10,03	0,000	0,8	-0,15	0,69	0,92
LL	9,69	0,000	0,73	-0,28	0,66	1,01
Mortier	7,45	0,000	0,8	0,02	0,88	1,00
Squelette	6,50	0,000	0,53	-0,12	0,91	0,96
LP	6,48	0,000	0,67	0,00	0,75	1,00
TE-OPM	5,59	0,000	0,44	-0,10	0,78	0,92
Fines	5,23	0,000	0,61	0,12	0,71	0,91
Argile	3,88	0,000	0,4	0,00	0,9	1,00
CBR	-2,43	0,008	-0,25	0,00	0,79	1,00
Sable	-2,97	0,001	-0,31	0,00	1,03	1,00
DSM	-4,83	0,000	-0,34	0,10	0,6	0,88
Gm	-7,29	0,000	-0,76	0,02	0,88	1,00

LL : limite de liquidité ; IP : indice de plasticité ; LP : limite de plasticité ; Gm : module de classement ; Pm : module de plasticité ; Pp : produit de plasticité ; Ac : activité des colloïdes de Skempton ; ε_s : gonflement potentiel ; TE-OPM : teneur en eau à l'optimum proctor modifié ; DSM : densité sèche maximale ; CBR : California bearing ratio

NUM	AINE	BENJ	EFF	POIDS	INDICE	
300	259	284	14	14	0,046	*
301	287	76	5	5	0,047	*
302	289	245	8	8	0,048	*
303	262	257	16	16	0,048	*
304	281	236	5	5	0,049	*
305	273	78	6	6	0,057	**
306	253	279	7	7	0,057	**
307	120	164	2	2	0,059	**
308	235	176	4	4	0,061	**
309	299	263	10	10	0,062	**
310	136	291	8	8	0,062	**
311	77	147	2	2	0,072	**
312	270	280	6	6	0,075	**
313	278	301	8	8	0,075	**
314	310	297	11	11	0,075	**
315	295	308	6	6	0,079	**
316	155	80	2	2	0,080	**
317	309	298	14	14	0,087	**
318	272	286	11	11	0,090	**
319	300	275	31	31	0,093	**
320	290	276	6	6	0,094	**
321	283	302	10	10	0,095	**
322	17	285	3	3	0,096	**
323	306	294	9	9	0,096	**
324	293	101	4	4	0,106	**
325	288	305	9	9	0,108	**
326	58	322	4	4	0,108	**
327	296	282	10	10	0,109	**
328	316	149	3	3	0,127	***
329	313	317	22	22	0,133	***
330	324	315	10	10	0,136	***
331	268	314	15	15	0,137	***
332	325	312	15	15	0,158	***
333	303	304	21	21	0,163	***
334	311	318	13	13	0,190	****
335	333	319	52	52	0,218	****
336	321	327	20	20	0,229	****
337	326	307	6	6	0,240	****
338	320	331	21	21	0,241	****
339	292	329	25	25	0,273	****
340	339	41	26	26	0,289	*****
341	335	323	61	61	0,303	*****
342	337	328	9	9	0,343	*****
343	336	338	41	41	0,448	*****
344	332	334	28	28	0,497	*****
345	340	343	67	67	0,967	*****
346	345	330	77	77	1,070	*****
347	341	344	89	89	1,262	*****
348	342	347	98	98	1,997	*****
349	346	348	175	175	4,476	*****
Somme des indices de niveau					17,741	

NUM : numéro des individus ; *AINE* : valeurs des aînés des individus ; *BENJ* : valeurs des benjamains des individus ; *EFF* : effectifs des individus.

Figure 62. Diagramme (a) et histogramme des indices de niveau (b)

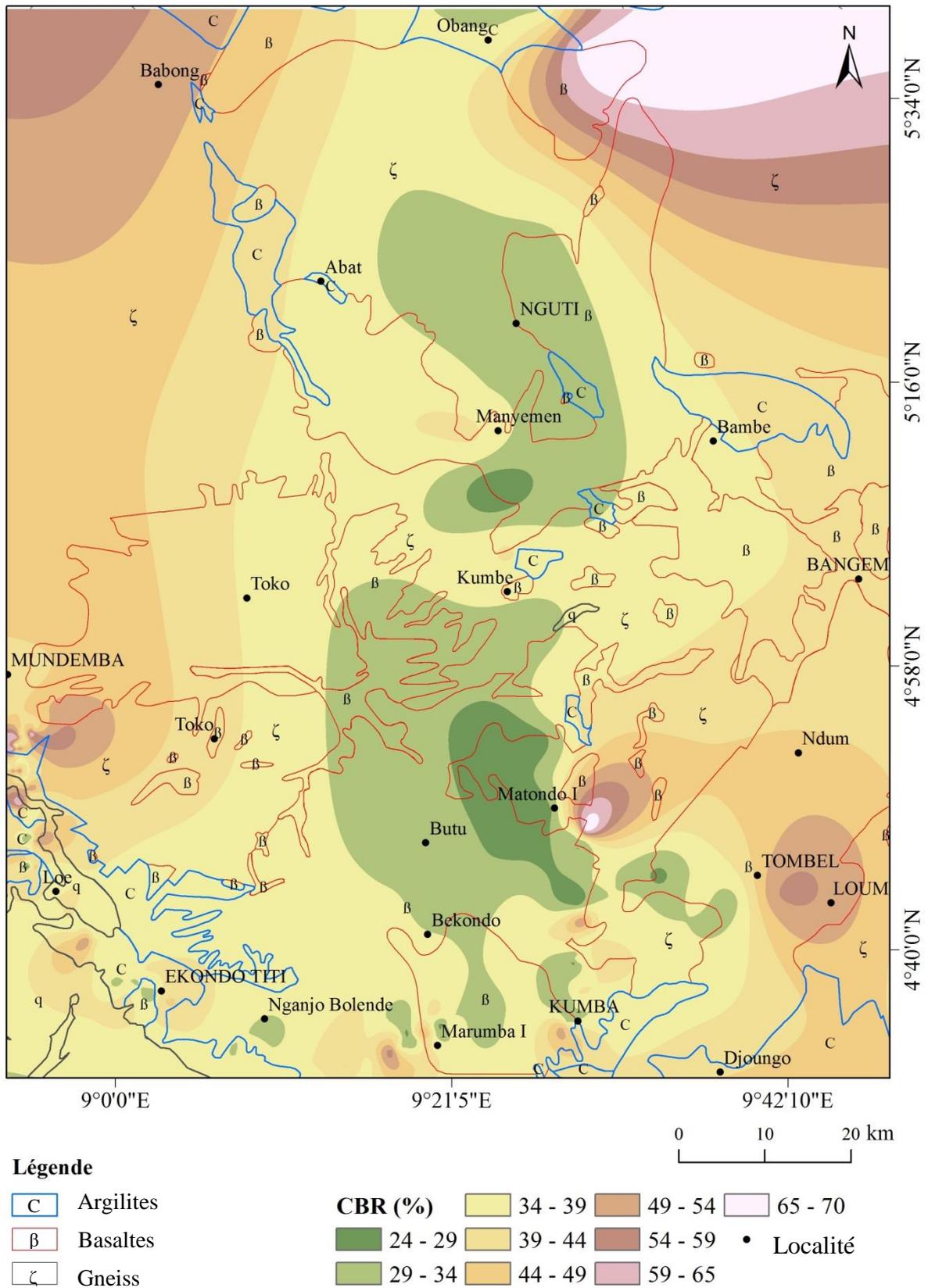


Figure 63. Carte iso-CBR de la zone d'étude

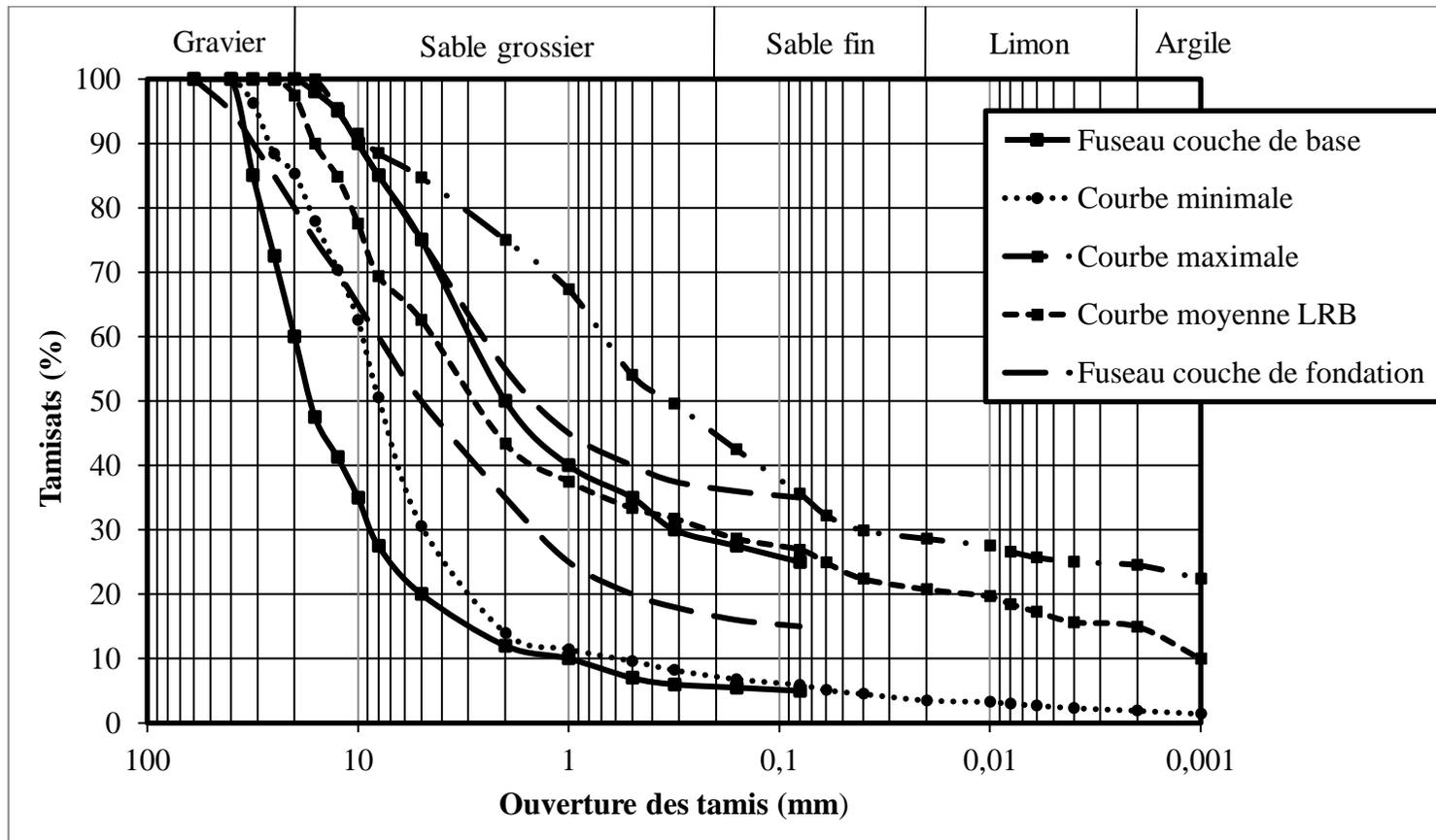


Figure 64. Position des latérites LRB dans le fuseau de spécification pour couche de fondation et couche de base (CEBTP, 1984)

comprise entre 20 et 30 %, confirme leur utilisation en couche de fondation. Environ 97 % des latérites dérivées des basaltes présentent une valeur de module de classement (G_m) supérieure à 1,5. Les valeurs de ce paramètre, couplées au trafic moyen journalier sur les routes nationales (258 véhicules par jours ; Anonyme, 2015), indiquent que ces latérites sont aptes à une utilisation en couche de fondation et en couche de base pour les routes mineures ($<0,3 \times 10^6$ ese (Essieux standards équivalents)). La valeur moyenne du module de plasticité (867,78) est supérieure à 250, pour plus de 97 % des matériaux dérivés des basaltes. Ceci montre qu'ils sont utilisables en couche de fondation. Soixante-onze pourcent environ de ces matériaux sont de classe A-2-7. Ces matériaux présentent de ce fait de bonnes performances en construction routière. Soixante-treize pourcent des latérites dérivées des basaltes ont une densité sèche maximale (DSM) supérieure à 1,80 et, 7 % ont une valeur DSM supérieure à 2. Ceci confirme l'utilisation de ces matériaux en couche de fondation et en couche de base. Les valeurs CBR de 91 % de ces latérites sont comprises entre 18 et 65 %. Ceci montre que les matériaux dérivés des basaltes sont aptes pour une utilisation en couches de fondation pour les trafics faibles à moyens T1 à T3.

VI.3. Latérites dérivées des argilites

Quarante un pourcent des latérites dérivées des argilites ont des valeurs de poids volumique des grains solides (γ_s) supérieures à $2,75 \text{ N/cm}^3$. Ces latérites ont des performances bonnes à moyennes en construction routière. La position des courbes minimum, moyenne et maximum de ces matériaux dans les fuseaux de spécification (CEBTP, 1984) montrent qu'ils peuvent être utilisés en couche de fondation et en couche de base (Fig. 65) pour tous types de trafic. La valeur moyenne de IP (27 %) s'insère dans l'intervalle défini par le CEBTP (1984) pour les couches de fondation en construction routière. Les valeurs de G_m , supérieures à 1,5, suggèrent que les matériaux étudiés sont aptes en couche de fondation pour tout type de trafic et en couche de base pour les routes mineures ($<0,3 \times 10^6$ ese). Les valeurs de P_m , supérieures à 250, indiquent que ces matériaux sont utilisables en couche de fondation. Environ 91 % des latérites sur argilites ont une valeur de DSM supérieure à 1,80 et, 11 % une valeur supérieure à 2. Ceci suggère que ces matériaux sont aptes à une utilisation en couche de fondation et en couche de base, en construction routière (CEBTP, 1984). Quatre-vingt-dix-sept pourcent des latérites sur argilites ont des valeurs de CBR comprises entre 30 et 70 %. Ceci montre que les latérites sur argilites sont aptes comme matériaux pour couche de fondation pour les trafics faibles à moyens T1 à T3 et, pour couche de base pour les trafics faibles T1.

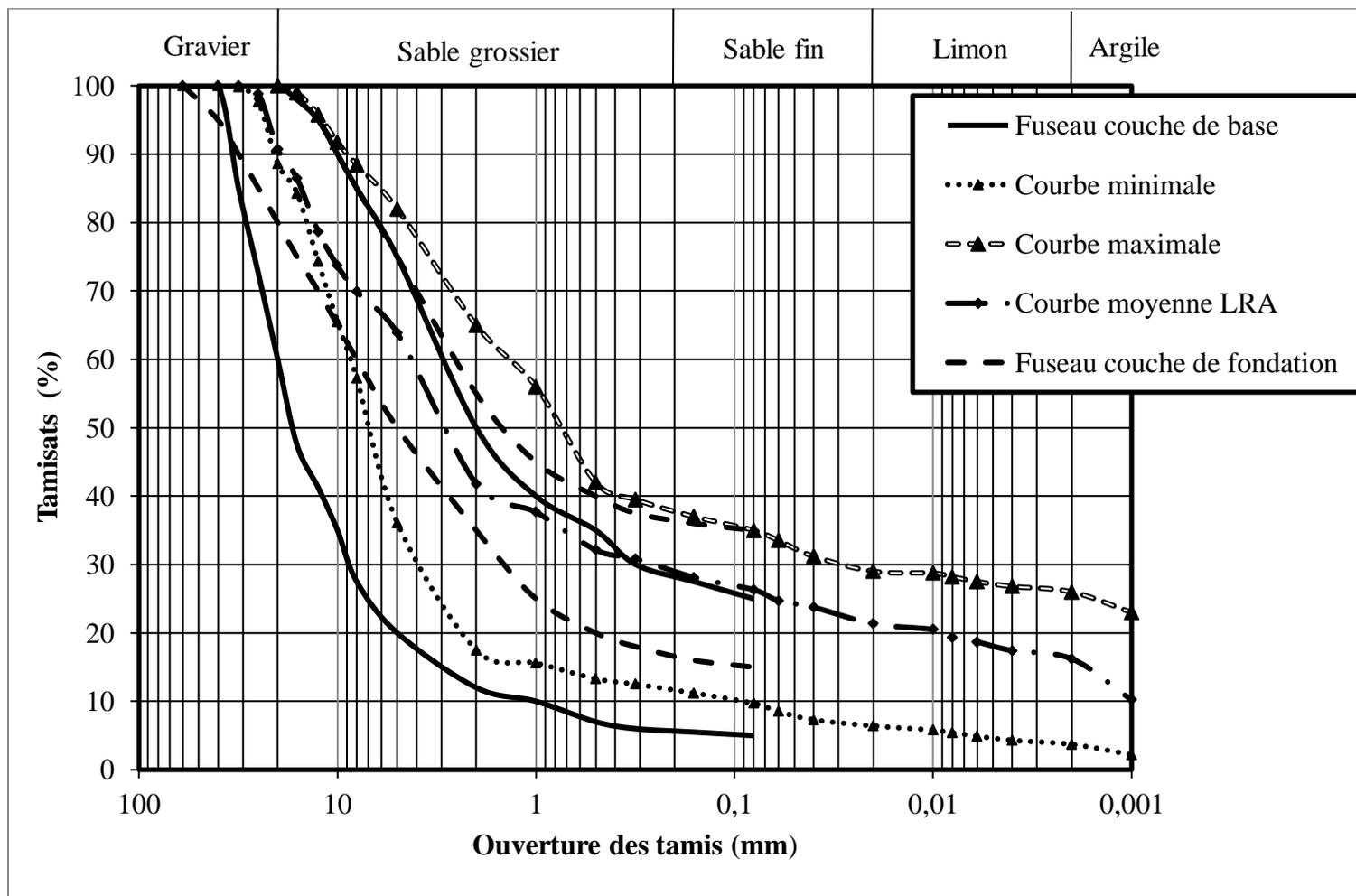


Figure 65. Position des latérites dérivées des argillites dans le fuseau de spécification pour couche de fondation et couche de base (CEBTP, 1984)

VI.4. Latérites dérivées sur gneiss

Environ 50 % des matériaux dérivés des gneiss ont des valeurs de poids volumique des grains solides (γ_s) supérieures à $2,75 \text{ N/cm}^3$. Celles-ci suggèrent que ces matériaux ont des performances moyennes à bonnes en construction routière (Nwaiwu *et al.*, 2006). La position des courbes granulométriques des matériaux LRG dans les fuseaux de spécification (CEBTP, 1984 ; Fig. 66), indiquent leur utilisation en couche de fondation et en couche de base en construction routière. La valeur moyenne de IP (29 %), comprise entre 30 et 20 %, confirme leur possible utilisation en couche de fondation (CEBTP, 1984). Environ 100 % des latérites sur gneiss ont des valeurs de Gm supérieures à 1,5. Les valeurs de ce paramètre, couplées au trafic moyen journalier sur les routes nationales (258 véhicules par jours ; Anonyme, 2015), indiquent que ces latérites sont aptes à une utilisation en couche de fondation et en couche de base pour les routes mineures ($<0,3 \times 10^6$ ese). La valeur moyenne de Pm (867,78) est supérieure à 250, pour 96 % environ des matériaux LRG. Ceci montre qu'ils sont utilisables en couche de fondation. Quatre-vingt-neuf pourcent des matériaux LRG ont une valeur de DSM supérieure à 1,80 et, 32 %, une valeur de DSM supérieure à 2. Ceci confirme l'utilisation de ces latérites en couche de fondation et en couche de base. Les valeurs CBR de 86 % des matériaux LRG étudiés sont comprises entre 30 et 70 %. Ceci montre que les matériaux dérivés des gneiss sont aptes à une utilisation en couche de fondation pour les trafics moyens T2 et T3 et, en couches de base pour les trafics faibles T1.

CONCLUSION

Les latérites étudiées, dérivées des basaltes (LRB), sont plus épaisses que celles développées sur argilites (LRA) et sur gneiss (LRG). Les matériaux LRB sont rouges à rouges sombres, alors que les matériaux LRA et LRG sont jaunes à jaunes rougeâtres. Les matériaux LRA sont kaolinisés à faiblement latéritisés tandis que, les matériaux LRB sont faiblement à modérément latéritisés. Les latérites LRB sont fortement à très fortement ferrugineuses alors que, celles développées sur argilites sont faiblement à moyennement ferrugineuses. Trois groupes de latérites sont observables dans la zone d'étude. Les latérites de la classe 1/3, latérites sur argilites, se caractérisent principalement par les paramètres DSM, sable et Gm. Les latérites de la classe 2/3, latérites sur gneiss, sont caractérisées par les paramètres Gm, gravier, TE-OPM et Ac. Les latérites de la classe 3/3, latérites sur basaltes, se singularisent par les paramètres Pm, ε_s , Pp, IP, LL, mortier, squelette, LP, TE-OPM, Fines et argiles. Le meilleur ajustement du CBR par les paramètres Fines, IP, TE-OPM et DSM est donné

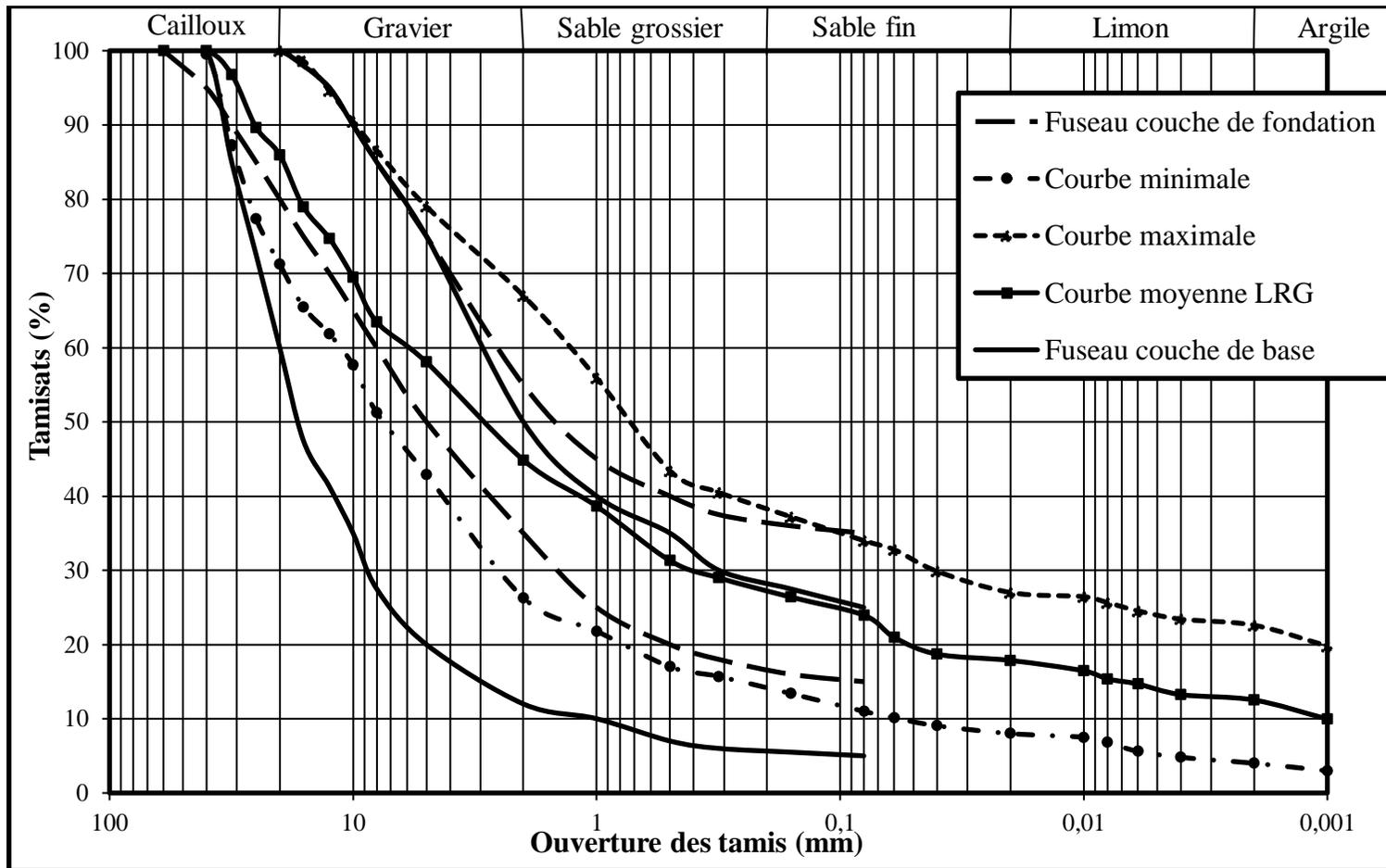


Figure 66. Position des latérites sur gneiss dans le fuseau de spécification pour couche de fondation et couche de base (CEBTP, 1984)

par l'équation : $CBR = -0,0616 (< 75\mu\text{m}) + 0,0892IP - 0,1035TE-OPM + 0,9347DSM + \beta$ (constante) avec un $R^2 = 0,95$. Les latérites LRA et LRG sont utilisables en couche de fondation pour les trafics faibles à moyens T1 à T3 et, en couche de base, pour les trafics faibles T1. Les latérites dérivées des basaltes sont utilisables en couche de fondation pour les trafics faibles à moyens T1 à T3.

CONCLUSION GENERALE
ET PERSPECTIVES

La zone d'étude se localise le long des routes nationales 8 (Kumba-Mamfé) et 16 (Loum-Mundemba) dans la région du Sud-Ouest Cameroun. Le climat qui y prévaut est de type équatorial à 02 saisons, inégalement réparties au cours de l'année. Le réseau hydrographique est de type dendritique. Les sols ferrallitiques sont les plus répandus. Les routes nationales 8 et 16 traversent les roches volcaniques, sédimentaires et les roches gneissiques situées dans des unités morphologiques différentes dans la zone étudiée. La présente étude, définit la variabilité des paramètres géotechniques des latérites dérivées de ces différentes roches et établit un modèle de détermination des valeurs de CBR à partir de quatre paramètres physiques simples pour le choix de ces matériaux en construction routière.

Les travaux de terrain ont permis d'identifier, de localiser et de collecter les échantillons de roches et de matériaux latéritiques à proximité des routes nationales 8 et 16. Dix huit échantillons de latérites dérivés de roches volcaniques et de roches sédimentaires ont été prélevés dans le niveau nodulaire et, ont été soumis aux analyses géochimiques. Cent soixante quinze échantillons de latérites dérivés de roches volcaniques, sédimentaires et gneissiques ont été prélevés dans les niveaux nodulaires et argileux superficiels et, soumis aux essais géotechniques. Les études statistiques ont été appliquées aux données des analyses minéralogiques, géochimiques et géotechniques.

Les résultats montrent que la roche volcanique étudiée est un basalte à texture microlitique porphyrique constituée d'olivine, de pyroxène et de feldspaths. La roche sédimentaire est une argilite composée de quartz, d'albite, de calcite et de clinochlore. Les latérites étudiées, dérivées des basaltes (LRB), sont plus épaisses que celles développées sur argilites (LRA) et sur gneiss (LRG). Les matériaux LRB sont rouges à rouges sombres, tandis que les matériaux LRA et LRG sont jaunes à jaunes rougeâtres. En plus de la muscovite et de la gibbsite présentes uniquement dans les latérites LRA, les latérites étudiées sont constituées de quartz, kaolinite, goethite, hématite et anatase. Les teneurs en SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 sont plus élevées dans les latérites LRB. Les matériaux LRB sont ferrugino-silico-alumineux tandis que, les matériaux LRA sont silico-ferrugino-alumineux. Les matériaux LRB sont plus altérés que les matériaux LRA. Les matériaux LRA sont kaolinitisés à faiblement latéritisés tandis que, les matériaux LRB sont faiblement à modérément latéritisés.

Sur le plan statistique, 03 groupes de latérites sont observables dans la zone d'étude. Les latérites de la classe 1/3, sont les latérites sur argilites, caractérisées principalement par les paramètres DSM, sable et Gm. Les latérites de la classe 2/3, associées aux latérites sur gneiss, sont caractérisées par les paramètres Gm, gravier, TE-OPM et Ac. Les latérites de la classe 3/3, représentées par les matériaux sur basaltes, se singularisent par les paramètres Pm,

ε_s , Pp, IP, LL, mortier, squelette, LP, TE-OPM, Fines et argiles. L'étude des paramètres géotechniques révèle 03 groupes : (1) le groupe des paramètres Fines, argile, squelette, mortier, sable et γ_s , (2) le groupe des paramètres Pp, Pm, LL, IP, ε_s , LP et TE-OPM et, (3) le groupe des paramètres CBR, Ac, gravier et Gm. Les paramètres géotechniques des latérites sur basaltes et gneiss sont plus dispersés que ceux des latérites sur argilites. Dans les latérites étudiées, DSM croît avec une diminution des teneurs en kaolinite, goethite, Fe_2O_3 et PF et, augmente proportionnellement avec la SiO_2 . Le meilleur ajustement du CBR par les paramètres Fines, IP, TE-OPM et DSM est donné par l'équation : $CBR = -0,0616 (< 75\mu m) + 0,0892IP - 0,1035TE-OPM + 0,9347DSM + \beta$ (constante) avec un $R^2 = 0,95$.

Sur le plan géotechnique, plus les concassés des basaltes sont grossiers, plus les valeurs de MDE et LA sont faibles. Les granulats basaltiques sont utilisables en couches de base et en couches de roulement pour les trafics faibles à moyens T1 à T3. Ces latérites dérivées des basaltes sont moins denses que celles développées sur argilites et sur gneiss. Les matériaux LRB sont plus fins et plus plastiques que les matériaux LRA et LRG. Dans l'ensemble, les latérites développées sur les trois types de roches sont plastiques à fortement plastiques. La valeur moyenne de TE-OPM des latérites sur argilites est faible par rapport à celle des matériaux développés sur basaltes et gneiss. Les matériaux LRA et LRG ont une portance plus élevée que ceux des latérites sur basaltes. Les latérites dérivées des argilites et celles dérivées des gneiss sont utilisables en couche de fondation pour les trafics faibles à moyens T1 à T3 et, en couche de base, pour les trafics faibles T1. Les latérites dérivées des basaltes sont utilisables en couches de fondation pour les trafics faibles à moyens T1 à T3.

En guise de perspectives, une étude géophysique est nécessaire afin de quantifier les volumes des matériaux dans la zone d'étude. Une étude pétrologique des profils d'altération dérivés des trois types de roche permettra de mieux comprendre les processus de formation des latérites étudiées. La diversité des corrélations obtenues sur les latérites et, la complexité de ces matériaux, confirment la nécessité de leur étude à l'échelle locale en vue de la réalisation d'une classification des sols au Cameroun.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- Abidemi O. I., 2015. Geotechnical characterization of a highway road alignment with light weight penetrometer (LRS 10), in southeastern Nigeria. *International Journal of Geology-Engineering* 6 (7). doi: 10.1186/s40703-015-0007-2.
- Adebesi N. O., Adeyemi G. O., Oluwafemi O. S., Songca S. P., 2013. Important properties of clay content of lateritic soils for engineering project. *Journal of Geography and Geology* 5(2), 99–115.
- Adeyemi G. O., 1995. The influence of parent rock factor on some engineering index properties of the three residual lateritic soils in southwestern Nigeria. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 52(1), 3–8.
- Adeyemi G. O., Wahab K. A., 2008. Variability in the geotechnical properties of a lateritic soil from southwestern Nigeria. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 67, 579–584.
- AFNOR NF P 94–056, 1990c. Granulats : analyse granulométrique par tamisage. Association Française de Normalisation, Paris.
- AFNOR NF P 94–054, 1991. Sols : reconnaissance et essais - détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau.
- AFNOR NF P94–057, 1992. Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique. In: Méthode par sédimentation. Association Française de Normalisation, Paris.
- AFNOR NF P 94–051, 1993. Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle-Limite de plasticité au rouleau.
- AFNOR NF EN 1097–1, 1996. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats Partie 1 : Détermination de la résistance à l'usure (micro - Deval).
- AFNOR. NF P 94–078, 1997. Sols : reconnaissance et essais – Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat–Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.
- AFNOR NF EN 1097–2, 1998. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation.
- AFNOR NF P 94–093, 1999. Sols : Reconnaissance et essais Détermination des références de compactage d'un matériau Essai Proctor normal – Essai Proctor modifié.
- Alawi M. H., Rajab M. I., 2013. Prediction of California bearing ratio of subbase layer using multiple linear regression models. *Road Materials and Pavement Design* 14(1), 211–219.
- Akpokodje E. G., Hudec P. P., 1994. The influence of petrology and fabric on the engineering properties of concretionary laterite gravel aggregates. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 27, 39–50.

- Anieka, E., 2017. Correlation between physio-mechanical parameters and geotechnical evaluations of some sandstone along the Calabar/Odukpani-Ikom-Ogoja highway transect, Southeastern Nigeria. *Geotechnics and Geollogical Engineering* ; [http://dx doi I 10.1007/s10706-017-0311-z](http://dx.doi.org/10.1007/s10706-017-0311-z).
- Anonyme, 1987. Recommandation pour l'utilisation en corps de chaussée des graveleux latéritiques naturels. Bulletin du Ministère de l'équipement. Direction des Etudes Générales et de la Normalisation. Cameroun, 44 p.
- Anonyme, 2015. Annuaire statistique du secteur des infrastructures. Ministère des Travaux Publics du Cameroun, 65 p.
- Ayodele A. L., Falade F. A., 2016. Some geotechnical properties of selected sub-base materials for road construction. *Civil and Environmental Research* 8(8), 31–39.
- Ayonghe S.N., Ntasin, E.B., Samalang, P., Suh, C.E., 2004. The June 27, 2001 landslide on volcanic cones in Limbe, Mount Cameroon. *West Africa Journal of African Earth Sciences* 39, 435–439.
- Babechuk M. G., Widdowson M., Kamber B. S., 2014. Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India. *Chemical Geology* 363, 56–75.
- Baccini A., 2010. Statistique descriptive multidimensionnelle (pour les nuls). (Version de mai 2010). Institut de mathématiques de Toulouse. Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 33 p.
- Bagarre E., 1990. Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière. ISTED, 143 p.
- Bagnouls F., Gaussen H., 1957. Les climats biologiques et leur classification. *Annales de géographie* 335, 193–220.
- Bayiga E. C., 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.
- Bello A. A., 2012. Regression Analysis between Properties of Subgrade Lateritic Soil. *Leonardo Journal of Science* 1583-0233(21), 99–108.
- Bello A. A., Osinubi K. J., 2010. Attenuative capacity of compacted three reddish brown tropical soils. *Continental Journal Engineering Sciences* 5(2), 39–54.
- Bhatt S., Jain P. K., Pradesh M., 2014. Prediction of California Bearing Ratio of Soils Using Artificial Neural Network. *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Maths*, 156–161.
- Bohi Z. P. B., 2008. Caractérisation des sols latéritiques utilisés en construction routière : le cas de la région de l'Agneby (côte d'Ivoire). Doct. Ph/D, Fac. Sci. Univ. ENPC - Paris, 123 p.

- Bokanda E. E., 2020. Petrology of the sedimentary rocks in the southern Mamfe basin, SW Cameroon. Doct. Ph/D, Fac. Sci. Univ. Yaounde, 177 p.
- Bokanda E. E., Ekomane E., Kenfack N. G., Njilah K. I., Ashukem N. E., Tematio P., Bisse S., Ngeutchoua G., Orock N., Belinga Belinga C., 2019. Provenance, paleoclimate and diagenetic signature of sandstones in the Mamfe basin (West Africa). *Heliyon Journal*. doi: 10.1016/j.heliyon.2019e01140.
- Brown G., Brindley G. W., 1980. Crystal structures of clay minerals and their x-ray identification. Mineralogical Society, London, 495 p.
- CEBTP., 1984. Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. Ministère de la coopération de la République Française. 157 p.
- Charman J. H., 1988. Laterite in road pavements. London: CIRIA Special Publication 47, 71 p.
- Chessel D., Thioulouse J., Dufour A. B., 2004. Introduction à la classification hiérarchique. Fiche de Biostatistique-Stage 7, 56 p. Disponible à l'adresse Internet : <http://pbil.univlyon1.fr/R/stage/stage7.pdf>.
- Chuka Osadebe C., Moruf Salam I. B., 2010. Ewoma Obrike S., Olatunbosun Ajala M., 2010. The Kano-Kazaure highway, north central Nigeria: the significance of the engineering geology in construction. *Bulletin of Engineering of Geology Environment* 70 (1), 33–40.
- Colin F., Nahon D., Trescases J. J., Melfi A., 1990. Lateritic weathering of Pyroxenites at Niquelandia, Goiás, Brazil: The Supergene Behaviour of Nickel. *Economic Geology* 85,1010–1023.
- D'Hoore J. L., 1964. Soil map of Africa ; scale 1/5 000 000, explanatory monograph. *Commonly For Technology and Cooperation in Africa* 93, 205 p.
- DEGN, 1987. Recommandations pour l'utilisation en corps de chaussée des graveleux latéritiques naturels. Bulletin du Ministère de l'équipement. Direction des études générales et de la normalisation, Cameroun, 16 p.
- DEGN, 1988. Directives pour la réalisation des assises de chaussée en grave concassée. Ministère de l'équipement. Direction des études générales et de la normalisation, Cameroun, 14 p.
- Diko M., Ekosse G., Ayonghe S., Ntasin E., 2011. Physical characterization of clayey materials from tertiary volcanic cones in Limbe (Cameroon) for ceramic applications. *Apply Clay Science* 51, 380–384.
- DNIT., 2007. Pavimentacao-Base estabilizada granulometricamente com utilizacao de solo lateritico-Especificacao de servico. Norma DNIT-098/2007-ES. DNIT, Brasilia.

- Driese, S.G., 2004. Pedogenic translocation of Fe in modern and ancient vertisols and implications for interpretations of the Hekpoort paleosol (2.25 Ga). *Journal of Engineering Geology* 112, 543–560.
- Duchaufour P., 2001. Introduction à la science du sol: sol, végétation, environnement. Dunod 6^e Ed., Paris. 333 p.
- Dumort J. C., 1968. Carte géologique de reconnaissance du Cameroun au 1/500 000. Feuille Douala-Ouest, avec notice explicative. *Géologie Direction of Mines*.
- Dupain R., Lanchon R., Saint-Arroman J.C., 1995. Granulats, sols, ciments et bétons. Editions Casteilla, Paris, 234 p.
- Duzgoren-Aydin N. S., Aydin A., Malpas J., 2002. Re-assessment of chemical weathering indices: case study on pyroclastic rocks of Hong Kong. *Journal of Engineering Geology* 63, 99–119.
- Ebah Abeng., 2013. Prospection géochimique de l'or et des éléments du groupe du platine dans les matériaux d'altération des pyroxénites à Lolodorf (Département de l'Océan, Région du Sud). Doct. Ph/D, Fac. Sci. Univ. Yaounde, 205 p.
- Ekodeck G. E., 1984. L'altération des roches métamorphiques du Sud Cameroun et ses aspects géotechniques. Th. Doct. 3^{ème} cycle, Fac. Sci. Univ. Scientif. Et Médic. Grenoble I France, 368 p.
- Ekodeck G. E., Kamgang K. B. V., 2002. L'altérologie normative et ses applications : une expression particulière des roches aluminosilicatées du point de vue de leur évolution supergène. Press. Univ. Yaoundé (Cameroun), Collect. Connaissances, 231 p.
- Ekodeck G. E., Kamgang K. B., 2011. Normative alterology and advanced applications a particular facet of aluminosilicate-bearing rocks petrology, with regard to their supergene evolution. Press. Univ. Yaoundé (Cameroun), collect. Connaissances, 225 p.
- Ekosse G. E., 2000. The Makoro kaolin deposit, southeastern Botswana: its genesis and possible industrial applications. *Applied Clay Sciences* 16, 301–320.
- Ekosse, G.E., Ngole, V., Sendze, Y., Ayonghe, S.N., 2002. Environmental mineralogy of unconsolidated surface sediments associated with the 2001 landslides on volcanic cones, Mabeta New Layout, Limbe, Cameroon. *Global Journal of Environmental Studies* 4 (2), 11–122.
- Eyong, J. T., 2003. Litho-Biostratigraphy of the Mamfe Cretaceous Basin, SW Province of Cameroon-West Africa. Th. Doct. 3^{ème} cycle, Fac. Sci. Univ. Leeds, Leeds, 256.
- Fall M., 1993. Identification et caractérisation mécanique des graveleux latéritiques du Sénégal : application au domaine routier. Th. Doct. 3^{ème} cycle, Fac. Sci. Univ. INPL, 170 p.

- Fall M., Tisot J. P., Cissé I. K., 1994. Specification for road design using statistical data. An example of laterite or gravel lateritic soils from Senegal. *Bulletin of International Association of Engineering Geology* 50, 17–35.
- Fall M., Tisot J. P., Cisse I. K., 1997. Undrained behaviour of compacted gravel lateritic soils from Western Senegal under monotonic and cyclic triaxial loading. *Engineering Geology* 47(1-2), 71–87.
- Fedo, C. M., Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1995. Unravelling the effects of potassiummetasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology* 23, 921–924.
- Gregory, G.H., Cross, S.A., 2007. Correlation of CBR with shear strength parameters. In: Proceedings of 9th international conference on low volume roads, Austin, Texas.
- Grignac C., Heraud H., Meyer J.-L., Roy J.-L., 1993. Caractéristiques des matériaux, Les techniques, pp. 20-33.
- Hieng I. O., 2003. Etude des paramètres géotechniques des sols du Cameroun. Clé Ed., Yaoundé, 148 p.
- Hyoumbi T. W., Wouatong A. S. L., Pizette P., Nor-Edine A., Medjo Eko R., 2017. Assessment of laterite suitable for road construction in Bafang area (West-Cameroon) based on physical properties, geo-environmental factors and gis software. *Journal Multidisciplinary Engineering Science Technology* 4 (3), 2458–9403.
- Kamgang Beyala, V., 1998. Evolution supergène des roches et incidences phytogéographiques : cas du contact forêt-savane du sud-est Cameroun. Th. Doct. d'Etat, Univ. Yaoundé I, 208 p.
- Kamtchueng T. B., Onana V. L., Fantong W. Y., Akira U., Ntouala R. F. D., Wongolo D. M. H., Ndongo B. G., Ngo'o Ze A., Kamgang K. B. V., Ondo J. M., 2015. Geotechnical, chemical and mineralogical evaluation of lateritic soils in humid tropical area (Mfou, Central-Cameroon): Implications for road construction. *International Journal of Geo-Engineering* 6(1), 1–21.
- Kanouo, S. N., 2014. Geology of the Western Mamfe Corundum Deposits, SW Region Cameroon: Petrography, Geochemistry, Geochronology, Genesis, and Origin. Unpublished. Th. Doct. d'Etat, Univ. Yaoundé , 225 p.
- Kassogue M., Herbert G., Massiéra M., 2002. Contrôle de la qualité sur les matériaux dans les couches de chaussée (Revêtement exclu). 4e Conférence Spécialisée en Génie des transports de la Société Canadienne de Génie Civil, 10 p.
- Lyon Associates, Inc., 1971. Les sols latéritiques et d'autres sols difficiles d'Afrique. Études géotechniques pour USAID-Lyon Associates, Maryland USA-BRRI, Kumassi Ghana, 394 p.

- Magnan J-P., Masamba Ndiaye., 2015. Determination and assessment of deformation moduli of compacted lateritic gravels, using soaked CBR tests. *Transportation Geotechnics* 5, 50–58.
- Mahalinga-Iyer U., William D. J., 1997. Properties and performance of lateritic soil in road pavements. *Engineering Geology* 46, 71–80.
- Massamba Ndiaye, Magnan J.P., Cissé I. K., Cissé L., 2013. Characterisation of laterite for road construction. *Arena Transport Research*, 8–16.
- Mengue E., 2015. Evaluation du comportement mécanique d'un sol latéritique traité au ciment pour des applications routières. Th. Doct. Ph/D, Fac. Sci. Univ. Yaounde / Lille 1. France. 193 p.
- Mesida E. A., 1987. The relationship between the geology and the lateritic engineering soils in the Northern environs of Akure, Nigeria. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 35(1), 65–69.
- Millogo Y., 2008. Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuse et latéritique du Burkina Faso améliorées aux liants hydrauliques : application au génie civil (bâtiment et route) Th. Doct. Ph/D, Fac. Sci. Univ. Ouagadougou, 142 p.
- Millogo Y., Karfa T., Raguilnaba O., Kalsibiri K., Blanchart P., Thomassin J. H., 2008. Geotechnical, mechanical, chemical and mineralogical characterization of a lateritic gravels of Sapouy (Burkina Faso) used in road construction. *Construction and Building Materials* 22(2), 70–76.
- Munsell Color, 2000. Charts. Macbeth Division of Kollmorge Corporation, 2441 North Calvert Street Baltimore, Maryland 21218.
- Nagaraj H. B., Suresh M. R., 2018. Influence of clay mineralogy on the relationship of CBR of fine-grained soils with their index and engineering properties. *Transportation Geotechnics* 15, 29–38.
- NCHRP., 2004. Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehailed pavement structures, NCHRP 1-37A Final Report, Appendix CC-1: Correlation of CBR values with soil index properties.
- Ndjigui P.-D., 2008. Mobilization and redistribution of major and trace elements in two weathering profiles developed on serpentinites in the Lomié ultramafic complex, South-East Cameroon, *Journal of African Earth sciences* 50, 305–328.
- Ndome E. P. E., Onana V. L., Likiby Boubakar, Kamgang k. B. V., Ekodeck G. E., 2014. Relationship between major and trace elements during weathering processes in a sedimentary context : Implication for the nature of source rocks in douala, Littoral Cameroon. *Chemie Geochemistry der Erde* 74, 765–781.

- Ndzié Mvindi A. T., 2019. Caractérisation minéralogique, géochimique et géotechnique des graveleux latéritiques de la zone Obala-Mbandjock (Centre Cameroun). Th. Doct. Ph/D, Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 225 p.
- Ndzié Mvindi A. T., Onana V. L., Ngo'o Ze A.; Nyassa Ohandja H., Ekodeck G. E., 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.
- Nesbitt H. W., Young G. M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299, 715–717.
- Nesbitt, H.W., Markovics, G., 1997. Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments. *Geochemica et Cosmochimica Acta* 61, 1653–1670.
- Ngo'o Ze A., 2019. Caractérisation minéralogique, géochimique, géotechnique et stabilisation à la chaux des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga (Sud-Cameroun). Th. Doct. Ph/D, Fac. Sci. Univ. Yaounde, 153 p.
- Ngo'o Ze A., Onana V.L., Ndzié Mvindi A. T., Nyassa Ohandja H., Medjo Eko R., Ekodeck G. E., 2019. Variability of geotechnical parameters of lateritic gravels overlying contrasted metamorphic rocks in a tropical humid area (Cameroon): implications for road construction. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01488-0>.
- Nkoumbou, C., 1990. Etude géologique des monts Roumpi : un ensemble plutonique et volcanique de la « ligne du Cameroun ». Données pétrologiques sur les néphélines du mont Etindé (Cameroun). Th. Doct. Ph/D, Fac. Sci. Univ. Nancy I, 352 p.
- Nkoumou A. J-F., Mouhamadou B. D., Fary D., Parisot J. C., Ndiane D., 2004. Etude corrélative entre propriétés géochimiques et caractéristiques géomécaniques des latérites. *Journal des Sciences et Technologies* 3 (1 et 2).
- Nwaiwu C. M. O., Alkali I. B. K., Ahmed U. A., 2006. Properties of ironstone lateritic gravels in relation to gravel road pavement construction. *Geotechnical and Geological Engineering* 24(2), 283–284.
- Nyassa Ohandja H., Ntoulala R. F. D., Onana V. L., Ngo'o Ze A., Ndzie Mvindi A. T., Ekodeck G. E., 2020. Mineralogy, geochemistry and physic-mechanical characterization of clay mixture from Sa'a (Center Cameroon): possibly use as construction materials. *SN applied Sciences Journal*. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03365-y>.
- Nyeck B., Ngimbous., Ndjigui P-D., 2019. Petrology of the saprolite developed on gneisses in the Matomb region South Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 150, 107–122.
- Nzabakurikiza A., 2018. Caractérisation minéralogique, géochimique et géotechnique des granulats et des sols latéritiques nodulaires de l'Est et du Sud camerounais dans l'optique des travaux routiers. Th. Doct. Ph/D, Fac. Sci. Univ. Yaoundé, 192 p.

- Nzabakurikiza A., Onana V. L., Likiby B., Ndome Effoudou P., Kamgang Kabeyene B. V., Ekodeck G. E., 2012. Chemical and mineralogical methods in the identification of laterite gravels over migmatites for engineering purposes. *Journal of the Cameroon Academy of sciences* 13(2), 28–33.
- Nzabakurikiza A., Onana V.L., Ngo'o Ze A., Ndzié Mvindi A. T., Ekodeck G. E., 2017. Geological, geotechnical. and mechanical characterization of lateritic gravels from Eastern Cameroon for road construction purposes. *Bulletin of Engineering Geology and Environment* 76 (4), 1549–1562.
- Nzeukou Nzeugang A., 2015. Minéralogie, géochimie et propriétés céramiques des argiles alluviales de la Sanaga entre Nanga-Eboko et Ebebda (région du Centre-Cameroun). Th. Doct. Ph/D, Fac. Sci. Univ. Yaoundé, 188 p.
- Ogunsanwo O., 1989. Some geotechnical properties of two laterite soils compacted at different energies. *Engineering Geology* 26(3), 261–269.
- Okeke O. C., Duruojinaka I. B., Echetama H. N., Paschal C. C., Ezekiel C. J., Okoroafor E. J., Akpunonu E. O., 2016. Geotechnical and geochemical characterization of lateritic soil deposits in parts of Owerri, Southeastern Nigeria, for road construction. *International Journal Advanced Academic Research Science, Technology and Engineering* 2(7), 2488–9849.
- Ola S. A., 1980. Mechanical properties of concretionary laterites from rain forest and savannah zones of Nigeria. *Bulletin of International Association of Engineering Geology* 21(1), 21–26.
- Olivry J. C., 1986. Fleuves et rivières du Cameroun. MESRES-ORSTOM 9^e Ed., Paris, 733 p.
- Onana V. L., 2010. L'altération supergène des chloritoschistes de la série de Mbalmayo Bengbis (Sud – Cameroun) et ses implications géotechniques. Th. Doct. Ph/D, Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 246 p.
- Onana V. L., Ndome Effoudou P. E., Kamgang Kabeyene B. V., et Ekodeck G. E., 2007. Corrélations entre les paramètres altérologiques normatifs et caractéristiques physico-mécaniques des roches et des produits d'altération de la série de Mbalmayo-Bengbis (Sud Cameroun). Proceedings du 14^{ème} Congrès Régional Africain de Mécanique des Sols et de la Géotechnique (CRA MSG)-Yaoundé (Cameroun) 26–28 novembre, 155-164 p.
- Onana V. L., Ngo'o Ze A., Medjo Eko R., Ntouala R. F. D., Nanga Bineli M. T., Ngono Owoudou B., Ekodeck G. E., 2017. Geological identification, geotechnical and mechanical characterization of charnockite-derived lateritic gravels from Southern Cameroon for road construction purposes. *Transportation Geotechnics* 10, 35–46
- Onana V. L., Ntouala R. F. D., Noa Tang S., Ndome E. E., Kamgang Kabeyene B. V., Ekodeck G.E., 2016. Major, trace and REE geochemistry in contrasted chlorite schist weathering profiles from southern Cameroon: Influence of the Nyong and Dja Rivers water table fluctuations in geochemical evolution processes. *Journal of African Earth Sciences* 124, 371–382.

- Onana V. L., Nzabakurikiza A., Ndome E. E., Likiby B., Kamgang K. B. V., Ekodeck G. E., 2015. Geotechnical, mechanical and geological characterization of lateritic gravels of Boumpial (Cameroon) used in road construction. *Journal of the Cameroon Academy of Sciences* 12(1), 45–54.
- Orense R. P., Zapanta A. J. R., Akinori H., Towhata I., 2006. Geotechnical characteristics of volcanic soils taken from recent eruptions. *Geotechnics and Geological Engineering* 24, 129 – 161. DOI 10.1007/s10706-004-2499-y.
- Owoyemi O. O., Adeyemi G. O., 2017. Variability in the highway geotechnical properties of two residual lateritic soils from Central Nigeria. *Journal of Geology & Geophysics*. <http://dx.doi.org/10.4172/2381-8719.1000290>.
- Patel R. S., Desai M. D., 2010. CBR predicted by index properties for alluvial soils of South Gujarat. In: Proceeding of the Indian geotechnical conference. Mumbai, 79–82.
- Robitaille V., Tremblay D., 1997. *Mécanique des sols (théorie et pratique)*. Modulo Ed. Quebec – Canada, 65 p.
- Sababa, E., 2015. *Pétrologie et métallogénie (Au-EGP) des enclaves de granites et des péridotites dans les régions de Nyos et Kumba (Ligne Volcanique du Cameroun)*. Th. Doct. Ph/D, Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 201 p.
- Satyanarayana R. C. N. V., Pavani K., 2006. Mechanically stabilized soils-regression equation for CBR evaluation. In: Proceeding of the Indian geotechnical conference, Chennai India, 731–734.
- Sikali F., Djalal M. E., 1987. Utilisation des latérites en technique routière au Cameroun. In *Séminaire Régional sur les latérites: Sols, Matériaux, Minerais*. Douala (Cameroun), ORSTOM Ed., 277–288 p.
- Sunil, B. M., Krishnappa, H., 2012. Effect of drying on the index properties of lateritic soils. *Geotechnical and Geological Engineering* 30, 869–879.
- Tagne-Kamga, G., 2003. Petrogenesis of the Neoproterozoic Ngondo plutonic complex (Cameroon, west central Africa): a case of late-collisional ferro-potassic magmatism. *Journal of African Earth Sciences* 36, 149–171.
- Tamen, J., Nkoumbou, C., Mouafo, L., Reusser, E., Tchoua, F.M., 2007. Petrology and geochemistry of monogenetic volcanoes of the Barombi Koto volcanic field (Kumba graben, Cameroun volcanic line): Implication for mantle source characteristics. *Comptes Rendus. Geoscience* 339, 799–809.
- Taskiran T., 2010. Prediction of California bearing ratio (CBR) of fine grained soils by AI methods. *Advances in Engineering Software* 41(6), 886–892.
- Teitchou, M.I., Gregoire, M., Dantas, C., Tchoua, F.M., 2007. Le manteau supérieur à l’aplomb de la plaine de Kumba (ligne du Cameroun), d’après les enclaves de péridotites à spinelles dans les laves basaltiques. *Comptes Rendus Geoscience* 339, 101-109.

- Tematio P., Tchaptchet W. T., Nguetnkam J. P., Mbog M. B., Yongue Fouateu R., 2017. Mineralogical and geochemical characterization of weathering profiles developed on mylonites in the Fodjomekwet-Fotouni section of the Cameroon Shear Zone (CSZ), West Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*. 32 – 42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.04.003>.
- Tockol I., 1993. Contribution à l'étude des graveleux latéritiques dans les pays du Sahel : cas des routes non revêtues. Th. Doct. Ph/D, Fac. Sci. Univ. Moncton, 171 p.
- Toll, D. C., 2015. California Bearing Ratio tests on a lateritic gravel from Kenya. *Transp Geotech*. 15:29–38. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.09.004>.
- Traoré D., Beauvais A., Augé T., Chabaux F., Parisot J-C., Cathelineau M., Peiffert C., Colin F., 2006. Platinum and Palladium mobility in supergene environment.
- Vallerie M., 1995. Atlas régional du Sud Cameroun. ORSTOM Ed., Volume Pédologie, 6-7 pp.
- Veysseyre R., 2014. Statistique et probabilités pour l'ingénieur. Aide-mémoire. DUNOD Ed., Paris, 390 p.
- Vinod, P., Reena, C., 2008. Prediction of CBR value of lateritic soils using liquid limit and gradation characteristics data. *Highway Research Journal* 1(1), 89–98.
- Whitney D. L., Evans B. D., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, 185–187.
- Wouatong A. S. L, Hyoumbi T. W., Ngapgue F., Yato K. V., Kamgang Kamgang B. V., 2014. Mineralogical and Geotechnical Characteristics of the Loose Weathered Trachytes of Fongo-Tongo (West-Cameroon). *International Journal Apply Science Technology* 4(7), 85-96.
- 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.
- Yadav D., Vishal P. K., 2014. Prediction of soaked CBR of fine grained soils. *International Journal of advanced Eng Research and Studies*. 119–121.
- Yato K. V., Mfoyet Moupe S., Manefouet B., Wouatong A. S. L., Aleh Bezeng L., 2018. Correlation of California bearing ratio (CBR) value with soil properties of road subgrade Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, <https://doi.org/10.1007/S10706-018-0604-X>.
- Yildirim, B., Gunaydin, O., 2011. Estimation of California bearing ratio by using soft computing systems. *Expert Systeme Applied* 38(5), 6381–6391.

ANNEXES

ANNEXE I. DONNEES GEOTECHNIQUES DES LATERITES

Tableau I. Localisation, désignation et description des latérites dans la zone d'étude

N°	Substratum	X	Y	Désignation	Tronçon routier	Description
				(Pk)		
1	Roches volcaniques	552016,00	507154,00	Pk0	Kumba-Mamfé	Grave latéritique argileuse rougeâtre
2		552222,98	507640,18	Pk1		
3		552424,15	508361,04	Pk2		
4		553077,94	509098,65	Pk3		
5		552524,73	510003,91	Pk4		
6		553446,75	510909,17	Pk5		
7		552943,83	512049,12	Pk6		Grave latéritique argileuse brunâtre
8		552357,09	513775,82	Pk7		
9		553596,00	514217,00	Pk8		
10		553359,67	514362,48	Pk9		Grave latéritique argileuse brunâtre
11		553416,82	514749,83	Pk10		
12		554128,02	514972,08	Pk11		Grave latéritique argileuse rougeâtre
13		553735,00	515176,00	Pk12		Argile latéritique brunâtre
14		554504,00	517951,00	Pk13		Grave latéritique argileuse rougeâtre
15		553890,96	519105,67	Pk14		
16		553509,96	521074,18	Pk15		Argile latéritique rougeâtre
17		555203,29	523910,52	Pk16		
18		553213,62	525603,85	Pk17		
19		554822,29	526683,36	Pk18		Argile latéritique rougeâtre
20		553397,00	529953,00	Pk20		
21		550927,62	543929,99	Pk25		
22		554028,00	547421,00	Pk26		
23		558230,13	611068,15	Pk33		Grave latéritique argileuse rougeâtre
24		553785,12	621281,08	Pk35		
25		544279,29	507585,43	Pk38	Mundemba - Mbongue	Grave latéritique argileuse brunâtre
26		542063,40	507601,97	Pk39		
27		540310,53	507353,92	Pk40		
28		538640,34	507039,72	Pk41		
29		537367,03	505849,10	Pk42		
30		533613,25	504526,18	Pk44		
31		527833,42	500984,06	Pk45		Argile latéritique jaunâtre
32		523864,66	501017,13	Pk46		
33		521284,96	501943,18	Pk47		
34		519002,93	502770,00	Pk48		
35		509180,25	505343,08	Pk50		Grave latéritique jaunâtre
36		506468,27	506666,00	Pk51		
37		503194,04	508253,50	Pk52		
38		501606,54	510204,81	Pk53		
39		490623,00	525569,00	Pk70		
40		489983,54	525336,36	Pk71		
41		489770,00	525766,00	Pk72		

42		490603,10	526667,62	Pk73		
43		556616,78	518362,33	Pk93	Kumba-Loum	Grave latéritique argileuse brunâtre
44		559952,00	521038,00	Pk95		
45		567689,61	522688,28	Pk96		
46		571102,74	521577,02	Pk97		
47		576468,00	522241,00	Pk98		
48		539268,69	508160,31	Pk99		
49		537312,09	508130,55	Pk100		
50		537444,38	506939,92	Pk101		
51		536015,63	507416,17	Pk102		
52		536095,01	505960,96	Pk103		
53		534745,63	506119,71	Pk104		
54		534560,42	505087,83	Pk105		
55		533581,46	506119,71	Pk106		
56		532761,25	505722,84	Pk107		
57		532814,17	504479,29	Pk108		
58		532152,71	503897,21	Pk109		
59		529718,54	502759,50	Pk110		
60		526252,49	501674,70	Pk111		
61		522865,81	502230,33	Pk112		
62		518314,97	504585,12	Pk113		
63		510112,87	507998,26	Pk115		
64		505376,82	509956,18	Pk116		
65		503921,61	511940,56	Pk118		
66		490798,25	523185,37	Pk132		
67		490798,25	524243,71	Pk133		
68		490401,37	524852,25	Pk134		
69		489502,70	526517,62	Pk135		
70		490812,39	526861,58	Pk140		
71		503333,82	509289,91	Pk177		
72		504292,94	510348,24	Pk179		
73		553856,12	514645,98	Pk186		
74		545050,21	563287,50	Pk187		
75		541860,83	575511,28	Pk188		
76		563054,00	524615,93	Pk189		
77	Roches sédimentaires	516092,51	502968,44	Pk49	Kumba-Mamfé	Argile latéritique rougeâtre
78		502070,00	512350,00	Pk54		
79		500196,00	512350,00	Pk55		
80		499010,31	513809,76	Pk56		
81		498315,78	514669,66	Pk57		
82		498944,16	516422,53	Pk58		
83		498348,85	516951,70	Pk59	Mundemba-Kumba	Grave latéritique brunâtre
84		497654,32	517547,01	Pk60		
85		496893,64	518439,98	Pk61		
86		495339,21	520192,85	Pk63		

87		492131,13	524260,83	Pk68	
88		491568,89	525286,09	Pk69	
89		489809,35	527858,24	Pk74	Grave latéritique argileuse jaunâtre
90		490735,40	528890,12	Pk75	
91		490312,06	529974,91	Pk76	
92		488962,68	530689,29	Pk77	
93		489597,68	531747,63	Pk78	
94		488590,00	532160,00	Pk79	Grave latéritique brunâtre
95		490338,52	534049,51	Pk81	
96		489438,93	536007,43	Pk84	
97		489333,10	536589,51	Pk85	
98		488592,27	537092,22	Pk86	
99		487613,31	537303,89	Pk87	Grave latéritique argileuse jaunâtre
100		487772,06	538071,18	Pk88	
101		488936,22	538388,68	Pk89	
102		488298,00	538779,00	Pk90	
103		513975,80	503632,62	Pk114	
104		505376,82	509956,18	Pk117	Grave latéritique argileuse rougeâtre
105		501566,81	513660,35	Pk119	
106		497386,39	516015,15	Pk120	
107		496513,26	516808,90	Pk121	
108		495534,30	517920,15	Pk122	
109		494396,59	519110,78	Pk123	Grave latéritique rougeâtre
110		493020,75	520222,03	Pk124	
111		595428,47	519243,07	Pk125	
112		494819,92	520433,70	Pk126	
113		493417,63	521148,07	Pk127	
114		492094,71	523502,87	Pk129	Argile latéritique jaunâtre
115		492544,50	521439,12	Pk130	
116		489820,20	527258,46	Pk136	
117		489978,95	528396,17	Pk137	
118		490018,64	529070,86	Pk138	
119		489264,57	529705,86	Pk139	Grave latéritique jaunâtre
120		490680,10	527933,15	Pk141	
121		490706,56	528594,61	Pk142	
122		490680,10	529507,42	Pk143	
123		489767,28	530314,40	Pk144	
124		489767,28	530314,40	Pk145	Grave latéritique argileuse brunâtre
125		489185,20	531240,45	Pk146	
126		489436,55	531994,51	Pk147	
127		488708,95	531624,09	Pk148	
128		488576,66	532510,45	Pk149	
129		488986,76	532894,10	Pk150	Grave latéritique jaunâtre
130		488484,05	536280,77	Pk155	
131		487954,88	536651,19	Pk156	

132		487743,22	537643,38	Pk157		Argile latéritique jaunâtre
133		490084,78	534587,43	Pk158		
134		489939,26	535275,35	Pk159		
135		489767,28	535778,06	Pk160		
136		488880,93	536862,85	Pk161		
137		488708,95	537735,98	Pk162		Grave latéritique jaunâtre
138		487994,57	538556,19	Pk163		
139		501498,27	511257,75	Pk178		
140		500671,45	514482,37	Pk180		
141		499778,47	515524,16	Pk181		
142		502903,87	512861,79	Pk182		Argile latéritique rougeâtre
143		499464,28	513225,59	Pk183		
144		500621,84	513523,25	Pk184		
145		497959,46	515408,41	Pk185		
146	Roches granito-gneissiques	554610,62	528694,19	Pk19		
147		554319,00	529953,00	Pk21		
148		550491,05	532182,47	Pk22		
149		549459,18	536270,29	Pk23		
150		549697,30	540596,23	Pk24		
151		548123,03	554717,08	Pk27	Grave latéritique argilo-sableuse jaunâtre	
152		543307,60	569427,94	Pk28		
153		543201,77	581641,13	Pk29		
154		545583,02	592684,86	Pk30		
155		550451,37	599987,37	Pk31		
156		553044,29	603818,55	Pk32	Mundemba-Ekondo titi-Mbonge-Loum	Argile latéritique jaunâtre
157		549710,53	625779,01	Pk36		
158		488666,00	539859,00	Pk91		
159		556021,46	515822,32	Pk92		
160		558204,28	520307,02	Pk94		
161		488880,93	538754,63	Pk164		Grave latéritique rougeâtre
162		488073,95	539323,48	Pk165		
163		488933,84	539297,02	Pk166		
164		488351,76	539773,28	Pk167		
165		489119,05	540064,32	Pk168		
166	489343,95	540368,59	Pk169	Grave latéritique jaunâtre		
167	489648,22	540633,17	Pk170			
168	489952,49	540977,13	Pk171			
169	490296,45	541228,49	Pk172			
170	490627,18	541665,05	Pk173			
171	488603,11	540474,42	Pk174			
172	488894,16	540897,76	Pk175			
173	489264,57	541175,57	Pk176			

Tableau II. Base de données élargie des caractéristiques géotechniques des latérites

N°	Roche	Code	Ys	Granulométrie						Limites d'Atterberg			Paramètres dérivés					Compactage		CBR
				Gravier	Sable	Fines	Argile	Squelette	Mortier	LL	LP	IP	Gm	Pm	Pp	Ac	Gs	DSM	TEO	
1		Pk3	2,77	31,0	50,0	19,0	7,0	49,0	27,0	63	38	25	2,05	675,00	475,00	3,57	0,01	14,60	18,48	34
2		Pk4	2,76	31,0	44,0	25,0	8,0	49,0	35,0	61	38	23	1,91	805,00	575,00	2,88	0,01	14,00	18,8	33
3		Pk5	2,74	43,0	26,0	31,0	16,5	44,0	35,2	59	35	24	1,90	844,80	744,00	1,45	0,01	14,3	18,8	39
4		Pk6	2,63	50,0	22,0	28,0	13,4	41,0	32,3	68	37	31	1,99	1001,30	868,00	2,31	0,02	15,5	18,36	34
5		Pk7	2,73	38,0	32,0	30,0	12,7	52,0	38,5	67	34	33	1,80	1270,50	990,00	2,60	0,03	14,4	18,27	30
6		Pk8	2,76	38,0	29,0	33,0	15,0	52,0	43,0	67	30	37	1,72	1591,00	1221,00	2,47	0,03	14,4	19,19	34
7		Pk9	2,68	56,6	21,0	22,4	9,6	30,7	24,8	74,5	39	36	2,22	892,80	806,40	3,75	0,03	16,4	19,00	28
8		Pk10	2,76	33,2	33,9	32,9	17,1	52,8	40,6	72,5	36	37	1,74	1502,20	1217,30	2,16	0,03	14,7	19,00	38
9		Pk11	2,82	22,9	51,4	25,7	9,9	67,5	40,4	52,3	31	21,8	1,66	880,72	560,26	2,20	0,01	17,4	19,3	35
10		Pk12	2,63	37,3	29,3	33,4	24,5	52,8	43,7	67	30	37	1,70	1616,90	1235,80	1,51	0,03	14,40	19,19	34
11		Pk13	2,69	20,5	59,1	20,4	9,5	38,6	25,7	57	35	22	2,15	565,40	448,80	2,32	0,01	12,60	20,42	40
12		Pk14	2,73	47,2	29,7	23,1	10,7	37,1	29,3	75	37	38	2,11	1113,40	877,80	3,55	0,03	19,7	17,58	53
13		Pk15	2,61	61,5	18,2	20,3	12,3	27,0	22,9	78	41	37,5	2,30	858,75	761,25	3,05	0,03	23,8	16,96	27
14		Pk16	2,78	35,0	37,0	28,0	14,0	41,0	30,0	60	39	21	2,01	630,00	588,00	1,50	0,01	16,5	18,08	34
15		Pk17	2,69	30,0	40,0	30,0	13,0	56,0	36,0	59	36	23	1,78	828,00	690,00	1,77	0,01	14,8	18,00	31
16		Pk18	2,73	33,0	35,0	32,0	16,0	50,0	38,0	65	39	26	1,80	988,00	832,00	1,63	0,01	15,4	18,2	33
17		Pk20	2,63	49,7	44,4	5,9	1,9	18,0	9,6	39	25	14	2,67	134,40	82,60	7,37	0,00	22,20	16,22	40
18		Pk25	2,77	38,0	31,0	31,0	10,8	55,0	38,5	78	40	38	1,76	1463,00	1178,00	3,52	0,03	16,00	18,2	38
19		Pk33	2,78	18,8	54,2	27,0	13,0	47,9	32,1	49	20	29	1,93	930,90	783,00	2,23	0,02	12,7	20,00	58
20		Pk43	2,80	36,0	36,3	27,7	15,8	35,8	29,3	51,4	28	23,9	2,07	700,27	662,03	1,51	0,01	11,00	20,11	36
21	LRV	Pk44	2,70	32,3	38,3	29,4	14,9	37,2	32,4	55,2	30	25,2	2,01	816,48	740,88	1,69	0,01	12,8	19,98	34
22		Pk45	2,73	40,8	32,5	26,7	12,8	35,0	28,2	51,6	28	23,6	2,10	665,52	630,12	1,84	0,01	11,7	20,02	39
23		Pk46	2,69	38,0	33,6	28,4	12,7	37,3	31,6	53,5	29	24,3	2,03	767,88	690,12	1,91	0,01	12,5	19,90	38
24		Pk47	2,73	39,3	35,2	25,5	11,6	36,0	28,4	50,7	28	23	2,10	653,20	586,50	1,98	0,01	11,00	20,10	39
25		Pk48	2,65	36,0	33,1	30,9	17,9	39,0	33,1	55	30	25	1,97	827,50	772,50	1,40	0,01	13,00	19,87	37
26		Pk50	2,75	42,8	30,8	26,4	16,4	36,8	29,1	53,6	30	23,6	2,08	686,76	623,04	1,44	0,01	13,00	20,07	38
27		Pk51	2,76	47,1	26,3	26,6	15,6	34,5	28,9	53	30	23	2,10	664,70	611,80	1,47	0,01	13,2	20,1	39
28		Pk52	2,69	43,1	29,9	27,0	17,1	35,9	29,7	54	31	23,8	2,07	706,86	642,60	1,39	0,01	13,6	20,00	38
29		Pk53	2,83	45,6	29,4	25,0	12,5	34,0	28,4	50,5	28	22,5	2,13	639,00	562,50	1,80	0,01	12,5	20,13	40
30		Pk70	2,72	62,6	25,9	11,5	4,5	19,2	15,0	61	44	17	2,54	255,00	195,50	3,78	0,01	20,40	17,35	47
31		Pk71	2,74	35,5	37,8	26,7	16,7	35,9	28,9	54,7	31	24,2	2,09	699,38	646,14	1,45	0,01	13,00	19,75	39
32		Pk72	2,62	34,9	37,9	27,2	17,9	43,9	32,7	58	40	18	1,96	588,60	489,60	1,01	0,01	16,80	18,01	23
33		Pk73	2,75	20,8	52,2	27,0	17,0	37,0	31,0	50,2	27	23,2	2,05	719,20	626,40	1,36	0,01	11,2	20,15	38
34		Pk93	2,68	50,1	22,4	27,5	16,0	41,1	34,3	61	32	29	1,97	994,70	797,50	1,81	0,02	15,4	18,89	36
35		Pk104	2,73	29,0	37,0	34,0	22,0	48,0	39,0	74	41	33	1,79	1287,00	1122,00	1,50	0,03	13,89	19,17	39,41
36		Pk105	2,76	30,0	42,0	28,0	17,0	48,0	41,0	82	42	40	1,83	1640,00	1120,00	2,35	0,04	18,00	17,90	30
37		Pk106	2,77	41,0	27,0	32,0	21,0	49,0	42,0	76	41	35	1,77	1470,00	1120,00	1,67	0,03	21,00	17,50	27
38		Pk107	2,77	28,0	47,0	25,0	13,0	50,0	35,0	78	40	38	1,90	1330,00	950,00	2,92	0,03	13,89	19,17	39,41
39		Pk108	2,73	46,0	33,0	21,0	11,0	44,0	32,0	90	50	40	2,03	1280,00	840,00	3,64	0,04	25,00	18,80	34
40		Pk109	2,73	30,0	35,0	35,0	22,0	51,0	41,0	90	51	39	1,73	1599,00	1365,00	1,77	0,04	14,00	19,30	56
41		Pk110	2,26	35,0	32,0	33,0	20,0	48,0	37,0	83	48	35	1,82	1295,00	1155,00	1,75	0,03	13,89	19,17	39,41

42		Pk111	2,74	33,0	35,0	32,0	19,0	50,0	40,0	95	49	46	1,78	1840,00	1472,00	2,42	0,05	18,00	18,00	44
43		Pk112	2,78	20,0	45,0	35,0	21,0	75,0	46,0	90	49	41	1,44	1886,00	1435,00	1,95	0,04	13,89	19,17	39,41
44		Pk113	2,76	30,0	37,0	33,0	22,0	50,0	40,0	81	42	39	1,77	1560,00	1287,00	1,77	0,04	15,00	18,10	34
45		Pk115	2,74	41,0	36,0	23,0	11,0	46,0	36,0	56	40	16	1,95	576,00	368,00	1,45	0,00	13,89	19,17	39,41
46		Pk116	2,76	47,0	25,0	28,0	21,0	42,0	32,0	81	39	42	1,98	1344,00	1176,00	2,00	0,04	15,00	19,20	46
47		Pk118	2,73	37,0	38,0	25,0	15,0	50,0	39,0	83	43	40	1,86	1560,00	1000,00	2,67	0,04	9,00	20,60	36
48		Pk132	2,77	38,0	49,0	13,0	7,0	48,0	32,0	66	36	30	2,07	960,00	390,00	4,29	0,02	9,00	21,10	44
49		Pk133	2,75	36,0	40,0	24,0	14,0	49,0	36,0	61	33	28	1,91	1008,00	672,00	2,00	0,02	13,89	19,17	39,41
50		Pk134	2,72	32,0	40,0	28,0	17,0	48,0	35,0	79	46	33	1,89	1155,00	924,00	1,94	0,03	17,00	18,00	44
51		Pk135	2,76	30,0	45,0	25,0	15,0	47,0	33,0	76	47	29	1,95	957,00	725,00	1,93	0,02	17,00	18,20	48
52		Pk140	2,74	30,0	41,0	29,0	20,0	39,0	33,0	65	42	23	1,99	759,00	667,00	1,15	0,01	18,00	17,50	44
53		Pk177	2,70	39,4	36,2	24,4	14,5	35,0	26,9	52,5	29	23,5	2,14	632,15	573,40	1,62	0,01	11,5	19,9	37
54		Pk179	2,61	36,8	32,7	30,5	21,0	34,0	31,0	50	28	22,5	2,05	697,50	686,25	1,07	0,01	11,5	19,61	31
55		Pk186	2,71	15,3	51,4	33,3	15,0	72,3	42,4	54,6	31	23,8	1,52	1009,12	792,54	1,59	0,01	15,5	18,7	34
56		Pk187	2,80	31,8	38,4	29,8	19,9	38,0	32,0	54	30	24	2,00	768,00	715,20	1,21	0,01	11,7	20,1	39
57		Pk188	2,75	32,5	36,8	30,7	20,8	37,9	31,3	52,6	29	23,4	2,00	732,42	718,38	1,13	0,01	11,5	20,12	39
58		Pk0	2,73	66,6	24,4	9,0	2,5	14,0	16,0	71	47	24	2,61	384,00	216,00	9,60	0,01	23,20	16,93	49
59		Pk1	2,72	38,0	39,0	23,0	9,0	41,0	30,0	63	39	24	2,06	720,00	552,00	2,67	0,01	16,8	18,00	32
60		Pk2	2,70	35,0	43,0	22,0	8,0	41,0	28,0	56	36	20	2,09	560,00	440,00	2,50	0,01	16,00	18,23	31
61		Pk26	2,72	38,5	36,0	25,5	16,5	44,4	34,5	50	33	17	1,96	586,50	433,50	1,03	0,01	11,70	20,05	38
62		Pk38	2,74	42,8	29,7	27,5	14,0	35,0	29,0	52,5	29	23,5	2,09	681,50	646,25	1,68	0,01	10,8	18,4	33
63		Pk39	2,67	39,0	32,0	29,0	17,0	36,2	31,0	56,2	32	24,2	2,04	750,20	701,80	1,42	0,01	10,3	18,25	31
64		Pk40	2,75	33,1	37,9	29,0	15,6	36,7	31,5	54,1	30	24,6	2,03	774,90	713,40	1,58	0,01	12,5	20,00	35
65		Pk41	2,76	34,0	37,5	28,5	14,4	36,3	30,9	53,5	29	24,5	2,04	757,05	698,25	1,70	0,01	12,2	20,01	35
66		Pk42	2,70	32,0	38,0	30,0	16,7	37,7	32,8	55,3	30	24,9	2,00	816,72	747,00	1,49	0,01	13,00	19,92	34
67		Pk95	2,57	69,4	23,1	7,5	2,6	20,5	13,7	53	42	11	2,58	150,70	82,50	4,23	0,00	21,50	15,72	36
68		Pk96	2,68	43,7	20,7	35,6	23,5	46,7	39,6	82	55	27	1,78	1069,20	961,20	1,15	0,02	15,7	18,68	36
69		Pk97	2,64	43,3	26,1	30,6	20,6	48,9	36,7	67	34	33	1,84	1211,10	1009,80	1,60	0,03	18,00	18,2	32
70		Pk98	2,74	47,2	29,7	23,1	11,4	37,1	29,3	75	37	38	2,11	1113,40	877,80	3,33	0,03	19,70	17,58	53
71		Pk99	2,75	20,0	45,0	35,0	22,0	75,0	52,0	80	38	42	1,38	2184,00	1470,00	1,91	0,04	20,00	17,20	34
72		Pk100	2,73	22,0	46,0	32,0	19,0	61,0	54,0	91	47	44	1,53	2376,00	1408,00	2,32	0,05	13,89	19,17	39,41
73		Pk101	2,76	30,0	36,0	34,0	24,0	48,0	44,0	82	39	43	1,74	1892,00	1462,00	1,79	0,05	21,00	17,20	27
74		Pk102	2,76	36,0	30,0	34,0	21,0	54,0	40,0	90	49	41	1,72	1640,00	1394,00	1,95	0,04	13,89	19,17	39,41
75		Pk189	2,68	56,6	21,0	22,4	11,2	30,7	24,8	75	39	36	2,22	892,80	806,40	3,21	0,03	16,40	19,00	28
76		Pk103	2,75	29,0	47,0	24,0	14,0	53,0	42,0	83	42	41	1,81	1722,00	984,00	2,93	0,04	20,00	17,60	49
77		Pk34	2,56	19,7	60,3	20,0	7,0	50,2	30,6	66	37	29	1,99	887,40	580,00	4,14	0,02	14,00	20,01	18
78		Pk35	2,87	29,4	44,6	26,0	11,0	44,7	32,2	83	54	29	1,97	933,80	754,00	2,64	0,02	10,7	20,61	65
79	LRS	Pk49	2,74	37,1	35,4	27,5	11,3	37,5	30,6	52,9	29	24,3	2,04	743,58	668,25	2,15	0,01	11,8	19,98	38
80		Pk54	2,64	41,1	36,7	22,2	12,4	32,2	25,3	46	31	15	2,20	379,50	333,00	1,21	0,00	12,70	14,58	33
81		Pk55	2,68	48,6	19,1	32,3	20,6	40,3	35,1	61	30	31	1,92	1088,10	1001,30	1,50	0,02	15,10	19,50	32
82		Pk56	2,68	36,0	34,2	29,8	16,9	37,7	33,1	52,8	28	24,8	1,99	820,88	739,04	1,47	0,01	11,6	20,03	36
83		Pk57	2,69	37,2	33,3	29,5	17,3	37,2	32,3	51,9	28	24,2	2,01	781,66	713,90	1,40	0,01	11,4	20,00	37
84		Pk58	2,58	34,7	34,6	30,7	18,6	38,0	33,1	53,3	29	24,8	1,98	820,88	761,36	1,33	0,01	11,9	19,9	36
85		Pk59	2,78	38,5	33,1	28,4	16,9	36,5	30,3	50,3	27	23,5	2,05	712,05	667,40	1,39	0,01	10,9	20,07	38
86		Pk60	2,69	37,9	33,2	28,9	17,4	37,0	31,0	51,2	27	23,8	2,03	737,80	687,82	1,37	0,01	11,00	20,05	38

87	Pk61	2,77	43,7	29,3	27,0	15,0	36,2	30,8	52	28	24	2,06	739,20	648,00	1,60	0,01	12,2	18,72	38
88	Pk63	2,65	41,2	30,8	28,0	18,6	37,0	31,1	52,9	29	24,4	2,04	758,84	683,20	1,31	0,01	12,7	18,70	37
89	Pk68	2,68	33,3	38,7	28,0	19,6	37,1	31,0	50,5	28	23	2,04	713,00	644,00	1,17	0,01	13,00	19,8	39
90	Pk69	2,64	31,6	40,5	27,9	15,0	37,0	30,9	51,7	28	23,5	2,04	726,15	655,65	1,57	0,01	12,00	19,84	36
91	Pk114	2,72	35,0	43,0	22,0	12,0	52,0	40,0	73	45	28	1,86	1120,00	616,00	2,33	0,02	13,00	19,10	34
92	Pk117	2,72	32,0	38,0	30,0	22,0	51,0	41,0	75	39	36	1,78	1476,00	1080,00	1,64	0,03	13,89	19,17	39,41
93	Pk119	2,77	47,0	19,0	34,0	25,0	44,0	39,0	81	43	38	1,83	1482,00	1292,00	1,52	0,03	17,00	18,50	36
94	Pk120	2,74	49,0	29,0	22,0	13,0	38,0	31,0	79	44	35	2,09	1085,00	770,00	2,69	0,03	13,89	19,17	39,41
95	Pk121	2,78	39,0	26,0	35,0	26,0	42,0	39,0	73	46	27	1,84	1053,00	945,00	1,04	0,02	15,00	19,50	53
96	Pk122	2,77	36,0	34,0	30,0	18,0	49,0	38,0	79	43	36	1,83	1368,00	1080,00	2,00	0,03	13,89	19,17	39,41
97	Pk124	2,76	36,0	44,0	20,0	9,0	43,0	30,0	62	39	23	2,07	690,00	460,00	2,56	0,01	16,00	19,00	34
98	Pk125	2,75	41,0	31,0	28,0	21,0	33,0	29,0	71	38	33	2,10	957,00	924,00	1,57	0,03	13,89	19,17	39,41
99	Pk126	2,74	52,0	27,0	21,0	10,0	35,0	29,0	60	33	27	2,15	783,00	567,00	2,70	0,02	15,00	18,40	43
100	Pk127	2,74	36,0	43,0	21,0	12,0	41,0	32,0	59	34	25	2,06	800,00	525,00	2,08	0,01	13,89	19,17	39,41
101	Pk129	2,76	63,0	19,0	18,0	8,0	29,0	24,0	93	44	49	2,29	1176,00	882,00	6,13	0,06	13,89	19,17	39,41
102	Pk130	2,74	39,0	39,0	22,0	11,0	57,0	30,0	81	43	38	1,91	1140,00	836,00	3,45	0,03	13,00	19,70	36
103	Pk136	2,73	39,0	34,0	27,0	14,0	48,0	37,0	70	44	26	1,88	962,00	702,00	1,86	0,01	13,89	19,17	39,41
104	Pk178	2,76	40,3	31,7	28,0	20,5	37,1	31,6	48,8	26	23,3	2,03	736,28	652,40	1,14	0,01	12,2	20,00	38
105	Pk180	2,54	23,3	44,7	32,0	22,8	38,5	34,2	52	28	24	1,95	820,80	768,00	1,05	0,01	12,5	19,5	36
106	Pk181	2,67	28,6	41,7	29,7	18,8	37,8	31,6	54,3	30	24	2,01	758,40	712,80	1,28	0,01	11,5	19,00	36
107	Pk182	2,73	37,5	34,5	28,0	19,5	35,8	30,0	51,5	29	23	2,06	690,00	644,00	1,18	0,01	10,7	19,09	38
108	Pk183	2,76	33,0	37,8	29,2	23,0	36,9	32,0	53,8	30	23,7	2,02	758,40	692,04	1,03	0,01	10,3	19,02	37
109	Pk184	2,77	36,1	35,4	28,5	17,0	36,0	31,9	52,4	29	23,2	2,04	740,08	661,20	1,36	0,01	10,9	19,05	38
110	Pk185	2,64	30,4	40,1	29,5	21,6	37,4	32,0	54,5	31	24	2,01	768,00	708,00	1,11	0,01	11,5	19,00	37
111	Pk78	2,66	36,0	37,0	27,0	17,0	35,5	31,0	52,2	29	23,2	2,07	719,20	626,40	1,36	0,01	11,4	20,00	38
112	Pk79	2,62	28,6	42,8	28,6	18,7	54,0	38,5	49	35	14	1,79	539,00	400,40	0,75	0,00	16,10	18,24	42
113	Pk81	2,66	37,5	35,3	27,2	16,5	35,0	29,9	50,9	28	22,5	2,08	672,75	612,00	1,36	0,01	11,00	20,02	38
114	Pk84	2,76	34,5	36,5	29,0	20,0	36,3	32,0	55,6	31	24,6	2,03	787,20	713,40	1,23	0,01	11,00	19,92	38
115	Pk85	2,62	30,0	39,5	30,5	21,0	37,0	33,0	57	32	25,2	2,00	831,60	768,60	1,20	0,01	12,5	19,56	36
116	Pk86	2,64	32,0	38,0	30,0	22,4	36,8	32,7	56	32	24,5	2,01	801,15	735,00	1,09	0,01	12,00	19,7	37
117	Pk87	2,61	28,0	40,5	31,5	21,8	37,3	33,0	57,5	33	25	1,98	825,00	787,50	1,15	0,01	12,7	19,5	36
118	Pk88	2,77	35,1	37,9	27,0	18,8	34,8	29,8	50,5	29	22	2,08	655,60	594,00	1,17	0,01	10,8	20,19	42
119	Pk89	2,79	33,5	37,5	29,0	20,1	37,1	32,0	56,2	29	27,2	2,02	870,40	788,80	1,35	0,02	11,2	20,15	39
120	Pk90	2,63	63,9	26,4	9,7	3,7	17,5	13,3	42	30	12	2,60	159,60	116,40	3,24	0,00	12,30	20,00	42
121	Pk144	2,72	48,0	25,0	27,0	18,0	38,0	31,0	82	44	38	2,04	1178,00	1026,00	2,11	0,03	14,00	19,30	34
122	Pk145	2,76	40,0	27,0	33,0	23,0	45,0	38,0	76	41	35	1,84	1330,00	1155,00	1,52	0,03	10,00	18,15	36
123	Pk146	2,77	35,0	34,0	31,0	20,0	52,0	36,0	69	40	29	1,81	1044,00	899,00	1,45	0,02	17,00	18,20	40
124	Pk147	2,72	18,0	51,0	31,0	19,0	61,0	37,0	75	43	32	1,71	1184,00	992,00	1,68	0,02	13,89	19,17	39,41
125	Pk148	2,75	36,0	34,0	30,0	18,0	48,0	37,0	80	44	36	1,85	1332,00	1080,00	2,00	0,03	16,00	18,50	47
126	Pk149	2,78	43,0	35,0	22,0	12,0	40,0	28,0	77	43	34	2,10	952,00	748,00	2,83	0,03	11,00	20,50	51
127	Pk150	2,76	40,0	44,0	16,0	8,0	51,0	30,0	67	46	21	2,03	630,00	336,00	2,63	0,01	10,00	20,80	65
128	Pk155	2,77	52,0	33,0	15,0	7,0	33,0	24,0	70	45	25	2,28	600,00	375,00	3,57	0,01	13,89	19,17	39,41
129	Pk156	2,76	45,0	36,0	19,0	10,0	46,0	29,0	67	41	26	2,06	754,00	494,00	2,60	0,01	7,00	21,40	54
130	Pk157	2,78	34,0	47,0	19,0	9,0	46,0	27,0	71	41	30	2,08	810,00	570,00	3,33	0,02	13,89	19,17	39,41
131	Pk158	2,74	35,0	49,0	16,0	8,0	48,0	28,0	69	41	28	2,08	784,00	448,00	3,50	0,02	9,00	21,10	56

132		Pk159	2,75	40,0	39,0	21,0	11,0	50,0	36,0	66	41	25	1,93	900,00	525,00	2,27	0,01	13,89	19,17	39,41
133		Pk160	2,74	34,0	48,0	18,0	10,0	47,0	26,0	70	39	31	2,09	806,00	558,00	3,10	0,02	10,00	20,70	39
134		Pk161	2,76	41,0	36,0	23,0	14,0	44,0	31,0	72	43	29	2,02	899,00	667,00	2,07	0,02	10,00	20,60	60
135		Pk162	2,78	33,0	41,0	26,0	17,0	51,0	36,0	60	29	31	1,87	1116,00	806,00	1,82	0,02	13,89	19,17	39,41
136		Pk163	2,79	30,0	41,0	29,0	18,0	60,0	42,0	63	39	24	1,69	1008,00	696,00	1,33	0,01	9,00	20,60	51
137		Pk74	2,78	21,5	50,8	27,7	18,3	36,9	30,7	50,5	28	22,5	2,05	690,75	623,25	1,23	0,01	10,5	20,1	40
138		Pk75	2,66	22,1	50,4	27,5	14,9	35,5	29,1	49	26	23	2,08	669,30	632,50	1,54	0,01	10,7	20,13	38
139		Pk76	2,78	22,0	49,8	28,2	19,0	36,0	30,0	46,2	26	20,2	2,06	606,00	569,64	1,06	0,01	11,5	20,15	39
140		Pk77	2,79	21,2	50,9	27,9	18,6	34,7	29,0	48,5	27	21,8	2,08	632,20	608,22	1,17	0,01	11,4	20,12	40
141		Pk137	2,76	19,0	46,0	35,0	21,0	65,0	40,0	73	48	25	1,60	1000,00	875,00	1,19	0,01	17,00	17,30	31
142		Pk138	2,73	25,0	50,0	25,0	14,0	53,0	42,0	76	40	36	1,80	1512,00	900,00	2,57	0,03	18,00	17,70	29
143		Pk139	2,74	32,0	45,0	23,0	12,0	35,0	27,0	75	48	27	2,15	729,00	621,00	2,25	0,02	13,89	19,17	39,41
144		Pk141	2,72	39,0	38,0	23,0	13,0	56,0	32,0	68	42	26	1,89	832,00	598,00	2,00	0,01	13,89	19,17	39,41
145		Pk142	2,74	19,0	54,0	27,0	16,0	61,0	33,0	62	38	24	1,79	792,00	648,00	1,50	0,01	17,00	18,00	56
146		Pk143	2,75	35,0	32,0	33,0	21,0	45,0	36,0	63	36	27	1,86	972,00	891,00	1,29	0,02	20,00	17,50	46
147		Pk37	2,65	41,8	41,2	17,0	5,0	40,1	29,9	46	17	29	2,13	867,10	493,00	5,80	0,02	12,9	20,05	21
148		Pk19	2,78	31,0	35,0	34,0	18,0	51,0	38,0	62	38	24	1,77	912,00	816,00	1,33	0,01	15,6	18,15	33
149		Pk21	2,72	57,1	23,6	19,3	10,6	26,3	22,6	57	45	12	2,32	271,20	231,60	1,13	0,00	20,60	17,28	71
150		Pk22	2,62	43,4	32,8	23,8	11,5	44,1	38,9	67,3	35	31,9	1,93	1240,91	759,22	2,77	0,02	13,7	18,69	29
151		Pk23	2,66	43,0	25,0	32,0	13,6	55,0	39,1	76	37	39	1,74	1524,90	1248,00	2,87	0,04	20,3	18,32	31
152		Pk24	2,57	38,0	29,0	33,0	14,5	58,0	43,4	77	40	37	1,66	1605,80	1221,00	2,55	0,03	14,1	18,00	28
153		Pk27	2,67	22,0	51,0	27,0	14,0	67,0	40,0	75,8	45	30,7	1,66	1228,00	828,90	2,19	0,02	19,1	18,3	32
154		Pk28	2,68	53,6	20,7	25,7	11,5	33,3	28,2	94	48	46	2,13	1297,20	1182,20	4,00	0,05	21,7	16,6	25
155		Pk91	2,72	56,7	19,3	24,0	14,3	30,3	27,2	61	42	19	2,19	516,80	456,00	1,33	0,01	24,30	16,12	20
156		Pk164	2,74	47,0	33,0	20,0	11,0	39,0	25,0	65	38	27	2,16	675,00	540,00	2,45	0,02	13,89	19,17	39,41
157		Pk166	2,74	46,0	41,0	13,0	6,0	39,0	22,0	68	37	31	2,26	682,00	403,00	5,17	0,02	8,00	20,90	55
158		Pk168	2,74	45,0	36,0	19,0	10,0	44,0	29,0	71	42	29	2,08	841,00	551,00	2,90	0,02	9,00	20,60	44
159		Pk169	2,72	39,0	39,0	22,0	13,0	49,0	32,0	75	44	31	1,97	992,00	682,00	2,38	0,02	13,89	19,17	39,41
160		Pk170	2,77	35,0	39,0	26,0	18,0	47,0	34,0	38	10	28	1,93	952,00	728,00	1,56	0,02	13,89	19,17	39,41
161	LRG	Pk171	2,77	52,0	35,0	13,0	7,0	35,0	24,0	53	29	24	2,28	576,00	312,00	3,43	0,01	8,00	21,50	54
162		Pk172	2,77	47,0	32,0	21,0	14,0	42,0	31,0	57	36	21	2,06	651,00	441,00	1,50	0,01	8,00	21,30	70
163		Pk173	2,78	44,0	37,0	19,0	11,0	45,0	25,0	53	31	22	2,11	550,00	418,00	2,00	0,01	13,89	19,17	39,41
164		Pk175	2,82	56,0	33,0	11,0	4,0	38,0	17,0	27	15	12	2,34	204,00	132,00	3,00	0,00	13,89	19,17	39,41
165		Pk176	2,73	32,5	37,1	30,4	19,0	37,5	32,0	51,5	28	23,5	2,00	752,00	714,40	1,24	0,01	11,5	20,13	39
166		Pk92	2,85	43,0	23,0	34,0	16,0	44,0	39,0	59	35	24	1,83	936,00	816,00	1,50	0,01	15,1	19,03	44
167		Pk94	2,69	37,7	29,8	32,5	22,6	51,6	42,6	67	30	37	1,73	1576,20	1202,50	1,64	0,03	14,4	19,19	34
168		Pk165	2,76	49,0	31,0	20,0	10,0	46,0	28,0	74	44	30	2,06	840,00	600,00	3,00	0,02	9,00	20,60	68
169		Pk167	2,75	39,0	39,0	22,0	13,0	52,0	35,0	80	47	33	1,91	1155,00	726,00	2,54	0,03	11,00	20,00	36
170		Pk174	2,79	47,0	36,0	17,0	8,0	41,0	28,0	51	32	19	2,14	532,00	323,00	2,38	0,01	7,00	21,70	77
171		Pk29	2,73	47,0	26,0	27,0	11,3	49,0	31,1	79	36	43	1,93	1337,30	1161,00	3,81	0,05	19,00	18,2	34
172		Pk30	2,69	44,0	29,0	27,0	12,1	52,0	32,8	70	31	39	1,88	1279,20	1053,00	3,22	0,04	17,3	18,03	30
173		Pk31	2,75	27,0	41,0	32,0	19,7	60,0	38,4	76	41	35	1,70	1344,00	1120,00	1,78	0,03	15,8	18,3	34
174		Pk32	2,87	21,0	53,0	26,0	9,0	38,0	25,0	57	35	21,9	2,11	547,50	569,40	2,43	0,01	12,00	20,42	40
175		Pk36	2,75	32,0	48,0	20,0	8,0	42,0	28,0	58	31	27	2,10	756,00	540,00	3,38	0,02	9,3	19,84	35

ANNEXE II. DONNEES ALTEROLOGIQUES DES MATERIAUX

Tableau III. Composition minéralogique virtuelle issue de la restructuration normative altérologique des matériaux du secteur d'étude.

	Composition minéralogique virtuelle	Roches		Latérites dérivées des roches volcaniques									Latérites dérivées des roches sédimentaires								
		Picro-basalte	Argilite	Bar 1	Bar 2	Bar 3	Bar 4	Bar 5	Bar 6	Bar 7	Bar 8	Bar 9	Mam 1	Mam 2	Be-Mo	La-Pi	Bi-Ab 1	Ant	Bi-Ab 2	Hig	Ba-So
MNPA	Chromite			0,29	0,43	0,43	0,29	0,29	0,29	0,43	0,29	0,14	0,14				0,14		0,14		
	Apatite	1,24	0,93	0,10	0,10	0,10	0,10	0,21	0,41	0,10		0,21	0,10								0,10
	Ilménite			0,76	0,30	0,46	0,15	0,15		0,30	0,76	0,15	0,30	0,46	0,61	0,46	0,30	0,61	1,22	0,15	1,06
	Anatase	2,16		2,56	2,48	1,84	1,92	2,56	2,40	1,92	2,72	3,92	1,92	0,80	0,72	0,56	0,72	0,72	0,40	0,88	0,48
Total		4,33		29,57									13,01								
Sil I	Orthose		16,96																		
	Métasil. K	1,23																			
	Métasil. Na	2,81																			
	Wollastonite	1,74																			
Total		22,74		0,00									0,00								
Sil II	Séricite		5,17	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	1,59	0,80	0,80	1,59	15,12	31,84	33,43	4,78	1,59	26,27	3,98	19,90	18,31
	Analcime		19,36	0,44	0,44	0,44	0,44	0,88	0,88	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
	Antigorite		6,35	0,64	0,37	0,28	0,28	0,37	0,64	0,28	0,37	0,55	1,93	4,32	4,42	0,55	0,28	3,59	0,46	2,39	2,48
	Scolécite	45,08	20,38																		
	Stévensite	22,68																			
Total		119,02		17,36									179,60								
Kandite	Halloysite					21,02															
	Kaolinite					25,67	3,61	1,20	1,72	17,80	2,75	11,86									
Oxyhydroxyde de Mn, Al, Fe	Pyrochroite	0,18	0,45	0,09	0,53		0,09	0,09	0,09	0,18	0,09	0,09	0,09	0,09			0,09	0,09		0,09	0,09
	Gibbsite			30,89	24,65	0,31	18,41	28,60	25,17	11,54	24,38	27,77	10,45	9,20	8,27	16,07	23,09	10,61	22,46	14,51	12,32
	Goethite	11,21	6,23	35,78	34,18	48,06	21,18	37,91	36,31	34,89	33,29	26,88	30,26	20,11	13,88	13,35	27,95	27,77	11,04	35,07	22,61
Total		18,07		501,43									329,55								
Silice	Silice amorphe	5,86	16,27	0,74	2,99								3,36	7,66	9,55	0,58	1,06	5,42	0,32	3,68	6,10
	Quartz		12,51	27,04	32,17		52,50	26,40	29,64	30,24	32,88	25,68	37,08	24,83	28,71	63,30	44,40	24,33	59,12	21,98	36,39
Total		34,64		260,28									377,87								
Total		94,19	87,65	100,13	99,43	99,40	99,76	99,45	99,15	98,92	98,76	99,28	101,21	99,76	100,03	100,08	99,91	99,99	99,44	99,24	100,38

ANNEXE III. SEMINAIRES ET COLLOQUES

1. **Nyemb Bayamack JF**, Onana VL, Medjo Eko R, Ngo'o Ze A, Ndzie' Mvindi AT: Assessment of the determination of Californian Bearing Ratio of laterites with contrasted geotechnical properties from simple physical parameters. In recueil des résumés, Colloque de la Société des Géosciences du Cameroun, 04 – 07 décembre 2019, Université de Yaoundé I (Cameroun).
2. **Nyemb Bayamack JF**, Onana VL, Medjo Eko R, Ngo'o Ze A, Ndzie' Mvindi AT, Ekodeck GE. Influence de la lithologie sur la variabilité des propriétés géotechniques des latérites du Sud-Ouest Cameroun. Valorisation en construction routière. In recueil des résumés, séminaire Entre Géosciences et Chimie, troisième édition (EGC_2). Université de Yaoundé, 07 décembre 2017.
3. **Nyemb Bayamack JF**, Onana VL, Medjo Eko R, Ngo'o Ze A, Ndzie' Mvindi AT: Geotechnical and mechanical characterization of basalt and laterites of Southwestern Cameroon: applications in road construction. In recueil des résumés, Colloque de la Société des Géosciences du Cameroun, 29 – 31 mars 2017, Université de Douala (Cameroun).
4. **Nyemb Bayamack JF**, Onana VL, Ntoh NG, Pianta Tadida C, Ekodeck GE: *Caractérisation minéralogique, chimique et géotechnique des graveleux latéritiques du tronçon routier Bahouan - Bamendjou - Batchum (Ouest Cameroun)*. Hommages académiques au Professeur Georges Emmanuel Ekodeck, communication orale, 16 – 17 mai 2013, Université de Douala.

ANNEXE IV. PUBLICATION

Nyemb Bayamack JF, Onana VL, Ndzie' Mvindi AT, Ngo'o Ze A, Medjo Eko R. Assessment of the determination of Californian Bearing Ratio of laterites with contrasted geotechnical properties from simple physical parameters. *Transp Geotech J* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.02.001>.

