

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
FACULTE DES SCIENCES



THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I
FACULTY OF SCIENCE

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

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

**CARACTERISATION MINERALOGIQUE,
GEOCHIMIQUE ET GEOTECHNIQUE DES PRODUITS
D'ALTERATION SUR QUARTZITES MICACES DE SA'A
(CENTRE CAMEROUN)
ET LEUR VALORISATION POTENTIELLE**

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

Option : Sols, Eau, Sciences Géotechniques

Spécialité : Sciences Géotechniques

Par

Nyassa Ohandja Hervé

Matricule 01Y084

Master en Sciences de la Terre

Sous la co-direction de



Onana Vincent Laurent

Maître de Conférences

Ekodeck Georges Emmanuel

Professeur

Année 2021



DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE DOCTORALE
EN GEOSCIENCES ET APPLICATIONS

ATTESTATION DE CORRECTION DE THESE DE DOCTORAT/Ph.D

Spécialité : Géosciences des Formations Superficielles
Option : Sciences Géotechniques

Nom et Prénoms du candidat : NYASSA OHANDJA HERVE

Matricule : 01Y084

Titre de la thèse : “Caractérisation minéralogique, géochimique, géotechnique des produits d’altération sur quartzites micacés de Sa’a (Centre-Cameroun) et leur valorisation potentielle”

Date de soutenance : Mardi, le 04 janvier 2022.

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

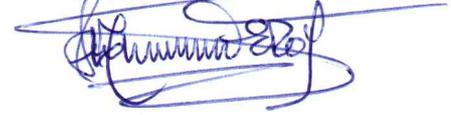
En foi de quoi, la présente **Attestation de correction** lui est délivrée, pour servir et valoir ce que de droit.

Le Président du Jury


Ndjigui Paul Désiré
Professeur

12 JAN 2022

Les Membres


Robert MEDJO EKO, PhD, P.E.
Professor


Georges Emmanuel EKODECK
Professeur


Michel Nyassa
Maitre de Conférences

A Dieu Tout Puissant

A Marcelline Belinga Mbia ma mère et Désiré Ohandja Nyassa mon père

Au Professeur Vincent Laurent Onana

A tes résolutions répondra le succès. Job 22 : 28

Fais de l'Eternel tes délices et Il te donnera ce que ton cœur désire. Psaume 37 : 4-5

Remerciements

Il convient d'exprimer ma gratitude à tous ceux qui ont œuvré à l'aboutissement de la présente thèse de Doctorat/PhD.

Je suis infiniment reconnaissant à Dieu le Père Tout Puissant qui, à travers son Fils Jésus-Christ notre Seigneur et Sauveur, m'a accordé la santé et la vie spirituelle.

Je remercie le Professeur Georges Emmanuel Ekodeck qui a accepté de diriger ce travail. Merci, cher professeur de m'avoir dit « M. Nyassa, je vous encourage à continuer avec vos travaux de thèse et, soyez déterminé ! »

Ma gratitude va à l'endroit du Professeur Vincent Laurent Onana, cet homme frère qui m'a tenu par la main au cours des travaux de Master et a bien voulu poursuivre jusqu'en thèse. Merci d'avoir toujours été là pour moi, aussi bien lors des multiples descentes sur le terrain que lors de l'accompagnement et de la recherche des laboratoires d'analyses minéralogiques et géochimiques. Ses conseils, sa rigueur, son orientation et ses sacrifices tant sur le plan académique que sur le plan social m'ont conduit à trouver un équilibre sur le plan intellectuel et social. Qu'il trouve dans cette thèse une forte satisfaction, je lui dis infiniment merci. Que Dieu le comble de toutes bénédictions divines.

Je suis très reconnaissant au Professeur Paul-Désiré Ndjigui, Chef du Département des Sciences de la Terre. Il m'a marqué depuis le niveau 4. Il m'a encouragé à faire des sacrifices pour la recherche scientifique et, à chaque fois que je le salue, il s'intéresse à l'évolution de mon travail et ne cesse de m'exhorter à aller plus loin. Qu'il trouve ainsi l'expression de ma gratitude.

Je dis merci au Professeur Robert Medjo Eko, pour ses multiples conseils prodigués en première année de Doctorat/PhD et ses paroles d'encouragement.

Je remercie mes chers enseignants du Département des Sciences de la Terre, notamment les Professeurs Jean Paul Nzenti, Véronique Kamgang Kabeyene Beyala, Lucien Dieudonné Bitom, Pierre Kamgang, Rose Yongue née Fouateu, Jules Remy Ndam Ngoupayou, Joseph Mvondo Ondo, Monique Abossolo née Angue, Joseph Quentin Yene Atangana et Emile Ekomane, pour tous les enseignements reçus.

Je remercie le Docteur Roger Firmin Donald Ntuala, qui a bien voulu m'accompagner sur le terrain pour le prélèvement des argiles alluvionnaires. Il m'a orienté dans l'interprétation et l'analyse des essais et analyses réalisés sur les argiles latéritiques et les mélanges alluvionnaires. Il m'a confié aux ingénieurs de la Mission de promotion des matériaux locaux (MIPROMALO) et a suivi de près les différents essais réalisés. Ses conseils m'ont aidé à garder foi et persévérance. Qu'il trouve en ce travail, l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je pense au Docteur Sylvie Désirée Noa Tang, l'épouse du Professeur Onana, pour ses multiples conseils et ses encouragements.

Je suis reconnaissant au Docteur Elisé Sababa, un frère et un ami, qui a accepté volontiers de contribuer à éclairer ma lanterne sur certains détails importants relatifs au volet Altérations de ce travail. Ses multiples explications m'ont également amené à mieux cerner l'étude des lames minces et leur description microscopique. Merci pour ces efforts déployés à mon endroit.

Je remercie le Docteur Aloys Thierry Mvindi Ndzié, pour sa contribution efficace dans l'interprétation des données des essais géotechniques, cher frère et ami, je te dis merci. Ces remerciements vont également à l'endroit du Docteur Arnaud Ngo'o Ze, mon ami et compagnon de terrain. Son aide lors du prélèvement des échantillons d'argiles latéritiques et de graveleux latéritiques m'a été précieuse. Qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude. Je n'oublie pas ma sœur cadette Marie Thérèse Nanga Bineli, pour m'avoir accordé de son temps dans le dépouillement des spectres des rayons X et dans l'exploitation des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques.

J'exprime ma gratitude à mes camarades de promotion les Docteurs Jules Mbanga Nyobe et Zakari Mfonka ainsi qu'à mes amis Pascal Eyenga, Florentin Plastini Ngami, Herman Ghislain Kenmogne et Josti Doum Motanoc, pour les bons moments passés au Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et Altérologie lors de la rédaction du présent travail.

Je remercie sincèrement ma très chère petite sœur Carine Tsoungui pour ses paroles d'encouragements et sa contribution matérielle et financière. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Ma reconnaissance va également à l'endroit de mes cadets du laboratoire de Géologie des Formations Superficielles, notamment à : Joël Fabrice Nyemb Bayamack, Yves Robert Bikoy, Yannick Wabo Talla, Calixte Edzambi Mbarga, Juliette Ulriche Awoumou, Elise Colette Ngo Mapuna, Paola Raïssa Ongboye Bassanack, pour les moments d'échanges passés ensemble. Je remercie particulièrement mon cadet Christophe Enock Embom, pour le volet cartographie de ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à mon épouse Christine Syntyche Grace Ihindi épouse Nyassa, à mes chères petites filles Love Nyassa et Chana Camille Nyassa, pour leur sourire, leur joie de vivre et leur assistance physique de tous les instants. Puisse le Seigneur Jésus-Christ, leur accorder la grâce d'être d'excellentes femmes spirituelles et intellectuelles.

Je remercie mon grand frère Jean Marie, qui m'a toujours encouragé par ses conseils, ses prières et sa présence physique. Je remercie également à mon petit frère Benoit Mendzana pour les causeries édifiantes ; mon souhait est qu'il devienne un grand actuaire. Merci également à ma grande sœur Evelyne Mbia, pour ses incessantes paroles d'encouragement.

Je ne saurais oublier ma belle-famille, notamment : Joseph Ihindi Bissohong, Jacqueline Camille née Ihindi, Camille Merveille Ihindi, Nadège Ihindi et Jean de dieu Ihindi. Je leur dis un grand merci pour leur soutien spirituel.

Que tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse de Doctorat/PhD et dont les noms n'ont pas été mentionnés, trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude et la ferme assurance que, leurs services ne seront jamais oubliés.

Sa'a, le 18 mars 2021.

Hervé Nyassa Ohandja

Tables des matières

Dédicace	i
Citation	ii
Remerciements	iii
Table des matières	v
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Liste des abréviations, sigles et acronymes	xiii
Résumé	xv
Abstract	xvi
Introduction générale	1
Chapitre I. Généralités	6
Introduction	7
I. Contexte naturel	7
I.1. Localisation géographique	7
I.2. Climat	7
I.3. Géomorphologie	7
I.3.1. Orographie	7
I.3.2. Hydrographie	8
I.4. Végétation et faune	8
I.5. Géologie	8
I.5.1. Roche	8
I.5.2. Sols	13
I.6. Géographie humaine et économique	13
II. Travaux antérieurs complémentaires	14
II.1. Graveleux latéritiques	14
II.1.1. Définitions et généralités	14
II.1.2. Caractéristiques génétiques	14
II.1.3. Caractéristiques géotechniques	15
II.1.4. Corrélations entre caractéristiques génétiques et géotechniques	16
II.1.5. Classification des graveleux latéritiques	17
II.1.6. Spécification des graveleux latéritiques en construction routière	18
II.1.6.1. Couche de forme	18
II.1.6.2. Couche de fondation et couche de base	18
II.2. Argiles latéritiques	18
II.2.1. Minéralogie et géochimie des matériaux latéritiques	18
II.2.2. Paramètres géotechniques des matériaux argileux	19
Conclusion	21
Chapitre II. Matériels et méthodes	22

Introduction	23
I. Enquêtes bibliographiques	23
II. Travaux de terrain	23
II.1. Localisation des points de prélèvement	23
II.2. Echantillonnage	23
II.3. Identification des échantillons	23
III. Travaux de laboratoire	25
III.1. Analyses pétrologiques	25
III.1.1. Analyses physico-chimiques	25
III.1.2. Analyses minéralogiques	25
III.1.3. Analyses géochimiques	26
III.2. Travaux géotechniques	26
III.2.1. Essais géotechniques sur les graveleux latéritiques	26
III.2.1.1. Propriétés physiques	26
III.2.1.1.1. Poids volumique des grains solides	26
III.2.1.1.2. Limites d'Atterberg	27
III.2.1.1.3. Valeur de bleu de méthylène	27
III.2.1.1.4. Granulométrie	27
III.2.1.1.5. Classification	29
III.2.1.1.6. Paramètres dérivés	29
III.2.1.2. Caractéristiques de compactage	31
III.2.2. Essais géotechniques sur les argiles latéritiques	31
III.2.2.1. Confection des éprouvettes	31
III.2.2.2. Couleur	31
III.2.2.3. Retrait linéaire	32
III.2.2.3.1. Retrait linéaire après séchage	32
III.2.2.3.2. Retrait linéaire après cuisson	32
III.2.2.3.3. Absorption d'eau	32
III.2.2.3.4. Porosité apparente	32
III.2.3. Essai mécanique : Résistance à la flexion	33
III.3. Exploitation des données	33
III.3.1. Exploitation des données de diffraction des rayons X	33
III.3.2. Exploitation des données géochimiques	34
III.3.2.1. Indices et diagrammes géochimiques	34
III.3.2.2. Restructuration normative altérologique	35
III.3.2.3. Exploitation des données géochimiques des Terres rares	36
III.3.3. Exploitation des données géotechniques	36
III.3.4. Sélection des matériaux pour la stabilisation	37
III.3.5. Traitement statistique des données	37
III.3.5.1. Coefficient de variation	37

III.3.5.2. Analyse des régressions	37
III.3.5.3. Analyse en composantes principales	38
Conclusion	38
Chapitre III. Pétrographie, minéralogie et géochimie des matériaux d'un profil d'altération de référence	41
Introduction	42
I. Roche	42
II. Profil d'altération	42
II.1. Caractéristiques macroscopiques et minéralogiques	42
II.1.1. Ensemble saprolitique	42
II.1.2. Ensemble nodulaire	46
II.1.3. Horizon argilo-caillouteux superficiel	46
II.2. Géochimie	47
II.2.1. Géochimie des éléments majeurs et quantification de l'altération supergène	47
II.2.2. Eléments traces	51
II.2.2.1. Eléments lithophiles (Ba, Sr, Cs, Rb, Li)	51
II.2.2.2. Eléments à haute intensité de champ (U, Zr, Nb, Hf, Mo, W, Ta)	51
II.2.2.3. Métaux de transition (V, Cr, Co, Ni)	56
II.2.2.4. Terres rares	56
II.2.2.5. Corrélations géochimiques	58
Conclusion	58
Chapitre IV. Caractérisation minéralogique, géochimique et géotechnique des graveaux latéritiques	61
Introduction	62
I. Caractéristiques minéralogiques et géochimiques graveaux latéritiques	62
II. Paramètres géotechniques des graveaux latéritiques	68
II.1. Poids volumique des grains solides	68
II.2. Granularité	68
II.3. Paramètres de plasticité	68
II.4. Paramètres dérivés	68
II.5. Classification	71
II.6. Paramètres de compactage	71
II.7. Variabilité statistique	71
II.7.1. Variabilité des paramètres minéralogiques et géochimiques	71
II.7.2. Variabilité des paramètres géotechniques	73
Conclusion	81
Chapitre V. Caractérisation minéralogique, géochimique et géotechnique des argiles latéritiques superficielles et des argiles alluviales	84
Introduction	85
I. Caractères macroscopiques des argiles alluviales	85

II. Minéralogie et géochimie des argiles latéritiques et des argiles alluviales	85
II.1. Minéralogie	85
II.2. Géochimie	88
III. Paramètres géotechniques	88
III.1. Paramètres géotechniques des argiles latéritiques superficielles	88
III.1.1. Granularité	88
III.1.2. Limites d'Atterberg et indice de plasticité	88
III.2. Paramètres géotechniques des argiles latéritiques stabilisées : Mélanges argiles latéritiques - argiles alluviales	92
III.2.1. Couleur et cohésion	92
III.2.2. Retrait linéaire de cuisson	92
III.2.3. Absorption d'eau	101
III.2.4. Résistance à la flexion	107
III.3. Paramètres géotechniques des matériaux stabilisés : Mélanges argiles latéritiques - chaux	107
III.3.1. Masse volumique	113
III.3.2. Absorption d'eau	113
III.3.3. Résistance à la flexion	113
Conclusion	129
Chapitre VI. Exploitation et discussion des résultats	130
Introduction	131
I. Influence de la structure de la roche mère sur les caractéristiques macromorphologiques et physico-chimiques et évolution géochimique des matériaux d'altération	131
II. Liens entre paramètres pétrologiques et paramètres géotechniques des graveleux latéritiques	136
II.1. Corrélations entre composants géochimiques et géotechniques	136
II.2. Corrélations entre paramètres d'altération chimique et paramètres géotechniques	137
II.3. Prédiction du CBR des graveleux latéritiques sur quartzites micacés	141
III. Comportement géotechnique et mécanique des argiles latéritiques naturelles et des argiles latéritiques stabilisées aux argiles alluviales et à la chaux	144
IV. Intérêts des graveleux et des argiles latéritiques de Sa'a en géotechnique routière et dans l'industrie du bâtiment	149
IV.1. Graveleux latéritiques en géotechnique routière	149
IV.2. Argiles latéritiques dans l'industrie du bâtiment	152
Conclusion	155
Conclusion générale et perspectives	156
Références bibliographiques	160
Annexes	

Liste des figures

Figure 1. Carte de localisation de la zone de Sa'a	8
Figure 2. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1957) appliqué aux données climatiques de la zone de Sa'a pour la période (1980 – 2020)	9
Figure 3. Carte géomorphologique de la zone de Sa'a	10
Figure 4. Carte géologique de la zone de Sa'a	12
Figure 5. Carte d'échantillonnage	24
Figure 6. Représentation de projections typiques de variables dans un plan factoriel	39
Figure 7. Vues macroscopique et microscopique des quartzites micacés de Sa'a	43
Figure 8. Profil d'altération sur quartzites micacés dans la zone de Sa'a	44
Figure 9. Diffractogramme des matériaux d'altération sur quartzites micacés de Sa'a	45
Figure 10. Position des matériaux d'altération étudiés dans les diagrammes molaires de Babechuk <i>et al.</i> (2014)	50
Figure 11. Covariation de la perte au feu en fonction de IOL, illustrant la kaolinitisation des matériaux d'altération étudiés	52
Figure 12. Diagramme SAF, illustrant le degré de latéritisation des matériaux d'altération étudiés	52
Figure 13. Gains et pertes des éléments le long du profil d'altération sur quartzites micacés de Sa'a d'après les calculs isotitane	53
Figure 14. Spectres des terres rares des quartzites micacés normalisés par rapport à la chondrite de McDonough and Sun (1995) et ceux des matériaux d'altération normalisés par rapport aux quartzites micacés et à la chondrite de McDonough and Sun (1995)	57
Figure 15. Diffractogrammes de rayons X des graveleux latéritiques de Sa'a	63
Figure 16. Position des graveleux latéritiques de Sa'a dans le diagramme géochimique $SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_{3t}$	66
Figure 17. Cercle de corrélation des données minéralogiques des graveleux latéritiques de la Zone de Sa'a	74
Figure 18. Biplot de corrélation des composants minéralogiques des graveleux latéritiques de La zone de Sa'a	74
Figure 19. Cercles de corrélation des composants géochimiques des graveleux latéritiques dans la zone de Sa'a suivant les axes F1-F2-F3	76
Figure 20. Cercles de corrélation des paramètres géotechniques suivant les axes F1-F2-F3 des individus issus de l'ACP	78
Figure 21. Diffractogrammes de rayons X des argiles latéritiques superficielles Sa'a et de l'argile alluviale de la Sanaga	86
Figure 22. Courbes granulométriques des argiles latéritiques superficielles de Sa'a	89
Figure 23. Position des argiles latéritiques de Sa'a dans le diagramme ternaire de classification belge de Bah <i>et al.</i> (2005)	91
Figure 24. Position des argiles latéritiques superficielles de Sa'a dans l'abaque de plasticité	

de Casagrande	93
Figure 25. Variation de couleurs dans les briquettes à base d'argile latéritique d'Ebogo cuites à 1050°C	94
Figure 26. Fissurations importantes sur les briquettes à base d'argile latéritique d'Elig- Zogo (EZ_100 à 1050°C)	95
Figure 27. Faibles fissurations sur les briquettes à base d'argile latéritique de Nkolang (NA_80 à 1050°C)	95
Figure 28. Variation des valeurs de retrait linéaire en fonction de la température de cuisson.....	99
Figure 29. Variation des valeurs d'absorption d'eau en fonction de la température de cuisson	106
Figure 30. Variation des valeurs de résistance à la flexion en fonction de la température de cuisson	112
Figure 31. Valeurs de masse volumique des argiles latéritiques stabilisées à la chaux de Sa'a	118
Figure 32. Valeurs d'absorption d'eau dans les argiles latéritiques stabilisées à la chaux de Sa'a .	123
Figure 33. Valeurs de résistance à la flexion dans les argiles latéritiques stabilisées à la chaux de Sa'a	128
Figure 34. Position des matériaux d'altération de Sa'a dans les diagrammes Eh - pH.....	132
Figure 35. Biplot des matériaux d'altération sur quartzites micacés de Sa'a	134
Figure 36. Variations du WIG le long du profil d'altération	134
Figure 37. Distance entre les prédictions des valeurs de CBR et les observations	145
Figure 38. Représentation des résidus normalisés	145
Figure 39. Faible cohésion – effrittement de briquettes de Nkom (illustration pour NK_100 après cuisson à 1050°C)	147
Figure 40. Distorsions observables sur les briquettes de Nsanmendouga (NS_100) après cuisson à 1050°C	147
Figure 41. Position des matériaux latéritiques superficiel de Sa'a dans l'abaque de maniabilité de Brain et Highly (1978) in Moutou <i>et al.</i> (2012)	148
Figure 42. Courbes granulométriques des graveleux latéritiques de la zone de Sa'a à l'intérieur du fuseau de spécification pour couche de fondation (CEBTP, 1984)	151
Figure 43. Courbe granulométrique moyenne des graveleux latéritiques de la zone de Sa'a à l'intérieur du fuseau de spécification pour couche fondation (CEBTP, 1984)	151
Figure 44. Position des matériaux latéritiques superficiels de Sa'a dans le diagramme de Winkler (1954) in Hajjaji <i>et al.</i> (2002)	153

Liste des tableaux

Tableau 1. Données météorologiques de la zone de Sa'a (1980 – 2020)	9
Tableau 2. Normes brésiliennes de construction des bâtiments	20
Tableau 3. Localisation des points de prélèvement	24
Tableau 4. Classification des sols selon les valeurs de bleu de méthylène	28
Tableau 5. Paramètres de la classification CEBTP - ISTED	30
Tableau 6. Données physico-chimiques (pH, Eh) et géochimiques des éléments majeurs (%) et traces (ppm) des matériaux d'altération de Sa'a	48
Tableau 7. Données du bilan d'altération isothorium dans les matériaux d'altération de Sa'a ...	54
Tableau 8. Matrice de corrélation des composants géochimiques des matériaux d'altération de Sa'a.....	59
Tableau 9. Estimation semi-quantitative (%) de la composition minéralogique des graveleux latéritiques de la zone de Sa'a	64
Tableau 10. Données d'analyses géochimiques (%) des graveleux latéritiques dans la zone de Sa'a	65
Tableau 11. Valeurs des indices géochimiques dans les graveleux latéritiques de la zone de Sa'a	67
Tableau 12. Valeurs des paramètres normatifs altérologiques des graveleux latéritiques dans la zone de Sa'a.....	69
Tableau 13. Valeurs moyennes des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques de la zone de Sa'a	70
Tableau 14. Tests de normalité appliqués aux données des paramètres minéralogiques des graveleux latéritiques de Sa'a	72
Tableau 15. Matrice de corrélation des minéraux des graveleux latéritiques de la zone de Sa'a .	72
Tableau 16. Tests de normalité appliqués aux données des paramètres géochimiques des graveleux latéritiques de Sa'a	75
Tableau 17. Matrice de corrélation des composants chimiques (% d'oxydes) des graveleux latéritiques de la zone de Sa'a	75
Tableau 18. Matrice de corrélation des données chimiques et minéralogiques des graveleux latéritiques de la zone de Sa'a	76
Tableau 19. Tests de normalité appliqués aux données des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques de Sa'a	77
Tableau 20. Cosinus carré des variables	80
Tableau 21. Matrice de corrélation des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques de Sa'a	82
Tableau 22. Composition minéralogique semi-quantitative des argiles latéritiques superficielles de Sa'a	87
Tableau 23. Composition géochimique en éléments majeurs (%) des argiles latéritiques superficielles et des argiles alluviales (AL) de Sa'a	89
Tableau 24. Données des paramètres physiques des argiles latéritiques superficielles de Sa'a	90
Tableau 25. Valeurs de retrait linéaire (%) des briquettes à base d'argiles latéritiques	100

et d'argiles alluviales de Sa'a après cuisson	
Tableau 26. Valeurs du taux d'absorption d'eau (%) des briquettes à base d'argiles latéritiques et d'argiles alluviales de Sa'a après cuisson	102
Tableau 27. Valeurs de résistance à la flexion (MPa) des briquettes à base d'argiles latéritiques et d'argiles alluviales de Sa'a, après cuisson	108
Tableau 28. Valeurs de masse volumique (kg/mm ³) des briquettes de Sa'a stabilisées à la chaux	114
Tableau 29. Valeurs d'absorption d'eau (%) des briquettes de Sa'a stabilisées à la chaux	119
Tableau 30. Valeurs de résistance à la flexion (MPa) des briquettes de Sa'a stabilisées à la chaux	124
Tableau 31. Matrice de corrélation entre composants géochimiques et paramètres géotechniques dans les graveleux latéritiques de la zone de Sa'a	138
Tableau 32. Matrice de corrélation entre paramètres d'altération et propriétés géotechniques dans les graveleux latéritiques de la zone de Sa'a	139
Tableau 33. Matrice de corrélation entre paramètres d'altération normatifs et paramètres géotechniques dans les graveleux latéritiques de la zone de Sa'a	140
Tableau 34. Différents modèles de régression de la variable CBR	142
Tableau 35. Coefficients d'ajustement	142
Tableau 36. Analyse de la variance	142
Tableau 37. Paramètres du modèle	143

Liste des abréviations, sigles, acronymes et symboles

AASHTO : *American association for state highway transportation officials*

Ac : Activité de Skempton

Ac_b : Activité de la fraction argileuse

ACP : Analyse en composantes principales

AFNOR : Agence française de normalisation

AIC : *Akaike information criterion*

ASTM : *American society for testing material*

CBR: *California bearing ratio*

CEBTP : Centre d'expertise du bâtiment et des travaux publics

CIA: *Chemical index of alteration*

CV : coefficient de variation

DDL: Degré de liberté

DEGN : Direction des études générales et de la normalisation

DSM : Densité sèche maximale

DVRAR : degré virtuel relatif d'altération de la roche

DW : test de Durbin - Watson

ϵ_s : Potentiel de gonflement

f : Fines (%)

G_m : Module de classement

GPS: *Global positioning system*

HFSE: *High field strength element*

HRB: *Highway research board*

HREE: *Heavy rare earth element*

ICP-MS: *Inductively coupled plasma-Mass spectrometry*

IOL: *Index of laterisation*

IP : Indice de plasticité

IRIP : Indice relatif de confinement potentiel

IRLP : Indice relatif de lixiviation potentielle

ISTED : Institut des sciences et des techniques de l'équipement et l'environnement pour le développement

LABOGENIE: Laboratoire National de Génie Civil

LBTP : Laboratoire du Bâtiment et Travaux Publics

LCPC : Laboratoire central des ponts et chaussées

LREE: *Light rare earth element*

LILE : *Large ion lithophile element*

LL : Limite de liquidité

LP : Limite de plasticité
MCE : Moyenne des carrés des erreurs
MIA: *Mafic index of alteration*
MIPROMALO : Mission de promotion des matériaux locaux
PC: *Prediction criterion*
PF : Perte au feu
Pm : Module de plasticité
Pp : Produit de plasticité
REE: *Rare earth element*
RL : Retrait linéaire
RMCE: Racine de la moyenne des carrés des erreurs
SBC *Schwarz bayesian criterion*
TEO : Teneur en eau à l'optimum Proctor
USCS: *Unified Soil classification system*
VBS : Valeur de bleu de méthylène
WA: *Water absorption*
WIG: *Weathering index of granite*
 γ_s : Poids volumique des grains solides

Résumé

Le présent travail a pour objectif principal d'établir, à partir des données pétrologiques, que les caractéristiques macromorphologiques des roches cristallophylliennes, notamment celles des quartzites micacés, contrôlent les processus d'altération en zone équatoriale et que, les sols, graveleux et argiles latéritiques dérivés des processus pédogénétiques qui affectent ces roches, sont utilisables, respectivement, en construction routière et dans l'industrie du bâtiment. L'étude a été menée dans la zone de Sa'a (Centre Cameroun) sur un profil d'altération développés sur quartzites micacés. De plus, 13 échantillons de graveleux latéritiques, 10 échantillons d'argiles latéritiques et, 01 échantillon d'argile alluviale en bordure de la Sanaga ont été prélevés. Ces matériaux ont été soumis à des analyses pétrographiques par microscopie optique, minéralogiques par diffraction des rayons X, géochimiques par fluorescence X et par spectrométrie de masse atomique, ainsi qu'aux tests géotechniques et mécaniques, notamment pour les graveleux et argiles latéritiques. Des tests statistiques ont été effectués uniquement sur les graveleux latéritiques étudiés. Les résultats obtenus montrent que les quartzites micacés de la zone de Sa'a sont constitués de plaquettes quartziques de 1 à 2 cm d'épaisseur, séparées par des lits de minéraux ferromagnésiens millimétriques à multi-millimétriques. Le profil d'altération montre l'organisation macromorphologique générale : saprolite/ensemble nodulaire/niveau argileux meuble superficiel. Son ensemble saprolitique présente une organisation macromorphologique atypique, saprolite grossière/matériau sol. Les principaux processus pédogénétiques qui ont influencé la mise en place du profil d'altération latéritique atypique de Sa'a sont la transformation des minéraux primaires, la translocation des terres rares et des argiles le long du profil, la formation des argiles et des oxyhydroxydes de fer associée aux pertes en terres rares légères, l'intervention de la matière organique dans les horizons de surface, en relation avec une accumulation des métaux de transition, certains HFSE et HREE. Les graveleux latéritiques dérivés des quartzites micacés de Sa'a présentent de fortes teneurs en SiO₂ et, de faibles teneurs en sesquioxydes, ce qui amoindrit leurs performances géotechniques. Ces matériaux sont de plasticité moyenne à élevée. Un modèle à 6 paramètres, de l'équation de détermination du CBR, a été établi en utilisant les paramètres minéralogiques, géochimiques et géotechniques. L'équation de ce modèle mathématique est : $CBR = 822,64 - 295,95 \times \gamma_s + 1,23 \times (< \%2 \mu m) - 23,21 \times VBS + 4,72 \times DSM + 2,25 \times Fe_2O_{3t} - 3,52 \times Goethite$. La valeur moyenne de *California bearing ratio* (CBR) de 33 % dans les graveleux latéritiques de Sa'a, associée aux valeurs des autres paramètres géotechniques indique que, ces matériaux sont utilisables en couche de fondation pour trafic faible à moyen T2/T3 et, en couche de base pour trafic faible T1. Les argiles latéritiques de Sa'a, par leurs caractéristiques mécaniques, ne sont pas adaptées pour la production des briques et/ou des tuiles à l'état naturel. La comparaison des paramètres après stabilisation thermique, aux argiles alluviales et à la chaux, montre que la stabilisation aux argiles alluviales est la mieux adaptée pour les matériaux étudiés. Cependant, deux modes, la stabilisation thermique et la stabilisation aux argiles alluviales, atteignent les exigences pour la fabrication des briques. La stabilisation à la chaux ne permet pas de fabriquer des tuiles de caractéristiques acceptables.

Mots clés : Zone équatoriale ; Quartzites micacés ; Matériaux d'altération ; Construction routière ; Stabilisation ; Briques et tuiles

Abstract

The main objective of the present work is to establish from petrological data that the macromorphological characteristics of crystallophyllous rocks, especially those of micaceous quartzites in the equatorial zone, control the weathering processes and that the soils, lateritic gravels and lateritic clays, derived from pedogenetic processes that affect these rocks are usable in road construction and building industry, respectively. The study was carried out in the Sa'a area (Central Cameroon) on a weathering profile overlying micaceous quartzites and on 13 lateritic gravel samples, 10 lateritic clay samples, and 01 alluvial clay sample from Sanaga River. These materials were subjected to petrographic analysis by optical microscopy, mineralogical analysis by X-ray diffraction, geochemical analysis by X-ray fluorescence and atomic mass spectrometry, as well as to geotechnical and mechanical tests, in particular for lateritic gravels and lateritic clays. Statistical tests were performed only on the lateritic gravels. The results obtained show that the studied micaceous quartzites consist of 1 – 2 cm thick quartz platelets separated by millimeter to multi-millimeter ferromagnesian mineral beds. The weathering profile shows the general macromorphological organization saprolite/nodular set/superficial loose clayey horizon. The saprolitic set is atypical because it presents a succession of coarse saprolite/soil material. The main pedogenetic processes along the studied weathering profile are transformation of primary minerals into neoformed-clays and Fe-oxide-hydroxides formation, translocation of rare earth elements (REE), associated mainly with light REE losses, and addition of organic matter in surface horizons, associated with an accumulation of transition metals, high field strength elements, and heavy REE. Lateritic gravels derived from Sa'a micaceous quartzites have high SiO₂ contents and low sesquioxide contents, which reduces their geotechnical performance. These materials are of medium to high plasticity. A 6-parameter model of the California bearing ratio (CBR) determination equation was established using mineralogical, geochemical, and geotechnical parameters. The equation for this mathematical model is: $CBR = 822,64 - 295,95 \times \gamma_s + 1,23 \times (<2 \mu m) - 23,21 \times VBS + 4,72 \times MDD + 2,25 \times Fe_2O_{3t} - 3,52 \times Goethite$. The average CBR value (33%) in the studied lateritic gravels, associated with the values of the other geotechnical parameters indicates that these materials can be used as a sub-base for low to medium traffic T2/T3 and as a base course for low traffic T1. The raw lateritic clays from Sa'a are not suitable for the production of bricks and/or tiles due to their mechanical characteristics. The comparison of the parameters after thermal stabilization, with alluvial clays and with lime, shows that the stabilization with alluvial clays is best suited for the studied lateritic clays. However, two modes, thermal stabilization and alluvial clay stabilization meet the requirements for bricks manufacture. Lime stabilization does not allow the production of tiles with acceptable characteristics.

Keywords: Equatorial zone; Micaceous quartzites; Weathered materials; Road construction; Stabilization; Bricks and tiles

INTRODUCTION GENERALE

La quasi-totalité des études pétrologiques réalisées sur les matériaux d'altération en zone équatoriale montrent que les profils d'altération comprennent du bas vers le haut deux grandes unités, les saprolites et les sols (Tardy, 1993 ; Babechuk *et al.*, 2014 ; Gong *et al.*, 2011, 2013 ; Nyeck *et al.*, 2019 ; Nyassa Ohandja *et al.*, 2020b), du fait de la nature de la roche mère, du climat, de la topographie, de l'activité biologique et du temps. En général, dans les profils d'altération latéritique, on observe un ensemble saprolitique qui comprend une saprolite grossière (SG) et une saprolite fine (SF) tandis que, les sols, recouvrant les saprolites, sont constitués de matériaux nodulaires recouverts par des matériaux argileux meubles superficiels. Des variations de cette organisation morphologique générale sont rares, mais cette organisation reste typique des matériaux d'altération développés dans les régions équatoriales. Les données pétrographiques et minéralogiques sont utiles dans la compréhension des facteurs contrôlant l'altération des roches cristallines et le développement des matériaux d'altération (Jiménez-Espinosa *et al.*, 2007). De plus, les études géochimiques du comportement des éléments majeurs et des éléments traces, y compris les éléments des terres rares (REE, de l'Anglais *Rare earth elements*), ont montré des relations entre la nature des matériaux altérés le long des profils latéritiques et le comportement de ces éléments (Ndjigui *et al.*, 2008 ; Kamgang *et al.*, 2009 ; Onana *et al.*, 2016b ; Nyeck *et al.*, 2019). La géochimie des éléments majeurs reflète fortement les transformations minéralogiques au cours du processus d'altération, tandis que la distribution et la mobilisation des éléments traces fournissent des informations supplémentaires sur les processus pédogénétiques, comme l'activité biologique et/ou redox au sein du profil d'altération. Le lien entre le comportement de ces éléments traces et des étapes spécifiques de l'hydrolyse est généralement établi par l'utilisation combinée d'indices d'altération chimique (Gong *et al.*, 2013 ; Babechuk *et al.*, 2014) et le calcul des bilans d'altération (Kamgang *et al.*, 2009 ; Onana *et al.*, 2016b). Le comportement des REE, en particulier, permet de mieux comprendre les relations géochimiques entre les différents matériaux altérés ainsi que les processus redox qui prévalent au cours du processus de pédogenèse. La saprolite est formée par les produits de l'altération *in situ* des roches ; elle peut présenter différentes épaisseurs, traduisant différents degrés d'altération de la roche mère. Du point de vue pétrographique, les saprolites préservent tout ou partie des structures du substratum rocheux, d'où la distinction entre SG et SF. Ces structures sont détruites dans les sols au cours de la pédogenèse. La minéralogie montre que les saprolites, en plus des minéraux néoformés tels que les minéraux argileux et les oxyhydroxydes de fer, contiennent des minéraux primaires hérités de la roche mère. D'autres études, par contre, indiquent des discontinuités génétiques entre les matériaux d'altération au

sein d'un même profil d'altération (Tardy, 1993 ; Nahon, 2003 ; Nguetnkam *et al.*, 2006), spécifiquement dans les sols. La présence de ces discontinuités géochimiques est la conséquence des migrations latérales des matières le long des toposéquences. Cependant, très peu ou pas de profils d'altération, présentant une alternance atypique saprolite/sol/saprolite, au sein même de l'ensemble saprolitique, ont été observés et encore moins étudiés en zone équatoriale. Les filiations génétiques entre matériaux d'altération dans ce type d'organisation macromorphologique méritent d'être bien connues et, on les imagine probablement complexes.

Les études pédologiques effectuées en zones tropicale et équatoriale ont amené les scientifiques à définir les sols ferrallitiques comme étant des sols zonaux, étroitement liés à la végétation et au climat et, relativement indépendants de la roche mère (Duchauffour, 2001). Au dessus de l'ensemble saprolitique présentant l'alternance atypique saprolite/sol/saprolite, dans la zone de Sa'a, dans le Plateau sud camerounais, on observe l'organisation classique des sols, présentant des matériaux nodulaires reposant sur la saprolite fine et recouverts par des matériaux argileux meubles superficiels. L'intérêt de ces deux types matériaux, graveleux et argiles latéritiques, dans le domaine de la géotechnique est sans cesse croissant et ces matériaux sont l'objet de nombreux travaux scientifiques dans le monde. Ces travaux ont démontré que la qualité de ces matériaux dans les travaux d'ingénierie est fonction des caractéristiques de la roche mère. Par exemple, les matériaux latéritiques argileux meubles superficiels développés sur chloritoschistes archivent le mauvais comportement mécanique de la roche mère (Onana, 2010). Plus le degré de métamorphisme de la roche parentale est élevée, plus les graveleux latéritiques générés sont aptes comme matériaux de corps de chaussée en construction routière (Ngo'o Ze *et al.*, 2019). Qu'il s'agisse de graveleux latéritiques, de carapace ou de cuirasses latéritiques, d'argiles latéritiques, les sols latéritiques sont les sols les plus utilisés en construction en Afrique, et au Sud du Sahara en particulier, à cause de leur abondance et de leur coût d'exploitation relativement faible (Sikali et Djalal, 1987; Tockol, 1993 ; Kassogue *et al.*, 2002 ; Bohi, 2008 ; Millogo, 2008). L'argile, par exemple, est une matière première abondante qui présente une étonnante variété d'utilisations et de propriétés dépendant largement de sa structure et de sa composition minéralogique. L'argile est utilisée dans les industries de transformation, en agriculture, en ingénierie et en construction, dans les remédiations environnementales et dans de nombreuses autres applications. Les argiles peuvent prendre naissance dans des environnements divers, au sein des profils d'altération ou dans certains bassins de sédimentation. Les argiles latéritiques sont largement répandues dans les pays tropicaux comme le Cameroun où elles recouvrent ~67 %

du territoire national (Tardy, 1993). De nombreuses études ont montré que l'utilisation de ces matériaux en céramique est liée aux caractéristiques minéralogiques et géochimiques des matières premières et aux caractéristiques physico-mécaniques des matériaux crus et cuits (Hajjaji *et al.*, 2002 ; Onana *et al.*, 2019 ; Nyassa Ohandja *et al.*, 2020a). Il apparaît donc que les sols ferrallitiques sont étroitement liés à la végétation et au climat et ne sont pas 'relativement indépendants de la roche mère' mais, dépendent des caractéristiques de celle-ci. Il convient donc dans les zones équatoriales d'étudier chaque type de sol en fonction de la roche mère aux dépens de laquelle il se développe, afin d'éviter des généralisations abusives qui sont sources d'erreurs pouvant entraîner des conséquences négatives, surtout dans le domaine de l'ingénierie. La structure particulière litée des quartzites micacés de la zone de Sa'a entraîne une organisation macromorphologique particulière de l'ensemble saprolitique. L'organisation des sols reste, celle typique, que l'on rencontre en zone équatoriale. Il est donc judicieux d'étudier ces sols sur le plan géotechnique afin les situer par rapport aux autres sols latéritiques observés en zone équatoriale.

Le présent travail a donc un objectif principal double : démontrer, à partir des données pétrologiques, (1) que la composition et les caractéristiques macromorphologiques des roches cristalphylliennes, notamment celles des quartzites micacés, contrôlent le type et l'étendue des processus d'altération en zone équatoriale et (2) que, les sols, graveleux et argiles latéritiques, dérivés des processus pédogénétiques qui affectent les saprolites dérivées de ces roches, sont utilisables, respectivement, en construction routière et dans l'industrie du bâtiment.

Les objectifs spécifiques de l'étude sont :

- décrire les matériaux d'altération dérivés des quartzites micacés ;
- déterminer leurs compositions minéralogique et géochimique des matériaux, ainsi que les paramètres d'altération associés ;
- déterminer les paramètres géotechniques des graveleux latéritiques ;
- proposer un modèle mathématique de détermination du CBR des graveleux latéritiques ;
- déterminer les paramètres géotechniques des argiles latéritiques ;

Le présent travail, après l'introduction générale, comprend six chapitres :

- le chapitre I, 'Généralités', porte sur le contexte naturel de la zone d'étude et les travaux antérieurs complémentaires ;

- le chapitre II, 'Matériels et méthodes', présente les travaux réalisés sur le terrain et en laboratoire et, s'achève par la présentation des modes d'exploitation des résultats ;
- le chapitre III, 'Pétrographie, minéralogie et géochimie des matériaux d'altération d'un profil de référence' présente les principaux faits d'observation et d'analyse pétrologique ;
- le chapitre IV 'Caractérisation minéralogique, géochimique et géotechnique des graveleux latéritiques' se focalise sur les données géotechniques et leur variabilité statistique ;
- le chapitre V 'Caractérisation minéralogique, géochimique et géotechnique des argiles latéritiques superficielles et des argiles alluviales' est axé sur la présentation des données géotechniques des argiles latéritiques naturelles et des argiles latéritiques naturelles stabilisées aux argiles alluviales et à la chaux ;
- le chapitre VI, 'Exploitation et Discussion des résultats', définit le mode d'évolution des matériaux d'altération sur quartzites micacés et précise l'intérêt des sols dérivés de ces roches en géotechnique.

La conclusion générale ressort les principaux résultats obtenus au cours de ce travail, ainsi que les principales perspectives.

CHAPITRE I.

GENERALITES

Introduction

Le présent chapitre traite des généralités sur le cadre naturel de l'étude. Après une présentation du contexte naturel de la zone de Sa'a, le chapitre fait l'état des connaissances relatives au socle et aux matériaux d'altération du point de vue géologique et pétrologique en général et, géotechnique, spécifiquement.

I. Contexte naturel

I.1. Localisation géographique

La zone de Sa'a est située dans le Plateau sud camerounais, dans le département de la Lékoumou, entre 4°20'10" – 4°29'40" Nord et 11°23'30" – 11°29'50" Est (Fig. 1). Sa'a, principale ville de cette zone est située à 73 km de Yaoundé sur l'axe routier Yaoundé - Ntui.

I.2. Climat

Les données météorologiques recueillies dans les services de l'agriculture de la ville de Sa'a (1980 – 2020) révèlent que le total annuel des précipitations varie entre 1400 mm et 1500 mm (Tab. 1). Ces précipitations sont plus abondantes en septembre et en octobre. Le nombre de jours pluvieux varie entre 160 et 180, par an. Les températures moyennes annuelles varient entre 22,9°C et 25,8°C, avec des minima en août (19,1°C) et des maxima en mars - avril (31,1°C). Les valeurs de l'humidité relative sont comprises entre 71 % et 82 %. Le climat de la zone de Sa'a est caractérisée par deux saisons de pluies alternant avec deux saisons sèches (Fig. 2), plus accentuées vers le Nord. Le climat y est donc de type équatorial de transition (Suchel et Tsalefac, 1995).

I.3. Géomorphologie

I.3.1. Orographie

Trois types d'unités morphologiques sont identifiables dans la zone de Sa'a (Fig. 3) :

- l'unité morphologique d'altitude basse, inférieure à 500 m,
- l'unité morphologique d'altitude intermédiaire, comprise entre 500 et 600 m,
- l'unité morphologique d'altitude élevée, supérieure à 600 m.

Deux types de collines sont observables : les collines en forme de demi-orange et les collines à flancs dissymétriques (Vallerie, 1995).

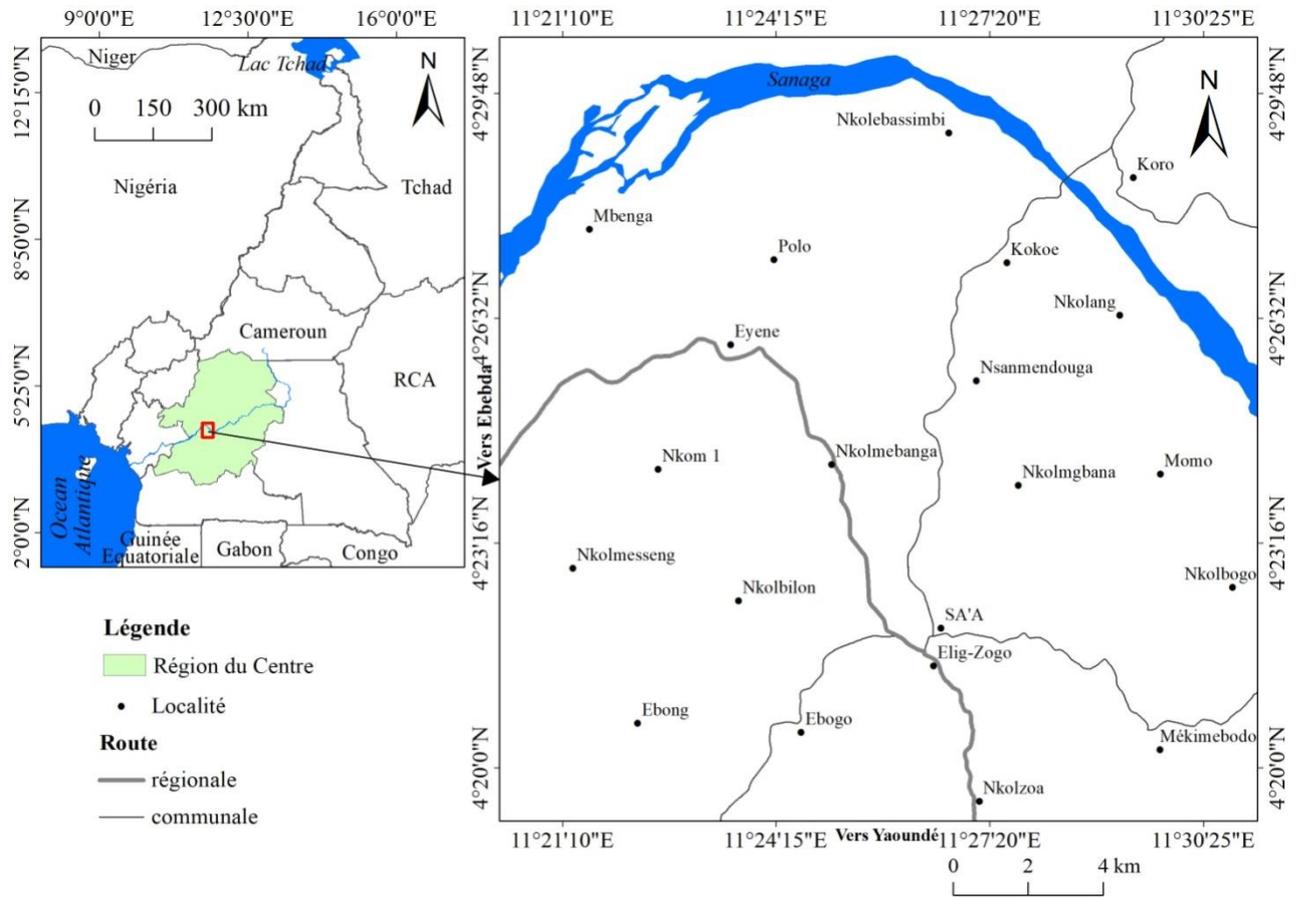


Figure 1. Carte de localisation de la zone de Sa'a (D'après la carte topographique de Bafia 1d au 1/50 000 NB-32-VI)

Tableau 1. Données météorologiques de la zone de Sa'a (1980 – 2020), d'après les services du Ministère de l'Agriculture

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc	Total	Moyenne
P (mm)	15	38	107	166	154	86	76	172	212	236	129	19	1502	-
T (°C)	25	26	25	25	25	24	23	23	23	24	24	24	-	24

P (mm) : Précipitations (mm) ; T (°C) : Températures en °C

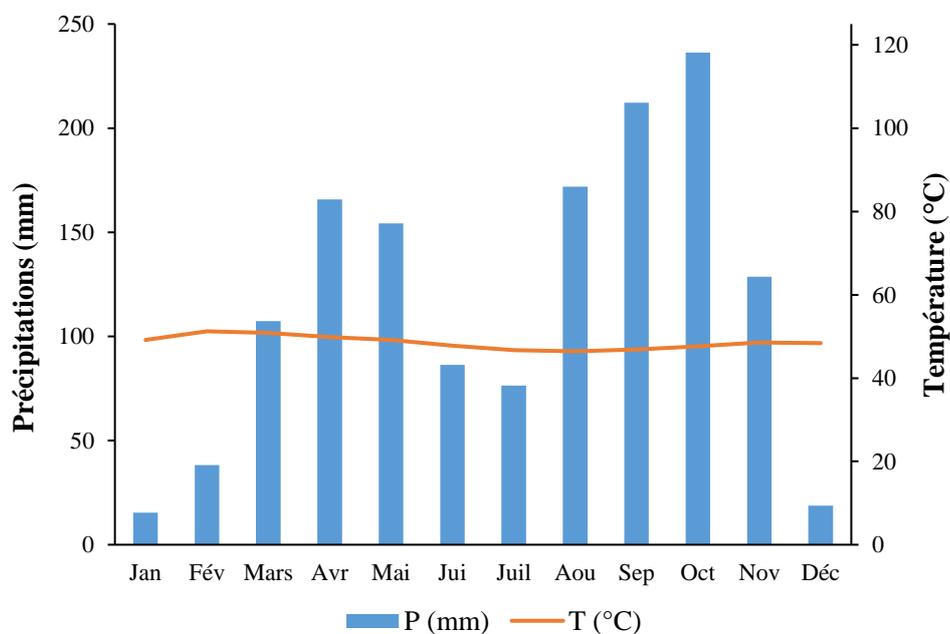


Figure 2. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957) appliqué aux données climatiques de la zone de Sa'a pour la période (1980 – 2020)

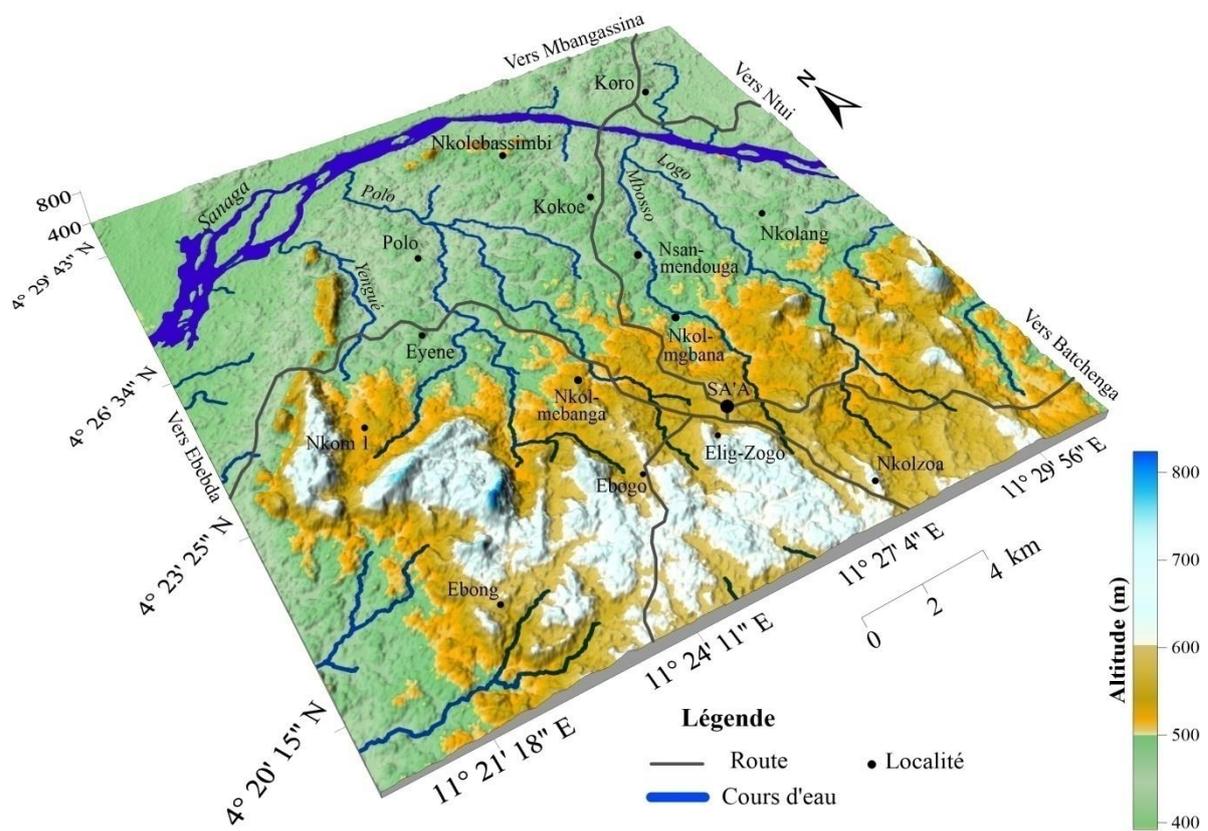


Figure 3. Carte géomorphologique de la zone de Sa'a (D'après la carte topographique de Bafia 1d au 1/50 000 NB-32-VI)

Les collines en forme de demi-orange sont très faiblement représentées ; elles présentent des versants dont de pentes sont de l'ordre de 10 %. Les collines dissymétriques dont les valeurs de pente varient entre 15 et 20 %, sont séparées par des vallées plus encaissées.

I.3.2. Hydrographie

La zone de Sa'a se localise dans le bassin de la Sanaga. Le réseau hydrographique dense, de structure parallèle au Nord et, dendritique au Sud, entaille fortement le relief (Fig. 3). Hormis la Sanaga, les cours d'eau les plus importants sont les rivières Polo (Ordre 3), Logo (Ordre 2) et Mbosso (Ordre 1).

I.4. Végétation et faune

La végétation est constituée de formations forestières au Sud de la zone d'étude. Ces formations forestières passent progressivement à une savane péri-forestière au Nord (Letouzey, 1985 ; Villiers et Santoir, 1995). Elles sont très dégradées par l'homme, mais la zone de Sa'a reste principalement couverte actuellement par quelques grands arbres (60 % de la superficie). La savane péri-forestière présente une végétation arbustive. . Cette savane est soit herbeuse à *Pennisetum purpureum et imperta* (herbes à éléphants et plantes de la famille des graminées), soit arbustive à *Terminalia glauscesceris* et *Ofromomum califolium*. L'activité faunique est importante, on observe des termitières en champignons, ainsi que de nombreux tortillons de vers de terre dans les vallées

I.5. Géologie

I.5.1. Roche

Le socle de la zone de Sa'a est constitué de roches appartenant à la zone mobile panafricaine (Gnotué *et al.*, 2015). Il constitue la « série de Sa'a » qui prolonge la série de Monatéle - Ebebda au Nord (Fig. 4). Les formations géologiques observables sont essentiellement des roches métamorphiques constituées de micaschistes, de quartzites micacés et de gneiss. Les micaschistes couvrent 30 % de la superficie de la zone étudiée. Ce sont des roches feuilletées formées de muscovite, de quartz, de biotite et de grenat. Elles présentent des intercalations de quartzites. Les quartzites micacés sont essentiellement constitués de quartz, associé à de la muscovite. Ces quartzites couvrent une superficie de 43 % environ. Ils forment des bancs très puissants et sont à l'origine de microreliefs plus ou moins accidentés fréquents dans la zone étudiée (Gnotué *et al.*, 2015).

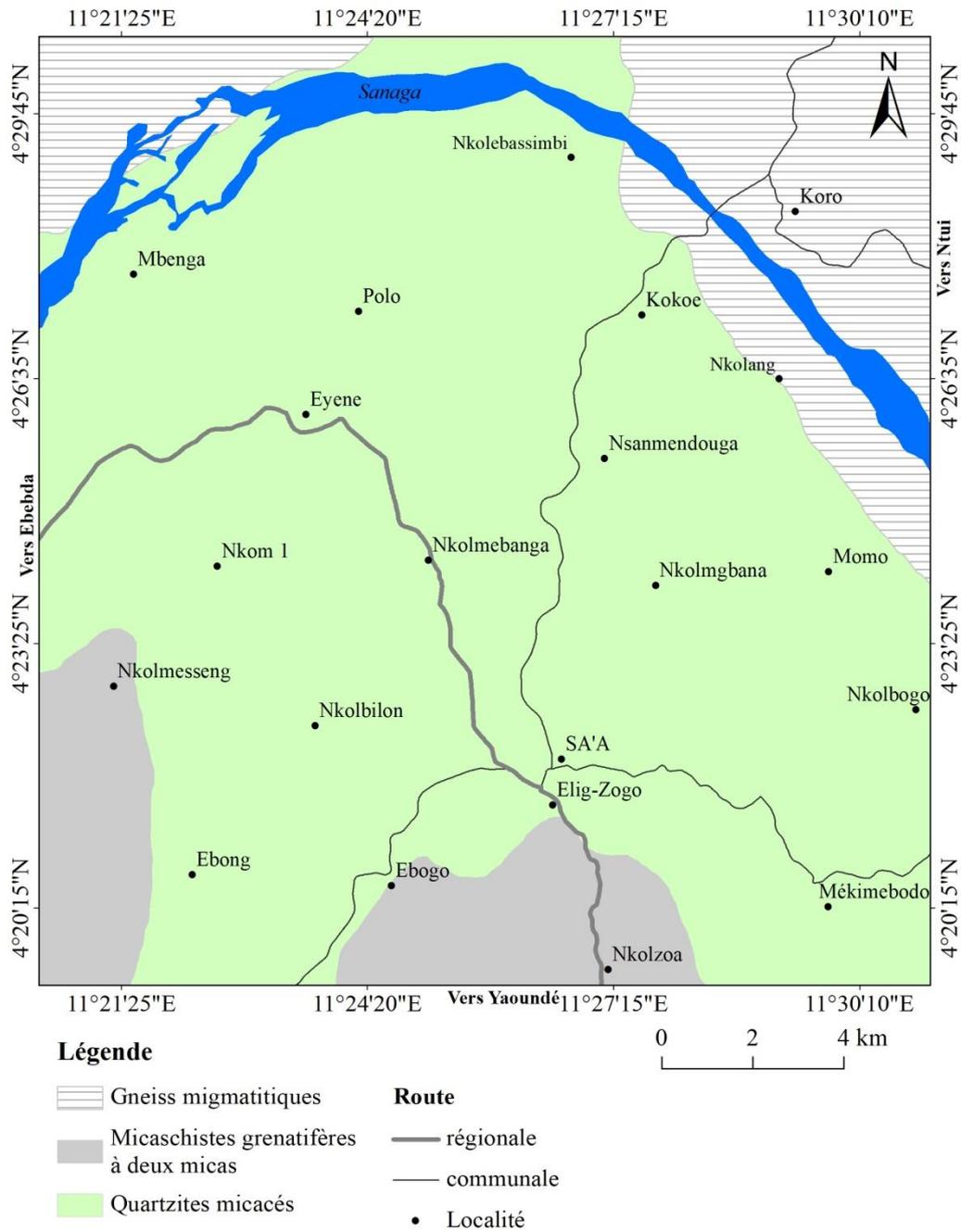


Figure 4. Carte géologique de la zone de Sa'a (D'après la carte géologique de Dumort, 1968)

Les gneiss couvrent environ 27 % de la superficie totale. Ils sont en association avec les micaschistes et les quartzites micacés. Ces gneiss sont des roches à grain fin et à foliation nette, présentant régulièrement des intercalations de quartzites.

I.5.2. Sols

La zone étudiée appartient au domaine des sols ferrallitiques. Ces sols formés aux dépens de roches métamorphiques sont majoritairement rouges dans l'unité morphologique d'altitude supérieure à 600 m, ocres dans l'unité morphologique d'altitude comprise entre 500 et 600 m, et jaunes dans l'unité morphologique d'altitude inférieure à 500 m. Sur le plan physique, ils présentent une épaisseur variable (2 à 5 m) dépendant de la nature du substrat rocheux. L'horizon nodulaire se compose de cailloux et de blocs, d'épaisseurs variables (0,5 à 1,5 m). Le pH est compris entre 5,5 et 6,0. Les teneurs en matières organiques sont variables (2 à 4 %) et diminuent avec la profondeur. L'horizon meuble de surface est argilo-sableux (35 à 45 % d'argile). Ce taux d'argile augmente très progressivement (50 à 55 %) jusqu'à l'horizon d'altération, dans lequel, on observe une chute assez brutale (20 à 25 %) accompagnée d'un accroissement sensible des limons. Les rapports C/N compris entre 10 et 12, indiquent une bonne minéralisation de la matière organique. Le taux de saturation du complexe absorbant est de 30 à 40 % en surface et baisse de 15 à 20 % dans les horizons sous-jacents (Vallerie, 1995).

I.6. Géographie humaine et économique

Les populations autochtones de la zone de Sa'a appartiennent au groupe ethnique des Menguissa. La ville attire aussi de nombreux allochtones : Eton, Bamenda, Sanaga, Yambassa, Haoussa, Bamiléké et Bassa, créant un brassage important. Les populations se retrouvent à l'intérieur des villages aux abords des axes routiers.

Les activités économiques sont l'agriculture, la chasse, la pêche et la cueillette. On y trouve des produits vivriers tels que *Manihot esculenta*, *Zea mais*, *Xanthosoma sagittifolium*, *Discorea bulbifera*, *Arachis hypogaea*, ainsi que les cultures maraichères comme *Solanum lycopersicum*, *Capsicum annum*, *Cucumis sativus* et *Abelmoschus esculenta*. La culture de *Theobroma cacao* reste toutefois dominante.

II. Travaux antérieurs complémentaires

II.1. Graveleux latéritiques

II.1.1. Définitions et généralités

Le terme « latérite » a été employé pour la première fois par Buchanan en 1807 pour désigner les dépôts ferrugineux recouvrant de vastes surfaces dans les régions montagneuses de Malabar en Inde (Bohi, 2008 ; Massamba Ndiaye, 2013 ; Oyelami et Van Rooy, 2016). C'est l'un des meilleurs matériaux de construction, possédant des cavités et des pores, possédant de grandes quantités de fer, et de coloration rouge ou jaune. Du point de vue géotechnique, ce sont des sols meubles de granulométrie 0/20 ou 0/40 mm, comportant 10 % à 35 % de fines et un « squelette » (refus sur le tamis de 2 mm) de 20 % à 60 % (Bagarre, 1990).

Lors des journées africaines de géotechnique tenues du 3 au 7 octobre 1988 à Yamoussoukro, il a été suggéré de limiter l'usage du mot latérite à son emploi comme adjectif dans des expressions sans ambiguïté comme : argile latéritique, graveleux latéritiques et carapace ou cuirasse latéritique (Bohi, 2008).

II.1.2. Caractéristiques génétiques

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

L'induration des matériaux dépend de plusieurs facteurs :

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

Les graveleux latéritiques sont caractérisés par leur forte teneur en oxydes et hydroxydes de fer et/ou d'aluminium qui peut atteindre 80 % du matériau du fait de la

ferrallitisation (Tockol, 1993 ; Millogo, 2008). Le fer est présent sous forme de goethite [$\alpha\text{Fe}_2\text{O}(\text{OH})$] ou d'hématite ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$). L'aluminium est contenu dans la gibbsite ($\gamma\text{Al}(\text{OH})_3$) et dans la boehmite ou le diaspore [$\text{AlO}(\text{OH})$]. Les principaux travaux réalisés sur les graveleux latéritique du Plateau sud camerounais ont porté sur ceux développés sur roches métamorphiques (chloritoschistes, schistes, gneiss, migmatites, quartzites micacées) et sur roches plutoniques (granites et syénites).

Les graveleux latéritiques développés sur roches métamorphiques sont composés de quartz, kaolinite, goethite et hématite. La gibbsite est présente dans les matériaux sur amphibolites et sur quartzites micacés, tandis que les schistes et les quartzites micacés contiennent de la muscovite. Les teneurs élevées en SiO_2 sont comprises entre 23,76 et 70,99 %, celles modérées à moyennes en Al_2O_3 , entre 9,00 et 27,26 % et, celles modérées à fortes en Fe_2O_3 , entre 7,38 et 44,18 %. Les teneurs en TiO_2 sont en moyenne égales à 1,00 %. Le taux de sesquioxydes dans ces matériaux oscille entre 41,10 et 61,80 %. (Onana, 2010 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2012 ; Onana *et al.*, 2017 ; Ndzié Mvindi, 2019 ; Ngo'o Ze *et al.*, 2019).

Les graveleux latéritiques développés sur roches plutoniques présentent des teneurs élevées en SiO_2 et, modérées en Al_2O_3 et Fe_2O_3 . La valeur de perte au feu dans ces matériaux est supérieure à 9 % et les autres oxydes sont présents, soit en teneurs faibles, soit en traces. Ces matériaux sont composés de quartz, kaolinite, hématite et gibbsite. La goethite et l'ilménite sont présentes dans les 2/3 des matériaux étudiés tandis que la muscovite est présente uniquement dans les graveleux latéritiques développés sur syénites et charnockites (Nguetnkam *et al.*, 2006 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017).

Les graveleux latéritiques développés sur basaltes (Nyemb Bayamack *et al.*, 2019) sont majoritairement constitués de goethite (20 – 57 %), kaolinite (18 – 30 %), hématite (8 – 18 %), magnétite (9 – 16 %), corindon (12 – 14 %) et ilménite (3 – 13 %). Ces graveleux latéritiques développés sur basaltes présentent des teneurs modérées à élevées en Fe_2O_3 (15,05 – 37,24 %) et Al_2O_3 (24,86 – 43,46 %) et, faibles en SiO_2 (10,07 – 17,62 %). Les autres oxydes sont présents soit en teneurs faibles, soit en traces (Nyemb Bayamack *et al.*, 2019).

II.1.3. Caractéristiques géotechniques

Les travaux sur les graveleux latéritiques dérivés des roches métamorphiques ont porté sur les gneiss, les migmatites, les micaschistes, les schistes et les quartzites. Les valeurs du poids volumique des grains solides varient entre 24,4 et 36,9 kN/m^3 . Les valeurs des paramètres de plasticité sont comprises entre 40 et 81 % pour la limite de liquidité (LL) et, entre 10 et 39 % pour l'indice de plasticité (IP). Les valeurs de densité sèche maximale

(DSM) oscillent entre 1,75 et 2,34, pour des teneurs en eau optimale (TEO) respectives de 9,50 et 24,0 %. Les valeurs de CBR sont comprises entre 21 et 88 %. Ces graveleux latéritiques sont utilisables en couche de fondation pour trafics faibles à moyens T1 – T3 et, en en couche de base, pour faibles trafics T1 (Onana, 2010 ; Nzabakurikiza *et al.*, 2012 ; Kamtchueng *et al.*, 2015 ; Ndzié Mvindi *et al.*, 2017 ; Ndzié Mvindi, 2019).

Les graveleux latéritiques développés sur roches plutoniques présentent des valeurs de poids volumiques des grains solides γ_s de comprises entre 26,9 et 29,9 kN/m³. Les valeurs de LL varient entre 46 et 95 %, pour des valeurs de IP comprises entre 20 et 55 %. Les valeurs paramètres Proctor varient de 1,91 – 2,20 pour la DSM et 8,6 – 14,5 % pour la TEO. Les valeurs de CBR oscillent entre 31 et 78 %. Ces matériaux sont utilisables en couche de fondation pour tout type de trafic et, en couche de base, pour les chaussées à faible trafic T1 (Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017).

Les graveleux latéritiques dérivés des roches basaltiques présentent des pourcentages des fines compris entre 12 et 38 %. Les valeurs de γ_s varient entre 27,2 et 29,0 kN/m³. Les valeurs de LL oscillent entre 51 et 79 %, pour des valeurs de IP comprises entre 20 et 35 %. Les valeurs des paramètres de compactage sont comprises entre 1,72 et 1,98 pour DSM, entre 14,0 et 25,6 % pour TEO et, entre 32 et 98 % pour CBR. Ces matériaux sont utilisables en couche de fondation pour tout type de trafic et, en couche de base pour les trafics faibles T2 (Nyemb Bayamack *et al.*, 2019).

II.1.4. Corrélations entre caractéristiques génétiques et géotechniques

Des corrélations entre la composition minéralogique de la roche mère et les propriétés géotechniques des graveleux latéritiques ont été établies (Bagarre, 1990 ; Adeyemi, 1995 ; Nkougou *et al.*, 2004 ; Fall et Sarr, 2007). Les roches mères acides, riches en quartz, génèrent des graveleux latéritiques à valeurs de γ_s faibles. Les roches basiques, riches en ferromagnésiens, produisent des latérites plus épaisses et plus denses. La recherche des relations entre la composition minéralogique des graveleux latéritiques et leur comportement géomécanique est menée dans le but, pour certains, de faciliter la prospection des gisements (Mesida, 1987 ; Fall, 1993 ; Nkougou *et al.*, 2004) et, pour d'autres, de prédire leur comportement sur le chantier (Bagarre, 1990 ; Fall, 1993 ; Tockol, 1993 ; Millogo, 2008 ; Onana, 2010). Les corrélations établies sont nombreuses, différentes et parfois contradictoires d'un auteur à un autre. Un lien a été établi entre le CBR et certains paramètres des sols. Il en ressort que, la nature argileuse du sol a une influence significative sur les valeurs de la résistance à la compression et de CBR et, que le CBR est mieux corrélé à la limite de

plasticité (LP), selon que le sol est kaolinitique ou montmorillonique (Nagaraj et Suresh, 2018). Vu l'hétérogénéité des propriétés géotechniques des graveleux latéritiques et la diversité des résultats et des corrélations statistiques obtenues sur ces matériaux, il est nécessaire d'étudier les graveleux latéritiques à une échelle régionale pour préciser les liens entre leurs caractéristiques génétiques et leurs propriétés géotechniques (Ndzié Mvindi, 2019).

II.1.5. Classification des graveleux latéritiques

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

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

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

Plusieurs classifications adaptées au contexte tropical ont par la suite été proposées. Il s'agit de la classification de la Lyon Associates (1971), de la classification Ivoirienne établie par le Laboratoire du Bâtiment et Travaux Publics (LBTP), de la classification du Centre d'expertise du bâtiment et des travaux publics (CEBTP, 1984), et de la classification de Rodrigues *et al.* (2010), spécifique aux sols latéritiques et qui est basée sur 06 paramètres. La diversité des systèmes de classification confirme l'hétérogénéité des graveleux latéritiques et la diversité des possibilités d'utilisation de ces matériaux suivant les aires géographiques. C'est dans ce sens que certains auteurs pensent que des classifications régionales de ces matériaux seraient les mieux adaptées (Tockol, 1993 ; Bohi, 2008).

II.1.6. Spécification des graveleux latéritiques en construction routière

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

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

Les graveleux latéritiques correspondent aux classes S5, S6 et S7 et, les graves argileuses, aux classes S2, S3 et S4.

II.1.6.1. Couche de forme

Les spécifications requises pour la couche de forme sont les suivantes : CBR > 10 %, fines < 35 ou 45 %, IP < 20 ou 30 % et, gonflement linéaire < 2 %.

II.1.6.2. Couche de fondation et couche de base

Les graveleux latéritiques utilisables en couche de fondation et en couche de base doivent présenter les caractéristiques suivantes (DEGN, 1987) : dimension maximale des grains ≤ 60 mm, pourcentage des passants au tamis de $80 \mu\text{m} < 35$, IP < 35 % avec LL < 70 %, CBR ≥ 15 %, pour la couche de fondation et, CBR ≥ 30 %, pour la couche de base.

II.2. Argiles latéritiques

II.2.1. Minéralogie et géochimie des matériaux latéritiques

Les compositions minéralogique et géochimique d'une argile ont une influence importante sur son comportement au séchage et à la cuisson (Baccour *et al.*, 2009). La composition minéralogique et la granulométrie idéales d'une argile destinée à la production des briques et tuiles cuites (Berton et Le Berre, 1983) est :

- kaolinite et illite à proportion dominante, smectite à moins de 10 % si possible < 5 %, sable quartzueux à proportions variables (30 – 40 %), calcite fine (5 – 10 %, mais tolérable si moins de 25 %) ;
- impuretés : matière organique en faible proportion (< 1 %), $\text{CaSO}_4 < 4\%$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 < 0,4$ % et $\text{MgSO}_4 < 1$ %. L'hématite est généralement considérée comme colorant ;

- teneur en argile suffisante pour une plasticité adéquate au façonnage (40 % d'argile pour la brique cuite associée à environ 70 % de sable (0,2 – 0,5 mm) lorsqu'il s'agit des tuiles) ;
- l'ajout des oxydes métalliques (MnO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , $CaCO_3$, $CaMgCO_3$, chromites, permet d'obtenir la couleur souhaitée et/ou d'améliorer la porosité du produit fini.

Les compositions minéralogique et géochimique influencent également les propriétés des argiles. Les argiles latéritiques de Monatélé et d'Ebebda (Centre Cameroun) sont constituées majoritairement de quartz, muscovite, kaolinite, corindon et rutile (Onana *et al.*, 2016a). Ces minéraux sont associés à la goethite, l'hématite et l'ilménite. Les argiles latéritiques d'Ayos (Centre Cameroun) sont constituées majoritairement de quartz, gibbsite et kaolinite, hématite, goethite et muscovite, comme minéraux principaux (Ntouala *et al.*, 2016). L'hématite et la goethite sont souvent à l'origine de la couleur rouge et jaune rencontrée dans les matériaux crus. SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 sont les oxydes majoritaires dans les argiles latéritiques en zone de Plateau sud camerounais (Mbumbia *et al.*, 2000 ; Ntouala *et al.*, 2016 ; Onana *et al.*, 2016a, 2019). La faible teneur des fondants (Na_2O , CaO , MgO , K_2O) dans les argiles latéritiques dans cette zone entraîne un frittage insuffisant lors de la cuisson (Onana *et al.*, 2016a). Les fortes teneurs en Fe_2O_3 (7,66 %) dans les argiles latéritiques d'Ayos limitent leur utilisation dans la fabrication des produits céramiques (Ngon Ngon *et al.*, 2009 ; Ntouala *et al.*, 2016).

II.2.2. Paramètres géotechniques des matériaux argileux

De nombreux auteurs se sont intéressés récemment à l'étude des matériaux argileux en vue de leur application dans le domaine du bâtiment (Souza *et al.*, 2002 ; Millogo, 2008 ; Ngon Ngon *et al.*, 2009, 2012 ; Millogo *et al.*, 2011 ; Diko *et al.*, 2011 ; Ntouala *et al.*, 2016 ; Onana *et al.*, 2016a, 2019). Ces études montrent que la granulométrie joue un rôle dans le façonnage, le séchage et la cuisson. Lorsque la granularité du matériau n'est pas adéquate, de nombreux auteurs font recours à la stabilisation. Les matériaux latéritiques d'Ayos, constitués majoritairement d'argiles sablo-limoneuses présentent une bonne aptitude pour la fabrication des tuiles et des briques de maçonnerie (Ntouala *et al.*, 2016). Les matériaux latéritiques de Monatélé - Ebebda constitués d'argile, sable et limon, sont bons pour la fabrication des tuiles, des blocs légers et des briques pleines (Onana *et al.*, 2016a).

Tableau 1. Normes brésiliennes de construction des bâtiments (Souza *et al.*, 2002)

Matériaux	Caractéristiques	
	Absorption d'eau (WA), %	Résistance à la compression (σ), MPa
Briques denses	WA < 25	$\sigma \geq 2$
Blocs céramiques	WA < 25	$\sigma \geq 5,5$
Tuiles	WA < 20	$\sigma \geq 6,5$

La plasticité d'une argile est sa propriété à se prêter à une déformation sans fissure. Elle dépend de la distribution de la taille des particules et du type d'argile (Millogo, 2008, Ngon Ngon *et al.*, 2009). Les matériaux latéritiques d'Ayos, Monatélé-Ebebda, Yaoundé (Centre Cameroun) ayant un pourcentage en fines élevé, présentent des valeurs de IP supérieures à 15 % (Ntouala *et al.*, 2016).

La distribution des particules, la plasticité et la composition minéralogique des matériaux naturels influencent les propriétés des matériaux utilisés dans l'industrie du bâtiment (Murray, 2007 ; Diko *et al.*, 2011). Les matériaux qui possèdent des teneurs élevées en argiles présentent de fortes valeurs de retrait linéaire (RL) et d'absorption d'eau (WA) et de faibles valeurs de résistance à la flexion (Diko *et al.*, 2011). Les valeurs de RL élevées entraînent les déformations et microfissures sur les briques produites (Onana *et al.*, 2016a). L'absorption d'eau est un paramètre nécessaire pour le choix des matériaux en céramique. Trois domaines d'utilisation des argiles en céramique ont été définis selon la norme brésilienne en fonction de WA et de la résistance à la flexion (σ_f) (Tab. 2).

Conclusion

La zone de Sa'a est une plaine d'altitude moyenne comprise entre 400 et 600 m. Elle est soumise à un climat équatorial de transition à 04 saisons inégalement réparties sur toute l'année. Le réseau hydrographique est de type dendritique avec pour cours d'eau principal la Sanaga. Le relief comprend trois unités morphologiques. La végétation appartient au grand domaine de la forêt humide semi-caducifoliée à Sterculiacées et Ulmacées, dégradée par endroits par une population dont les activités principales sont l'agriculture, la chasse et la pêche. Les sols rencontrés dans la zone étudiée sont surtout des sols ferrallitiques développés majoritairement sur quartzites micacés. Ces sols ferrallitiques sont des matériaux évolutifs et leurs caractéristiques minéralogiques, géochimiques, physiques et mécaniques sont variables d'un lieu géographique à un autre et sont fonction de la roche parentale. Ces sols sont constitués de graveleux et d'argiles latéritiques. La méthodologie retenue afin de comprendre la pétrologie matériaux d'altération sur quartzites micacés et l'intérêt géotechnique des sols dérivés de ces roches est présentée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II.

MATERIELS ET METHODES

INTRODUCTION

A la suite des enquêtes bibliographiques et de la revue de la littérature, les travaux de terrain ont porté sur la localisation des sites, la description des profils et le prélèvement des échantillons. Les travaux de laboratoire ont consisté aux analyses pétrographiques, physico-chimiques, minéralogiques, géochimiques et, aux essais géotechniques sur les graveleux et argiles latéritiques.

I. Enquêtes bibliographiques

Les enquêtes bibliographiques et la revue de la littérature ont consisté en l'exploitation de cartes topographiques et géologiques et, en la lecture des articles et des ouvrages scientifiques.

II. TRAVAUX DE TERRAIN

II.1. Localisation des points de prélèvement

Douze sites de prélèvement ont été retenus, 11 puits pour les graveleux latéritiques et argiles latéritiques développés sur quartzites micacés et 01 profil d'altération complet sur quartzites micacés également (Tab. 3). Les points de prélèvement sont soit des puits forés jusqu'à la roche (Fig. 5), soit des puits forés jusqu'à l'horizon nodulaire (Fig. 5). Le matériel utilisé comprend un appareil photo muni d'un récepteur *Global Positioning System (GPS)*, une carte topographique de Sa'a NA-33-XIX-4c à l'échelle 1/50 000.

II.2. Echantillonnage

Le prélèvement des échantillons a été effectué à l'aide d'une pelle et d'un marteau, par grattage sur les parois des puits. Les échantillons destinés aux analyses minéralogiques et géochimiques ont été prélevés et conditionnés dans des sachets en plastique. Les échantillons destinés aux essais géotechniques ont été prélevés dans des sacs en plastique d'une contenance de 50 kg. Environ 200 kg de matériaux ont été prélevés par puits pour les essais de caractérisation géotechnique des sols étudiés.

II.3. Identification des échantillons

L'encodage des échantillons a été effectué à l'aide d'un marqueur indélébile. La nomenclature adoptée comporte un préfixe constitué des deux lettres tirées du nom de la localité où le matériau a été prélevé.

Tableau 3. Localisation des points de prélèvement

Echantillon	Localité	Roche mère	Latitude Nord	Longitude Est	Altitude (m)
NE	Nkolebassimbi	Quartzites micacés	4°28'51,1''	11°26'05,0''	505
KO	Kokoe		4°27'59,8''	11°27'46,5''	472
NM1	Nkolmgbana		4°24'16,7''	11°27'29,8''	521
NS	Nsanmendouga		4°25'54,0''	11°27'40,7''	479
EY	Eyene		4°26'03,2''	11°22'53,1''	461
PO	Polo		4°27'06,9''	11°24'21,0''	472
NK	Nkom 1		4°25'14,0''	11°22'10,0''	485
NM	Nkolmebanga		4°24'35,3''	11°25'07,7''	524
NA	Nkolang		4°25'52,4''	11°29'02,2''	468
EB	Ebogo		4°21'41,7''	11°25'04,6''	589
EZ	Elig-Zogo		4°21'51,1''	11°26'05,4''	562
Profil d'altération	Sa'a		4°21'50,2''	11°26'05,6''	574

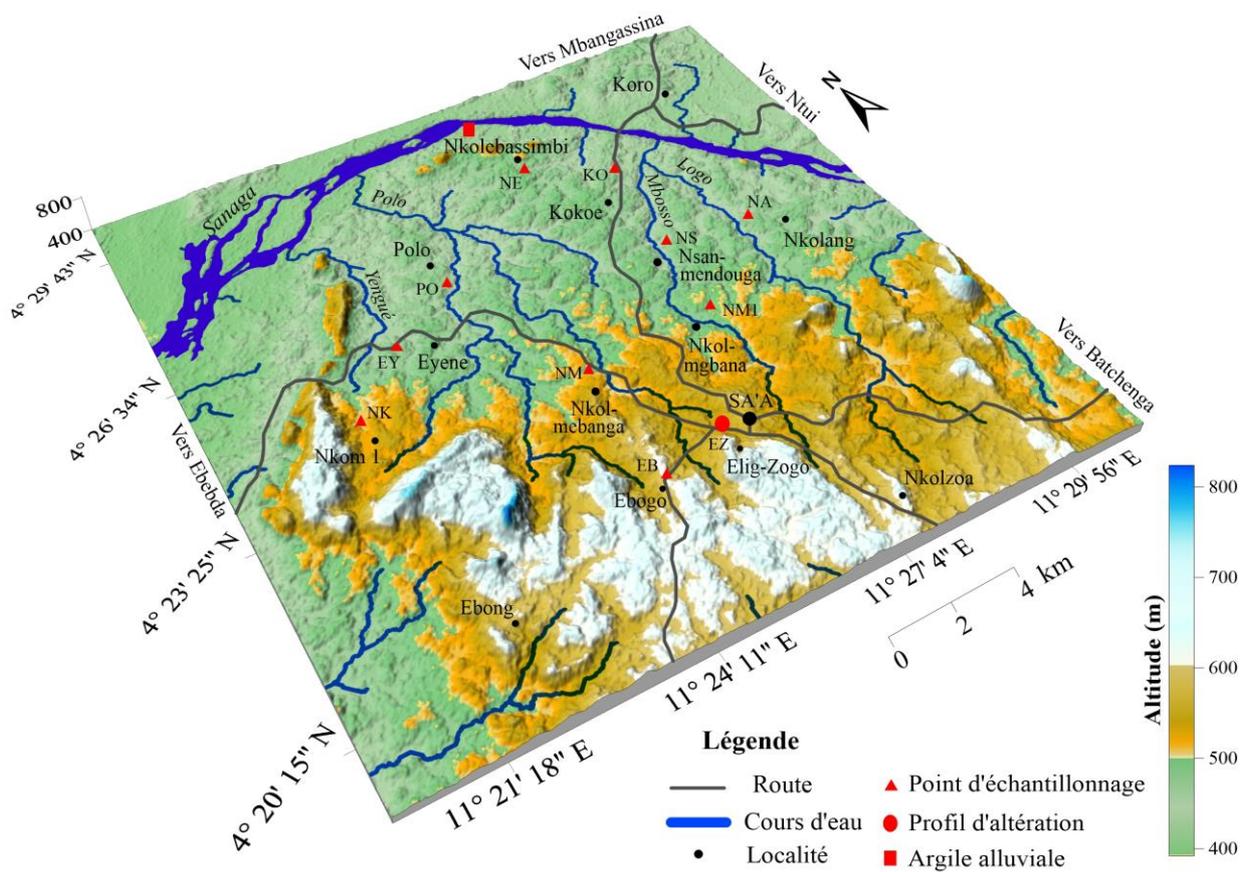


Figure 5. Carte d'échantillonnage (D'après la carte topographique de Bafia 1d au 1/50 000 NB-32-VI)

Par exemple, EB désigne un échantillon prélevé à Ebogo. Dans le cas où les lettres sont identiques, le chiffre 1 est ajouté au code de l'échantillon de matériau pour les distinguer. Par exemple NM et NM1 désignent les échantillons de matériaux de Nkolmebanga et Nkolmgbana, respectivement. De plus, les lettres N (ou C) et m sont ajoutés au code des échantillons de graveleux latéritiques destinés aux essais géotechniques. Par exemple, EY-N et EY-NC, désignent des matériaux prélevés dans le niveau nodulaire et dans le niveau nodulaire caillouteux de la localité d'Eyéné, respectivement. Pour les matériaux argileux superficiels, aucun préfixe n'est ajouté au code de l'échantillon. Par exemple, EB désigne un matériau argileux latéritique dans la localité d'Ebogo.

III. TRAVAUX DE LABORATOIRE

III.1. Analyses pétrologiques

Les échantillons de matériaux d'altération sélectionnés pour les analyses physico-chimiques, minéralogiques et géochimiques ont été séchés à l'étuve à température ambiante (~30°C). Ces matériaux ont ensuite été broyés au Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et d'Altérologie du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, à l'aide d'une pulvérisette électrique de marque Fritsch.

III.1.1. Analyses physico-chimiques

La couleur a été déterminée à l'aide de la charte des teintes Munsell (Munsell Color Charts 2000). Les données de pH et Eh des matériaux ont été obtenues à l'aide d'un pH/Eh-mètre Shott Geräte CG818 au Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et d'Altérologie du Département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I.

III.1.2. Analyses minéralogiques

La minéralogie des poudres d'échantillons de roche et de matériaux d'altération a été déterminée par diffractométrie des rayons X. L'analyse est effectuée sur des poudres de granulométrie <80 µm, à l'aide d'un PAnalytical X'PERT PRO équipé d'un monochromateur utilisant un rayonnement CoK α de longueur d'onde $\lambda = 1,7854 \text{ \AA}$, sur une plage de 2,5° à 35° 2 θ et un pas de 0,05° 2 θ /min, à 40 kV et 45 mA. Ces analyses ont été effectuées dans les laboratoires de Géosciences de l'*Ontario Geological Survey* à Sudbury (Canada).

III.1.3. Analyses géochimiques

La composition géochimique de la roche mère et des matériaux d'altération a été déterminée par fluorescence aux rayons X. Les échantillons de poudre ont d'abord été enflammés puis fondus avec un flux de tétraborate de lithium avant d'être analysés avec un spectromètre à fluorescence X à dispersion de longueur d'onde RIX-3000 de marque Rigaku. Le matériau de référence international utilisé était BIR-1-1243. Les normes internes étaient MRB-29-8539 et NPD-1-0965. Les valeurs d'erreur relative des échantillons dupliqués analysés varient entre 1 % et 5 %. Les concentrations en éléments traces (y compris les REE) de la roche mère et des matériaux d'altération ont été déterminées par spectrométrie de masse à plasma inductif (ICP-MS de l'Anglais *Inductively coupled plasma-Mass spectrometry*) IMC-100. Les échantillons ont été préparés par dilution acide et analysés par digestion acide dans les béchers fermés. Les normes internationales et internes pour les matériaux étaient respectivement SY-4 et MRB-29-8497. Les valeurs d'erreur relative varient entre 0,007 et 10 %. Les teneurs en NiO ont été déterminées par ICP-MS et, celles en FeO, par titrimétrie. Toutes ces analyses ont été réalisées dans les laboratoires de Géosciences de l'*Ontario Geological Survey* à Sudbury au Canada. Les données de Fe₂O₃ ont été obtenues à l'aide de la formule suivante (Ekodeck et Kamgang, 2011) : $Fe_2O_3 = 1,111 \times [(0,9 \times Fe_2O_{3t}) - FeO]$ (1).

III.2. Travaux géotechniques

Les essais géotechniques et mécaniques ont été réalisés au Laboratoire National de Génie Civil (LABOGENIE), dans les laboratoires de la Mission de Promotion des Matériaux Locaux (MIPROMALO) à Yaoundé et au Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et d'Altérologie de l'Université de Yaoundé I. Ces essais ont été réalisés sur les matériaux naturels et sur les mélanges à divers pourcentages d'adjuvants, argiles alluviales et chaux, notamment sur les matériaux argileux superficiels.

III.2.1. Essais géotechniques sur les graveleux latéritiques

III.2.1.1. Propriétés physiques

III.2.1.1.1. Poids volumique des grains solides

Le poids volumique des grains solides ou poids volumique absolu est, par définition, le poids par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains. La méthode utilisée pour réaliser l'essai est celle du pycnomètre décrite par la norme française NF P 94 – 054 (AFNOR, 1991).

III.2.1.1.2. Limites d'Atterberg

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

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

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considérée, exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute. Seules LL et LP ont été déterminées sur les matériaux étudiés.

L'indice de plasticité IP, qui définit l'étendue du domaine plastique, est particulièrement important. La formule de calcul de cet indice est :

$$IP (\%) = LL - LP \quad (2)$$

L'indice IP permet d'évaluer la quantité et le type d'argiles présentes dans un matériau. Il définit donc l'argilosité d'un matériau. La détermination des limites d'Atterberg a été réalisée selon la norme française NF P 94 – 051 (AFNOR, 1993).

III.2.1.1.3. Valeur de bleu de méthylène

La valeur de bleu de méthylène d'un sol (VBS) mesure par dosage, la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par un matériau mis en suspension dans l'eau. Cette quantité est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du sol. L'essai de détermination des valeurs de bleu de méthylène a été réalisé selon la norme française NF P 94 – 068 (AFNOR, 1998). La classification des matériaux, en fonction des résultats de cet essai, est présentée dans le tableau 4.

III.2.1.1.4. Granulométrie

La granulométrie ou essai d'analyse granulométrique est l'étude de la dimension et de la répartition en différentes classes des grains d'un matériau. Elle consiste en deux procédés le tamisage et la sédimentométrie. La méthode par tamisage a été effectuée la totalité de l'échantillon de matériau, à l'aide d'une colonne de 08 tamis à mailles carrées, dont les diamètres étaient 8 – 5 – 4 – 2 – 1 – 0,5 – 0,315 – 0,080 mm. La méthode par sédimentométrie a été utilisée pour les grains les plus fins de diamètre inférieurs à 0,080 mm. Cette méthode consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau. Plus les grains sont fins, plus la vitesse de décantation est lente (loi de Stockes).

Tableau 4. Classification des sols selon les valeurs de bleu de méthylène (AFNOR, 1998)

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

La mesure de la densité de la suspension à des intervalles de temps variables permet de calculer la proportion de grains de chaque diamètre. Les analyses granulométriques par tamisage à sec et par sédimentométrie ont été réalisées selon les normes françaises NF P 94 – 056 (AFNOR, 1996) et NF P 94 – 057 (AFNOR, 1992), respectivement.

III.2.1.1.5. Classification

Le but d'une classification géotechnique est, à partir des observations de terrain et d'essais d'identification simples en laboratoire, de prévoir le comportement mécanique des matériaux (Tockol, 1993). La classification permet également de regrouper les sols en familles aux caractéristiques géomécaniques voisines (Bagarre, 1990). Plusieurs systèmes de classification sont utilisables (Anonyme, 1987 ; Bagarre, 1990 ; Millogo, 2008).

L'indice de groupe I_g des matériaux est l'un des paramètres importants dans les systèmes de classification. Cet indice permet de préciser l'utilité des matériaux comme couches d'infrastructures en construction routière.

La classification proposée par le CEBTP - ISTED (Bagarre, 1990) tient compte de 05 paramètres dont le pourcentage des fines (f), l'indice de plasticité (I_p), le produit $f \times I_p$, la densité sèche OPM et la teneur en eau optimale (w_{opt}). Dans cette classification, les graveleux GL1 représentent de bons matériaux pour couches de fondation et pour couches de base, après traitement. Les graveleux GL2 constituent des matériaux intermédiaires qui sont rarement utilisables en couches de fondation. Les matériaux du groupe GL3 conviennent aux remblais et couches de forme. Ces trois classes de matériaux (Tab. 5) sont adaptées aux routes non revêtues.

III.2.1.1.6. Paramètres dérivés

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

$$A_{cb} = \frac{VBS}{\% < 2 \mu m} \quad (3)$$

$$G_m = \frac{300 - (\% \leq 2 \text{ mm} + \% < 425 \mu m + \% < 80 \mu m)}{100} \quad (4)$$

Tableau 5. Paramètres de la classification CEBTP - ISTED (Bagarre, 1990)

Groupe	f x IP	Caractéristiques mécaniques
GL1	< 250	CBR = 20 à 80, DSM = 2,1 à 2,50, TEO = 5 à 8
GL2	250 – 600	CBR = 15 à 40, DSM = 2 à 2,25, TEO = 7 à 10
GL3	600 – 1600	CBR < 30, DSM = 1,9 à 2,20, TEO = 8 à 12

f = fines (%) ; IP = Indice de plasticité (%) ; CBR : *California Bearing Ratio* ; DSM : Densité sèche maximale ; TEO : Teneur en eau optimale ; CEBTP - ISTED : Centre des études pour le bâtiment et les travaux publics - Institut des sciences et des techniques de l'équipement et l'environnement pour le développement

$$P_m = IP \times (\% < 425 \mu m) \quad (5)$$

$$P_p = IP \times (\% < 80 \mu m) \quad (6)$$

$$A_c = \frac{IP}{\% < 2 \mu m} \quad (7)$$

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

III.2.1.2. Caractéristiques de compactage

L'ingénieur américain Proctor a démontré que la teneur en eau du matériau avait une grande influence sur la compacité pour une énergie de compactage donnée. Il existe deux types d'essais Proctor, l'essai Proctor normal et l'essai Proctor modifié. En géotechnique routière, c'est l'essai Proctor modifié qui est le plus souvent utilisé. Cet essai été réalisé selon la norme NF P94 – 093 (AFNOR, 1999).

L'essai CBR est une notion empirique nécessaire à l'évaluation de la qualité des matériaux constituant le corps d'une chaussée. Cet essai est incontournable pour le dimensionnement des chaussées (Tockol, 1993 ; Millogo, 2008 ; Nyemb Bayamack *et al.*, 2019) et pour la classification des matériaux (CEBTP, 1984). L'essai CBR a été réalisé par référence à la norme française NF P 94 – 078 (AFNOR, 1997).

III.2.2. Essais géotechniques sur les argiles latéritiques

III.2.2.1. Confection des éprouvettes

La confection des éprouvettes a consisté au séchage des échantillons d'argiles latéritiques à l'étuve à 105°C durant 24 h, puis à leur broyage et à leur tamisage à $800 \mu\text{m}$. Par la suite, le façonnage de la pâte a été effectué par ajout d'eau à des teneurs différentes variant en fonction du matériau. La confection des éprouvettes a été réalisée à l'aide d'une presse hydraulique. Les dimensions du moule utilisé sont : $80 \times 40 \times 20 \text{ mm}$. Les briquettes confectionnées ont été séchées à l'air libre pendant 07 jours, puis à l'étuve à 105°C pendant 24 h, afin d'éviter le séchage brusque lors de la cuisson, et donc, leur déformation par fissuration.

III.2.2.2. Couleur

Les couleurs des matériaux naturels et des éprouvettes avant et après cuisson ont été déterminées à l'aide de la charte des teintes Munsell (Munsell Color Charts, 2000).

III.2.2.3. Retrait linéaire

III.2.2.3.1 Retrait linéaire après séchage

Le retrait linéaire (RL) est la variation d'une des dimensions de l'éprouvette. Le but de cet essai est de déterminer l'aptitude d'un matériau à rétrécir. Il est réalisé selon la norme américaine (ASTM C531, 2000). Le mode opératoire de détermination de la valeur du retrait après séchage à l'air libre consiste à mesurer une des dimensions (longueur, largeur et épaisseur) de l'éprouvette, après fabrication de l'éprouvette (L_0), puis à mesurer de nouveau une de ces mêmes dimensions, après séchage pendant un certain nombre de jours (L_1). Le retrait linéaire s'exprime en pourcentage et est donné par la formule :

$$RL = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100 \quad (8)$$

RL = retrait linéaire (%),

L_0 = longueur (mm) avant séchage à l'étuve,

L_1 = longueur (mm) après séchage à l'étuve.

III.2.2.3.2. Retrait linéaire après cuisson

Le mode opératoire ici est le même que pour le retrait après séchage décrit ci-dessus. La seule différence est que L_0 est la dimension de l'éprouvette après séchage à l'étuve et, L_1 la dimension de l'éprouvette après cuisson à la température choisie.

III.2.2.3.3. Absorption d'eau

Le test d'absorption d'eau (WA) a pour but de déterminer le taux d'absorption d'une brique pendant 24 h. L'essai est effectué par référence à la norme américaine (ASTM C20, 2000). Ce test consiste à peser les éprouvettes crues ou cuites après leur sortie de l'étuve (M_1) puis, à les tremper totalement dans l'eau pendant 24 h. Passées ces 24 h, les éprouvettes sont essuyées puis pesées immédiatement (M_2). La valeur de WA est déterminée par la formule :

$$WA = \frac{M_2 - M_1}{M_2} \times 100 \quad (9)$$

WA = absorption d'eau (%),

M_1 = masse avant immersion (g),

M_2 = masse après immersion (g).

III.2.2.3.4. Porosité apparente

La porosité apparente est déterminée par le rapport entre le taux d'absorption d'eau WA et la densité apparente ρ . Elle est donnée par la formule :

$$P = WA/\rho \quad (10).$$

III.2.3. Essai mécanique : Résistance à la flexion

La résistance à la flexion a été déterminée par la méthode des trois points suivant la norme américaine (ASTM F 417, 1996). Elle représente la contrainte limite avant la rupture en flexion d'un matériau. Le but de l'essai est d'évaluer la capacité du matériau à se rompre sous l'action d'une force fléchissante. Son principe consiste à soumettre le matériau à une force croissante. L'éprouvette est placée sur deux appuis cylindriques parallèles et horizontaux se trouvant sur le plateau fixé sur un piston mobile selon le plan vertical d'une presse hydraulique. Au-dessus de l'éprouvette, un troisième appui cylindrique, situé à égale distance des deux autres, est monté sur une traverse reliée à un anneau dynamométrique. La résistance à la flexion est donnée par la formule :

$$\sigma = 3DP/ 2le^2 \quad (11)$$

avec :

σ : résistance à la flexion (MPa),

P : charge maximale indiquée par le test machine (N),

D : distance entre les supports (mm),

l : largeur de l'éprouvette (mm),

e : épaisseur de l'éprouvette (mm).

III.3. Exploitation des données

III.3.1. Exploitation des données de diffraction des rayons X

Le dépouillement des données contenues dans les diffractogrammes des rayons X des matériaux a été effectué sur les plans qualitatifs et quantitatifs. La méthode qualitative consiste à rechercher les minéraux présents dans le matériau étudié à partir des pics principaux identifiés à l'aide des abaques de Brindley et Brown (1980). La méthode quantitative 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 de matériau. Lorsqu'un pic est représentatif de plusieurs minéraux, son aire est rapportée au nombre de minéraux qu'il porte. La proportion du minéral i dans le matériau est donnée par la relation :

$$P_i = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n \frac{A_p}{N_i} \quad (12)$$

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.3.2. Exploitation des données géochimiques

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

III.3.2.1. Indices et diagrammes géochimiques

Plusieurs indices d'altération chimique ont été calculés à partir des données d'analyses géochimiques. Les indices utilisés pour quantifier l'intensité de l'altération sont l'indice d'altération chimique (CIA ; Nesbitt et Young 1982), l'indice d'altération du granite (WIG) de Gong *et al.* (2013), l'indice mafique d'altération (MIA) et l'indice de latéritisation (IOL) de Babechuk *et al.* (2014). Les formules de ces indices d'altération sont les suivantes :

$$CIA = 100 \times Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O) \quad (13) ;$$

$$WIG = 100 \times [Na_2O + K_2O + (CaO^* - 10/3 \times P_2O_5)] / (Al_2O_3 + Fe_2O_{3t} + TiO_2) \quad (14) ;$$

$$MIA_{(O)} = 100 \times [(Al_2O_3 + Fe_2O_{3(t)}) / (Al_2O_3 + Fe_2O_{3(t)} + MgO + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \quad (15) ;$$

$$IOL = 100 \times (Al_2O_3 + Fe_2O_3) / (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3) \quad (16).$$

L'indice IOL est un rapport de masse de SiO₂, Fe₂O_{3t} et Al₂O₃, tandis que CIA, WIG et MIA sont calculés à partir des teneurs molaires des principaux éléments. Pour la valeur de CaO*, si la fraction molaire de CaO ≤ Na₂O, alors la valeur de CaO* = CaO. Si la fraction molaire de CaO > Na₂O, alors CaO* = Na₂O (McLennan *et al.* 1993). Bien que l'indice WIG soit l'indicateur le plus sensible pour étudier la quantification de l'altération, étant donné le nombre d'oxydes qui entrent dans sa formule, MIA, présente l'avantage que de nombreux diagrammes lui sont associés.

Les valeurs de CIA, WIG, MIA et IOL varient entre 0 et 100 %. Comme pour CIA et MIA, des valeurs IOL plus élevées correspondent à des matériaux fortement altérés (Babechuk *et al.* 2014), tandis que des valeurs plus élevées de WIG correspondent à des matériaux moins altérés (Gong *et al.* 2013).

Les bilans d'altération ont été calculés d'après la formule de Brimhall et Dietrich (1987) et Anderson *et al.* (2002) suivante :

$$T_{Th,j} = 100 \times [(C_{j,w} / C_{j,p}) / (C_{Th,w} / C_{Th,p}) - 1] \quad (17)$$

avec :

$C_{j,w}$ et $C_{j,p}$ sont les concentrations de l'élément considéré dans l'échantillon altéré et la roche mère, respectivement. $C_{Th,w}$ et $C_{Th,p}$ sont les concentrations en thorium dans l'échantillon altéré et la roche mère, respectivement.

Deux types de diagrammes ont été utilisés pour l'exploitation des données géochimiques. Il s'agit notamment des diagrammes binaires et des diagrammes ternaires du système Al – Fe – Mg – Ca – Na – K de Babechuk *et al.* (2014).

III.3.2.2. Restructuration normative altérologique

La restructuration normative altérologique est une méthode d'étude géochimique à partir de laquelle 07 paramètres ont été définis pour caractériser les roches et les matériaux d'altération qui en dérivent (Ekodeck, 1984 ; Ekodeck et Kamgang Kabeyene, 2002 ; Ekodeck et Kamgang Kabeyene, 2011). Cette méthode d'étude, inspirée de la méthode américaine CIPW (Cross *et al.*, 1903) est fondée uniquement sur les résultats d'analyses géochimiques des constituants majeurs. Le principe consiste en la combinaison de 14 constituants chimiques comprenant l'eau de constitution. Cinq groupes standards rassemblant 37 espèces minérales sont susceptibles de se former et permettent de reconstituer une constitution minéralogique virtuelle pour chaque échantillon. Les paramètres évalués sont de 03 types :

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

$$PPFAL = \frac{(Gibb + Boeh + Cor)}{Goethite + Hematite} \quad (18),$$

$$IAL = \frac{(Gibb + Boeh + Cor)}{Gibb + Boeh + Cor + Goe + Hem + Co} \times 100 \quad (19),$$

$$IFL = \frac{(Goe + Hem)}{Gibb + Boe + Cor + Goe + Hem + Co} \times 100 \quad (20),$$

$$IIP = \frac{(Oxydes + Hydroxydes de Fe^{3+}, Al^{3+}, Mn^{2+})}{Tous\ les\ minéraux} \times 100 \quad (21),$$

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 :

$$Co = \%aT - (\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3) \quad (22),$$

%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 (ILP, DVAR) :

$$ILP = \frac{(Gibb + Boeh)100 + (Kand)75 + (Sil.al Ca.alc)50 + (Sil.al FeMg)25}{Gibb + Boeh + Cor + Sil} \quad (23),$$

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

(24),

- les paramètres de caractérisation du milieu (ICP) :

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

(25).

Les données obtenues ont été 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 ont permis des caractérisations ponctuelles, des études comparatives, évolutives au sein du profil d'altération. La méthode restructuration normative altérologique a permis également de corréliser les caractéristiques génétiques des matériaux étudiés à leurs paramètres géotechniques.

III.3.2.3. Exploitation des données géochimiques des Terres rares

Les différents ratios permettant de quantifier la distribution et la répartition des Terres rares (REE de l'Anglais *Rare Earth Element*) ont été calculés : Σ REE, *Light* REE (LREE), *Heavy* REE (HREE), LREE/HREE, La/Yb, Ce/Ce* et Eu/Eu*.

Les diagrammes de normalisation des spectres des REE ont été réalisés par rapport aux données de REE de la roche mère et par rapport à celles de la chondrite (d'après McDonough et Sun, 1995).

III.3.3. Exploitation des données géotechniques

L'abaque de plasticité de Casagrande (in Philipponnat et Hubert, 2000), l'abaque de maniabilité de Brain et Highly (1978) et le diagramme de Winkler (1954) in Moutou *et al.* (2012) ont été nécessaires à l'interprétation des données géotechniques des argiles latéritiques. Les fuseaux de spécification de l'utilisation des matériaux en construction

routière du CEBTP (1984) ont été nécessaires à l'exploitation des données géotechniques des graveleux latéritiques.

III.3.4. Sélection des matériaux pour la stabilisation

Pour le protocole de sélection et l'aptitude au traitement à la chaux, les matériaux argileux latéritiques ont été sélectionnés sur la base de la teneur en fines et de l'indice de plasticité. L'intérêt des matériaux argileux latéritiques a été déterminé à partir des diagrammes géotechniques binaires et ternaires.

III.3.5. Traitement statistique des données

Le traitement statistique des données d'analyses chimiques a nécessité de nombreux calculs pour la détermination des moyennes, des écarts-types, des coefficients de variation (CV), des coefficients de corrélation et des coefficients de détermination entre paramètres. Le logiciel XLstat version 2014.5.03 a permis une analyse en composantes principales (ACP) des données.

III.3.5.1. Coefficient de variation

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

$$CV = \frac{\text{Ecart - type}}{\text{Moyenne}} \times 100 \quad (26)$$

Pour évaluer les variations des propriétés des graveleux latéritiques sur la base de CV, l'étude a adopté la classification de Wilding et Dress (1983) : (1) si la valeur de CV est inférieure à 15, alors le paramètre a une faible variation, (2) si la valeur de CV est comprise entre 15 et 35, la variation de la variable est moyenne et, (3) si la valeur de CV est supérieure à 35, le paramètre a une forte variation.

III.3.5.2. Analyse des régressions

L'analyse des régressions est une méthode statistique utilisée pour la modélisation des relations entre différentes variables. Elle permet de décrire et d'analyser les relations entre les données. Cette analyse peut être utilisée pour faire des prédictions au moyen des équations liant 02 paramètres. Dans la présente étude, la validation d'une relation se fait par le biais du coefficient de détermination (R^2). Dans cette analyse, une relation est forte si $R^2 \geq 0,8$,

moyenne dans l'intervalle $[0,50 - 0,80[$ et, faible dans l'intervalle $[0,00 - 0,50[$. Seules les relations dont la valeur de R^2 est supérieure ou égale à 0,65 sont retenues.

III.3.5.3. Analyse en composantes principales

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) constitue une des techniques d'analyse statistique les plus communément employées (De Lagarde, 1995). A partir d'un espace à n dimensions défini par p variables initiales (Fig. 6), l'ACP a pour but de déterminer un sous espace de dimension moindre, en recherchant de nouvelles variables (composantes principales), linéairement indépendantes, expliquant au mieux l'ensemble des observations.

Le calcul de ces composantes se ramène à celui des valeurs propres et des vecteurs propres de la matrice de covariance ou de corrélation. L'intérêt de la méthode est de se limiter à quelques composantes expliquant une proportion satisfaisante de la variabilité totale des variables initiales, pour résumer une information décrite de façon redondante par l'ensemble des variables initiales. On obtient grâce à l'ACP, un résumé descriptif (Fig. 6), sous forme graphique, d'un ensemble de n observations effectuées sur p variables numériques continues.

Les règles permettant d'interpréter la position des variables dans les plans factoriels (cercles de corrélation par exemple) sont celles-ci :

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

Les facteurs limitant de la méthode sont :

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

Les biplots de corrélation qui affinent l'interprétation des ACP ont permis d'établir les liens entre composants minéralogiques, géochimiques et géotechniques au sein des graveleux latéritiques étudiés.

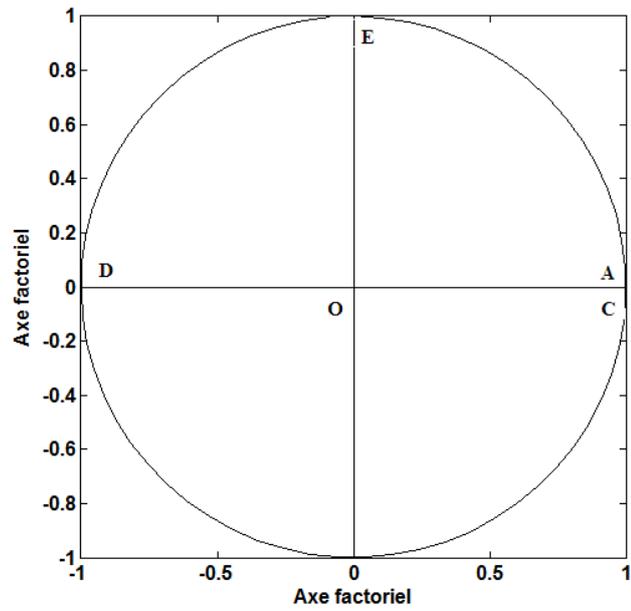


Figure 6. Représentation de projections typiques de variables dans un plan factoriel (De Lagarde, 1995)

Conclusion

Les travaux de terrain ont été focalisés sur la localisation des points de prélèvement, la description, le prélèvement des échantillons de matériaux d'altération et leur encodage. Les travaux de laboratoire ont porté sur les analyses physico-chimiques, minéralogiques et géochimiques. Ces travaux ont également consisté en la détermination des paramètres géotechniques et mécaniques des matériaux naturels pour les graveleux latéritiques et, à ceux des briquettes crues et cuites, pour les matériaux latéritiques argileux meubles superficiels. La dernière étape des manipulations en laboratoire a été consacrée aux analyses statistiques sur les données géotechniques des graveleux latéritiques. Les résultats des travaux effectués tant sur le terrain qu'en laboratoire sont consignés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III.

MORPHOLOGIE, MINERALOGIE ET GEOCHIMIE DES MATERIAUX D'UN PROFIL D'ALTERATION

Introduction

Le présent chapitre fournit les données d'analyses pétrologique et géotechnique des matériaux d'altération développés sur quartzites dans la zone de Sa'a. La première partie est consacrée aux données macroscopique, microscopique, minéralogique et géochimique du profil d'altération. La deuxième partie présente les résultats des essais géotechniques réalisés sur les graveleux et argiles latéritiques constituant la partie supérieure des profils d'altération étudiés.

I. Roche

Les quartzites micacés de Sa'a sont des roches leucocrates à mésocrates qui se débitent en plaquettes quartziques de 1 à 2 cm d'épaisseur (Fig. 7a). Ces plaquettes sont séparées les unes des autres par des lits millimétriques à centimétriques riches en minéraux ferromagnésiens (Fig. 7b-e). Ces quartzites micacés ont une texture granoblastique à granolépidoblastique (Fig. 7c-d) et sont constitués de quartz (50 – 60 %), de muscovite (10 – 15 %), de biotite (5 – 10 %), de hornblende (3 – 5 %), de grenat (3 – 5 %), de plagioclases (< 3 %), de graphite, de magnétite, de titanite, d'épidote et de zircon.

II. Profil d'altération

II.1. Caractéristiques macroscopiques et minéralogiques

Le profil d'altération sur quartzites micacés étudié se localise au sommet d'un interfluve, à 562 m d'altitude dans la zone de Sa'a (04°21'51,1'' N, 11°26'05,4'' E ; Fig. 5). Ce profil d'altération dont l'épaisseur est de 6,5 m, comprend du bas vers le haut : un ensemble saprolitique, un ensemble nodulaire et un horizon argilo-caillouteux meuble superficiel (Fig. 8).

II.1.1. Ensemble saprolitique

L'ensemble saprolitique met clairement en évidence le processus d'altération différentielle (Fig. 8). Cet ensemble a une épaisseur de 2,50 m et est constitué d'une alternance de matériaux indurés et de bandes riches en fer ou bandes ferrifères (Fig. 8).

Les matériaux indurés (Q1Q, Q2Q, Q3Q, Q4Q, et Q5Q) représentent la saprolite grossière. Ces matériaux de couleur jaune olive (2,5Y 6/6) sont d'épaisseurs métrique (Q1Q ~ 130 m), décimétrique (Q2Q, Q3Q, Q4Q ~ 17 cm) à multimentricité (Q5Q ~ 8 cm). Ils se composent de quartz, de feldspaths potassiques, de muscovite, de magnétite et d'anatase (Fig. 9).



Figure 7. Vues macroscopique et microscopique des quartzites micacés de Sa'a

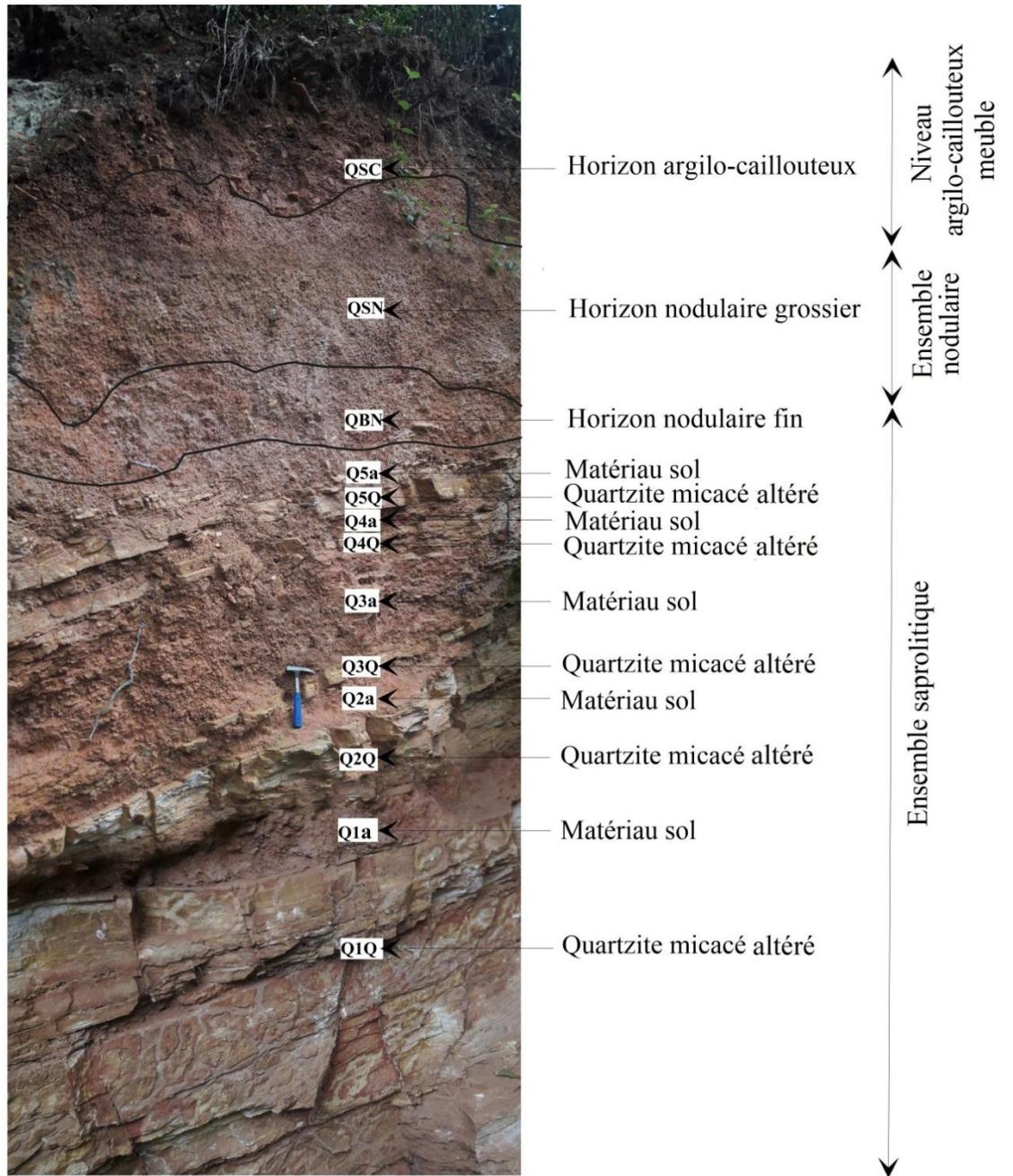


Figure 8. Profil d'altération sur quartzites micacés dans la zone de Sa'a

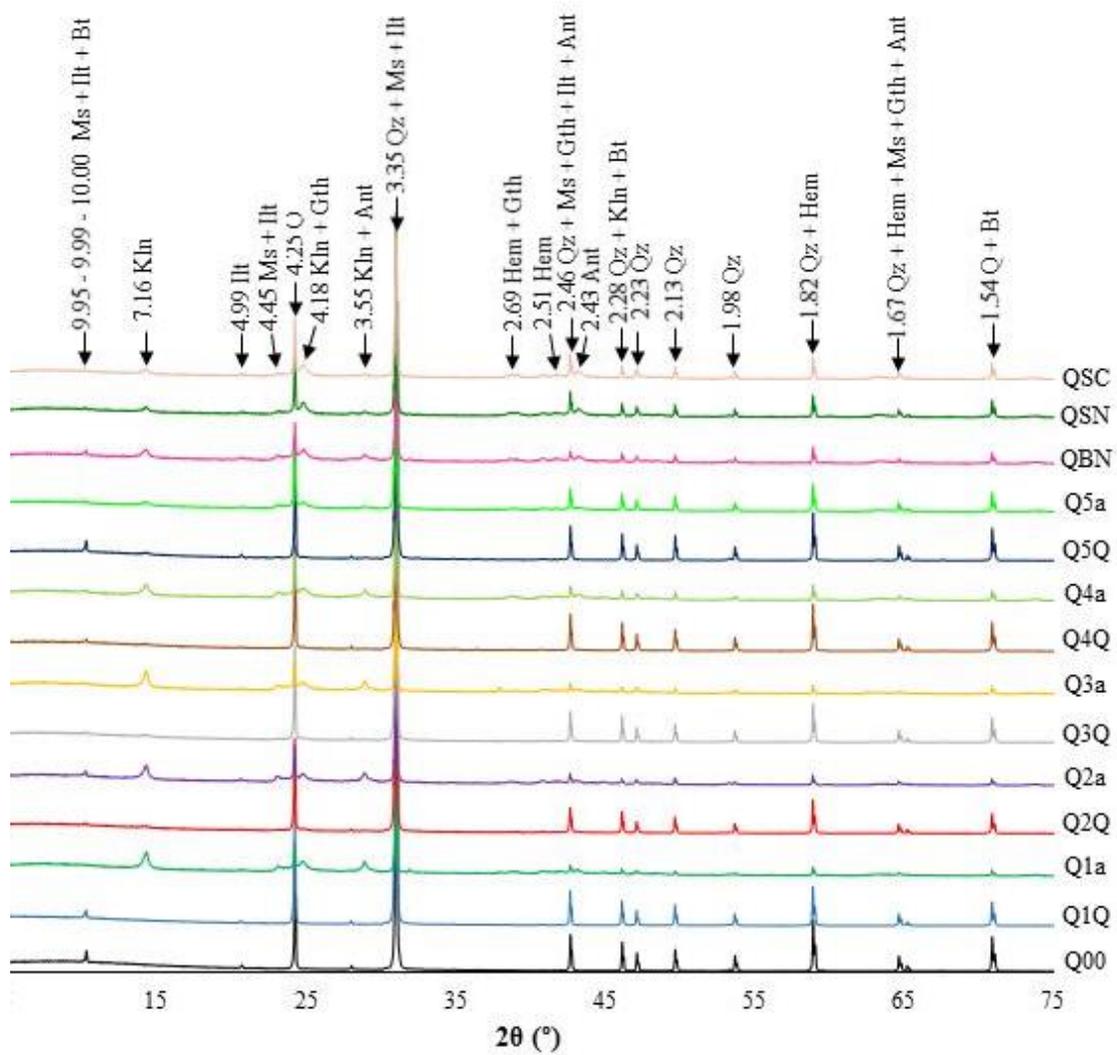


Figure 9. Diffractogramme des matériaux d'altération sur quartzites micacés de Sa'a

Qz : Quartz ; Kln : Kaolinite ; Ms : Muscovite ; Bt : Biotite ; Hem : Hematite ; Ant : Anatase ; Gth : Goethite ; Illt : Illite (Abréviations d'après Whitney et Evans, 2010).

Ces matériaux indurés sont faiblement acides à très faiblement basiques (pH : 6,62 – 7,16). Les limites entre les matériaux indurés et les unités de sol qui les intercalent sont très nettes. Les bandes riches en fer (Q1a, Q2a, Q3a, Q4a et Q5a) alternent avec les saprolites grossières. Ces matériaux sont rouges (2,5YR 4/8) et leurs épaisseurs sont centimétriques (Q1a, Q2a, Q4a et Q5a, ~ 8 cm) à décimétriques (Q3a, ~ 31 cm). Ces matériaux sont constitués de nodules ferrugineux arrondis rouges foncés (10R 3/6) à rouges clairs (10R 4/4) (15 – 20 %) dont les tailles sont millimétriques à centimétriques. Les blocs de quartz contenus dans ces matériaux argileux meubles représentent 15 à 20 %. Les nodules ferrugineux et les blocs de quartz sont emballés dans une matrice argileuse rouge friable (20 – 25%). Ces matériaux sols sont constitués de quartz, de muscovite, d'illite, de kaolinite, d'anatase, de rutile, de magnétite et d'hématite (Fig. 9). Ils sont légèrement acides (pH : 5,60 – 6,38).

II.1.2. Ensemble nodulaire

L'ensemble nodulaire est constitué d'un matériau rougeâtre (2,5YR 4/8) d'épaisseur comprise entre 1 m et 1,5 m (Fig. 8). Cet ensemble se compose de matériaux fins relativement épais à sa base (QBN ~ 1 m) et de matériaux grossiers, moins épais (QSN ~ 0,5 m), dans sa partie supérieure. Les nodules ferrugineux contenus dans ces matériaux sont abondants (70 – 80 %) et noyés dans une matrice argileuse rouge clair (2,5YR 6/8) (20 – 30%). Ces nodules sont millimétriques à la base de l'ensemble nodulaire et, centimétriques, dans la partie supérieure. Les blocs de quartz plurimillimétriques à décimétriques (5 à 10 cm) représentent 5 à 10 % des matériaux nodulaires étudiés. Ces matériaux nodulaires, moyennement acides (pH : 5,92 – 5,97) sont constitués de quartz, de muscovite, d'illite, de kaolinite, d'hématite et d'anatase (Fig. 9). La transition avec l'horizon qui les recouvre est diffuse.

II.1.3. Horizon argilo-caillouteux superficiel

L'horizon argilo-caillouteux a une épaisseur variant entre 0,8 et 1 m. Au sein de ce matériau rouge clair (2,5YR 6/8), les galets représentés par les blocs de quartz sont de tailles diverses, centimétriques à décimétriques. Ces blocs de quartz représentent ~30 % de cet horizon argilo-caillouteux. Les nodules ferrugineux de tailles millimétriques représentent ~20 % de ces matériaux. Les blocs de quartz et les nodules ferrugineux sont emballés dans une fine matrice argileuse friable brunâtre parsemée de nombreuses racines. L'horizon argilo-caillouteux superficiel est constitué de quartz, d'illite, de kaolinite, d'hématite et d'anatase (Fig. 9) et l'acidité des matériaux qui le constituent est moyenne (pH ~ 5,90). Sa partie la plus superficielle est recouverte par une végétation arbustive secondaire.

II.2. Géochimie

II.2.1. Géochimie des éléments majeurs et quantification de l'altération surpergène

Les saprolites grossières représentées par des plaquettes de quartzites micacés altérés (Q1Q, Q2Q, Q3Q, Q4Q et Q5Q) ont des valeurs CIA qui varient entre 73,2 % et 90,2 % (Tab. 6). Les valeurs CIA des matériaux des unités de sol intercalent les quartzites micacés altérés sont comprises entre 93,7 % et 96,7 %. Les matériaux nodulaires et les matériaux argilo-caillouteux superficiels ont des valeurs de CIA de 95,0 % et 96,2 %, respectivement (Tab. 6). Les valeurs de MIA varient entre 79,9 % (Q4Q) et 95,2 % (Q1Q). Les valeurs de ce paramètre suivent la même évolution en dents de scie que celles de CIA, le long du profil d'altération, excepté que celles de CIA vont croissant de l'horizon nodulaire basal QBN à l'horizon argilo-caillouteux superficiel QSC. Les valeurs de WIG oscillent entre 13,2 % (Q3Q) et 35,8 % (Q1Q). Ces valeurs présentent également une évolution en dents de scie le long du profil d'altération. Les valeurs de IOL varient entre 1,3 % (Q1Q) et 4,5 % (Q2Q) dans les quartzites micacés altérés et, entre 12,0 % (Q5a) et 40,0 % (QSC) dans les matériaux à structure de sol.

Dans le diagramme A – CN – K (Nesbitt et Young 1982 ; Fig. 10a), les matériaux d'altération étudiés montrent une évolution parallèle à l'axe A – K. Cette évolution est plus prononcée dans les matériaux sols (Q1a, Q2a, Q3a, Q4a et Q5a) intercalant des lits de quartzites micacés altérés et des sols (QBN, QSN et QSC) de la partie supérieure du profil d'altération. Cela indique une lixiviation totale de Ca et de Na dans ces matériaux, tandis que K est retenu en faibles concentrations (0,45 – 0,93 %). La position des quartzites micacés altérés dans le diagramme A – CN – K indique que ces matériaux contiennent encore de faibles quantités de feldspaths.

L'altération est également quantifiable graphiquement dans le système A – Fe – Mg – Ca – Na – K (Nesbitt et Young, 1989 ; Nesbitt et Wilson, 1992), en combinaison le paramètre MIA (Babechuk *et al.*, 2014 ; Fig. 10b-c). Le diagramme A – L – F (Fig. 10b) montre une perte très importante des éléments mobiles (Ca, Na, K et Mg) dans les matériaux sols (Q1a, Q2a, Q3a, Q4a et Q5a) intercalant les lits de quartzites micacés altérés et les sols (QBN, QSN, QSC) de la partie supérieure du profil d'altération. Cette perte est modérée à élevée dans les quartzites altérés (Q1Q, Q2Q, Q3Q, Q4Q et Q5Q). Les matériaux d'altération étudiés sont plus alumineux que ferrugineux, excepté les matériaux nodulaires QSN (Fig. 10b). Le diagramme AF – CNK – M (Fig. 10c) montre que l'hydrolyse est intense dans les matériaux ferromagnésiens. Cette hydrolyse est intense dans les matériaux sols intercalant les lits de quartzites micacés altérés et les sols de la partie supérieure du profil d'altération.

Tableau 6. Données physico-chimiques (pH, Eh) et géochimiques des éléments majeurs (%) et en traces (ppm) des matériaux d'altération de Sa'a

	Q00	Q1Q	Q1a	Q2Q	Q2a	Q3Q	Q3a	Q4Q	Q4a	Q5Q	Q5a	QBN	QSN	QSC
	Quartzite micacé	QMA	MS	QMA	MS	QMA	MS	QMA	MS	QMA	MS	HNB	HNS	HAC
Prof. (m)	6	4,4	3,7	3,6	3,4	3,3	3,1	2,8	2,7	2,6	2,5	2,1	1,3	0,5
pH	6,61	7,15	6,01	6,62	5,81	7,06	5,74	7,16	5,60	7,01	6,38	5,97	5,92	5,90
Eh (mV)	27	3	71	31	83	9	86	2	95	17	48	68	76	77
SiO ₂	99,79	98,04	43,90	87,98	54,81	90,01	47,24	91,76	49,69	94,12	70,74	46,86	53,45	49,43
TiO ₂	0,05	0,09	4,08	0,37	1,86	0,41	4,06	0,18	2,28	0,10	0,94	2,37	1,10	2,14
Al ₂ O ₃	0,53	1,33	18,59	4,12	17,70	3,87	18,37	2,89	16,22	2,89	9,68	16,71	11,61	23,61
Fe ₂ O _{3t}	0,07	0,29	20,11	4,25	14,78	2,93	18,92	2,91	19,76	1,34	10,86	21,78	23,37	9,23
MnO	0,00	0,00	0,05	0,01	0,02	0,01	0,04	0,00	0,02	0,00	0,02	0,03	0,03	0,09
MgO	0,04	0,08	0,12	0,08	0,20	0,07	0,14	0,11	0,15	0,09	0,13	0,17	0,12	0,38
CaO	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,81
Na ₂ O	0,04	0,05	0,04	0,04	0,07	0,05	0,06	0,06	0,05	0,04	0,05	0,07	0,05	0,04
K ₂ O	0,15	0,36	0,50	0,33	0,93	0,31	0,65	0,29	0,66	0,37	0,50	0,85	0,45	0,73
P ₂ O ₅	0,00	0,01	0,20	0,04	0,11	0,02	0,12	0,02	0,12	0,01	0,09	0,11	0,20	0,15
PF	0,11	0,33	10,89	2,52	9,14	2,29	9,79	1,59	9,72	1,27	6,51	10,08	9,10	13,03
<i>Total</i>	100,79	100,59	98,50	99,75	99,65	99,99	99,40	99,83	98,68	100,25	99,53	99,04	99,50	99,64
CIA (%)	68,1	73,2	96,7	90,2	93,8	89,5	95,7	86,6	95,2	85,4	93,7	94,1	95,1	96,2
WIG (%)	46,6	35,8	23,5	13,5	19,1	13,2	23,3	16,4	22,0	17,5	15,0	24,9	22,6	18,1
MIA _(O) (%)	60,3	65,8	95,2	86,4	91,4	86,0	94,0	79,9	93,1	80,0	90,8	91,4	92,3	94,0
IOL (%)	0,5	1,3	29,8	4,5	24,4	4,1	28,0	3,1	24,6	3,0	12,0	26,3	17,9	40,0
LILE														
Li	0,8	2,0	4,7	1,9	6,7	1,6	5,8	1,4	6,0	1,8	5,2	6,1	4,6	5,4
Rb	4,26	11,22	34,25	15,25	57,08	15,07	43,21	10,59	49,81	12,44	39,95	50,32	36,79	43,6
Cs	0,071	0,181	1,427	0,515	2,098	0,482	1,759	0,293	1,981	0,303	1,535	1,960	1,550	1,8
Sr	4,7	4,5	21,1	12,0	30,8	15,1	21,9	11,2	22,1	8,2	14,9	22,5	15,4	19,0
Ba	18,6	28,4	118,03	73,4	207,7	89,2	144,4	70,2	148,7	70,1	103,2	168,5	107,8	138,2
HFSE														
Th	1,058	2,308	13,227	4,299	14,640	3,776	13,653	2,415	17,009	2,091	13,447	24,601	24,700	24,7
U	0,255	0,375	7,268	1,178	4,461	0,934	5,765	0,881	6,983	0,422	4,721	7,810	7,882	7,8
Zr	49	134	186	81	155	78	205	105	184	58	139	262	151	207
Nb	1,264	1,883	45,843	7,373	29,558	14,405	36,123	11,956	30,949	2,167	19,700	34,499	20,401	27,500
Hf	1,20	3,54	4,94	2,02	3,87	1,98	5,05	2,21	4,62	1,51	3,65	6,57	3,88	5,20
Mo	0,22	0,13	8,03	1,69	6,37	1,50	5,27	1,50	8,51	0,92	4,78	8,43	10,10	9,30
W	0,15	0,26	3,63	0,86	1,41	0,35	1,00	0,23	1,33	0,22	0,92	1,64	1,06	1,40
Ta	0,088	0,149	2,650	0,464	1,766	0,753	2,152	0,303	1,821	0,132	1,347	2,322	1,329	1,800
Métaux de transition														
Sc	<1,1	<1,1	37,0	5,7	22,7	4,5	33,0	4,3	30,4	2,2	20,1	33,0	38,1	35,6

V	4,9	10,4	>370	76	331,6	67,6	>370	60,3	>370	24,4	186,8	>370	345,7	345,7
Cr	5	8	232	113	192	40	112	40	248	12	219	309	555	432
Co	0,31	0,14	7,76	1,46	4,74	0,94	9,56	0,71	5,25	0,46	3,94	5,09	5,86	5,5
Ni	0,5	0,8	39,5	11,6	24,3	5,0	31,4	3,5	29,2	2,4	19,1	28,9	28,5	28,7
REE														
La	6,1	5,8	34,1	13,3	36,1	13,8	29,3	7,4	28,8	5,6	22,6	29,7	23,6	23,1
Ce	11,84	11,62	39,81	15,58	46,28	13,02	41,82	8,13	45,02	7,55	44,51	58,69	65,86	63,36
Pr	1,28	1,319	5,631	2,038	6,278	1,916	5,318	1,031	5,856	1,005	5,05	6,283	5,382	4,882
Nd	4,21	4,68	17,44	6,34	19,46	5,63	17,09	3,19	19,29	3,35	17,33	21,87	19,33	18,83
Sm	0,742	0,934	2,989	1,012	3,157	0,878	2,8	0,536	3,611	0,558	3,279	4,062	4,288	3,788
Eu	0,2835	0,2805	0,7209	0,2339	0,6986	0,2002	0,6428	0,1442	0,7762	0,1132	0,7306	0,9458	0,9327	0,8827
Gd	0,449	0,748	2,525	0,79	2,291	0,639	2,194	0,474	2,614	0,618	2,475	3,209	3,061	2,561
Tb	0,0653	0,1114	0,418	0,1104	0,354	0,0969	0,3381	0,0791	0,4046	0,1096	0,3799	0,5146	0,4965	0,4765
Dy	0,398	0,729	2,539	6,694	2,139	0,553	1,993	0,467	2,336	0,78	2,144	3,124	2,908	2,408
Ho	0,0836	0,1644	0,5413	0,1377	0,4344	0,0974	0,3902	0,0953	0,4329	0,2043	0,4161	0,6047	0,5413	0,4913
Er	0,260	0,548	1,696	0,408	1,208	0,274	1,113	0,264	1,295	0,589	1,190	1,820	1,632	1,132
Tm	0,0366	0,0866	0,2621	0,0583	0,1853	0,036	0,1708	0,0397	0,2004	0,0826	0,1867	0,2726	0,2617	0,2017
Yb	0,292	0,625	1,826	0,429	1,189	0,262	1,159	0,281	1,356	0,426	1,259	1,906	1,837	1,337
Lu	0,046	0,112	0,287	0,068	0,178	0,037	0,172	0,038	0,193	0,056	0,187	0,281	0,274	0,199
LREE	24,17	24,35	99,97	38,27	111,28	35,24	96,33	20,29	102,58	18,06	92,77	120,61	118,48	115,96
HREE	1,63	3,12	10,09	8,70	7,98	2,00	7,53	1,74	8,83	2,87	8,24	11,73	11,01	9,21
ΣREE	26,09	27,76	110,79	47,20	119,95	37,44	104,50	22,17	112,19	21,04	101,74	133,28	130,40	125,17
LREE/HREE	14,82	7,79	9,90	4,40	13,95	17,66	12,79	11,67	11,61	6,30	11,26	10,28	10,76	12,60
(La/Yb) _N	14,19	6,30	12,69	21,06	20,63	35,78	17,17	17,89	14,43	8,09	7,14	10,59	8,73	11,74
Ce/Ce*(1)	1,00	0,99	0,68	0,71	0,73	0,60	0,79	0,69	0,82	0,75	0,98	1,01	1,38	1,45
Eu/Eu*(1)	1,00	0,68	0,53	0,53	0,53	0,54	0,53	0,58	0,51	0,39	0,52	0,53	0,53	0,58
Ce/Ce*(2)	1,03	1,02	0,70	0,72	0,74	0,61	0,81	0,71	0,84	1,05	1,06	1,04	1,42	1,49
Eu/Eu*(2)	1,51	1,03	0,80	0,80	0,80	0,82	0,79	0,88	0,77	0,42	0,77	0,80	0,79	0,87

QMA : Quartzite micacé altéré ; MS : Matériau sol ; HNB: Horizon nodulaire basal ; HNS: Horizon nodulaire sommital ; HAC : Horizon argilo-caillouteux meuble; PF : Perte au feu

LILE : Large Ion Lithophile Element ; HFSE : High Field Strength Element ; CIA : Chemical Index of Alteration ; MIA : Mafic Index of Alteration ; IOL : Index Of Laterisation

$(La/Yb)_N = (La_{\text{échantillon}}/La_{\text{chondrite}})/(Yb_{\text{échantillon}}/Yb_{\text{chondrite}})$; $(La/Sm)_N = (La_{\text{échantillon}}/La_{\text{chondrite}})/(Sm_{\text{échantillon}}/Sm_{\text{chondrite}})$; $Ce/Ce^{*(1)} = Ce_{\text{échantillon}}/Ce_{\text{roche mère}}/(La_{\text{échantillon}}/La_{\text{roche mère}})^{1/2}(Pr_{\text{échantillon}}/Pr_{\text{roche mère}})^{1/2}$; $Eu/Eu^{*(1)} = (Eu_{\text{échantillon}}/Eu_{\text{roche mère}})/(Sm_{\text{échantillon}}/Sm_{\text{roche mère}})^{1/2}(Gd_{\text{échantillon}}/Gd_{\text{roche mère}})^{1/2}$; $Ce/Ce^{*(2)} = Ce_{\text{échantillon}}/Ce_{\text{chondrite}}/(La_{\text{échantillon}}/La_{\text{chondrite}})^{1/2}(Pr_{\text{échantillon}}/Pr_{\text{chondrite}})^{1/2}$; $Eu/Eu^{*(2)} = (Eu_{\text{échantillon}}/Eu_{\text{chondrite}})/(Sm_{\text{échantillon}}/Sm_{\text{chondrite}})^{1/2}(Gd_{\text{échantillon}}/Gd_{\text{chondrite}})^{1/2}$

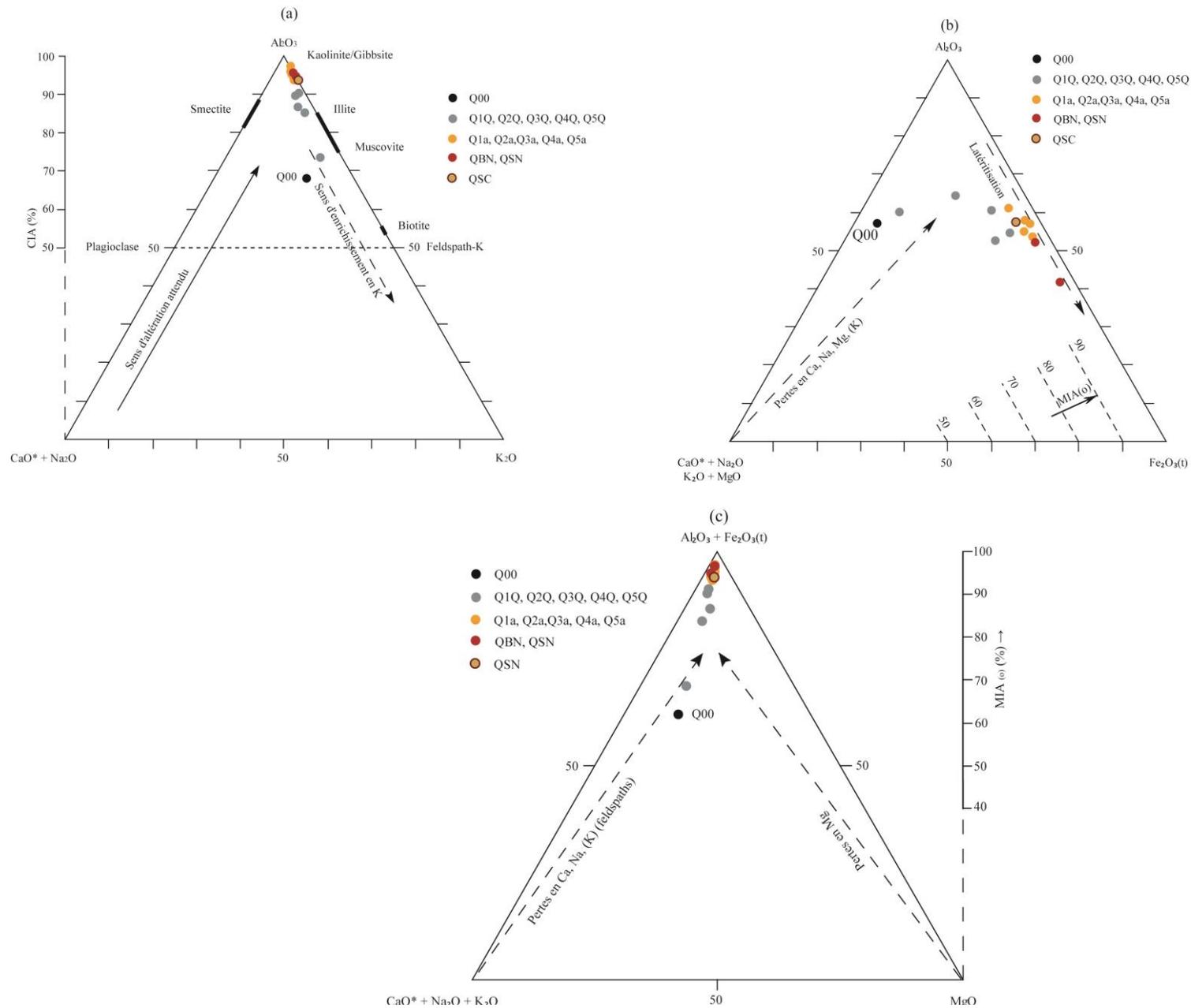


Figure 10. Position des matériaux d'altération étudiés dans les diagrammes molaires de Babechuk *et al.* (2014)

(a) A – CN – K, (b) A – CNKMg – F et, (c) AF – CNK – Mg, illustrant les différents degrés

En général, les figures 10 et 11 montrent que la Kaolinitisation prédomine dans les matériaux sols intercalant des lits de quartzite altérés et dans les sols de la partie supérieure du profil d'altération par rapport aux lits de quartzites micacés altérés. Le diagramme S – A – F (Fig. 12) montre que les matériaux sols de la base du profil d'altération et ceux de la partie supérieure se situent dans le domaine de latéritisation faible à modérée.

II.2.2. Eléments en traces

II.2.2.1. Eléments lithophiles (Ba, Sr, Cs, Rb, Li)

Parmi les éléments lithophiles (*LILE : Large Ion Lithophile Element*), Ba (18,6 ppm), Sr (4,7 ppm) et Rb (4,26 ppm) sont ceux dont les teneurs sont significatives dans les quartzites micacés. Ces éléments présentent une distribution similaire dans les matériaux d'altération. Le baryum, avec des teneurs allant jusqu'à 208 ppm, est l'élément lithophile dont les teneurs sont les plus élevées (Tab. 6).

Le lithium, Rb, Sr et Ba sont évacués faiblement dans les quartzites micacés altérés (Q1Q, Q2Q et Q3Q ; Fig. 13 ; Tab. 7) à la base du profil d'altération étudié (< -23 %) et, s'accumulent très faiblement dans ceux situés au sommet (Q4Q et Q5Q) des saprolites (< +35 %). Ces éléments sont modérément lixiviés dans les matériaux sols intercalant les quartzites micacés altérés (< -52 %) et, modérément à fortement évacués (< -75 %) dans matériaux nodulaires et argilo-caillouteux superficiels. Le césium s'accumule très faiblement dans tous les horizons du profil d'altération étudié (+6 % – +116 %), excepté dans l'horizon nodulaire QSN, où il légèrement évacué (-6 %).

II.2.2.2. Eléments à haute intensité de champ (U, Zr, Nb, Hf, Mo, W, Ta)

Les teneurs en éléments à haute intensité de champ (*HFSE : High Field Strength Element*) sont faibles dans l'ensemble du profil d'altération. Les valeurs les plus faibles se rencontrent dans la roche mère et les quartzites micacés altérés (Tab. 6).

L'uranium, Nb, Mo et Ta sont moyennement évacués dans le matériau Q1Q à la base du profil (~ -40 % ; Fig. 13 ; Tab. 7). Ces éléments s'accumulent faiblement dans les autres matériaux d'altération (Tab. 7), excepté U, Nb et Ta dans les horizons Q5Q (-13 %) et QSN (-33 %), où on observe des pertes faibles. Le zirconium et Hf s'accumulent faiblement à la base du profil (+30 %), puis sont moyennement à fortement évacués du profil avec les silicates ferromagnésiens et les feldspaths. Le même phénomène est observé pour W.

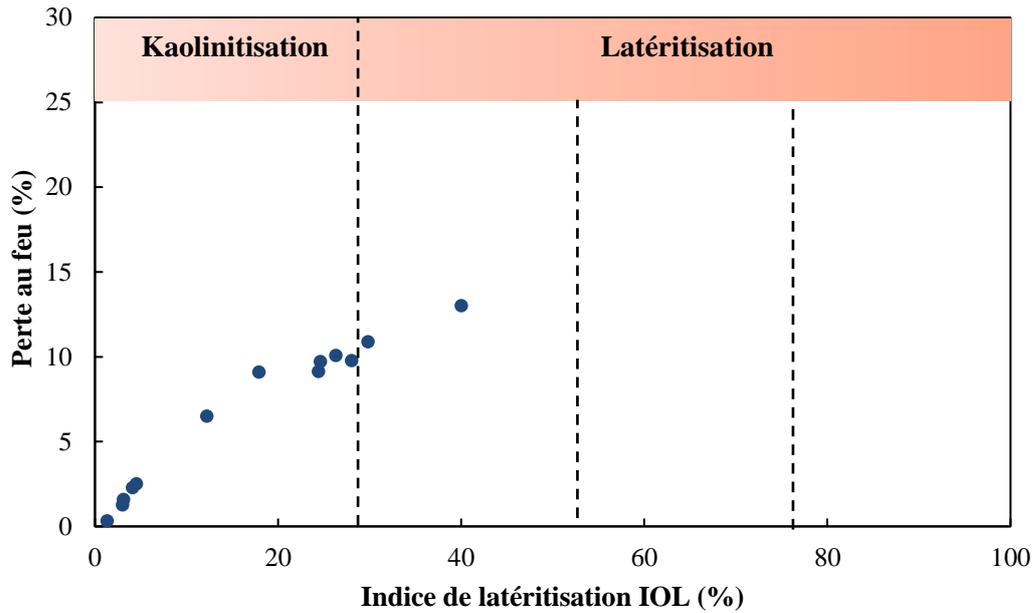


Figure 11. Covariation de la perte au feu en fonction de IOL, illustrant la Kaolinitisation des matériaux d'altération étudiés dans le diagramme de Babechuk *et al.* (2014)

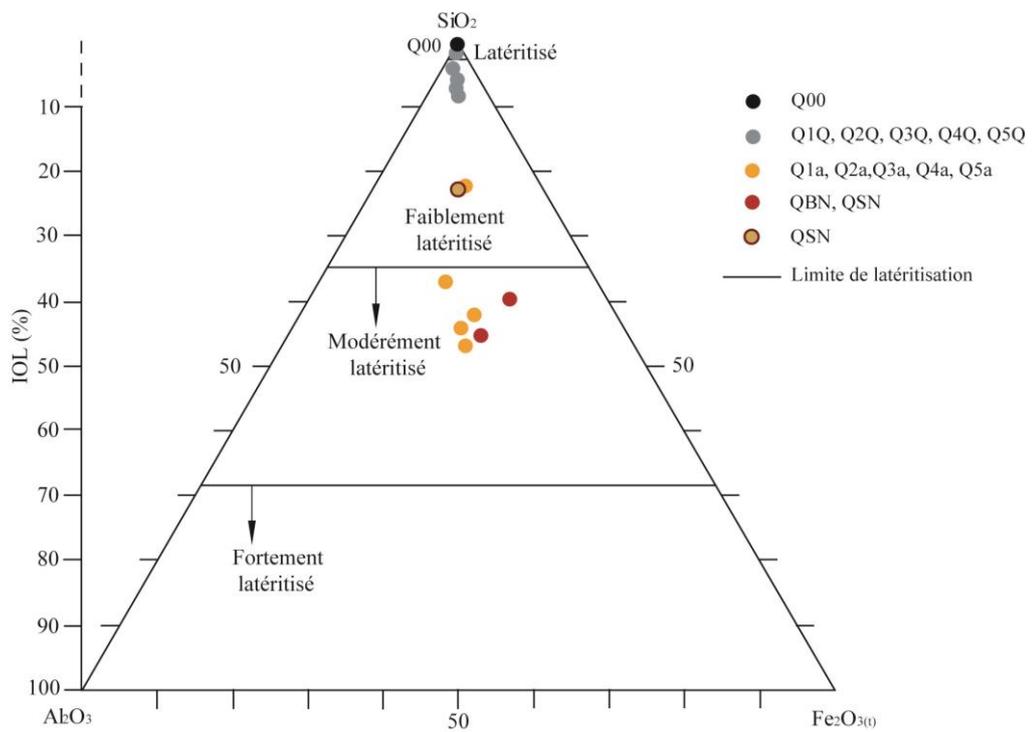


Figure 12. Diagramme SAF, illustrant le degré de latéritisation des matériaux d'altération étudiés dans le diagramme de Babechuk *et al.* (2014)

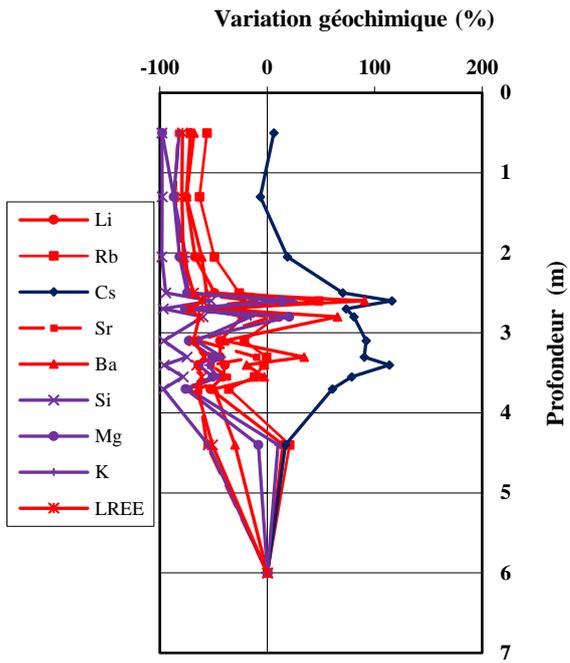
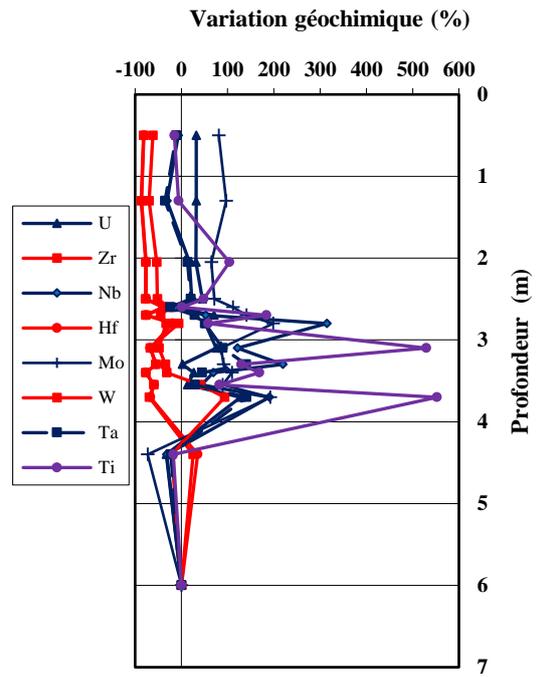
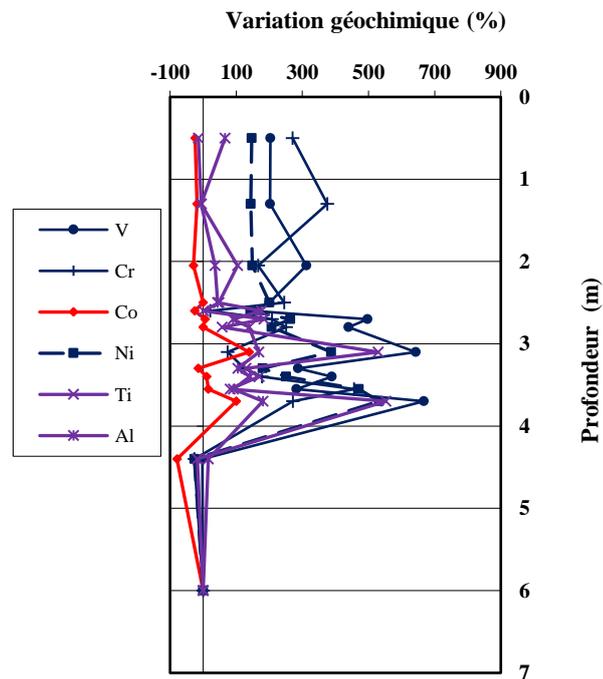
a**b****c**

Figure 13. Gains et pertes des éléments le long du profil d'altération sur quartzites micacés de Sa'a en fonction des formules de calcul isotherium de Brimhall et Dietrich (1987) et Anderson *et al.* (2002)

Tableau 7. Données du bilan d'altération isothorium dans les matériaux d'altération de Sa'a

	Pertes (%)		Gains (%)		
	Élevées 100-70	Moyennes 70-40	Faibles 40-0	Faibles – Modérées < 1000	Élevées > 1000
QSC	Si, Mg, Ca, Na, K Li, Sr Zr, Hf LREE, HREE	Rb, Ba W	Ti Nb, Ta Co	Al, P Cs U, Mo Cr, V, Ni	Fe ³⁺ , Mn
QSN	Si, Mg, Ca, Na, K Li, Sr, Rb, Ba Zr, Hf LREE, HREE	W	Ti, Al, Mn Cs Nb, Ta Co	P U, Mo Cr, V, Ni	Fe ³⁺
QBN	Si, Mg, Ca, Na, K Sr Zr, Hf LREE	Mn Li, Rb, Ba W HREE	 Co	Ti, Al, P Cs U, Nb, Mo, Ta Cr, Ni	Fe ³⁺
Q5a	Si, Mg, Ca, Na, K, Sr Zr, Hf	Li, Ba W LREE, HREE	Mn Rb	Ti, Al, P Cs U, Nb, Mo, Ta V, Cr, Ni	Fe ³⁺
Q5Q	 Sr	Si, Na LREE	Mn, Ca U, Zr, Nb, Hf, W, Ta, Co HREE	Ti, Al, P, Fe ³⁺ Mg, K Li, Rb, Cs, Ba Mo V, Cr, Ni	
Q4a	Si, Mg, Ca, Na, K Sr Zr, Hf LREE	Li, Ba W HREE	Mn, Rb	Ti, Al, P Cs U, Nb, Mo, Ta Cr, Co, Ni	Fe ³⁺
Q4Q		Si REE	Mn, Ca, Na, K Li Zr, Hf, W	Ti, Al, Mg, P Cs, Rb, Sr, Ba U, Nb, Mo, Ta V, Cr, Ni	Fe ³⁺
Q3a	Si, Mg, Ca, Na, K	Li, Sr, Ba Zr, Hf, W REE	Rb	Ti, Al, Mn, P Cs, U, Nb, Mo, Ta Cr, Co, Ni	Fe ³⁺

Q3Q	Si HREE	Mg, Ca, Na, K Li, Zr, Hf, LREE	Mn, Rb, Sr W Co	Ti, Al, P Cs, Ba U, Nb, Mo, Ta V, Cr, Ni	Fe ³⁺
Q2a	Si, Ca, Na Zr, Hf	Mg, K	Mn Li, Rb, Sr, Ba W	Ti, Al, P Cs U, Nb, Mo, Ta V, Cr, Ni, Co	Fe ³⁺
Q2Q	Si, Na	Mg, Ca, K Li, Zr, Hf, REE	Mn Rb, Sr, Ba	Ti, Al, P Cs U, Nb, Mo, W, Ta V, Cr, Ni, Co	Fe ³⁺
Q1a	Si, Mg, Ca, Na, K	Li, Sr, Ba Zr, Hf, REE	Rb	Ti, Al, P, Mn Cs U, Nb, Mo, W, Ta Cr, Ni, Co	Fe ³⁺
Q1Q	Mo Co	Si, Mn, Ca, Na, P Sr LREE	Ti, Mg Ba U, Nb, W, Ta V, Cr, Ni HREE	Al, Fe ³⁺ , K Li, Rb, Cs Zr, Hf	

Les calculs ont été effectués d'après les formules de Brimhall et Dietrich (1987) et Anderson *et al.* (2002).

II.2.2.3. Métaux de transition (V, Cr, Co, Ni)

Les métaux de transition présentent des teneurs faibles mais variables dans les quartzites micacés et les quartzites micacés altérés par rapport aux autres matériaux d'altération. Le chrome et V sont les métaux de transition les plus abondants. Leurs teneurs les plus élevées s'observent dans le haut du profil d'altération (Cr = 555 ppm ; V > 370 ppm ; Tab. 6).

Après des pertes très faibles dans les matériaux Q1Q localisés à la base du profil d'altération étudié (~ -15%), V, Cr et Ni, s'accumulent de façon relativement faible (< +700 %) dans tous les autres matériaux d'altération (Fig. 13 ; Tab. 7). Le cobalt, fortement lixivié dans les matériaux Q1Q (-79%), s'accumule dans les quartzites micacés altérés avant d'être faiblement évacué dans les sols (-24%).

II.2.2.4. Terres rares

Les quartzites micacées étudiés ont des teneurs faibles en REE ($\Sigma\text{REE} = 26,09$ ppm) et, en particulier, en terres rares lourdes (HREE = 1,63 ppm ; (LREE/HREE = 14,82). Le spectre des REE de ces roches normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995) révèle un léger enrichissement en REE, un fractionnement important des REE et une anomalie positive en Eu ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1,51$; Fig.14a).

Les teneurs en REE sont également relativement faibles dans les matériaux d'altération ($\Sigma\text{REE} = 21 - 133$ ppm) avec des rapports LREE/HREE élevés (9,90 – 13,95). Les teneurs en REE les plus faibles (21 – 41 ppm) sont celles des quartzites micacés altérés et, les plus élevées (101 – 133 ppm), celles des matériaux sols intercalant les quartzites micacés altérés et les sols de la partie supérieure du profil d'altération. La teneur en REE la plus élevée s'observe dans le matériau nodulaire basal QBN (133,28 ppm) et, la plus faible, dans le quartzite micacé altéré Q5Q (21,04 ppm). Les spectres de REE normalisés au quartzite micacé montrent un enrichissement relatif en REE dans la plupart des matériaux d'altération, des anomalies négatives en Eu, des anomalies positives et négatives en Ce (Fig. 14b).

Par rapport aux données de chondrite (McDonough et Sun, 1995), les matériaux d'altération montrent un enrichissement élevé en LREE (Fig. 14c). Les matériaux sols intercalant les quartzites micacés altérés et les sols de la partie supérieure du profil d'altération sont particulièrement enrichis en REE par rapport à la chondrite.

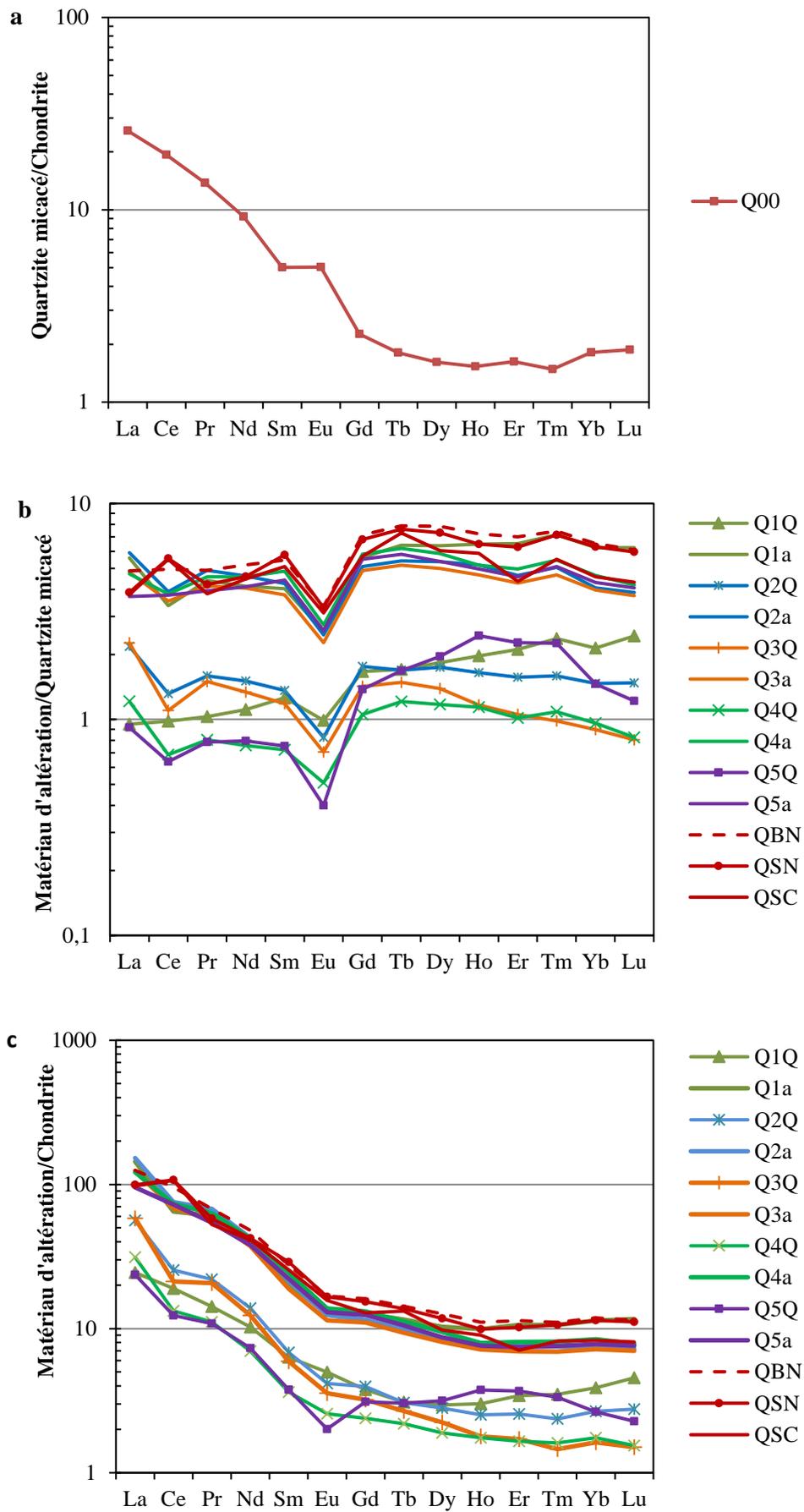


Figure 14. Spectres des terres rares (a) des quartzites micacés normalisés par rapport à la chondrite de McDonough and Sun (1995), (b) des matériaux d'altération normalisés par rapport aux quartzites micacés et (c) des matériaux d'altération normalisés par rapport à la chondrite de McDonough and Sun (1995)

Les spectres normalisés montrent des anomalies négatives en Ce dans les matériaux sols intercalant les quartzites micacés altérés et les sols de la partie supérieure du profil d'altération ($Ce/Ce^* \sim 0,60 - 0,82$). Le matériau nodulaire supérieur QSN ($Ce/Ce^* = 1,38$) et le matériau argilo-caillouteux superficiel ($Ce/Ce^* = 1,45$) présentent des anomalies négatives en (Eu/Eu* $\sim 0,39 - 0,68$). Les valeurs du rapport $(La/Yb)_N$ sont élevées dans les matériaux étudiés et confirment le fractionnement des REE révélé par les rapports élevés LREE/HREE, en particulier dans les sols. Les valeurs du rapport $(La/Yb)_N$ varient entre 6,30 (Q1Q) et 35,78 (Q3Q).

II.2.2.5. Corrélations géochimiques

Les corrélations géochimiques sont présentées par la matrice de corrélation de Pearson (Tab. 8). Dans les matériaux d'altération étudiés, parmi les LILE, Li est fortement lié à Rb ($r = 0,94$; $N = 13$), Sr ($r = 0,61$), Ba ($r = 0,69$). Le silicium est très fortement lié à Li, Rb, Sr et Ba ($r = 0,89, 0,87, 0,78, 0,82$, respectivement). De fortes corrélations existent également entre Li, Rb, Sr, Ba et Mg ($r = 0,88, 0,89, 0,83, 0,86$, respectivement), Ca ($r = 0,73, 0,83, 0,94, 0,96$, respectivement), Na ($r = 0,84, 0,84, 0,82, 0,81$, respectivement), et K ($r = 0,96, 0,94, 0,74, 0,81$, respectivement). Or, Si est étroitement lié à Mg ($r = 0,95$), Ca ($r = 0,91$), Na ($r = 0,97$) et K ($r = 0,97$). Parmi les HFSE, Mo est lié à U ($r = 0,68$) et Nb ($r = 0,64$), tandis que Nb est lié à Ta ($r = 0,79$). Des éléments traces ferromagnésiens ou métaux de transition, V est fortement lié à Co ($r = 0,88$) et Ni ($r = 0,78$). Ces deux éléments V et Co sont également fortement liés entre eux ($r = 0,83$). Le vanadium, Co et Ni sont liés à Ti ($r = 0,92, 0,75, 0,89$, respectivement), à Al ($r = 0,65, 0,59, 0,65$, respectivement) et à Fe^{3+} ($r = 0,85, 0,82, 0,94$, respectivement).

Conclusion

Les quartzites micacés de Sa' sont constitués de plaquettes quartziques de 1 à 2 cm d'épaisseur séparées par des lits de minéraux ferromagnésiens millimétriques à multi-millimétriques. Le profil d'altération présente l'organisation macromorphologique atypique quartzites micacés/saprolite grossière (SG)/Sol/SG/Sol/SG/Sol/SG/Sol/SG/Matériaux nodulaires/Matériaux argilo-caillouteux meubles. La Kaolinitisation prédomine dans les matériaux sols intercalant des lits de quartzites micacés altérés et dans les sols de la partie supérieure du profil d'altération. Les matériaux sols de la base du profil d'altération et ceux de la partie supérieure se situent dans le domaine de latéritisation faible à modérée.

Tableau 8. Matrice de corrélation des composants géochimiques des matériaux d'altération de Sa'a

Variables	Si	Ti	Al	Fe ³⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	P	PF	Li	Rb	Cs	Sr	Ba	U	Zr	Nb	Hf	Mo	W	Ta	V	Cr	Co	Ni	LREE	HREE	REE		
Si	1,00																															
Ti	-0,41	1,00																														
Al	0,15	0,62	1,00																													
Fe ³⁺	-0,54	0,75	0,56	1,00																												
Mn	-0,35	0,28	0,26	0,33	1,00																											
Mg	0,95	-0,30	0,30	-0,35	-0,39	1,00																										
Ca	0,91	-0,33	0,38	-0,28	-0,23	0,93	1,00																									
Na	0,97	-0,34	0,18	-0,44	-0,36	0,97	0,92	1,00																								
K	0,97	-0,33	0,26	-0,55	-0,36	0,94	0,86	0,92	1,00																							
P	-0,44	0,72	0,45	0,82	0,28	-0,34	-0,28	-0,40	-0,46	1,00																						
PF	-0,19	0,70	0,88	0,83	0,31	-0,02	0,12	-0,14	-0,15	0,72	1,00																					
Li	0,89	-0,20	0,28	-0,53	-0,36	0,88	0,73	0,84	0,96	-0,42	-0,15	1,00																				
Rb	0,87	-0,17	0,44	-0,40	-0,39	0,89	0,83	0,84	0,94	-0,35	0,06	0,94	1,00																			
Cs	0,27	0,32	0,79	0,27	-0,21	0,40	0,45	0,28	0,37	0,17	0,68	0,41	0,65	1,00																		
Sr	0,78	-0,12	0,52	-0,07	-0,26	0,83	0,94	0,82	0,74	-0,09	0,34	0,61	0,79	0,64	1,00																	
Ba	0,82	-0,19	0,54	-0,14	-0,27	0,86	0,96	0,81	0,81	-0,19	0,31	0,69	0,85	0,66	0,96	1,00																
U	-0,63	0,77	0,39	0,90	0,40	-0,46	-0,47	-0,53	-0,63	0,80	0,66	-0,55	-0,52	0,05	-0,32	-0,39	1,00															
Zr	0,87	-0,26	0,01	-0,51	-0,30	0,84	0,69	0,91	0,84	-0,41	-0,33	0,83	0,71	0,05	0,56	0,53	-0,47	1,00														
Nb	0,15	0,45	0,57	0,56	0,08	0,29	0,41	0,32	0,06	0,44	0,66	0,00	0,17	0,43	0,60	0,43	0,44	0,19	1,00													
Hf	0,86	-0,26	-0,03	-0,59	-0,30	0,80	0,63	0,87	0,84	-0,44	-0,39	0,85	0,71	0,01	0,50	0,47	-0,51	0,99	0,09	1,00												
Mo	-0,20	0,40	0,61	0,82	0,23	0,00	0,14	-0,12	-0,24	0,65	0,83	-0,31	-0,12	0,40	0,29	0,26	0,68	-0,35	0,64	-0,45	1,00											
W	0,12	0,49	0,46	0,32	0,12	0,12	0,10	0,08	0,12	0,69	0,46	0,16	0,16	0,23	0,20	0,13	0,36	0,13	0,31	0,15	0,30	1,00										
Ta	-0,18	0,76	0,59	0,59	0,18	-0,12	0,02	-0,08	-0,19	0,62	0,72	-0,17	0,00	0,45	0,29	0,12	0,55	-0,12	0,79	-0,15	0,46	0,49	1,00									
V	-0,46	0,89	0,65	0,94	0,27	-0,27	-0,25	-0,34	-0,42	0,74	0,82	-0,36	-0,25	0,37	-0,02	-0,10	0,88	-0,35	0,61	-0,41	0,70	0,36	0,72	1,00								
Cr	-0,44	-0,06	-0,20	0,45	0,16	-0,42	-0,31	-0,43	-0,58	0,57	0,19	-0,65	-0,59	-0,24	-0,22	-0,31	0,36	-0,49	0,06	-0,54	0,43	0,24	0,00	0,16	1,00							
Co	-0,43	0,92	0,65	0,85	0,33	-0,30	-0,29	-0,38	-0,38	0,77	0,79	-0,27	-0,21	0,39	-0,09	-0,14	0,78	-0,37	0,43	-0,39	0,51	0,39	0,66	0,88	0,14	1,00						
Ni	-0,38	0,75	0,59	0,82	0,26	-0,28	-0,23	-0,37	-0,37	0,90	0,80	-0,31	-0,21	0,39	0,00	-0,08	0,71	-0,40	0,40	-0,43	0,60	0,70	0,63	0,78	0,49	0,83	1,00					
LREE	0,78	-0,01	0,30	-0,39	-0,35	0,72	0,65	0,76	0,80	-0,13	0,00	0,84	0,85	0,47	0,67	0,62	-0,42	0,77	0,26	0,80	-0,26	0,44	0,24	-0,20	-0,44	-0,12	-0,04	1,00				
HREE	-0,30	-0,33	-0,52	-0,05	0,23	-0,38	-0,29	-0,34	-0,39	0,02	-0,35	-0,47	-0,57	-0,66	-0,44	-0,41	-0,04	-0,33	-0,39	-0,33	-0,04	-0,37	-0,47	-0,28	0,43	-0,21	-0,25	-0,59	1,00			
REE	-0,30	-0,34	-0,52	-0,05	0,23	-0,38	-0,29	-0,34	-0,39	0,02	-0,35	-0,47	-0,56	-0,66	-0,44	-0,41	-0,05	-0,33	-0,39	-0,33	-0,04	-0,37	-0,47	-0,29	0,43	-0,21	-0,25	-0,58	1,00	1,00		

N = 13

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

Les teneurs en REE sont relativement faibles dans les matériaux d'altération étudiés. Les spectres des REE normalisés au quartzite micacé montrent un enrichissement relatif en REE dans la plupart des matériaux d'altération, des anomalies négatives en Eu, des anomalies positives et négatives en Ce. Le silicium est très fortement lié aux LILE. Le vanadium, Co et Ni sont liés à Ti, Al et Fe³⁺. Les paramètres géotechniques des graveleux latéritiques dérivés des processus pédogénétiques sus-décrits sont présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV.

CARACTERISATION MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE ET GEOTECHNIQUE DES GRAVELEUX LATERITIQUES

Introduction

Le présent chapitre se focalise sur les résultats des analyses chimico-minéralogiques et des tests géotechniques réalisés sur les graveleux latéritiques des profils d'altération étudiés, ainsi que sur les liens statistiques, entre composants géochimiques, paramètres géochimiques et paramètres géotechniques.

I. Caractéristiques minéralogiques et géochimiques graveleux latéritiques

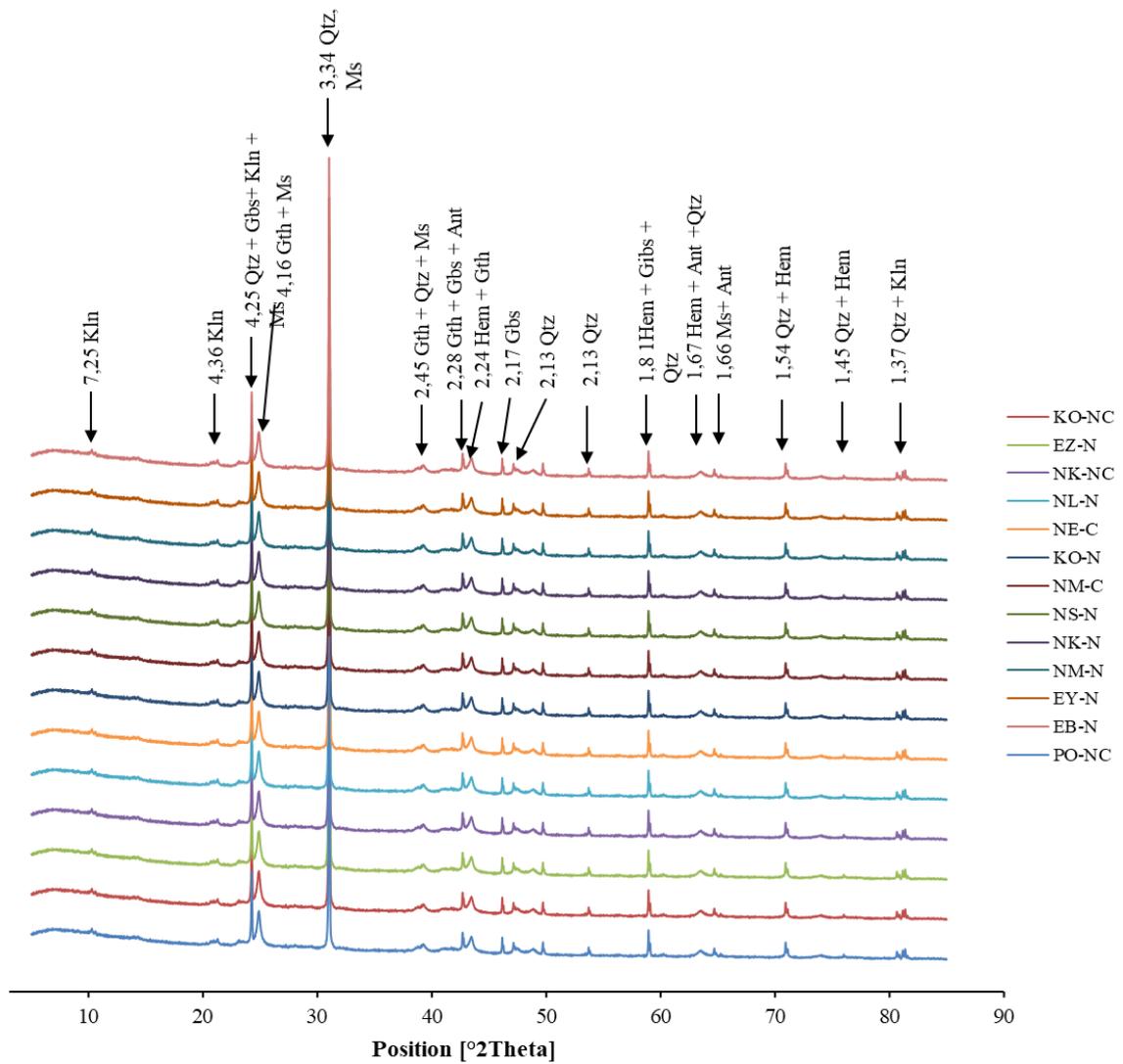
Les graveleux latéritiques de la zone de Sa'a ont une matrice argileuse de couleur jaunâtre. Les nodules de couleur rougeâtre (10R 5/8) sont millimétriques à décimétriques, subarrondis ou arrondis. On y observe des blocs de quartz de taille variée. Ces blocs représentent 35 % du matériau.

L'exploitation des spectres de diffraction de rayons X (Fig. 15) montre que les graveleux latéritiques développés sur quartzites micacés sont composés de quartz, kaolinite, hématite, goethite, gibbsite et muscovite. Les résultats de l'analyse semi-quantitative de ces graveleux latéritiques par la méthode des aires des pics sont présentés dans le tableau 9. Ces matériaux étudiés sont constitués de quartz (30 – 43 %), gibbsite (19 – 27 %), kaolinite (12 – 22 %) et goethite (14 – 21 %). Les teneurs en hématite sont faibles (≤ 3 %). La muscovite est présente dans 02 échantillons de matériaux (EB-N et EZ-N; ~ 12 %). Dans les autres matériaux, ce minéral est présent à l'état de traces.

Les graveleux latéritiques de la région de Sa'a présentent des teneurs élevées en SiO_2 (55,35 – 79,76 %) et, faibles à modérées en Al_2O_3 (6,88 – 11,82 %) et en Fe_2O_3 (5,15 – 21,07 %). Ces trois oxydes majoritaires représentent en moyenne 80 % en poids d'oxydes des graveleux latéritiques étudiés. Les teneurs en PF sont comprises entre 4,32 % et 9,11 %. Les teneurs en TiO_2 sont relativement faibles et, inférieures à 2 %. Les autres oxydes sont présents à des teneurs inférieures à 1 % (Tab. 10).

Le diagramme $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ (Fig. 16) montre que les matériaux étudiés sont en majorité silico - ferrugino - alumineux. Les teneurs en SiO_2 de ces matériaux d'altération sont proches de celles contenues dans les quartzites micacés (Fig. 16).

Les valeurs des indices d'altération étudiés sont consignées dans le tableau 11. Les graveleux latéritiques étudiés présentent des valeurs de CIA élevées (80,2 – 98,9 %). Les valeurs de $\text{MIA}_{(O)}$ de ces graveleux latéritiques sont en général supérieures à 92,0 %, soit une moyenne 94,1 %. Les valeurs de IOL (Tab. 11) sont moyennes ($\sim 23,1$ %) dans les graveleux latéritiques de Sa'a.



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

Figure 15. Diffractogrammes de rayons X des graveleux latéritiques de Sa'a

Tableau 9. Estimation semi-quantitative (%) de la composition minéralogique des graveleux latéritiques de la zone de Sa'a

	Kaolinite	Quartz	Gibbsite	Goethite	Hématite	Muscovite	Total	Balance
EZ-N	15	30	26	15	3	13	100	0
NL-N	12	42	27	20	0	0	100	0
KO-N	14	40	25	20	2	0	100	0
NS-N	15	37	26	20	2	0	100	0
NK-N	14	40	27	18	1	0	100	0
NM-N	15	39	26	19	1	0	100	0
EY-N	15	39	26	17	0	0	98	2
EB-N	14	39	19	15	1	12	100	0
NK-NC	13	40	24	19	1	0	97	3
KO-NC	14	39	25	20	2	0	100	0
PO-NC	17	42	22	18	1	0	100	0
NE-C	13	43	20	14	2	0	91	9
NM-C	17	37	24	21	2	0	100	0
Minimum	12	30	19	14	0	0	-	-
Moyenne	14	39	24	18	1	2	-	-
Maximum	17	43	27	21	3	13	-	-
CV	10	8	10	12	60	235	-	-

N : Nodulaire ; NC : Nodulaire cailloteux ; C : Cailloteux

Tableau 10. Données d'analyses géochimiques (%) des graveleux latéritiques dans la zone de Sa'a

	EZ-N	NL-N	KO-N	NS-N	NK-N	NM-N	EY-N	EB-N	NK-NC	KO-NC	PO-NC	NE-C	NM-C	Min.	Moy.	Max.	CV
SiO ₂	55,35	72,43	71,28	69,09	65,8	71,67	68,92	74,9	79,76	78,93	72,12	70,13	64,18	55,35	70,40	79,8	8,64
TiO ₂	1,13	0,39	0,38	0,54	0,8	0,49	0,52	0,53	0,33	0,32	0,6	0,68	0,56	0,32	0,56	1,13	37,7
Al ₂ O ₃	11,82	8,69	10,57	9,86	11,26	7,23	10,79	8,67	7,65	6,88	10,15	13,57	10,57	6,88	9,82	13,6	18,9
Fe ₂ O _{3t}	21,07	10,71	10,08	12,05	14,22	13,68	10,44	9,01	5,92	7,69	8,57	5,15	15,86	5,15	11,10	21,1	37,5
Fe ₂ O ₃	20,86	10,54	10,00	11,86	13,96	13,49	10,32	8,70	5,72	7,47	8,38	4,94	15,64	4,94	10,91	20,86	36,8
FeO	0,19	0,15	0,07	0,17	0,23	0,17	0,11	0,28	0,18	0,2	0,17	0,19	0,2	0,07	0,18	0,28	27,8
MnO	0,03	0,07	0,03	0,06	0,06	0,08	0,16	0,06	0,05	0,04	0,1	0,08	0,03	0,03	0,06	0,16	53,5
MgO	0,14	0,09	0,17	0,07	0,1	0,08	0,2	0,15	0,11	0,07	0,14	0,17	0,12	0,07	0,12	0,2	32,4
CaO	0,02	0,04	0,05	0,04	0,06	0,05	0,04	0,04	0,06	0,05	0,07	0,09	0,1	0,02	0,06	0,1	36,6
Na ₂ O	0,03	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,02	0,04	0,04	<0,02	<0,02	0,16	0,02	0,02	0,05	0,16	95,1
K ₂ O	0,59	0,18	0,05	0,07	0,19	0,17	0,75	0,66	1,12	0,05	0,33	2,7	0,36	0,05	0,56	2,7	125
P ₂ O ₅	0,14	0,05	0,04	0,07	0,1	0,1	0,04	0,05	0,04	0,05	0,12	0,05	0,14	0,04	0,07	0,14	48,4
PF	8,66	6,03	6,93	6,8	6,79	5,7	6,93	5,01	4,32	4,95	6,57	6,51	7,11	4,32	6,33	8,66	17,2
Total	99,03	98,71	99,61	98,67	99,43	99,31	98,84	99,15	99,42	99,06	98,79	99,3	99,08				

PF : Perte au feu ; Min. : Minimum ; Max. : Maximum ; CV : Coefficient de Variation.

Pour les contraintes liées à l'exploitation de la méthode de restructuration normative altérologique (Ekodeck et Kamgang, 2002, 2011), on a : $Fe_2O_3 = 1,111 \times [(0,9 \times Fe_2O_{3t}) - FeO]$.

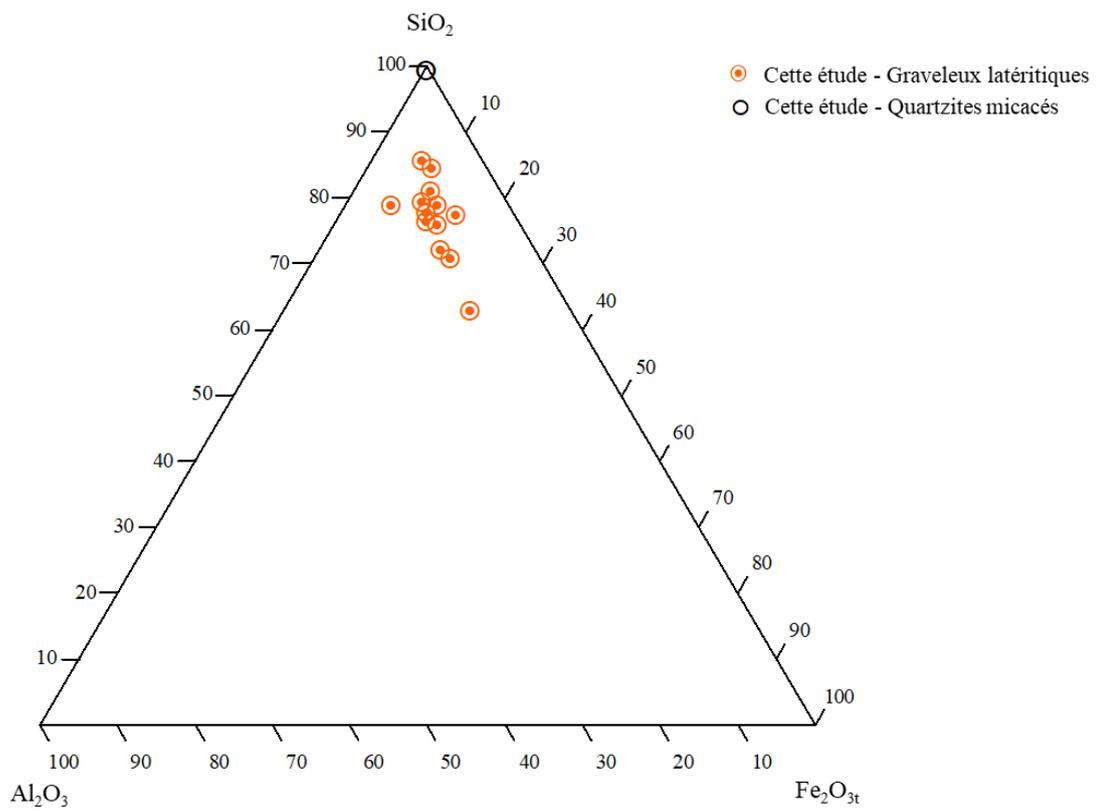


Figure 16. Position des graveaux latéritiques de Sa'a dans le diagramme géochimique SiO₂ – Al₂O₃ – Fe₂O_{3t} (Diagramme *in* Onana, 2010)

Tableau 11. Valeurs des indices géochimiques dans les graveleux latéritiques de la zone de Sa'a

	Code	CIA (%)	MIA _(O) (%)	IOL (%)	
Roche		75,5	75,8	0,6	
	EZ-N	94,2	95,9	37,3	
	NL-N	97,4	97,2	21,1	
	KO-N	92,5	92,7	23,5	
	NS-N	98,9	98,4	24,1	
	NK-N	97,9	97,6	27,9	
	NM-N	97,1	97,4	22,6	
	EY-N	92,5	92,7	23,5	
	EB-N	91,1	92,2	19,1	
	Graveleux latéritiques	NK-NC	85,1	87,6	14,5
		KO-NC	98,8	97,8	15,6
		PO-NC	96,3	95,5	20,6
		NE-C	80,2	81,7	21,1
		NM-C	95,9	96,5	29,2
Minimum		80,2	81,7	14,5	
Moyenne		93,7	94,1	23,1	
Maximum	98,9	98,4	37,3		
CV	5,7	4,9	24,7		

CIA = $100 \times [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})]$, Nesbitt et Young (1982) ;

MIA = $100 \times [\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_{3t} / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_{3t} + \text{MgO} + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})]$, Babechuk *et al.*(2014) ;

IOL = $100 \times [\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_{3t} / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_{3t})]$, Babechuk *et al.* (2014).

Les paramètres altérologiques normatifs déterminés (Tab. 12) sont l'indice relatif de lixiviation potentielle (IRLP), le degré virtuel relatif d'altération de la roche (DVRAR), l'indice relatif d'induration potentielle (IRIP) et l'indice relatif de confinement potentiel (IRCP). Les valeurs de DVRAR (A) varient entre 13,4 % (KO-NC) et 27,5 % (NE-C), pour une moyenne de 19,50 %, tandis que celles de IRLP (L) varient entre 59,7 % (NE-C) et 95,4 % (NS-N), soit une moyenne de 84,1 %. Les valeurs de IRIP (I) oscillent entre 12,1 % (NE-C) et 38,9 % (EZ-N), soit 23,9 % de moyenne.

II. Paramètres géotechniques des graveaux latéritiques

II.1. Poids volumique des grains solides

Les valeurs de poids volumique des grains solides (γ_s) des graveaux latéritiques de Sa'a varient entre 26,7 et 27,8 kN/m³, soit une moyenne de 27,3 kN/m³ (Tab. 13).

II.2. Granularité

Les fractions les plus importantes permettant de caractériser la granularité des graveaux latéritiques sont le squelette (<2 mm), le mortier (<0,425 mm), les fines (<80 μ m) et les argiles (<2 μ m). Les teneurs en squelette varient entre 20,4 % et 59,1 %, celles en mortier entre 10,5 % et 32,2 % et, celles en fines, entre 12,1 % et 38,8 %, soit pour ces fines, une valeur moyenne de 26,2 % (Tab. 13). La teneur en argiles varie entre 9,6 % et 30,5 % pour 19,7 % de moyenne (Tab. 13).

II.3. Paramètres de plasticité

Les valeurs de limite de liquidité LL de la région de Sa'a varient entre 42 % et 65 %, soit une moyenne de 55 % (Tab. 13). Les valeurs correspondantes d'indice de plasticité IP sont comprises entre 13 % et 31 %, pour une moyenne de 22 % (Tab. 13).

Les valeurs de bleu de méthylène VBS sont comprises entre 1,8 et 3,5 g/100 g, soit une moyenne de 2,8 g/100 g (Tab. 13).

II.4. Paramètres dérivés

Les paramètres dérivés étudiés sont : le module de classement Gm, l'activité des colloïdes Ac, le produit de plasticité Pp, le module de plasticité Pm et le potentiel de gonflement (ϵ_s). Les valeurs de Gm varient entre 1,71 et 2,54, pour une moyenne de 2,14 (Tab. 13). Les valeurs de Ac oscillent entre 0,56 et 2,92, soit une moyenne de 1,30.

Tableau 12. Valeurs des paramètres normatifs altérologiques des graveleux latéritiques dans la zone de Sa'a

	Code	DVRAR (%)	IRLP (%)	IRIP (%)
Quartzites micacés	Q00	0,98	0,0	0,0
	EZ-N	26,7	87,0	38,9
	NL-N	16,7	92,1	24,3
	KO-N	21,6	81,2	24,5
	NS-N	18,9	95,4	28,2
	NK-N	22,0	86,7	27,6
	NM-N	15,0	92,2	25,4
	EY-N	21,6	81,2	24,5
	EB-N	15,5	78,9	19,6
Graveleux latéritiques	NK-NC	15,1	67,1	12,4
	KO-NC	13,4	93,5	18,4
	PO-NC	19,4	89,1	23,4
	NE-C	27,5	59,7	12,1
	NM-C	20,5	89,9	32,1
	Minimum	13,4	59,7	12,1
	Moyenne	19,5	84,1	23,9
	Maximum	27,5	95,4	38,9
	CV	21,7	12,1	29,5

DVRAR : degré virtuel relatif d'altération de la roche ; IRLP : Indice Relatif de Lixiviation Potentielle

IRIP : Indice Relatif d'Induration Potentielle ; CV : Coefficient de Variation

Tableau 13. Valeurs moyennes des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques dans la zone de Sa'a

	γ_s (kN/m ³)	< 2 mm (%)	< 0,425 μ m (%)	< 80 μ m (%)	< 2 μ m (%)	Sables (%)	Graviers (%)	LL (%)	IP (%)	VBS g/100g	Gm	Ac	Pm	Pp	ε_s	TEO (%)	DSM	CBR (%)	Classification	
																			HRB	USCS
EZ-N	27,3	52,9	28,7	35,7	26,9	45,5	18,8	56	15	2,8	1,83	0,56	431	536	0,005	12,4	2,00	71	A-2-7(0)	SM
NL-N	27,0	26,5	14,4	18,1	13,6	31,1	50,8	58	22	2,6	2,41	1,62	317	398	0,011	13,0	1,94	24	A-1-b(0)	GM
KO-N	27,0	45,1	27,8	34,0	26,4	37,1	28,9	65	30	3,0	1,93	1,14	834	1020	0,022	11,7	2,01	39	A-2-7(0)	SC
NS-N	27,3	31,5	20,0	22,4	18,8	24,5	53,1	64	25	2,8	2,26	1,33	500	560	0,015	11,9	2,01	25	A-1-b(0)	GM
NK-N	27,3	30,6	10,5	12,1	9,6	45,4	42,5	42	20	1,8	2,47	2,08	210	242	0,009	6,8	2,26	60	A-1-a(0)	SC
NM-N	27,7	26,1	16,3	19,0	14,8	40,3	40,7	53	22	2,8	2,39	1,49	359	418	0,011	11,2	2,08	21	A-1-b(0)	SM
EY-N	27,5	53,7	25,7	34,5	24,0	39,1	26,4	53	21	3,5	1,86	0,88	540	725	0,010	10,6	2,05	15	A-2-7(0)	SM
EB-N	27,8	59,1	25,6	33,6	24,8	51,3	15,1	54	21	3,0	1,82	0,85	538	706	0,010	12,2	2,03	27	A-2-7(0)	SM
NK-NC	26,7	52,3	25,0	34,0	23,6	34,5	31,5	54	25	3,0	1,89	1,06	625	850	0,015	8,7	2,14	39	A-2-7(0)	SC
KO-NC	26,7	24,8	12,1	15,9	11,7	28,8	55,3	58	13	2,6	2,47	1,11	157	207	0,003	8,5	2,10	31	A-1-a(0)	GM
PO-NC	27,6	58,0	32,2	38,8	30,5	44,2	17,0	54	26	2,9	1,71	0,85	837	1009	0,016	12,7	2,02	23	A-2-7(0)	SC
NE-C	27,2	20,4	10,9	14,4	10,6	27,1	58,5	58	31	2,5	2,54	2,92	338	446	0,024	11,5	2,03	31	A-1-a(0)	GC
NM-C	27,7	33,0	20,9	27,5	20,2	10,8	61,7	52	21	2,8	2,19	1,04	439	578	0,010	13,2	1,99	18	A-2-7(0)	GM
Minimum	26,7	20,4	10,5	12,1	9,6	10,8	15,1	42	13	1,8	1,71	0,56	157	207	0,0034	6,8	1,94	15	-	-
Moyenne	27,3	39,5	20,8	26,2	19,7	35,4	38,5	55	22	2,8	2,14	1,30	471	592	0,0125	11,1	2,05	33	-	-
Maximum	27,8	59,1	32,2	38,8	30,5	51,3	61,7	65	31	3,5	2,54	2,92	837	1020	0,0241	13,2	2,26	71	-	-
CV	1,3	34,5	34,0	34,7	34,1	29,6	41,3	9,9	22	13,4	13,6	46,1	42,6	42,4	46,2	16,9	3,8	48,3	-	-

N = 13 échantillons

N = nombre d'échantillons ; Gm = $[300 - (\% \leq 2 \text{ mm} + \% < 425 \mu\text{m} + \% < 75 \mu\text{m})]/100$; Pm = PI x pourcentage passants au tamis de 425 μ m (Charman,1988) ; Pp = IP x pourcentage passants au tamis de 75 μ m (Charman, 1988) ; $\varepsilon_s = 1 \times 10^{-5} \text{PI}^{2,24}$ (Millogo, 2008) ; Ac = $\text{PI}/(\% < 2 \mu\text{m})$, TEO : teneur en eau optimale ; DSM : densité sèche maximale ; AASTHO : American Association for State Highway and Transportation ; USCS : Unified Soil Classification System.

Le module de plasticité (P_m) présente des valeurs comprises entre 157 et 837, soit une moyenne de 471. Les valeurs de P_p varient entre 207 et 1020, soit une moyenne de 592. L'expression du potentiel de gonflement ε_s utilisée est celle des sols contenant entre 8 et 65 % de phase argileuse. Les valeurs de ε_s des graveleux latéritiques de Sa'a varient entre 0,0034 et 0,0241, soit 0,0125 en moyenne (Tab. 13).

II.5. Classification

Les graveleux latéritiques de Sa'a sont selon la classification AASHTO (Tab. 13), des fragments de pierres, graviers et sables grossiers (A-1-a) ou fins (A-1-b) et, des graviers et sables limoneux (A-2-7). D'après la classification USCS (Tab. 13), les matériaux de Sa'a sont des sables silteux (SM), des graviers silteux (GM), des sables argileux (SC) et des graviers argileux (GC).

II.6. Paramètres de compactage

Les valeurs moyennes des données de compactage sont présentées dans le tableau 13. Les valeurs de teneur en eau optimale (TEO) des graveleux latéritiques étudiés varient entre 6,8 % et 13,2 %, soit une moyenne de 11,1 %. Les valeurs de densité sèche maximale (DSM) varient entre 1,94 et 2,26, pour une moyenne de 2,05.

Les valeurs de CBR à 95% OPM sont comprises entre 15 % et 71 %, soit une moyenne de 33 %.

II.7. Variabilité statistique

II.7.1. Variabilité des paramètres minéralogiques et géochimiques

Quatre tests de normalité ont été appliqués aux données afin de vérifier si elles suivent une loi normale. Ces tests ont été réalisés selon Anderson et Darling (1954), Shapiro et Wilk (1965), Lilliefors (1969) et Jarque et Bera (1981). Dans la présente étude, les données d'un paramètre suivent une loi normale si au moins 02 tests sont concluants.

Les graveleux latéritiques de la zone de Sa'a sont constitués de quartz, kaolinite, hématite, goethite, gibbsite et, parfois, de muscovite. Les tests de normalité appliqués aux données minéralogiques indiquent que les données des paramètres quartz et muscovite ne suivent pas une loi normale (Tab. 14). Ces paramètres ne sont donc pas pris en compte dans l'analyse statistique. La matrice de corrélation appliquée aux données minéralogiques est présentée dans le tableau 15. On observe une tendance de corrélation directe entre la goethite et la gibbsite ($r = 0,55$).

Tableau 14. Tests de normalité appliqués aux données des paramètres minéralogiques des graveleux latéritiques de Sa'a

Variable\Test	Shapiro-Wilk	Anderson-Darling	Lilliefors	Jarque-Bera
(Kaolinite)	0,2772	0,1752	0,1590	0,8552
(Quartz)	0,0121	0,0179	0,0107	0,0084
(Gibbsite)	0,0278	0,0252	0,1205	0,3142
(Goethite)	0,0941	0,0769	0,2667	0,5088
(Hématite)	0,1106	0,0418	0,0795	0,8957
(Muscovite)	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0080

$N = 13$; niveau de signification $\alpha = 5 \%$

* Les valeurs en gras indiquent les p-value inférieurs au niveau de signification α .

Tableau 15. Matrice de corrélation des minéraux des graveleux latéritiques de la zone de Sa'a

Variabes	Kaolinite	Gibbsite	Goethite	Hématite
Kaolinite	1,00			
Gibbsite	-0,05	1,00		
Goethite	0,15	0,55	1,00	
Hématite	0,24	-0,11	-0,12	1,00

$N = 13$; p-value = 5 %

* Les valeurs en gras indiquent les corrélations significatives.

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) réalisée sur les 13 échantillons montre que 82,05 % de la variance totale est exprimée sur les 03 premiers axes. (Fig. 17). Ce qui représente un très bon pourcentage pour une interprétation suivant le plan de ces 03 axes. La position des paramètres goethite, gibbsite, kaolinite et, dans une moindre mesure, celle de l'hématite, proches du cercle de corrélation indiquent qu'ils sont bien exprimés suivant les 03 premiers axes. La représentation du nuage des individus et des composants minéralogiques sur les plans factoriels (Fig. 18) indique les graveleux latéritiques de Sa'a se singularisent par la présence de kaolinite, goethite et gibbsite, et rarement, par celle de l'hématite.

L'ACP suivant la matrice de Pearson a été réalisée dans le but de regrouper les éléments ayant un même comportement géochimique. Les données des paramètres géochimiques Na_2O , K_2O et P_2O_5 ne suivent pas une loi normale (Tab. 16). Par conséquent, ils ne pas pris en compte dans la réalisation de la matrice de corrélation et de l'ACP. De plus, l'analyse a porté sur les oxydes SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_{3t} , ainsi que la perte au feu (PF), qui influencent le plus le comportement géotechnique des graveleux latéritiques (Tab. 17). De fortes corrélations négatives existent entre SiO_2 - Al_2O_3 (-0,67), SiO_2 - Fe_2O_{3t} (-0,86) et SiO_2 - PF (-0,94). Par contre des corrélations positives apparaissent entre Al_2O_3 - PF (0,74) et Fe_2O_{3t} - PF (0,72). Le pourcentage de variabilité représenté sur les trois premiers axes F1-F2-F3 de l'ACP est de 82,05 % (Fig. 18). Ce qui représente un pourcentage convenable pour l'interprétation de cette ACP. La position de SiO_2 et Fe_2O_{3t} , Al_2O_3 et PF, proche de la périphérie des cercles de corrélation, indique que ces oxydes interviennent majoritairement dans la formation des graveleux latéritiques dans la zone de Sa'a. Les corrélations qui existent entre ces trois oxydes sont confirmées par leurs positions sur le cercle de corrélation (Fig. 19).

La matrice de corrélation appliquée aux composants minéralogiques et géochimiques (Tab. 18) montre des tendances de corrélations inverses entre goethite et Al_2O_3 (-0,52), hématite et SiO_2 (-0,44), ainsi que des tendances de corrélations directes, entre hématite et PF (0,42), kaolinite et Fe_2O_{3t} (0,42) et, gibbsite et Fe_2O_{3t} (0,51).

II.7.2. Variabilité des paramètres géotechniques

Le test de normalité réalisé sur les paramètres géotechniques étudiés indique que ces derniers étudiés suivent une loi normale (Tab. 19). Le plan factoriel F1-F2 (Fig. 20) explique environ 70 % de l'information contenue dans les données géotechniques. Cette représentation est donc acceptable. La somme des cosinus carrés sur des axes factoriels, pour une observation donnée, donne une idée de la fidélité de la représentation dans le plan défini par les axes pour cette observation

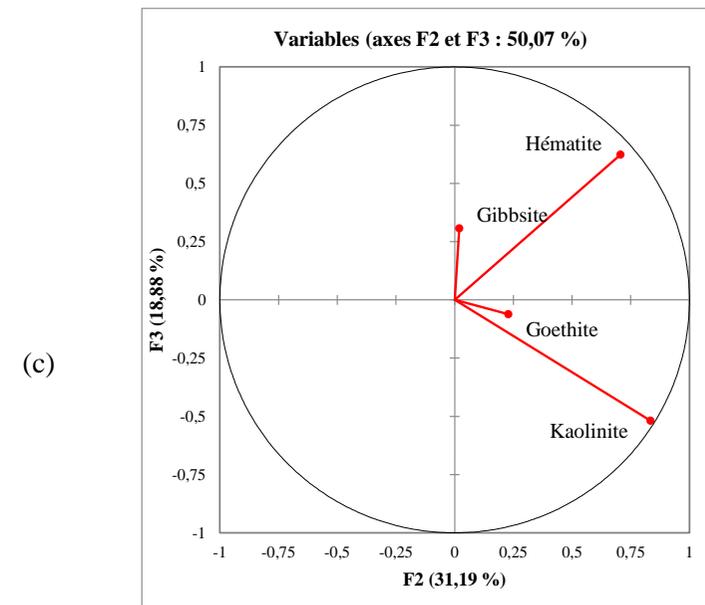
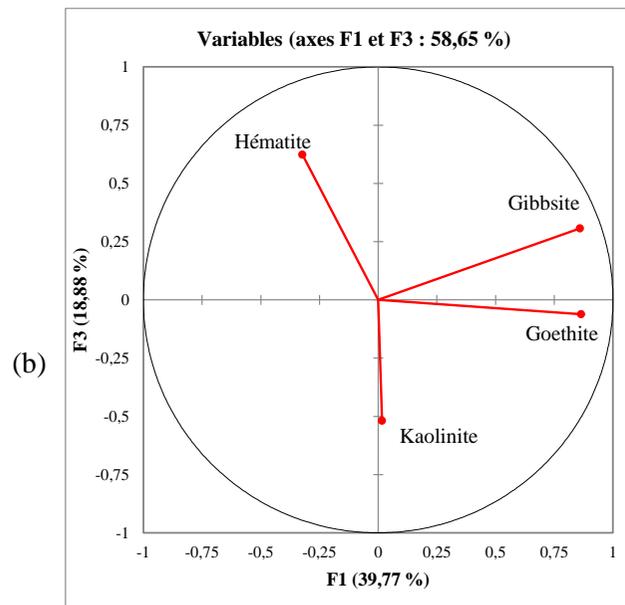
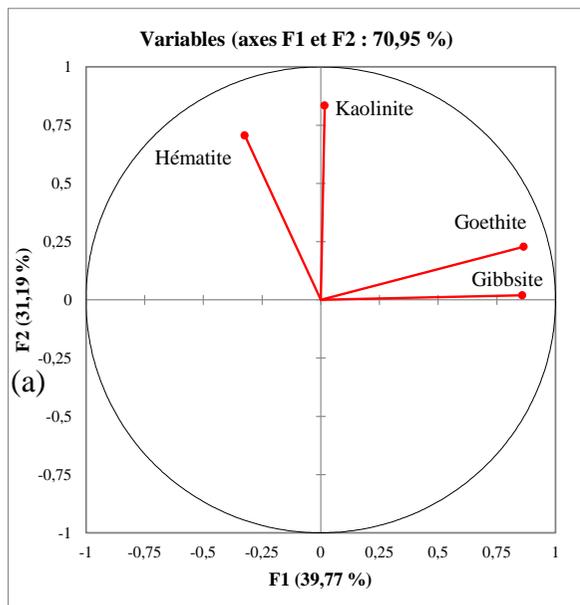


Figure 17. Cercle de corrélation des données minéralogiques des graveleux latéritiques de la zone de Sa'a

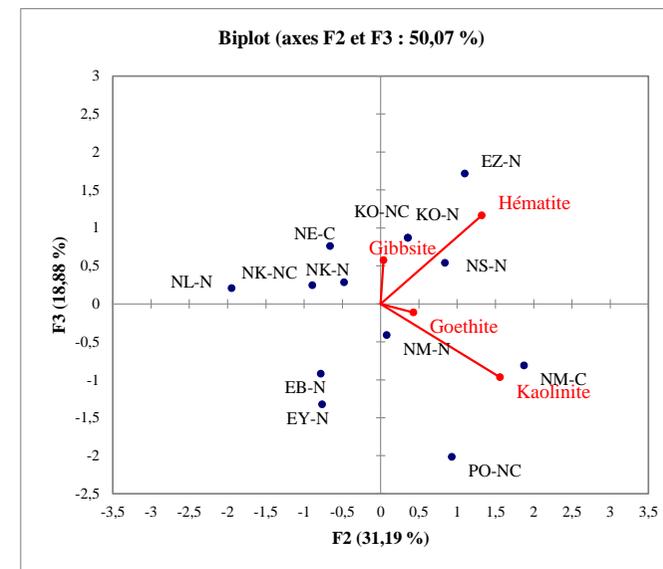
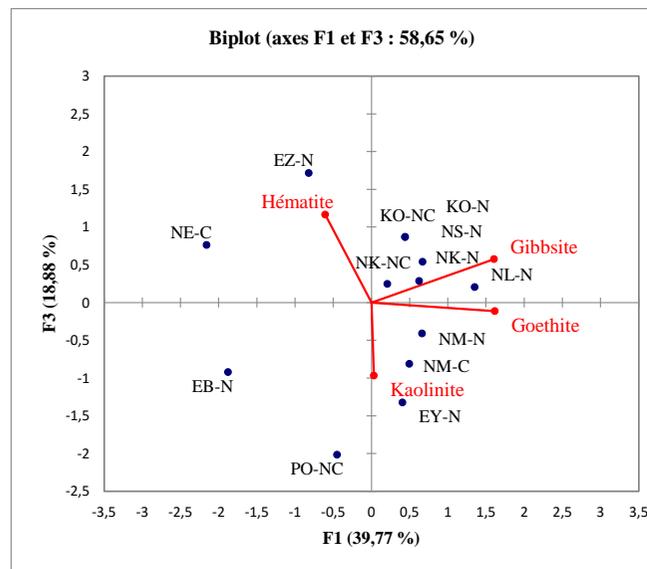
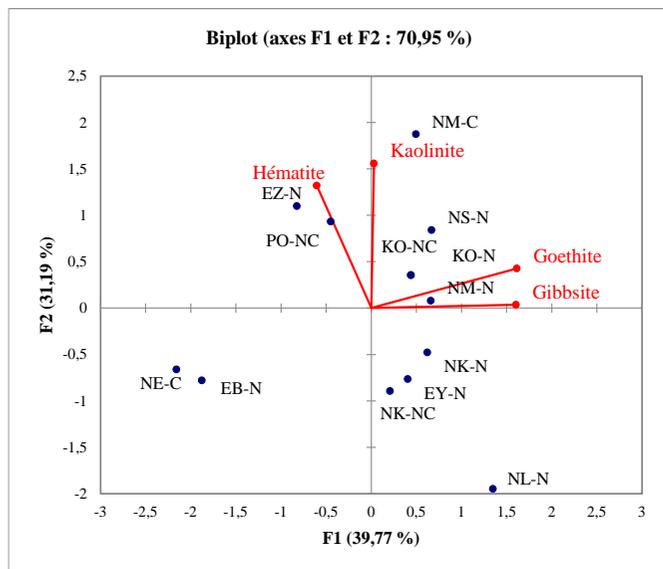


Figure 18. Biplot de corrélation des composants minéralogiques des graveleux latéritiques de la zone de Sa'a

Tableau 16. Tests de normalité appliqués aux données des paramètres géochimiques des graveleux latéritiques de Sa'a

Variable\Test	Shapiro-Wilk	Anderson-Darling	Lilliefors	Jarque-Bera
(SiO ₂)	0,3961	0,3511	0,2991	0,4853
(TiO ₂)	0,0453	0,0855	0,1901	0,0702
(Al ₂ O ₃)	0,8316	0,7415	0,8543	0,8789
(Fe ₂ O ₃)	0,6208	0,6806	0,5628	0,5184
(FeO)	0,5246	0,2213	0,1222	0,8731
(MnO)	0,0441	0,0889	0,2623	0,0713
(MgO)	0,5864	0,7148	0,9260	0,6909
(CaO)	0,1978	0,1098	0,2228	0,5739
(Na ₂ O)	< 0,0001	< 0,0001	0,0007	< 0,0001
(K ₂ O)	0,0005	0,0007	0,0368	< 0,0001
(P ₂ O ₅)	0,0085	0,0057	0,0079	0,4297
(PF)	0,4904	0,2543	0,3147	0,9970

N = 13 ; niveau de signification $\alpha = 5 \%$

* Les valeurs en gras indiquent les p-value inférieurs au niveau de signification α .

Tableau 17. Matrice de corrélation des composants chimiques (% d'oxydes) des graveleux latéritiques dans la zone de Sa'a

Variables	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O _{3t}	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	PF
SiO ₂	1,00									
TiO ₂	-0,87	1,00								
Al ₂ O ₃	-0,67	0,66	1,00							
Fe ₂ O _{3t}	-0,86	0,68	0,21	1,00						
MnO	0,07	-0,04	0,14	-0,25	1,00					
MgO	-0,22	0,21	0,61	-0,14	0,42	1,00				
CaO	0,13	-0,15	0,25	-0,33	0,03	0,08	1,00			
K ₂ O	0,03	0,19	0,52	-0,43	0,23	0,48	0,45	1,00		
P ₂ O ₅	-0,72	0,66	0,24	0,77	-0,17	-0,16	0,18	-0,25	1,00	
PF	-0,94	0,75	0,74	0,72	0,02	0,33	-0,13	-0,06	0,59	1

N = 13 ; p-value = 5 %

* Les valeurs en gras indiquent les corrélations significatives.

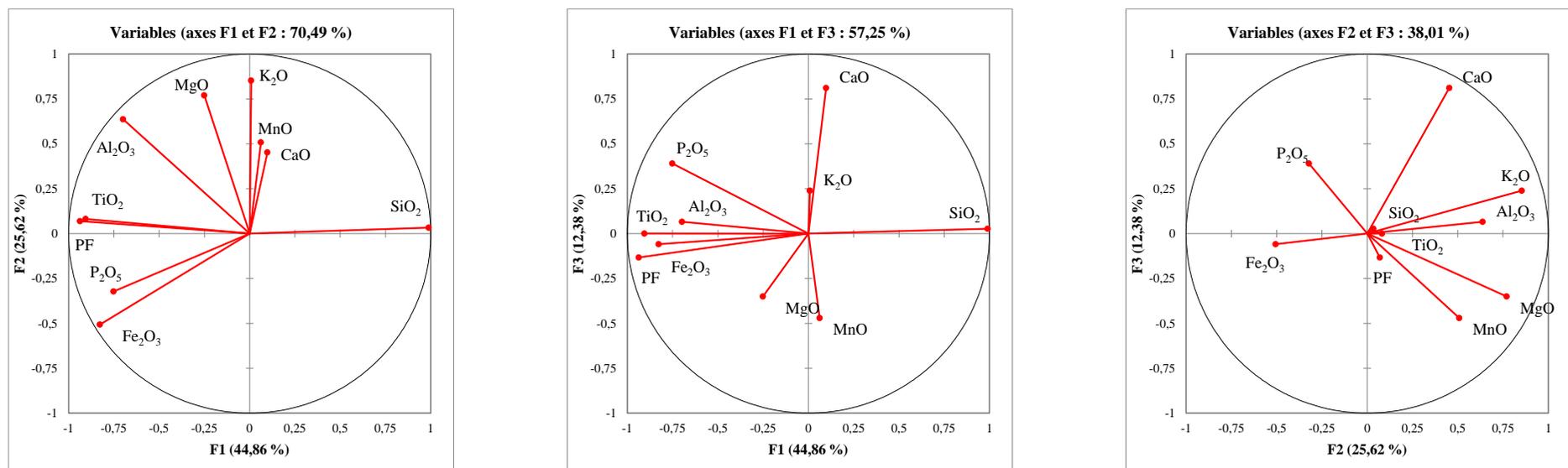


Figure 19. Cercles de corrélation des composants géochimiques des graveleux latéritiques dans la zone de Sa'a suivant les axes F1-F2-F3

Tableau 18. Matrice de corrélation des données chimiques et minéralogiques des graveleux latéritiques de la zone de Sa'a

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O _{3t}	PF	Kaolinite	Gibbsite	Goethite	Hématite
SiO ₂	1,00							
Al ₂ O ₃	-0,67	1,00						
Fe ₂ O _{3t}	-0,86	0,21	1,00					
PF	-0,94	0,74	0,72	1,00				
Kaolinite	-0,39	0,13	0,42	0,42	1,00			
Gibbsite	-0,29	-0,17	0,51	0,30	-0,05	1,00		
Goethite	0,27	-0,52	0,04	-0,19	0,15	0,55	1,00	
Hématite	-0,44	0,32	0,36	0,42	0,24	-0,11	-0,12	1,00

N=13 ; p-value = 5 %

* Les valeurs en gras indiquent les corrélations significatives.

Tableau 19. Tests de normalité appliqués aux données des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques de Sa'a

Variable\Test	Shapiro-Wilk	Anderson-Darling	Lilliefors	Jarque-Bera
(γ_s)	0,3879	0,5048	0,8468	0,6885
(<2 mm)	0,0662	0,0543	0,0990	0,4768
(<0,425 μm)	0,3500	0,3897	0,3067	0,6051
(<80 μm)	0,0902	0,0677	0,0303	0,4947
(<2 μm)	0,3745	0,3802	0,3330	0,5965
(Limon)	0,2980	0,3327	0,2331	0,5857
(Sable)	0,7166	0,7506	0,9709	0,6135
(Gravier)	0,2801	0,3893	0,5227	0,5653
(LL)	0,1614	0,1028	0,1859	0,6469
(IP)	0,6104	0,4084	0,4705	0,9550
(VBS)	0,1043	0,0699	0,1777	0,2091
(Gm)	0,0669	0,0560	0,1071	0,4749
(Ac)	0,0311	0,0369	0,0925	0,0578
(Pm)	0,5674	0,6139	0,6900	0,7525
(Pp)	0,6357	0,7477	0,7226	0,7424
(ϵ_s)	0,6002	0,5566	0,5125	0,7905
(TEO)	0,0564	0,0526	0,1166	0,3265
(DSM)	0,0603	0,0567	0,0967	0,0781
(CBR)	0,0231	0,0222	0,0550	0,1492

N =13 ; niveau de signification $\alpha = 5 \%$

* Les valeurs en gras indiquent les p-value inférieurs au niveau de signification α .

LL : Limite de Liquidité ; IP : Indice de plasticité ; VBS : Valeur de Bleu de Méthylène ; Ac : Activité ; TEO : Teneur en Eau Optimale ; DSM : Densité Sèche Maximale ; CBR : California Bearing Ratio

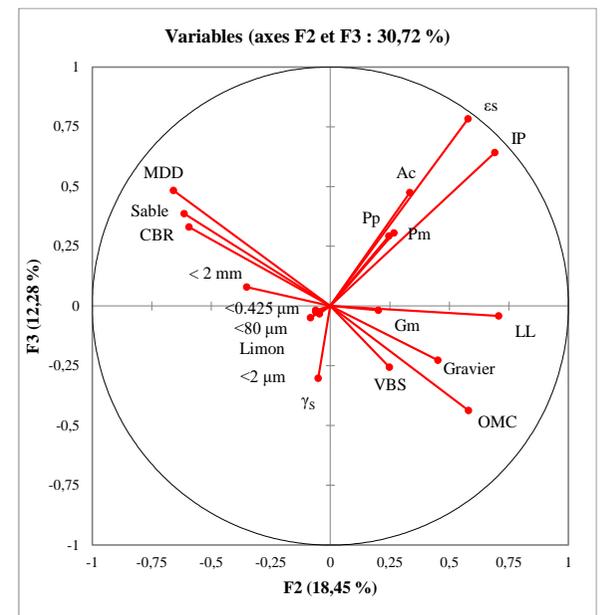
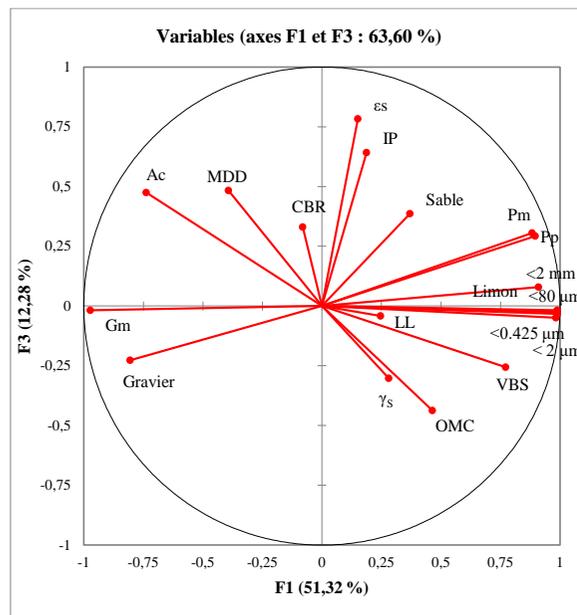
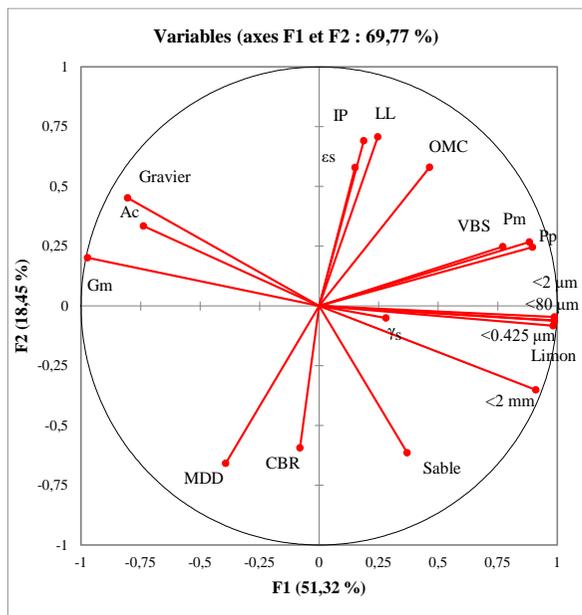


Figure 20. Cercles de corrélation des paramètres géotechniques suivant les axes F1-F2-F3 des individus issus de l'ACP

Plus le nombre d'axes mobilisés est important moins fiable est l'interprétation à partir de ces axes (Tab. 20). Il ressort donc que les paramètres <2 mm, <425 μm , <75 μm , <2 mm, limons, sables, graviers Gm, Pm, Pp, avec des valeurs de \cos^2 variant entre 0,9 – 0,6 sur l'axe F1 représentent le plus la réalité. Ils sont suivis sur cet axe par les paramètres VBS et Ac, avec des valeurs de \cos^2 comprises dans l'intervalle 0,6 – 0,5. Les paramètres sable, LL, IP, TEO, DSM et CBR, avec des valeurs de \cos^2 comprises dans l'intervalle 0,5 – 0,2, sont liés à l'axe F2. Les paramètres ε_s et γ_s sont respectivement liés aux axes F3 et F4. Cette répartition des paramètres sur 04 axes factoriels indique une grande dispersion des valeurs des paramètres géotechniques dans les graveleux latéritiques étudiés (Tab. 20). Sur cette base, l'interprétation de l'ACP à partir des paramètres à \cos^2 inférieurs à 0,6 sera donc hasardeuse (Tab. 20). Le plan factoriel (Fig. 21) permet d'observer une dispersion des individus. La matrice de corrélation issue de l'ACP permet d'observer des corrélations entre les différents paramètres géotechniques (Tab. 21). De fortes corrélations positives existent entre le paramètre <2 mm et <0,425 μm (0,90), <80 μm (0,93), <2 μm (0,90), limon (0,91), Pm (0,72), Pp (0,75). Ce paramètre est négativement lié au gravier (-0,91), Gm (-0,98), Ac (-0,73). Le mortier (<0,425 μm) est positivement corrélé à <80 μm (0,99), <2 μm (1,00), Limon (1,00), VBS (0,72), Pm (0,86) et Pp (0,87) et, inversement corrélé au gravier (-0,79), Gm (-0,97) et Ac (-0,77). Le pourcentage des fines (<80 μm) est directement lié aux paramètres granulométriques <2 μm (0,99), limon (0,99), VBS (0,99), Pm (0,83) et Pp (0,87). Ce paramètre est négativement lié au gravier (-0,78), à Gm (-0,98) et Ac (-0,78). Le paramètre <2 μm est fortement et positivement corrélé aux limons (1,00), VBS (0,72), Pm (0,87) et Pp (0,87) et, inversement au pourcentage de gravier (-0,78), Gm (-0,97) et Ac (-0,77). La teneur en sable est fortement inversement corrélée à la teneur en gravier (-0,84). Le pourcentage de gravier est directement lié au module de classement Gm (0,86). L'argilosité VBS, est modérément corrélée à Gm (-0,70) et Pp (0,67). Il n'existe pas de corrélation significative entre la limite de liquidité LL et l'indice de plasticité IP.

Conclusion

Les graveleux latéritiques de la zone de Sa'a ont des épaisseurs qui varient entre 0,40 et 1,20 m. Leur couleur est jaunâtre. Ces matériaux sont constitués de quartz, kaolinite, gibbsite et goethite et, accessoirement, d'hématite et de muscovite. Sur le plan géochimique, les graveleux latéritiques étudiés présentent de fortes teneurs en SiO_2 et de faibles teneurs en sesquioxydes.

Tableau 20. Cosinus carré des variables

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
γ_s	0,08	0,00	0,09	0,76	0,01	0,00	0,02	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
<2 mm	0,83	0,12	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
<0,425 μm	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<80 μm	0,97	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<2 μm	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Limon	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sable	0,14	0,38	0,15	0,05	0,10	0,18	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Gravier	0,65	0,20	0,05	0,01	0,03	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LL	0,06	0,50	0,00	0,27	0,05	0,05	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
IP	0,04	0,48	0,41	0,05	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
VBS	0,60	0,06	0,07	0,01	0,09	0,10	0,03	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00
Gm	0,95	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ac	0,54	0,11	0,23	0,06	0,01	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pm	0,78	0,07	0,09	0,00	0,01	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pp	0,80	0,06	0,09	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ε_s	0,02	0,33	0,61	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TEO	0,22	0,34	0,19	0,06	0,18	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
DSM	0,15	0,43	0,23	0,00	0,15	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
CBR	0,01	0,35	0,11	0,12	0,28	0,10	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00

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

LL : Limite de Liquidité ; IP : Indice de plasticité ; VBS : Valeur au Bleue de Méthylène ; Ac : Activité ; TEO : Teneur en Eau Optimale ; DSM : Densité Sèche Maximale ; CBR : California Bearing Ratio

Tableau 21. Matrice de corrélation des paramètres géotechniques des graveleux latéritiques de Sa'a

	γ_s	<2 mm	<0,425 μm	<80 μm	<2 μm	Limon	Sable	Gravier	LL	IP	VBS	Gm	Ac	Pm	Pp	ε_s	OMC	MDD	CBR	
γ_s	1,00																			
<2 mm	0,25	1,00																		
<0,425 μm	0,26	0,90	1,00																	
<80 μm	0,23	0,93	0,99	1,00																
<2 μm	0,26	0,90	1,00	0,99	1,00															
Limon	0,25	0,91	1,00	0,99	1,00	1,00														
Sable	0,20	0,57	0,34	0,32	0,33	0,34	1,00													
Gravier	-0,26	-0,91	-0,79	-0,78	-0,78	-0,79	-0,84	1,00												
LL	-0,34	-0,06	0,21	0,17	0,22	0,21	-0,30	0,10	1,00											
IP	0,02	-0,01	0,13	0,10	0,13	0,13	-0,13	0,03	0,35	1,00										
VBS	0,16	0,62	0,72	0,77	0,72	0,72	0,03	-0,46	0,41	0,12	1,00									
Gm	-0,25	-0,98	-0,97	-0,98	-0,97	-0,98	-0,45	0,86	-0,08	-0,06	-0,70	1,00								
Ac	-0,15	-0,73	-0,77	-0,78	-0,77	-0,77	-0,23	0,60	-0,11	0,45	-0,63	0,77	1,00							
Pm	0,16	0,72	0,86	0,83	0,87	0,87	0,21	-0,61	0,35	0,57	0,62	-0,81	-0,45	1,00						
Pp	0,13	0,75	0,87	0,86	0,87	0,87	0,20	-0,62	0,31	0,55	0,67	-0,83	-0,47	0,99	1,00					
ε_s	-0,17	0,00	0,08	0,04	0,08	0,09	0,09	-0,09	0,44	0,92	0,08	-0,04	0,48	0,50	0,47	1,00				
TEO	0,47	0,17	0,44	0,40	0,45	0,42	-0,20	-0,10	0,47	0,25	0,44	-0,31	-0,24	0,40	0,37	0,10	1,00			
DSM	-0,19	-0,09	-0,36	-0,34	-0,37	-0,35	0,30	-0,01	-0,66	-0,18	-0,50	0,23	0,25	-0,32	-0,31	-0,10	-0,94	1,00		
CBR	-0,30	0,12	0,01	-0,02	0,00	0,01	0,41	-0,26	-0,22	-0,28	-0,47	-0,05	0,01	-0,17	-0,18	-0,11	-0,37	0,39	1,00	

N =13 ; p-value = 5 %

* Les valeurs en gras indiquent les corrélations significatives.

LL : Limite de Liquidité ; IP : Indice de plasticité ; VBS : Valeur au Bleu de Méthylène ; Ac : Activité ; TEO : Teneur en Eau Optimale ; DSM : Densité Sèche Maximale ; CBR : California Bearing Ratio

L'étude de la variabilité statistique des paramètres indique des corrélations entre IP et Fe_2O_{3t} et, entre le CBR et Fe_2O_{3t} . L'indice de plasticité IP est corrélé à MIA. Les valeurs de IRLP sont négativement corrélées à IP. Au plan géotechnique, les matériaux étudiés sont des graviers argileux ou silteux et des graviers et sables limoneux dont la portance moyenne est de 33 %. Les processus pédogénétiques conduits à la formation des graveleux latéritiques ont également généré des argiles latéritiques superficielles dont les paramètres géotechniques sont présentés dans le prochain chapitre.

CHAPITRE V.

CARACTERISATION MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE ET GEOTECHNIQUE DES ARGILES LATERITIQUES SUPERFICIELLES ET DES ARGILES ALLUVIALES

Introduction

Le présent chapitre est consacré aux caractéristiques macroscopiques des argiles alluvionnaires, aux caractéristiques minéralogiques et géochimiques des argiles latéritiques et des argiles alluviales ainsi qu'à leurs paramètres géotechniques. Les paramètres géotechniques des matériaux naturels sont présentés, ensuite, ceux des matériaux stabilisés aux argiles alluviales et, enfin, ceux des mélanges argiles latéritiques - chaux.

I. Caractères macroscopiques des argiles alluviales

Les argiles alluviales (AL) ont été prélevées sur les berges de la Sanaga, à 388 m d'altitude. A partir de la surface, on observe :

- de 0 à 0,15 m, une couche d'argile noire (10YR 4/3), riche en matière organique, marquée de la présence de racines millimétriques ;
- de 0,15 à 1,30 m, une couche d'argile grise (5YR 6/1) présentant des tâches rouges ; ces argiles grises ont servi à stabiliser les argiles latéritiques ;
- au-delà 1,30 m, une couche de sable argileux (10YR 5/2).

II. Minéralogie et géochimie des argiles latéritiques et des argiles alluviales

II.1. Minéralogie

Les résultats de l'analyse diffractométrique aux rayons X des argiles latéritiques meubles superficielles de Sa'a (Fig. 21a) montrent qu'elles se composent de kaolinite (7,20 Å ; 4,46 Å ; 3,58 Å ; 2,34 Å ; 1,98 Å), quartz (4,26 Å ; 3,34 Å ; 1,82 Å), goethite (4,99 Å ; 4,16 Å ; 2,69 Å ; 1,67 Å), hématite (2,69 Å ; 1,67 Å ; 1,45 Å) et muscovite (10,03 Å ; 4,46 Å ; 3,34 Å). Les résultats de l'analyse semi-quantitative (Tab. 22) montrent que les teneurs en kaolinite sont comprises entre 10 % à Nkom (NK) et 47 % à Nkolang (NA). Les teneurs en quartz varient entre 16 % à Nkolang (NA) et 42 % à Nkolmgbana (NM1) et, celles en gibbsite, entre 12 % à Elig-Zogo (EZ) et 21 % à Eyene (EY). La goethite et l'hématite ont, respectivement, des teneurs qui varient entre 9 % à Elig-Zogo (EZ) et 15 % à Nsanmendouga (NS), et entre 0,32 % à Ebo (EB) et 4 % à Elig-Zogo (EZ). La muscovite est le minéral le moins représenté. Elle n'a pas été identifiée à Nsanmendouga (NS), Nkolmebanga (NM), Nkolmgbana (NM1), Eyene (EY) et Kokoe (KO). Ses teneurs varient entre 8 % à Nkolang (NA) et 14 % à Ebo (EB). Les argiles alluviales (Fig. 21b) sont principalement constituées de quartz (20 %), kaolinite (19 %), muscovite (17 %), illite (12 %), gibbsite (7 %), goethite (4 %), hématite (3 %) et anatase (2 %).

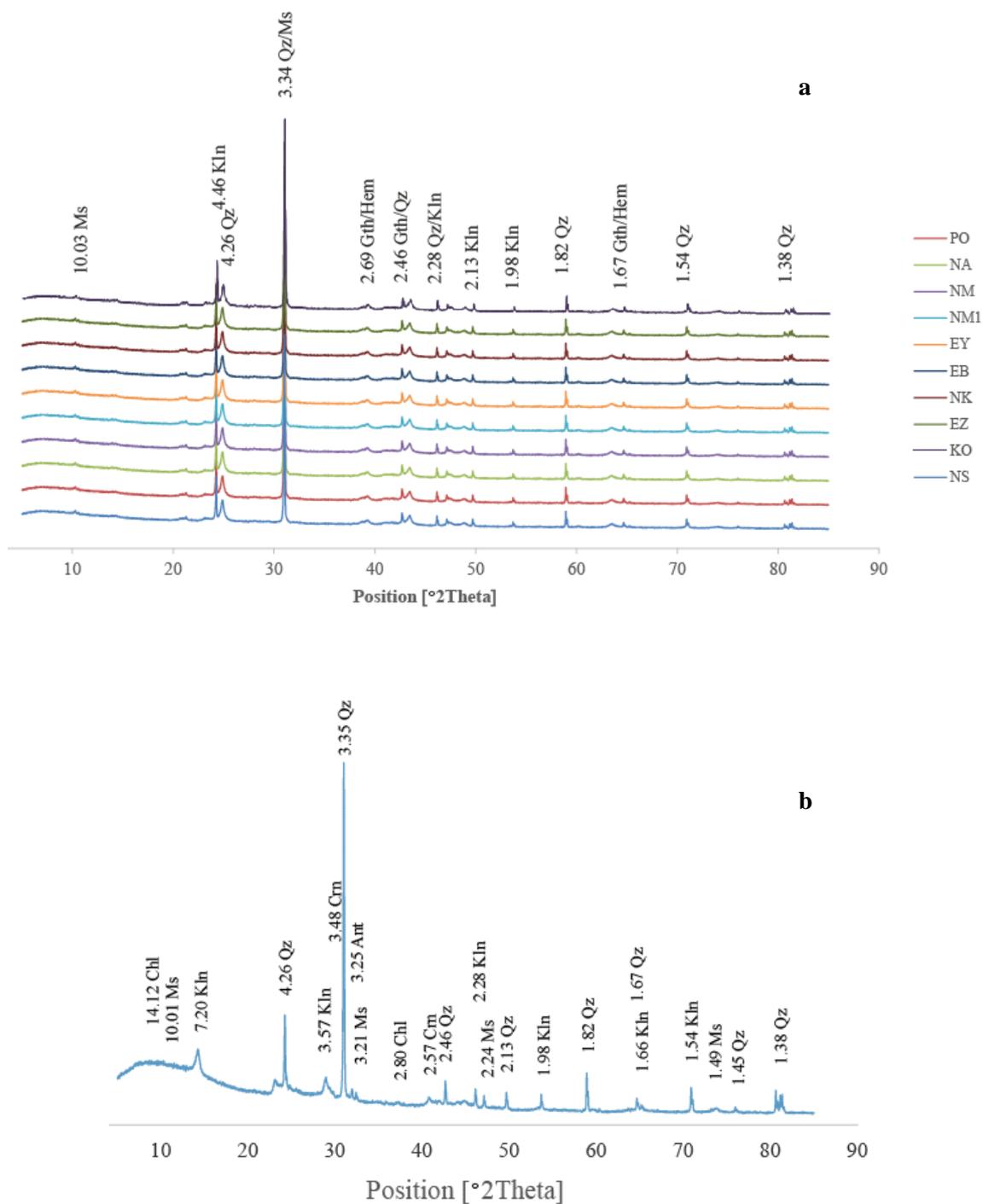


Figure 21. Diffractogrammes de rayons X (a) des argiles latéritiques superficielles de Sa'a, (b) de l'argile alluviale de la Sanaga

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

Tableau 22. Composition minéralogique semi-quantitative des argiles latéritiques superficielles de Sa'a

	NS	PO	NA	NM	NM1	EY	EB	NK	EZ	KK	AL
Kaolinite	28	13	47	32	23	22	13	10	39	31	19
Quartz	30	38	16	34	42	37	35	41	21	32	20
Gibbsite	21	15	12	17	19	21	20	19	12	17	7
Goethite	15	12	9	12	14	14	15	14	9	14	4
Hématite	2	1	1	1	1	1	1	1	4	3	3
Muscovite	0	12	8	0	0	0	14	13	11	0	17
Illite	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12
Anatase	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Total	96	91	93	96	99	95	98	98	96	97	84
Balance	4	9	7	4	1	5	2	2	4	3	16

II.2. Géochimie

Les résultats d'analyses géochimiques des éléments majeurs montrent que les argiles latéritiques superficielles de Sa'a sont à prédominance silicique (Tab. 23). Les teneurs en SiO_2 sont comprises entre 49,43 % (EZ) et 84,55 % (NK). SiO_2 est suivi par Al_2O_3 dont les teneurs varient entre 4,70 % (NK) et 23,61 % (EZ). Les teneurs en Fe_2O_{3t} sont comprises entre 3,66 % (NK) et 11,58 % (EY). Celles en K_2O varient entre 0,15 % (NM1) et 1,55 % (NM), tandis que celles en TiO_2 oscillent entre 0,64 % (NK) et 2,14 % (EZ). Les autres oxydes présentent de faibles teneurs (~1 %). Les argiles alluviales présentent des teneurs élevées en SiO_2 (61,43 %), suivies de Al_2O_3 (18,01 %) et de Fe_2O_{3t} (4,85 %). Les teneurs en fondants $\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{MgO}$ sont inférieures à 2,50 %. La teneur en TiO_2 est de 1,58 %

III. Paramètres géotechniques

III.1. Paramètres géotechniques des argiles latéritiques superficielles

III.1.1. Granularité

Les argiles latéritiques de Sa'a présentent une granularité étalée (Fig. 22). Les trois principales classes granulométriques observables sont : les sables, les limons et les argiles (Tab. 24). Seuls les matériaux d'Eyene présentent des proportions considérables de graviers (20 %). Cette proportion de graviers est faible (<5 %) pour les autres matériaux étudiés. Le pourcentage de sables varie entre 17,20 % (NA) et 51,80 % (NK). Les teneurs en limons sont comprises entre 11,50 % (EY) et 40,00 % (NM). Les argiles ont des teneurs comprises entre 8,00 % (NK) et 51,00 % (EZ).

La projection des données granulométriques dans le diagramme de classification ternaire belge (Bah *et al.*, 2005 ; Fig. 23) montre que les matériaux argileux meubles superficiels de Nsanmendouga, Nkolang, Nkolmgbana, Ebogo et Elig-Zogo sont des argiles sableuses, tandis que ceux de Kokoe, Polo et Eyene sont des argiles fortement sableuses. Les matériaux de Nkolmebanga sont des argiles légères alors que ceux de Nkom sont des limons sableux.

III.1.2. Limites d'Atterberg et indice de plasticité

Les données de limite de liquidité (LL), de limite de plasticité (LP) et d'indice de plasticité (IP) des matériaux argileux meubles superficiels de Sa'a sont présentées dans le tableau 24. Les valeurs de LL (20 %), LP (14 %) et IP (6 %) les plus faibles sont celles des matériaux de Nkom. Les valeurs les plus élevées de LL (47 %) et IP (19 %) sont observées à Elig-Zogo, tandis que celle de LP, la plus élevée (31 %), est celle des matériaux de Nkolang.

Tableau 23. Composition géochimique en éléments majeurs (%) des argiles latéritiques superficielles et des argiles alluviales (AL) de Sa'a

	NS	PO	NA	NM	NM1	EY	EB	NK	EZ	KK	AL
SiO ₂	59,09	70,35	53,61	54,77	58,25	63,26	76,04	84,55	49,43	59,91	61,43
TiO ₂	1,18	1,22	1,17	1,20	1,51	0,74	0,80	0,64	2,14	1,02	1,58
Al ₂ O ₃	19,42	12,00	23,23	19,71	20,18	12,91	12,06	4,70	23,61	19,12	18,01
Fe ₂ O _{3t}	8,49	6,02	7,53	9,31	8,36	11,58	3,76	3,66	9,23	8,04	4,85
FeO	0,43	0,42	0,41	0,51	0,17	0,17	0,24	0,63	0,80	0,43	1,23
MnO	0,10	0,16	0,07	0,12	0,21	0,58	0,03	0,11	0,09	0,08	0,08
MgO	0,13	0,21	0,21	0,27	0,11	0,20	0,19	0,11	0,38	0,17	0,36
CaO	0,07	0,22	0,11	0,32	0,10	0,06	0,08	0,18	0,81	0,15	0,24
Na ₂ O	0,02	0,07	0,03	0,11	<0,02	0,05	0,03	0,05	0,04	0,04	0,25
K ₂ O	0,20	1,11	0,76	1,55	0,15	0,93	0,82	0,25	0,73	0,17	1,29
P ₂ O ₅	0,07	0,18	0,05	0,20	0,06	0,06	0,03	0,06	0,15	0,10	0,11
PF	10,91	7,70	12,65	11,51	10,45	8,85	5,73	5,17	13,03	11,20	9,77
Total	99,68	99,24	99,43	99,08	99,41	99,26	99,58	99,49	99,76	100,02	99,20

PF : Perte au feu

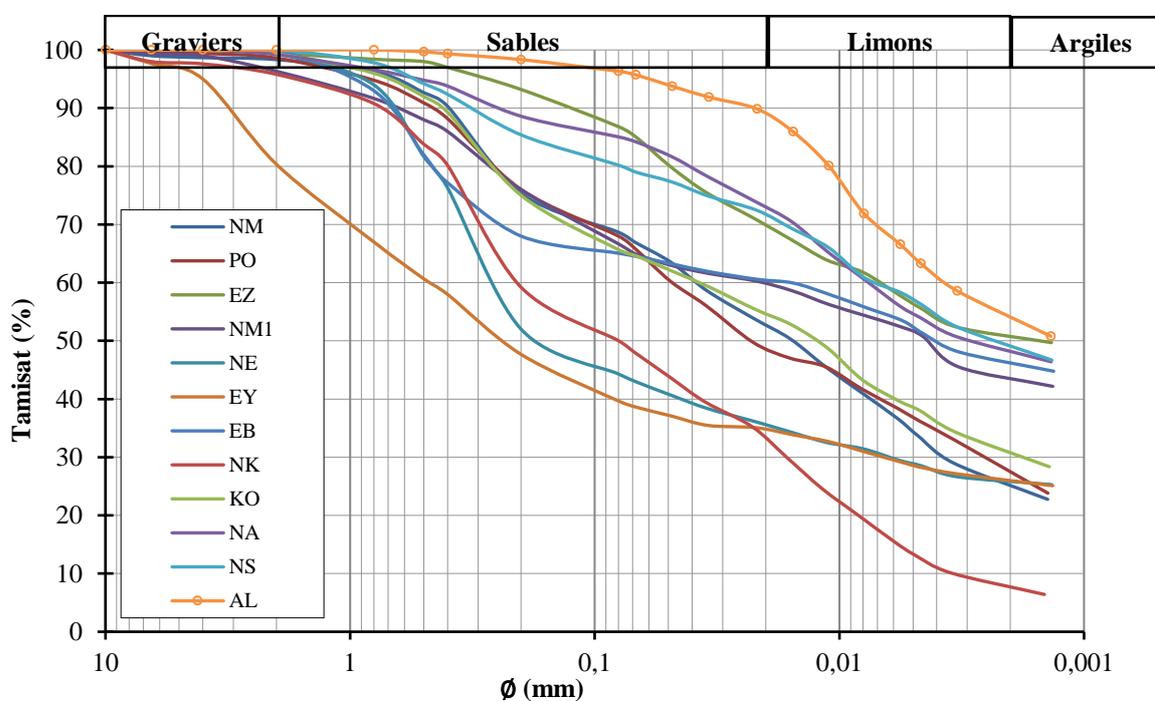


Figure 22. Courbes granulométriques des argiles latéritiques superficielles de Sa'a

Tableau 24. Données des paramètres physiques des argiles latéritiques superficielles de Sa'a

		NS	PO	NA	NM	NM1	EY	EB	NK	EZ	KO	AL
Granularité	Sables (%)	22,40	37,60	17,20	34,33	33,33	42,83	36,20	51,80	19,40	37,33	6,00
	Limons (%)	28,40	33,00	33,70	40,00	19,00	11,50	17,80	36,00	29,00	31,00	40,00
	Argiles (%)	49,20	28,00	48,30	24,00	44,00	26,00	46,00	8,00	51,00	31,00	54,00
Limites de consistance (%)	LL (%)	46	30	46	44	45	40	40	20	47	41	43
	LP (%)	37	19	31	28	27	28	24	14	28	28	25
	IP (%)	9	11	15	16	18	12	16	6	19	13	18
Argilosité	VBS (%)	2,27	2,20	2,87	2,53	3,00	2,80	2,80	2,07	4,00	2,33	5,07

LL : Limite de liquidité ; LP : Limite de plasticité ; IP : Indice de plasticité ; VBS : Valeur de bleu de méthylène

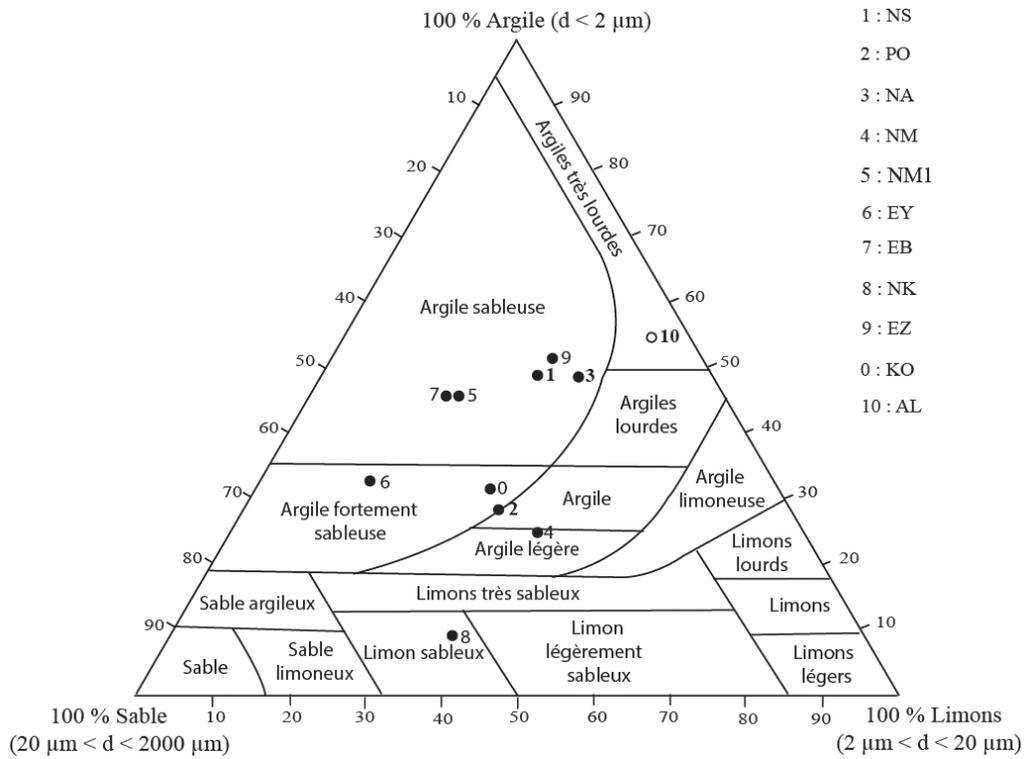


Figure 23. Position des argiles latéritiques de Sa'a dans le diagramme ternaire de classification belge de Bah *et al.* (2005)

L'abaque de plasticité de Casagrande (Fig. 24) indique que les matériaux de Nkom sont des argiles inorganiques de faible plasticité. Les matériaux de Polo et d'Ebo sont des argiles inorganiques de moyenne plasticité. Les autres matériaux sont des limons inorganiques de compressibilité moyenne.

III.2. Paramètres géotechniques des argiles latéritiques stabilisées : Mélanges argiles latéritiques - argiles alluviales

III.2.1. Couleur et cohésion

La couleur des matériaux latéritiques argileux meubles superficiels de Sa'a, codifiée par le code Munsell est présentée en annexe. L'argile alluviale a une couleur naturelle gris olive (5Y 5/2). Après cuisson, sa couleur varie dans les tons rouges (2,5YR 7/8 à 2,5YR 6/6 ; Fig. 25). De manière globale, la couleur des briquettes après cuisson est rouge brique. Cette couleur devient de plus en plus foncée avec la teneur croissante en argile latéritique du mélange et l'augmentation de température (Fig. 25). Elle passe progressivement d'un rouge clair à 900°C (2,5YR 6/6 ; 2,5YR 6/8 ; 2,5YR 5/8) à un rouge foncé (2,5YR 3/6) ou marron foncé (2,5YR 3/3), à 1100°C pour les briquettes à 80 et 100 % d'argile latéritique.

La cohésion est généralement bonne pour les différents mélanges argiles latéritiques - argiles alluviales. Les briquettes à base de 100 % de matériaux latéritiques de Polo, Eyene, Ebo présentent une cohésion acceptable à mauvaise entre 950 et 1100°C. Les briquettes de Nkom à base de 60 à 100 % d'argiles latéritiques présentent une cohésion acceptable à mauvaise à toutes les températures de cuisson testées. Les briquettes à base d'argile latéritique d'Elig-Zogo présentent d'importantes fissurations (Fig. 26), quelle que soit la proportion d'argile alluviale du mélange et la température de cuisson. Ces fissurations sont plus modérées dans les matériaux de Nkolang (Fig. 27).

III.2.2. Retrait linéaire de cuisson

Les valeurs de retrait linéaire (RL) obtenues sur les briquettes à base des mélanges argiles latéritiques - argiles alluviales de Sa'a sont présentées en annexe et illustrées par la figure 28. En général, les valeurs de RL croissent avec la température de cuisson et le taux d'argile alluviale du mélange. Un examen minutieux permet néanmoins de constater que des éprouvettes présentent des valeurs de RL négatives. C'est particulièrement le cas pour les briquettes à base de 100 % et 80 % de matériaux de Nkom, à toutes les températures testées et, celles à 60 % de ce matériau à 900, 950 et 1000°C (Tab. 25).

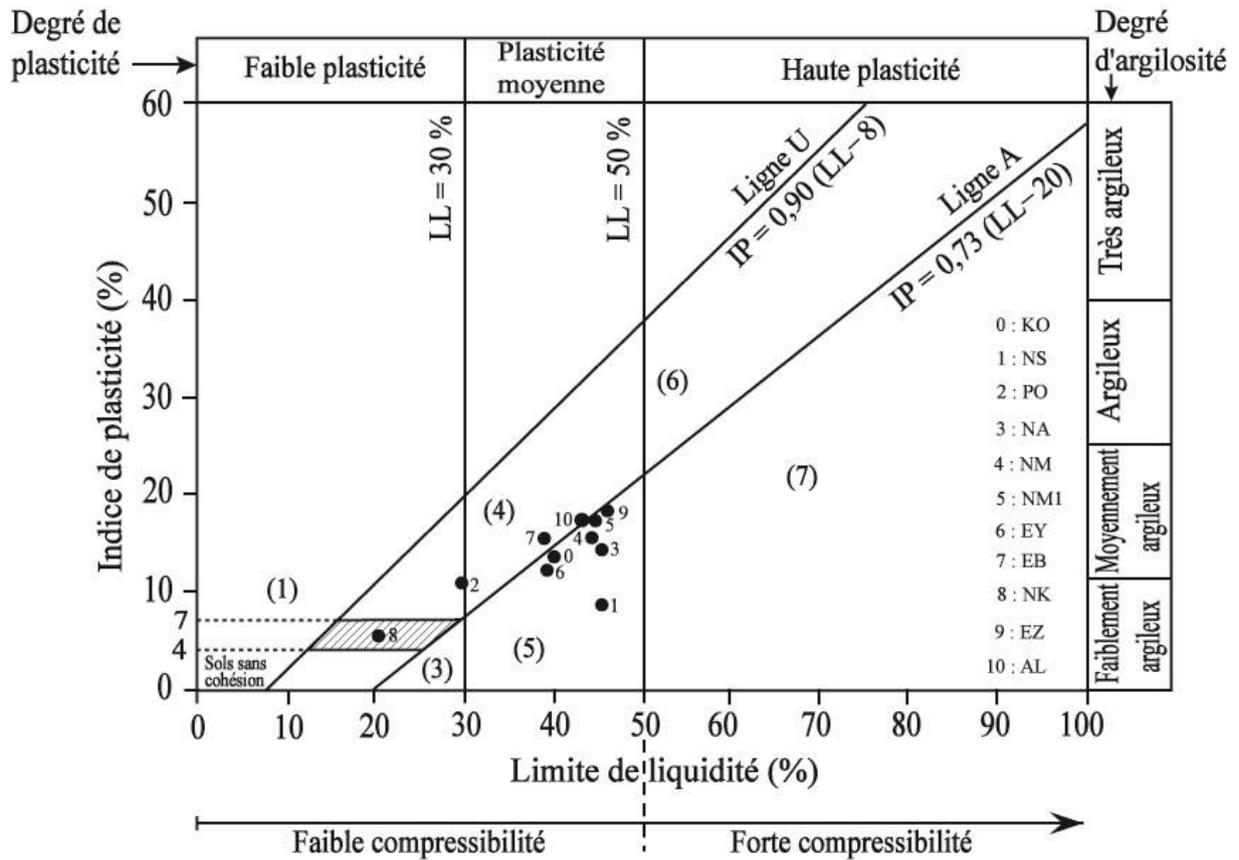


Figure 24. Position des argiles latéritiques superficielles de Sa'a dans l'abaque de plasticité de Casagrande (in Philipponnat et Hubert, 2000)

(1) Sols cohérents (2) Argiles inorganiques de faible plasticité (3) Limons inorganiques de faible compressibilité (4) Argiles inorganiques de moyenne plasticité (5) Limons inorganiques de moyenne compressibilité et limons organiques (6) Argiles inorganiques de forte plasticité (7) Limons inorganiques de forte compressibilité et argiles organiques.

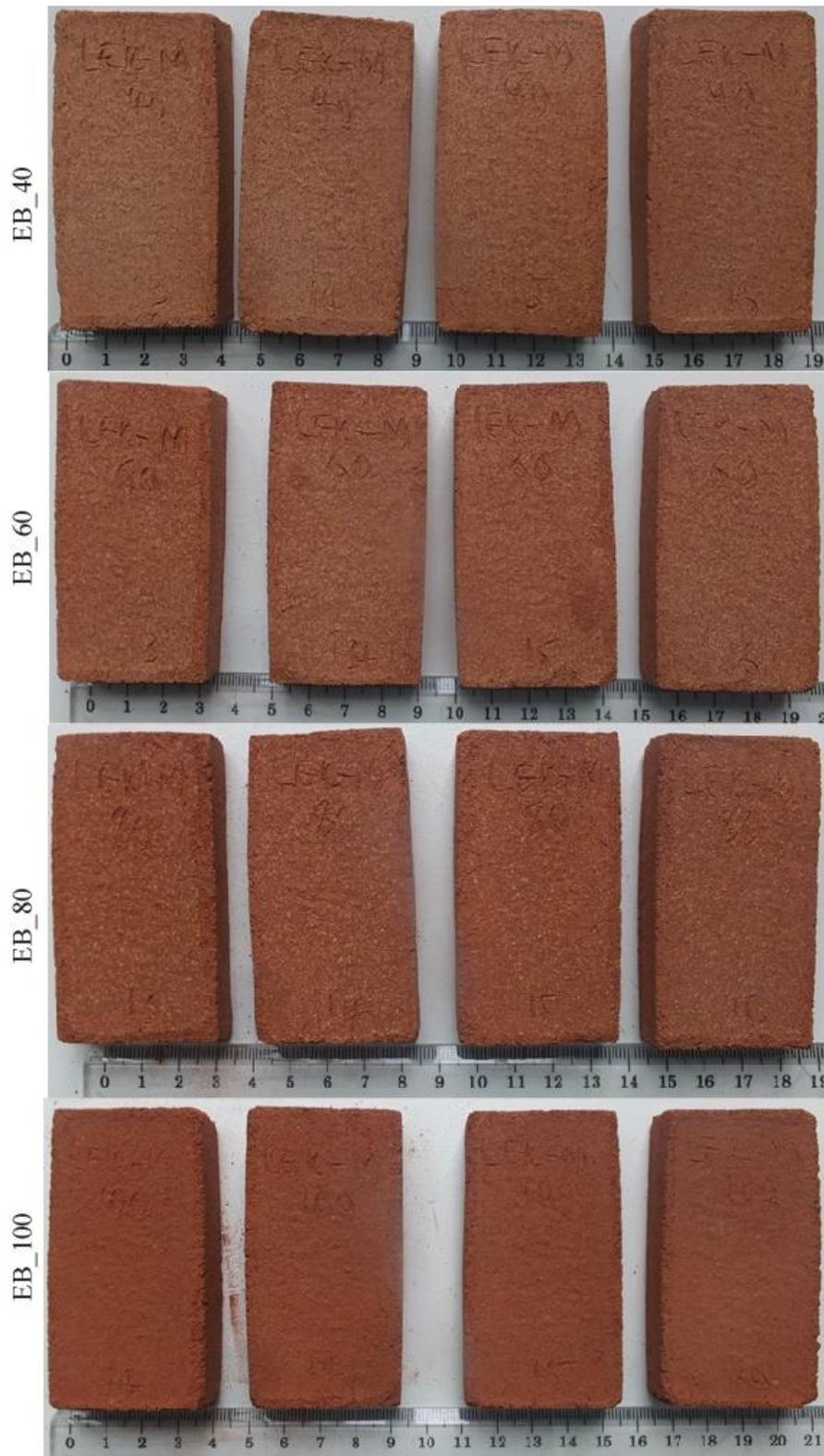


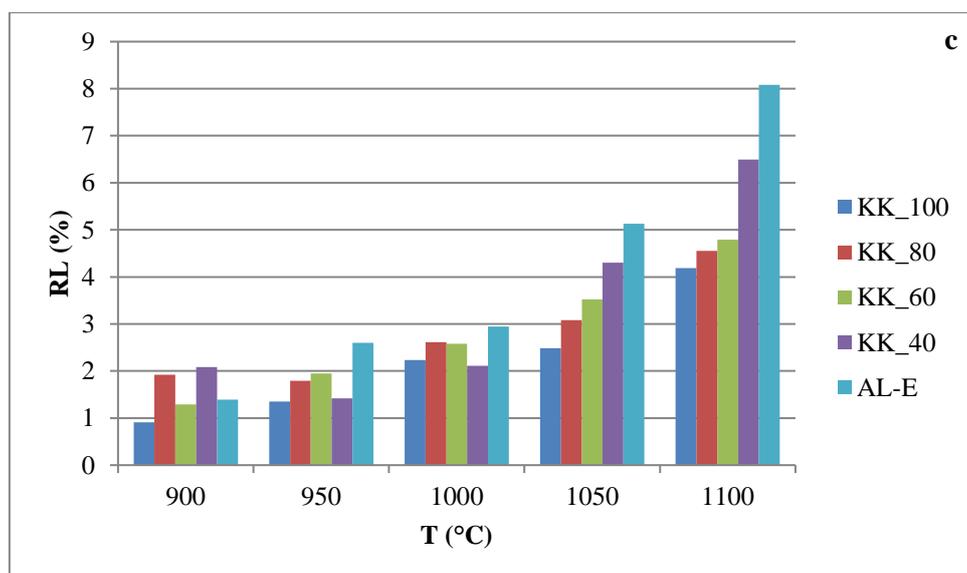
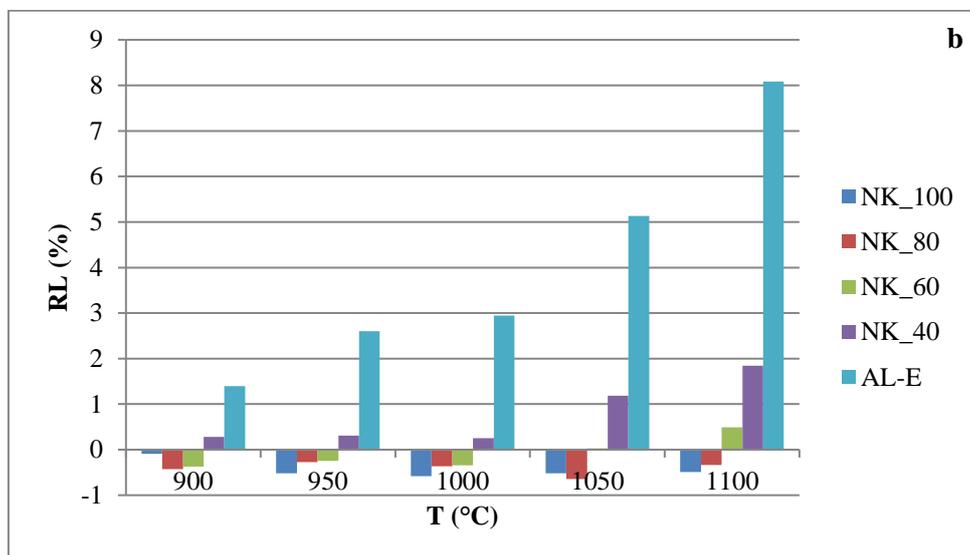
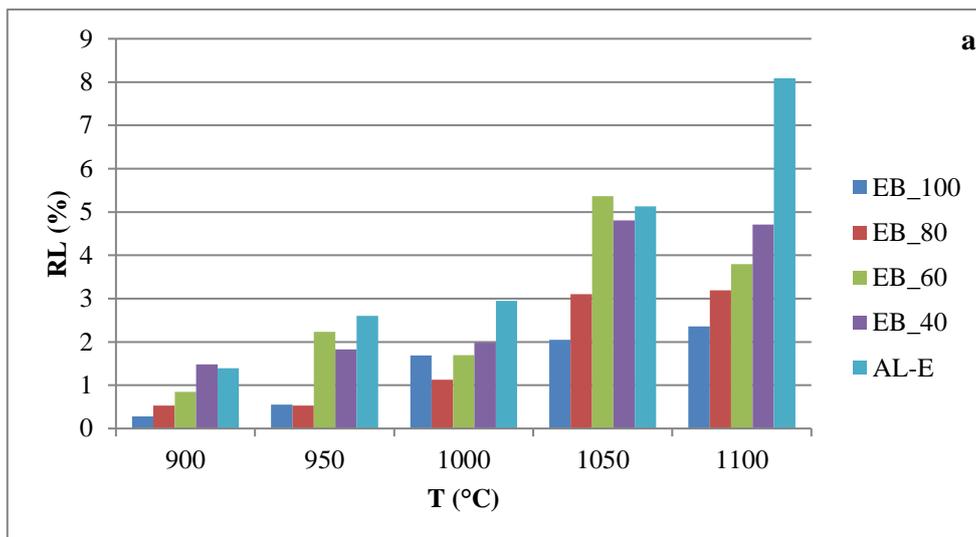
Figure 25. Variation de couleurs dans les briquettes à base d'argile latéritique d'Ebogo cuites à 1050°C

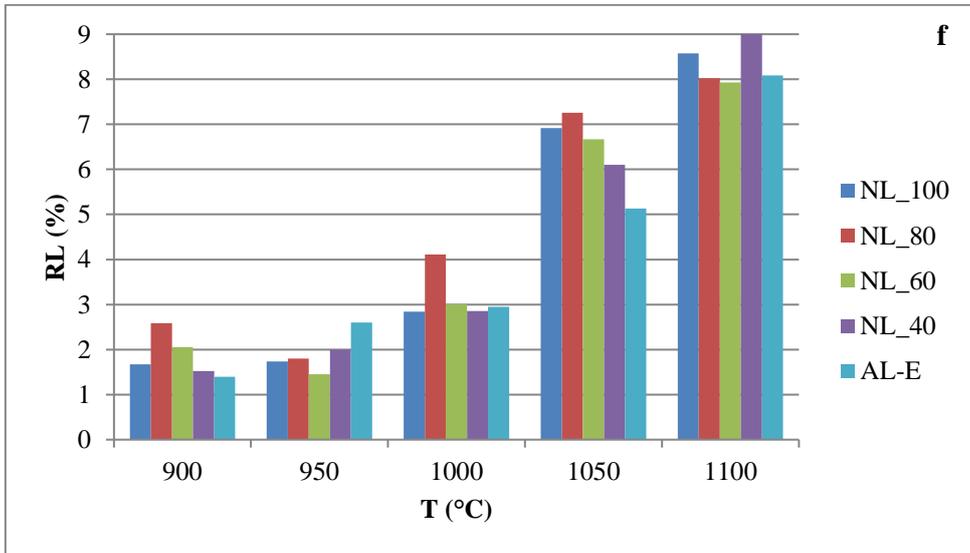
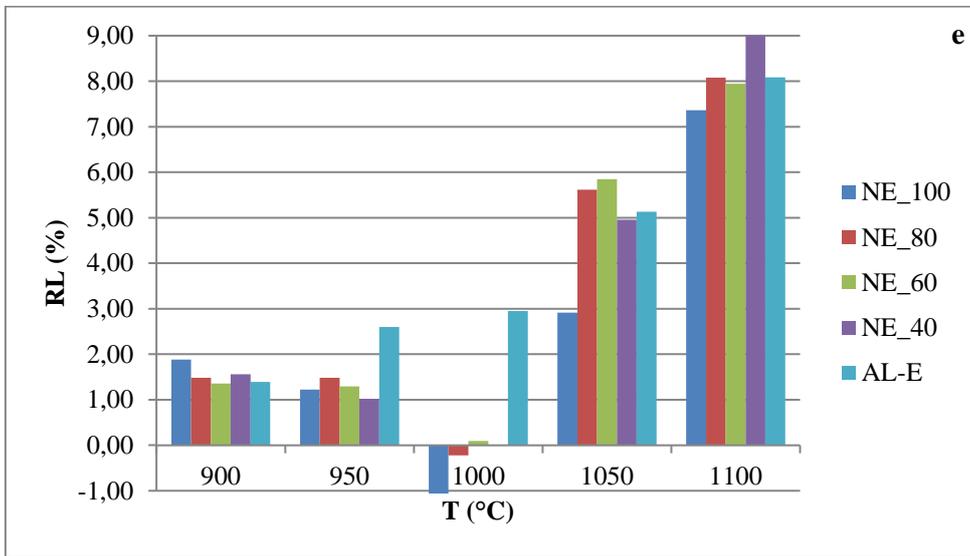
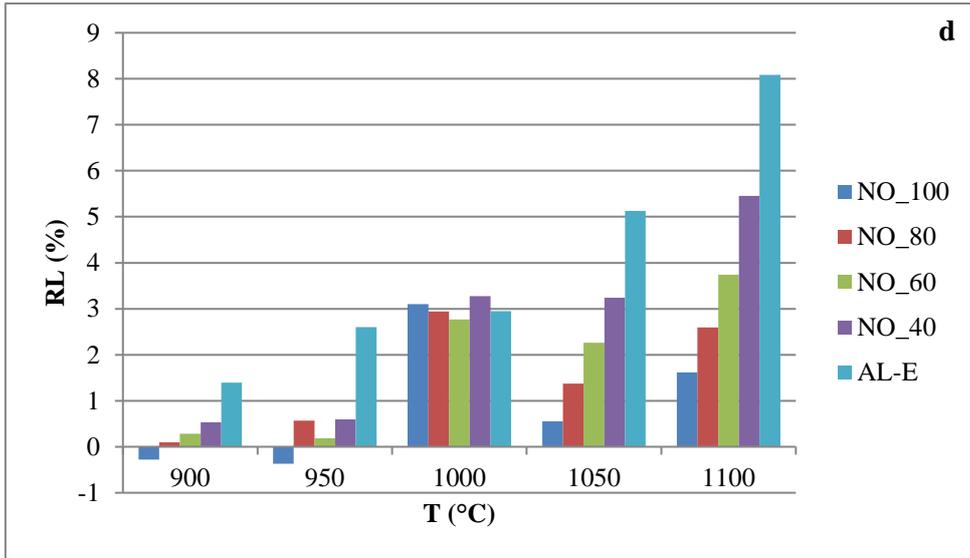


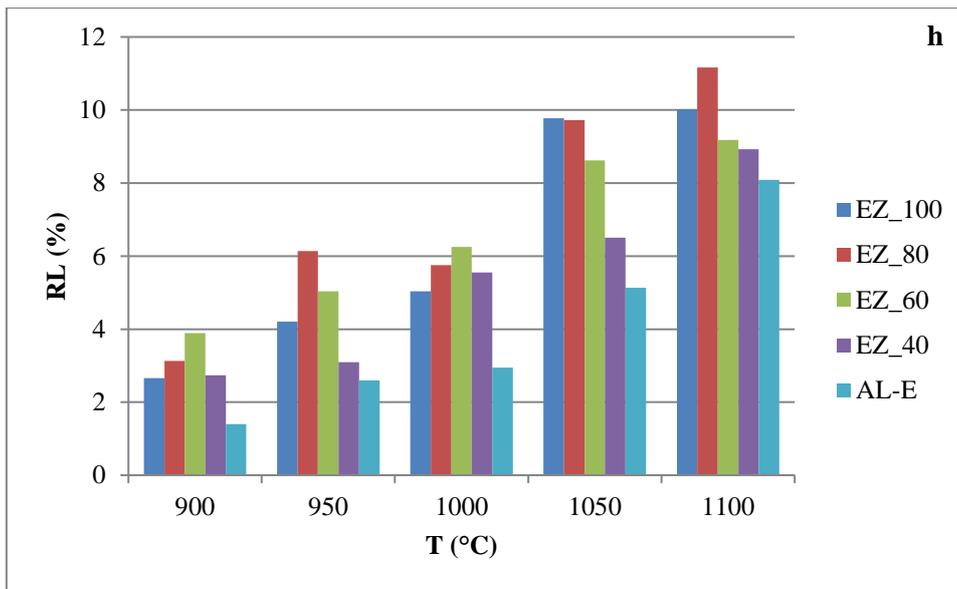
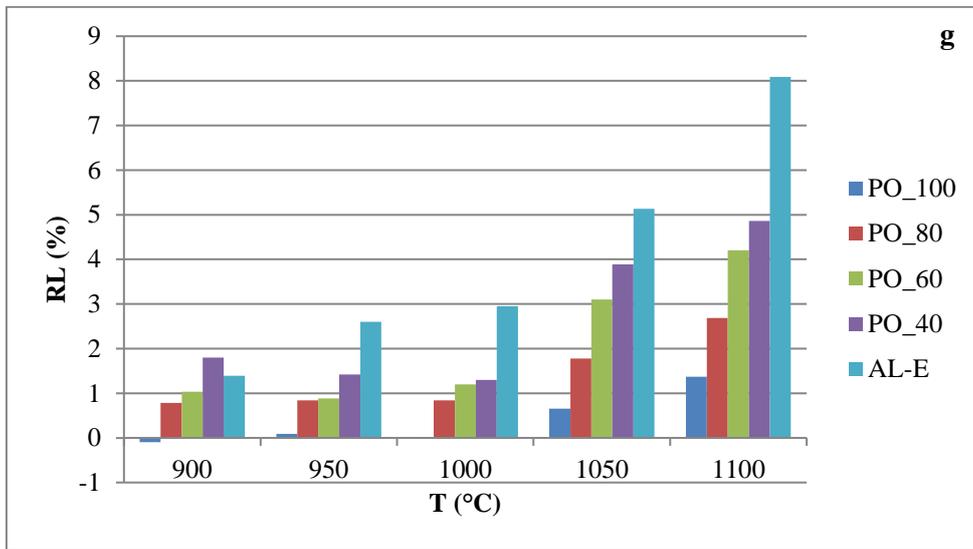
Figure 26. Fissurations importantes sur les briquettes à base d'argile latéritique d'Elig-Zogo (EZ_100 à 1050°C)



Figure 27. Faibles fissurations sur les briquettes à base d'argile latéritique de Nkolang (NA_80 à 1050°C)







(i) Pas de retrait linéaire pour les briquettes d'Elig-Zogo qui étaient toutes fissurées

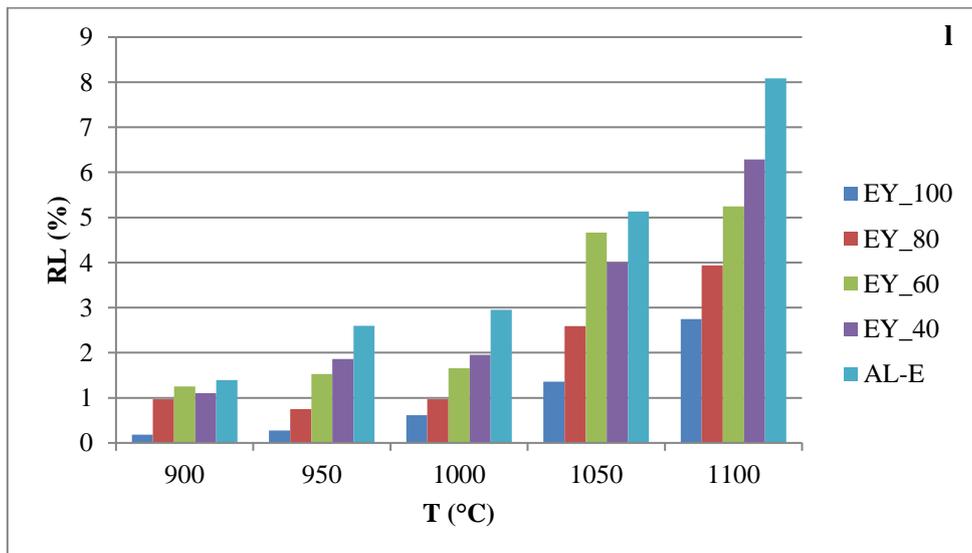
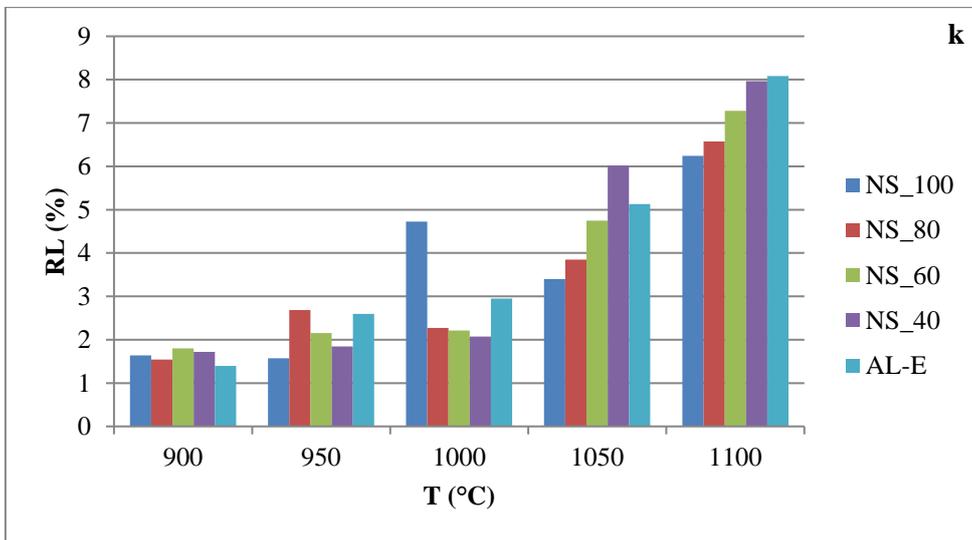
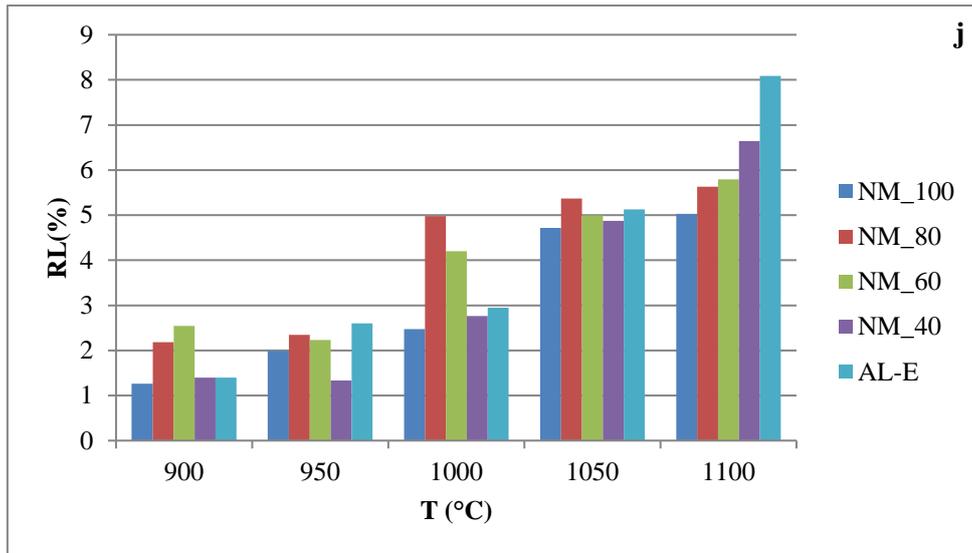


Figure 28. Variation des valeurs de retrait linéaire en fonction de la température de cuisson

Tableau 25. Valeurs de retrait linéaire (%) des briquettes à base d'argiles latéritiques et d'argiles alluviales de Sa'a après cuisson

Echantillon	% argile latéritique	900°C	950°C	1000°C	1050°C	1100°C
AL	00	1,40	2,60	2,95	5,13	8,08
	100	0,28	0,55	1,69	2,05	2,36
EB	80	0,53	0,53	1,13	3,10	3,19
	60	0,85	2,23	1,70	5,37	3,80
	40	1,48	1,82	1,98	4,81	4,71
NK	100	-0,09	-0,52	-0,58	-0,52	-0,49
	80	-0,43	-0,28	-0,37	-0,64	-0,34
	60	-0,37	-0,25	-0,34	0,03	0,49
	40	0,28	0,31	0,25	1,19	1,84
KK	100	0,91	1,35	2,23	2,48	4,19
	80	1,92	1,79	2,61	3,08	4,56
	60	1,29	1,95	2,58	3,52	4,79
	40	2,08	1,42	2,11	4,30	6,50
NO	100	-0,28	-0,37	3,10	0,56	1,61
	80	0,09	0,56	2,94	1,37	2,60
	60	0,28	0,19	2,77	2,26	3,74
	40	0,53	0,60	3,27	3,24	5,45
NE	100	1,88	1,23	-1,32	2,91	7,36
	80	1,48	1,48	-0,22	5,62	8,08
	60	1,36	1,30	0,09	5,85	7,94
	40	1,56	1,02	0,00	4,96	9,01
NL	100	1,67	1,74	2,84	6,92	8,57
	80	2,59	1,80	4,11	7,25	8,02
	60	2,06	1,46	3,01	6,67	7,93
	40	1,52	2,00	2,86	6,10	9,15
PO	100	-0,09	0,09	0,00	0,65	1,37
	80	0,78	0,84	0,84	1,78	2,69
	60	1,04	0,88	1,19	3,10	4,20
	40	1,80	1,42	1,30	3,89	4,86
EZ	100	2,65	4,21	5,03	9,77	10,02
	80	3,13	6,13	5,75	9,72	11,16
	60	3,89	5,03	6,25	8,62	9,18
	40	2,74	3,10	5,55	6,51	8,93
NM	100	1,26	1,99	2,47	4,72	5,03
	80	2,18	2,34	4,98	5,37	5,63
	60	2,54	2,23	4,20	4,99	5,79
	40	1,39	1,33	2,76	4,87	6,64
NS	100	1,64	1,57	4,73	3,40	6,24
	80	1,55	2,68	2,27	3,85	6,57
	60	1,80	2,15	2,22	4,75	7,28
	40	1,72	1,85	2,07	6,01	7,96
EY	100	0,19	0,28	0,62	1,36	2,75
	80	0,97	0,75	0,97	2,59	3,93
	60	1,25	1,53	1,65	4,67	5,25
	40	1,10	1,86	1,95	4,00	6,29

Les briquettes à 100 % d'argiles latéritiques de Nkolebassimbi présentent des valeurs de RL négatives à 900°C (-0,28 %) et 950°C (-0,37 %). Les briquettes confectionnées à partir des matériaux de Nkolmgbana présentent des valeurs de RL négatives uniquement à 1000°C, pour les mélanges à 100 % (-1,32 %) et 80 % (-0,22 %) d'argile latéritique. A Polo, la valeur de RL est négative uniquement pour les briquettes à 100 % d'argile latéritique et, ceci à 900°C (-0,09 %).

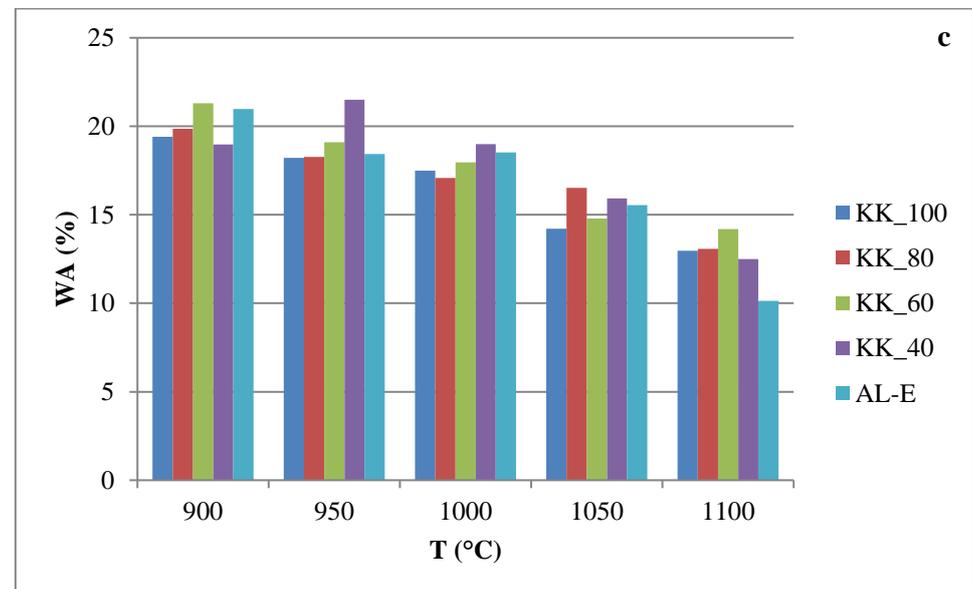
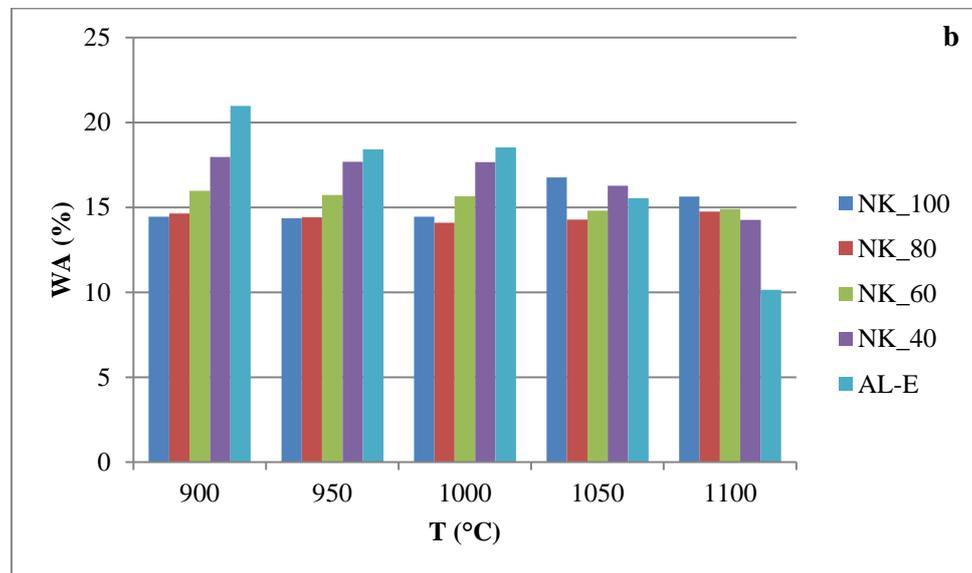
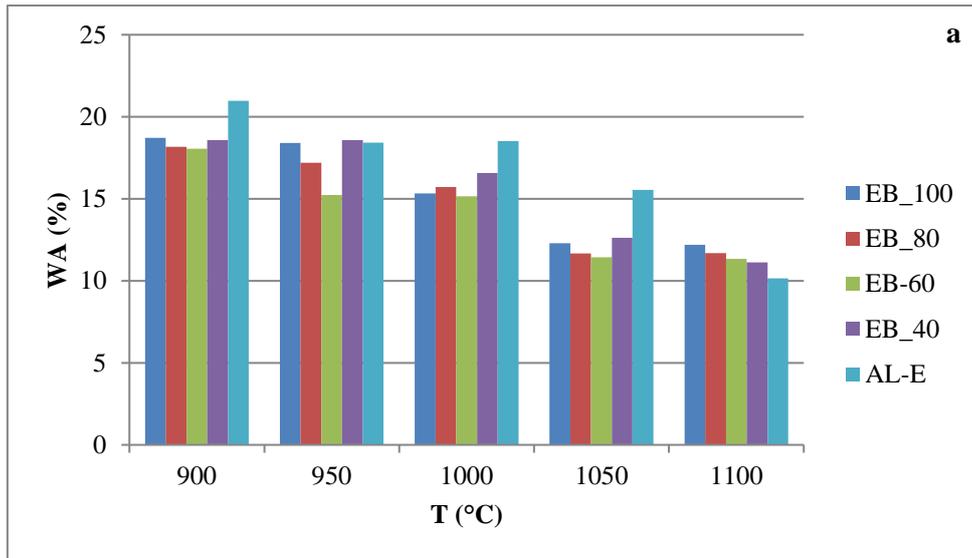
Les briquettes à base 100 %, 80 % et 60 % de matériaux argileux crus de Nkolebassimbi (NE) présentent des valeurs de RL plus élevées après cuisson à 1000°C qu'à 1050 et/ou 1100°C, alors que celles confectionnées avec les matériaux argileux crus de Nkolmgbana présentent les valeurs de RL les moins élevées à cette température de 1000°C. A Nkolmebanga, toujours à 1000°C, les briquettes à 80 et 60 % d'argile latéritique présentent des valeurs de RL plus élevées que les autres mélanges. A Elig-Zogo, les briquettes présentent un comportement différent. Il est certes fonction de la température de cuisson mais est tantôt maximal pour les mélanges à 60 % de matériaux latéritiques (respectivement 3,89 % et 6,25 %, à 900°C et 1000°C), tantôt maximal pour celles à 80 % de ces matériaux (6,13 % à 950°C et, 11,16 % à 1100°C) et maximal pour le mélange à 100 % d'argile latéritique à 1050°C (9,77 %).

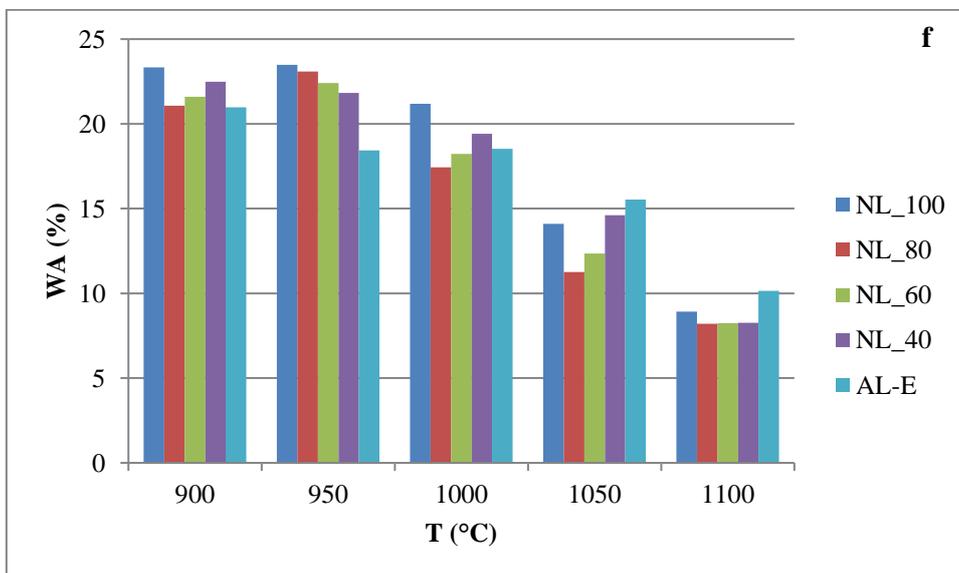
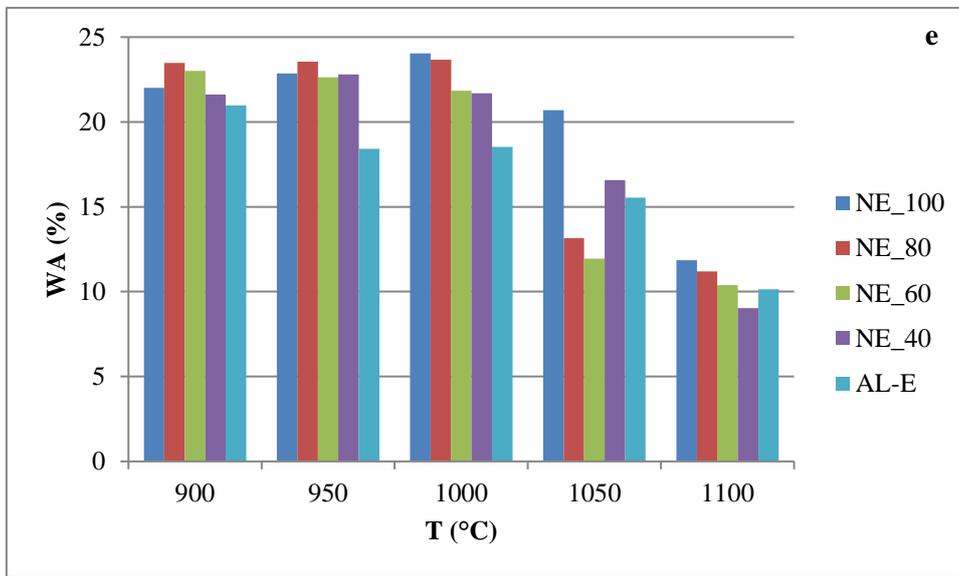
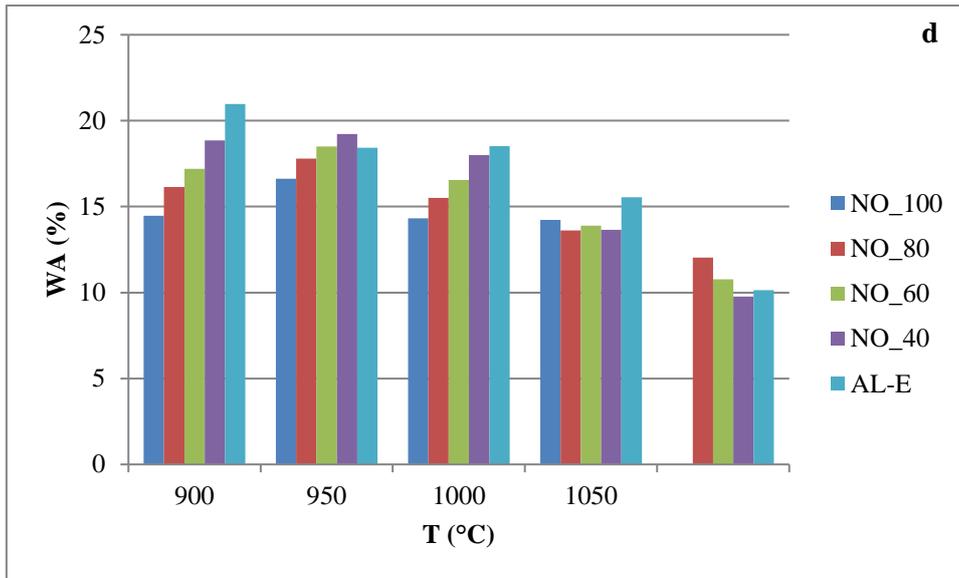
III.2.3. Absorption d'eau

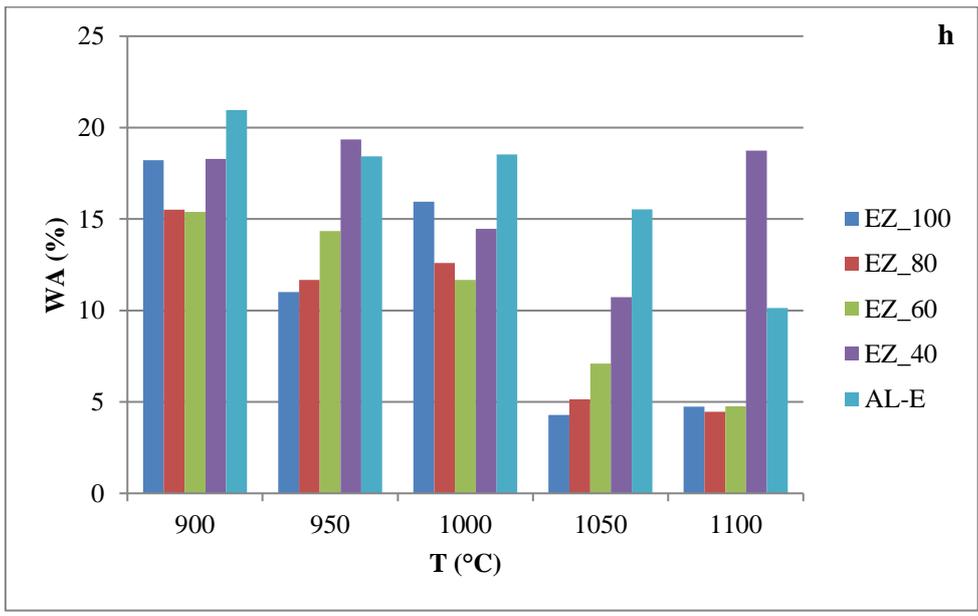
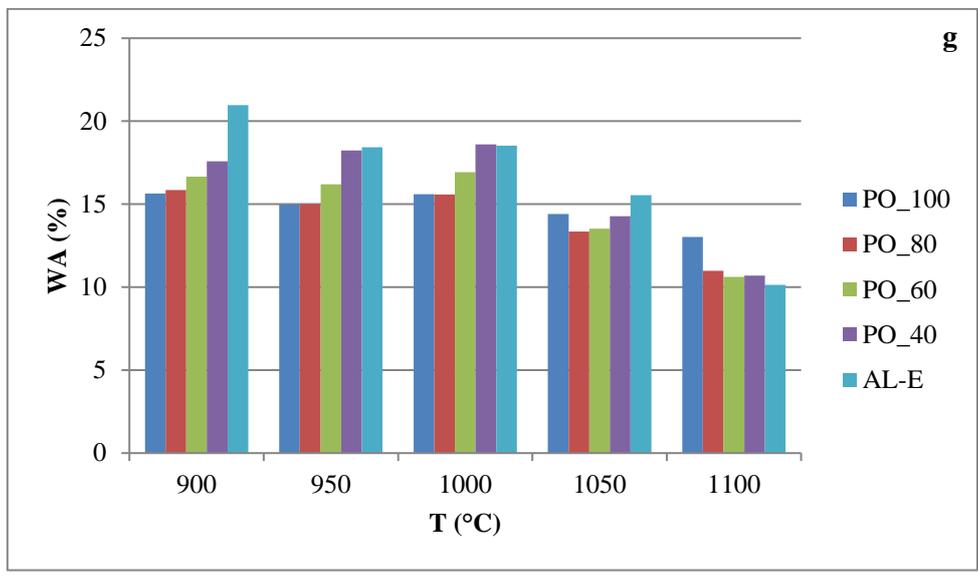
Les valeurs d'absorption d'eau WA obtenues après cuisson des briquettes à base des argiles latéritiques de Sa'a et des argiles alluviales de la Sanaga sont présentées par le tableau 26. La figure 29 illustre ces résultats. Globalement, les valeurs de WA demeurent inférieures à 25 % pour tous les matériaux étudiés et à toutes les températures testées. Ces valeurs de WA paramètre décroissent avec la température de cuisson des mélanges. Les briquettes confectionnées avec les matériaux latéritiques d'Ebo, de Nkom, de Nkolebassimbi, de Polo et d'Elig-Zogo présentent des taux d'absorption d'eau inférieures à 20 %, à toutes les températures testées et pour toutes les compositions. A Nkolmgbana et Nsanmendouga, toutes les briquettes ont des valeurs de WA supérieures à 20 % à 900, 950 et 1000°C pendant qu'à Nkolang, le même fait est observable à 900 et 950°C uniquement. Les briquettes à base d'argiles latéritiques de Nkolmebanga ont des valeurs de WA supérieures à 20 % à 900°C pour NM_100 (21,04 %) et NM_80 (21,24 %), et à 950°C pour NM_40 (21,37 %). Pour les mélanges d'Eyené, seules les briquettes à 100 % d'argiles latéritiques possèdent des valeurs de WA de 20 %, à 900 (20,44 %) et 950°C (20,58 %).

Tableau 26. Valeurs du taux d'absorption d'eau (%) des briquettes à base d'argiles latéritiques et d'argiles alluviales de Sa'a après cuisson

Echantillon	% argile latéritique	900°C	950°C	1000°C	1050°C	1100°C
AL	00	20,97	18,43	18,53	15,54	10,14
	100	18,71	18,40	15,33	12,30	12,19
EB	80	18,16	17,19	15,71	11,67	11,68
	60	18,04	15,23	15,16	11,43	11,34
	40	18,58	18,58	16,57	12,61	11,12
NK	100	14,45	14,35	14,45	16,77	15,64
	80	14,65	14,41	14,10	14,28	14,75
	60	15,98	15,74	15,65	14,81	14,91
	40	17,97	17,68	17,66	16,27	14,26
KK	100	19,40	18,22	17,49	14,20	12,97
	80	19,86	18,27	17,08	16,51	13,07
	60	21,31	19,09	17,96	14,79	14,20
	40	18,97	21,50	19,00	15,93	12,49
NO	100	14,46	16,63	14,31	14,22	
	80	16,15	17,80	15,51	13,60	12,03
	60	17,20	18,51	16,56	13,90	10,77
	40	18,85	19,23	18,00	13,66	9,78
NE	100	22,01	22,86	24,05	20,69	11,86
	80	23,48	23,55	23,67	13,15	11,20
	60	23,01	22,63	21,83	11,95	10,38
	40	21,61	22,80	21,68	16,57	9,03
NL	100	23,34	23,48	21,18	14,09	8,93
	80	21,08	23,09	17,43	11,26	8,20
	60	21,59	22,41	18,23	12,34	8,24
	40	22,48	21,82	19,40	14,61	8,27
PO	100	15,65	14,99	15,60	14,41	13,03
	80	15,86	15,01	15,58	13,36	10,97
	60	16,67	16,19	16,93	13,53	10,61
	40	17,58	18,23	18,60	14,28	10,70
EZ	100	18,23	11,01	15,95	4,28	4,75
	80	15,52	11,67	12,59	5,14	4,46
	60	15,40	14,34	11,67	7,09	4,75
	40	18,30	19,36	14,47	10,74	18,75
NM	100	21,04	19,57	15,21	15,00	12,52
	80	19,38	19,44	13,93	14,28	11,91
	60	17,76	19,71	15,03	14,76	13,15
	40	21,24	21,37	17,53	16,26	12,91
NS	100	23,03	24,57	23,94	19,65	14,00
	80	21,22	21,67	22,30	17,01	13,04
	60	22,54	22,68	21,14	15,65	12,50
	40	22,24	22,83	22,03	14,14	11,97
EY	100	20,44	20,58	19,50	17,37	16,64
	80	19,57	18,78	19,10	14,36	13,99
	60	19,87	18,07	18,41	13,95	10,86
	40	19,95	18,25	18,36	13,66	10,87







(i) Pas d'absorption d'eau pour les briquettes d'Elig-Zogo qui étaient toutes fissurées

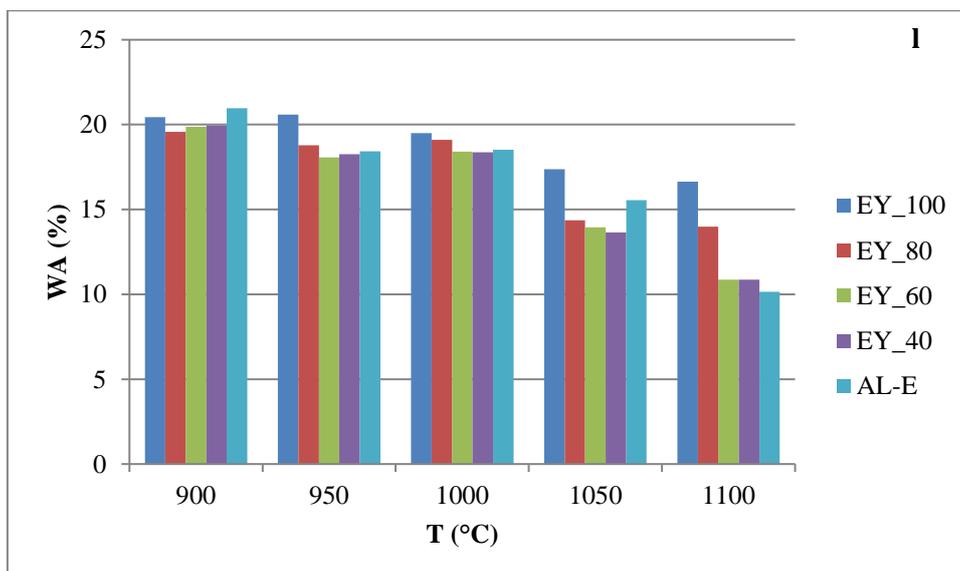
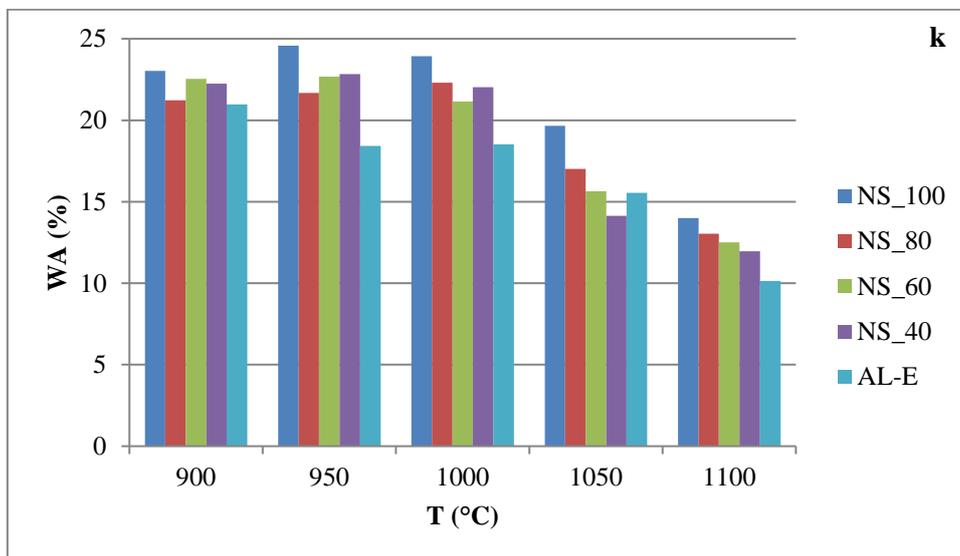
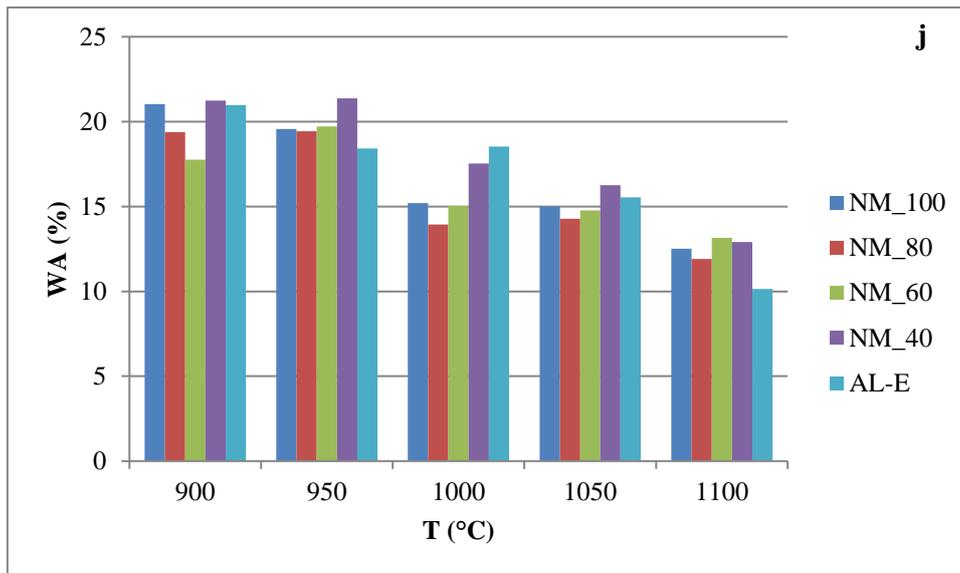


Figure 29. Variation des valeurs d'absorption d'eau en fonction de la température de cuisson

A Kokoé, seules les briquettes confectionnées avec 60 % d'argiles latéritiques à 900°C (21,31 %) et, celles avec 40 % d'argiles latéritiques, à 950°C (21,50 %), présentent des valeurs de WA supérieures à 20 %.

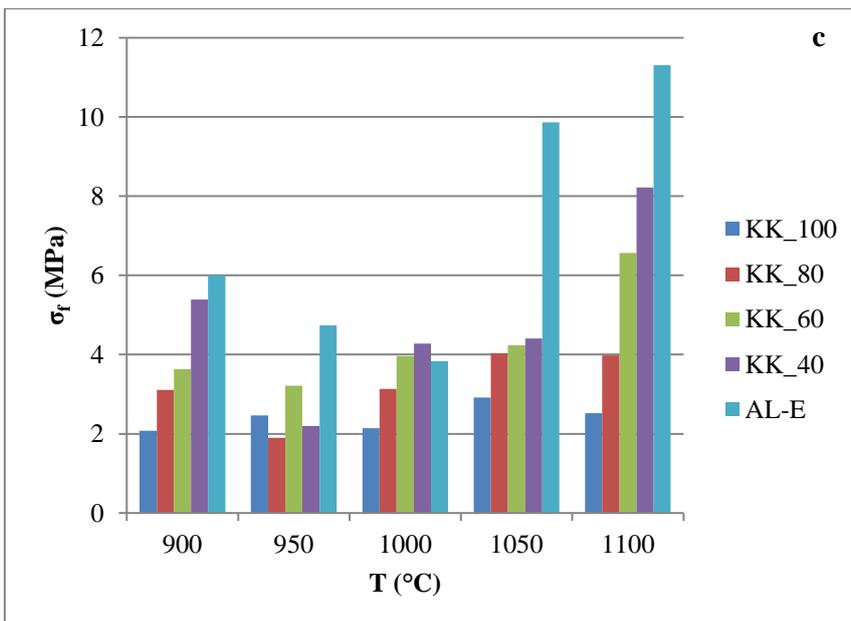
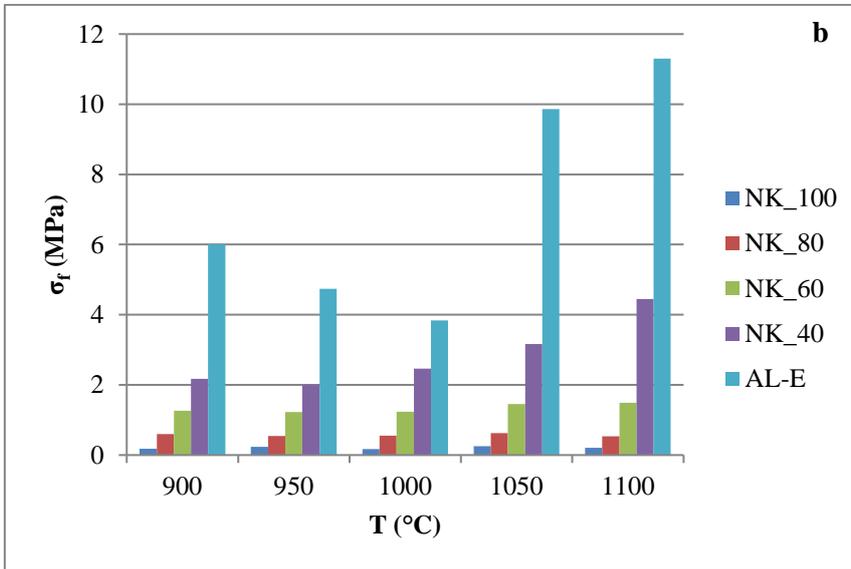
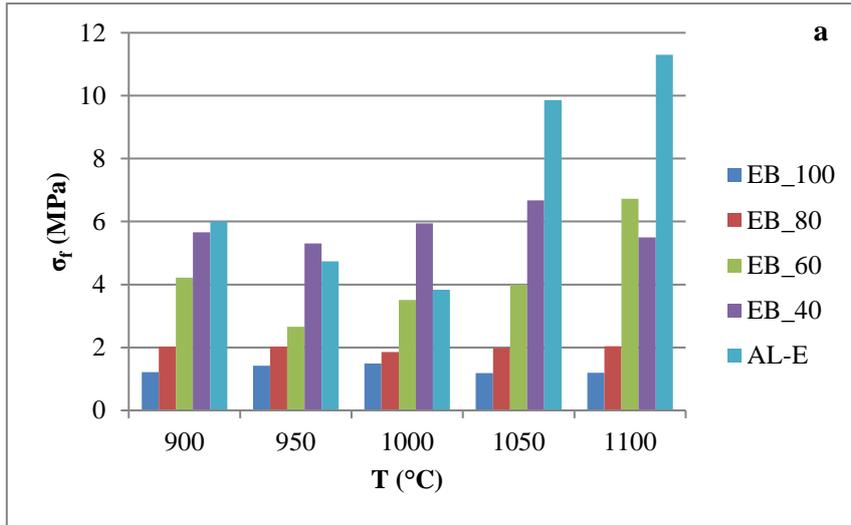
III.2.4. Résistance à la flexion

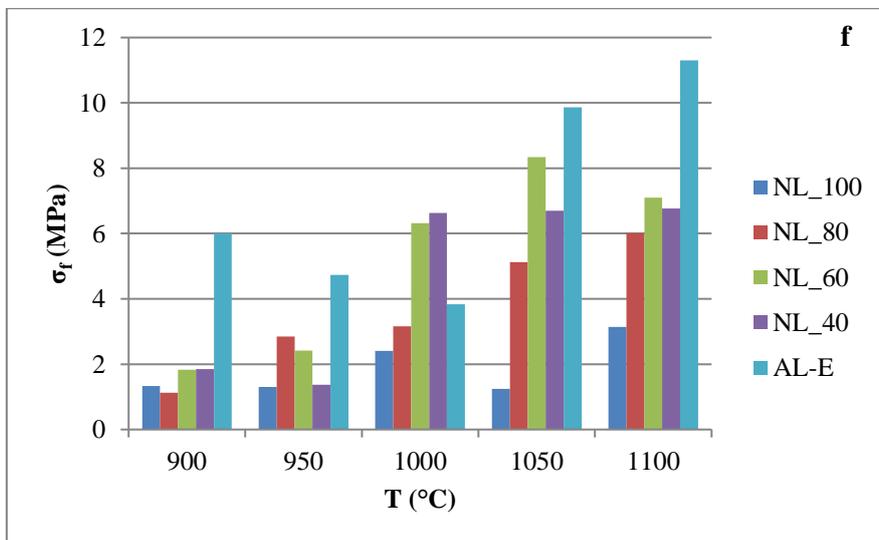
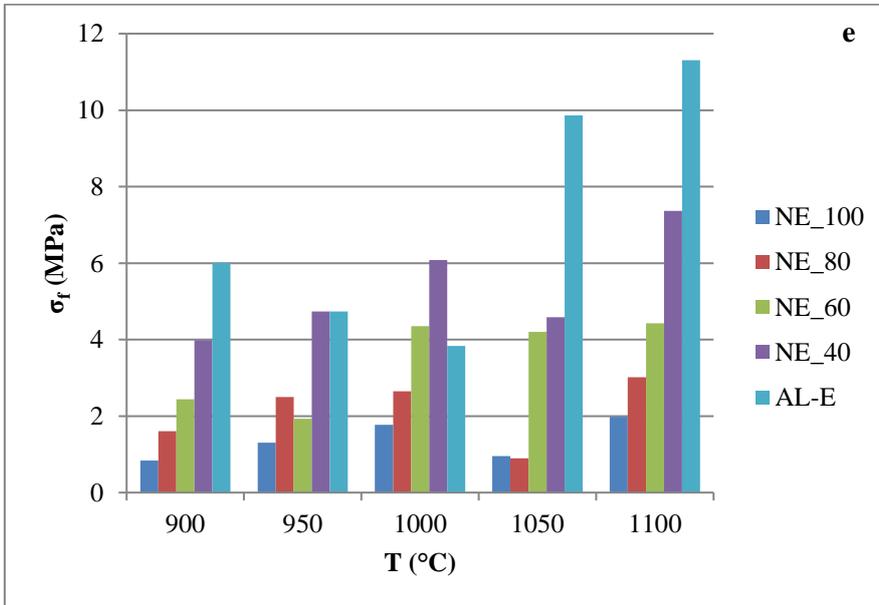
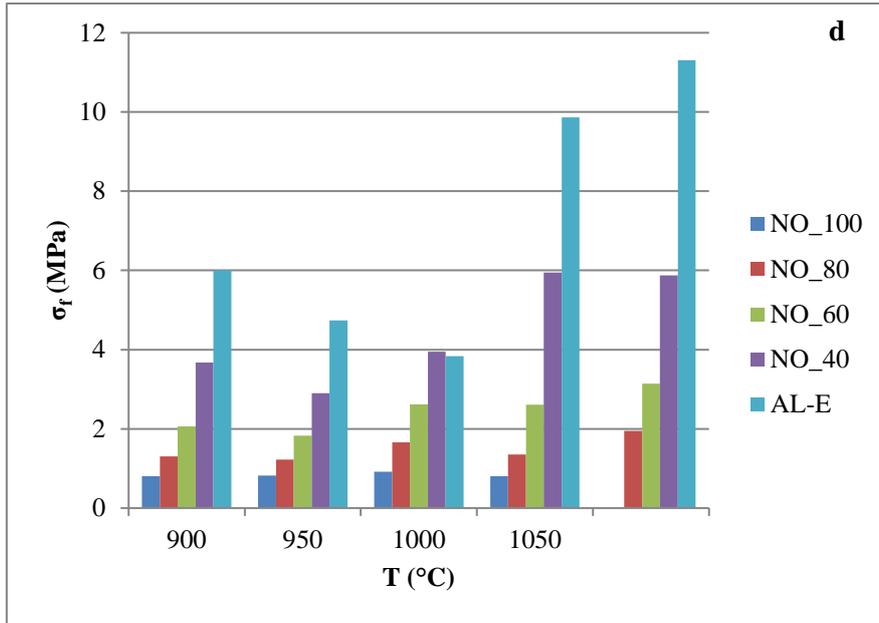
Les valeurs de résistance à la flexion σ_f obtenues avec les mélanges argiles latéritiques - argiles alluviales de Sa'a sont présentées dans le tableau 27 et illustrées par la figure 30.

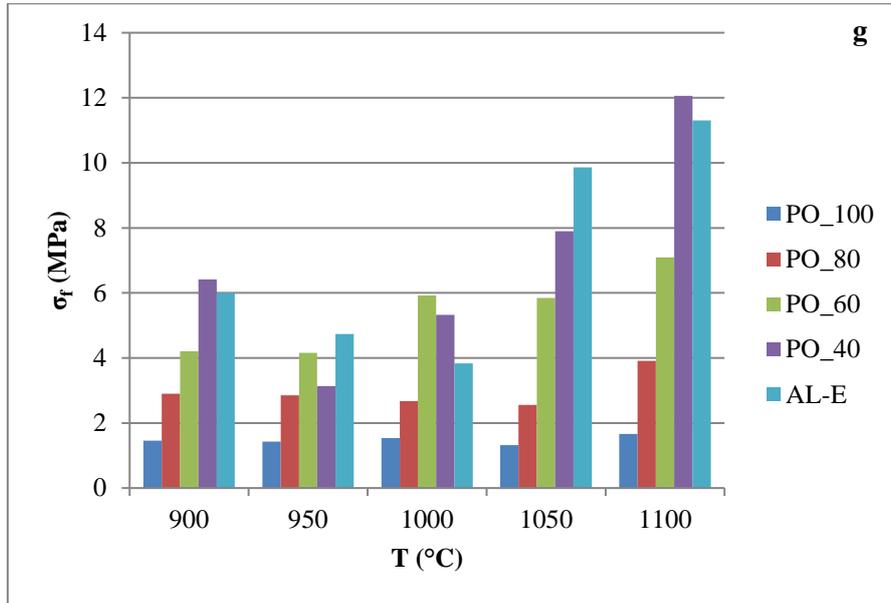
Les valeurs de résistance à la flexion σ_f croissent en général avec la teneur en argiles alluviales du mélange et la température de cuisson. A quelque exception près, les valeurs de σ_f les plus élevées sont obtenues avec les matériaux de Nkolmgbana. Elles varient entre 2,78 MPa (NM_100 à 900°C) et 9,76 MPa (NM_40 à 1050°C). Excepté les briquettes d'Elig-Zogo pour lesquelles les valeurs de σ_f n'ont pas pu être déterminées à cause de l'importante fissuration, les valeurs les moins élevées sont présentées par les briquettes de Nkom ; celles-ci oscillent entre 0,17 MPa (1000°C) et 0,25 MPa (1050°C) pour NK_100 et, entre 2,01 MPa (950°C) et 4,45 MPa (1100°C) pour NK_40. Les briquettes à 100 % d'argiles latéritiques d'Eyené, d'Ebo, de Nkom, de Nkolebassimbi, Nkolmgbana et Polo présentent des valeurs de σ_f inférieures à 2 MPa, à toutes les températures testées. A Nkolang, les valeurs de σ_f des briquettes de composition similaire ne dépassent ce standard qu'à 1000°C (2,40 MPa) et 1100°C (3,14 MPa). A Nsanmendouga, les valeurs de σ_f sont supérieures à 2 MPa pour les briquettes à 100 % de ce matériau à 1050°C (2,95 MPa) et à 1100°C (2,58 MPa). Les briquettes à 100 % d'argile latéritique de Nkolmebanga (NM_100) et de Kokoé (KO_100) ont des valeurs de σ_f supérieures à 2 MPa aux 5 températures testées. Les valeurs minimales obtenues pour ces briquettes sont observées à 900°C, soit 2,78 MPa pour NM_100 et 2,07 MPa pour KO_100. L'ajout d'argiles alluviales permet de relever les valeurs de σ_f qui passent au-dessus de ce standard (2 MPa) pour les mélanges de Nsanmendouga ($\sigma_{\min} = 2,86$ MPa pour NS_80 à 950°C) et ceux de Polo ($\sigma_{\min} = 2,85$ MPa pour PO_80 à 950°C). Les valeurs de σ_f demeurent inférieures à 2 MPa pour les briquettes à 80 et 60 % de limons sableux de Nkom à toutes les températures de cuisson. A Eyené, seules les briquettes EY_80, à 950 et 1000°C, présentent des valeurs de σ_f inférieures à 2 MPa (respectivement 1,85 et 1,86 MPa) alors que, à Ebogo et Kokoé, c'est le cas pour EB_80 à 1000°C (1,86 MPa) et, KO_80 à 950°C (1,90 MPa). Les briquettes à 80 % d'argiles latéritiques de Nkolebassimbi possèdent des valeurs de σ_f inférieures à 2 MPa aux cinq températures testées et, celles à 60 %, uniquement à 950°C (1,83 MPa). A Nkolmgbana et Nkolang, seuls NM1_80 à 900°C (1,60 MPa) et 1050°C (0,90 MPa), NM1_60 à 950°C (1,93 MPa), NA_40 à 950°C (1,37 MPa) et tous les mélanges NA

Tableau 27. Valeurs de résistance à la flexion (MPa) des briquettes à base d'argiles latéritiques et d'argiles alluviales de Sa'a, après cuisson

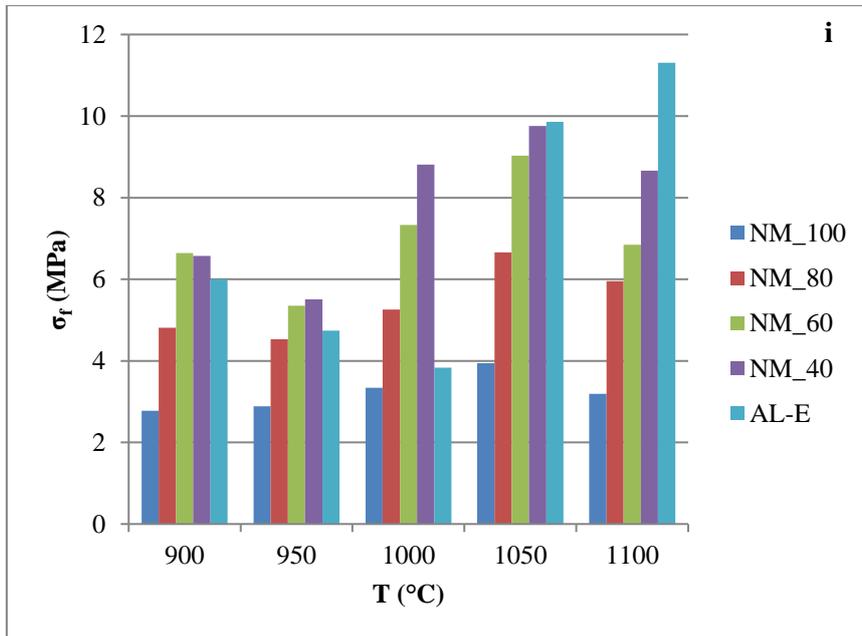
Echantillon	% argile latéritique	900°C	950°C	1000°C	1050°C	1100°C
AL	00	1,20	2,04	6,72	5,49	11,30
	100	1,22	1,42	1,49	1,19	1,20
EB	80	2,03	2,03	1,86	1,99	2,04
	60	4,22	2,66	3,51	3,99	6,72
	40	5,66	5,31	5,95	6,68	5,49
NK	100	0,18	0,23	0,17	0,25	0,21
	80	0,60	0,55	0,55	0,63	0,54
	60	1,26	1,23	1,24	1,46	1,49
	40	2,17	2,01	2,46	3,16	4,45
KK	100	2,07	2,47	2,14	2,91	2,52
	80	3,11	1,90	3,14	4,03	3,98
	60	3,63	3,22	3,97	4,24	6,57
	40	5,39	2,20	4,28	4,41	8,22
NO	100	0,80	0,82	0,91	0,80	/
	80	1,30	1,22	1,66	1,35	1,95
	60	2,06	1,83	2,62	2,61	3,14
	40	3,68	2,90	3,95	5,94	5,87
NE	100	0,84	1,31	1,77	0,95	1,98
	80	1,60	2,50	2,65	0,90	3,02
	60	2,44	1,93	4,36	4,20	4,43
	40	3,99	4,74	6,08	4,59	7,36
NL	100	1,33	1,30	2,40	1,24	3,14
	80	1,13	2,85	3,16	5,13	6,01
	60	1,83	2,42	6,31	8,34	7,10
	40	1,85	1,37	6,63	6,70	6,77
PO	100	1,46	1,43	1,53	1,32	1,66
	80	2,90	2,85	2,68	2,56	3,91
	60	4,21	4,16	5,92	5,84	7,09
	40	6,41	3,13	5,33	7,89	12,06
NM	100	2,78	2,89	3,34	3,94	3,19
	80	4,81	4,53	5,26	6,66	5,95
	60	6,64	5,35	7,33	9,03	6,85
	40	6,58	5,51	8,81	9,76	8,66
NS	100	1,76	1,56	1,14	2,95	2,58
	80	3,19	2,86	3,03	4,28	3,85
	60	4,43	4,05	4,78	6,39	6,52
	40	5,57	4,32	3,92	8,52	9,70
EY	100	0,86	0,75	0,75	0,97	1,02
	80	2,06	1,85	1,86	2,50	2,34
	60	3,43	3,49	2,91	4,69	4,58
	40	4,40	5,73	5,02	7,72	7,38







(h) Pas de résistance à la flexion pour les briquettes d'Elig-Zogo qui étaient toutes fissurées



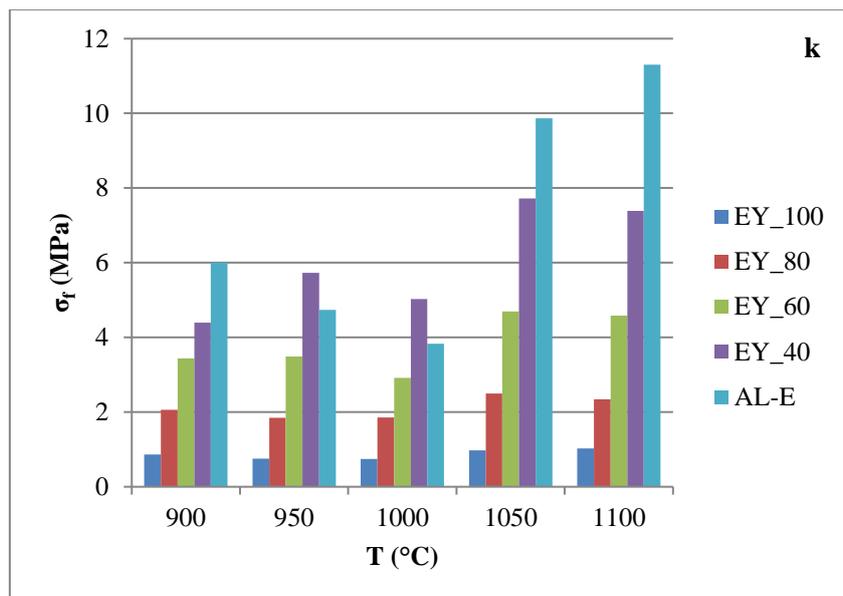
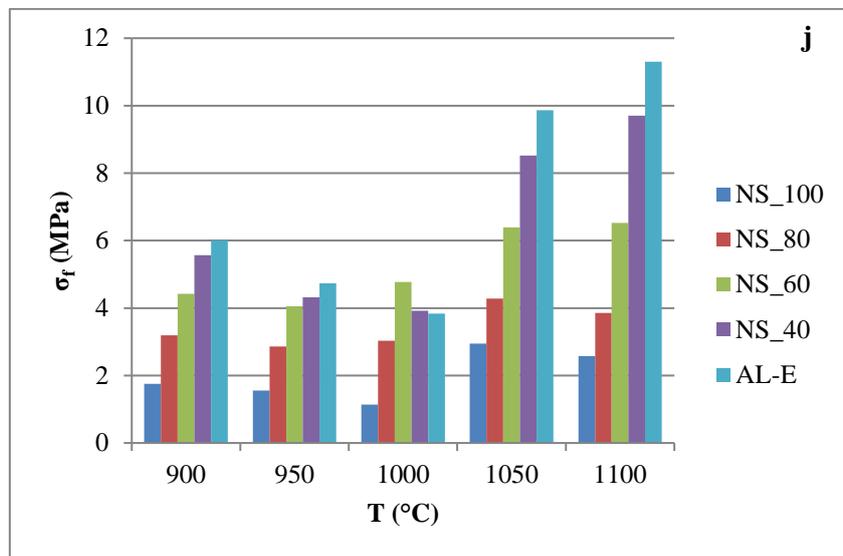


Figure 30. Variation des valeurs de résistance à la flexion en fonction de la température de cuisson

à 900°C présentent des valeurs de σ_f inférieures à 2 MPa.

III.3. Paramètres géotechniques des matériaux stabilisés : Mélanges argiles latéritiques - chaux

III.3.1. Masse volumique

Les valeurs de masse volumique MV des briquettes à base d'argiles latéritiques superficielles des 11 sites dans la zone de Sa'a avant et après stabilisation à 5, 10 et 15 % de chaux et, après curage pendant 7, 14 et 21 jours, sont présentées dans le tableau 28. Les variations des valeurs de MV avec le pourcentage de chaux et le temps de cure sont illustrées par la figure 31. Les valeurs de MV demeurent comprises entre 1,60 kg/mm³ (KO_15 après 28 jours) et 2,13 kg/mm³ (EZ_5 après 14 jours et EB_0). Excepté les éprouvettes EY_10 et NK_15 après 28 jours de cure et, EZ_5, EZ_10, NS et KO, après 14 jours de cure, à tous les pourcentages de stabilisation, la valeur de MV des briquettes non stabilisées est plus élevée que celle des briquettes stabilisées. Globalement, pour le même temps de cure, la valeur de MV décroît avec la teneur croissante en chaux. Toutefois, à Ebogo et à Nkom, les valeurs de MV sont moins élevées après stabilisation à 10 % de chaux, qu'à 5 et 15 %.

III.3.2. Absorption d'eau

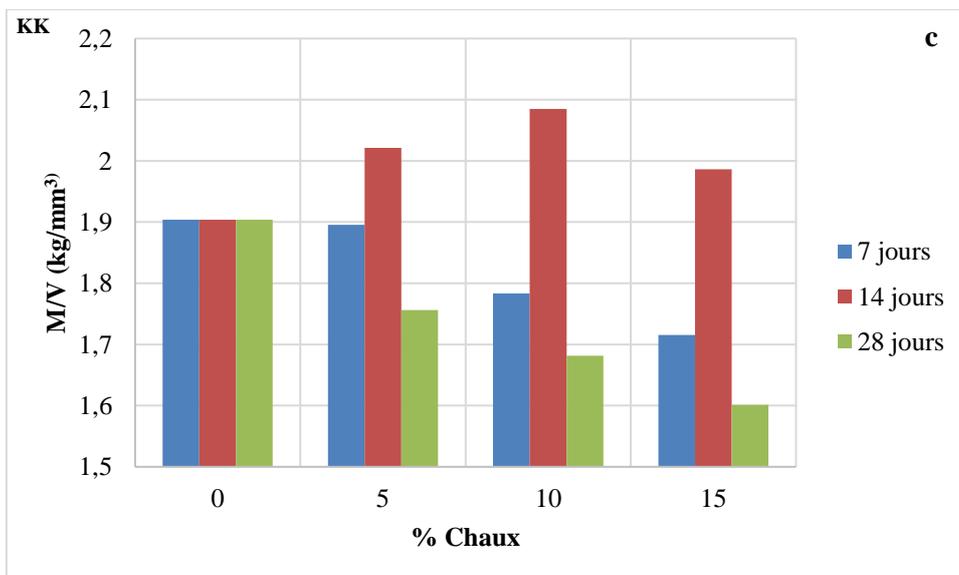
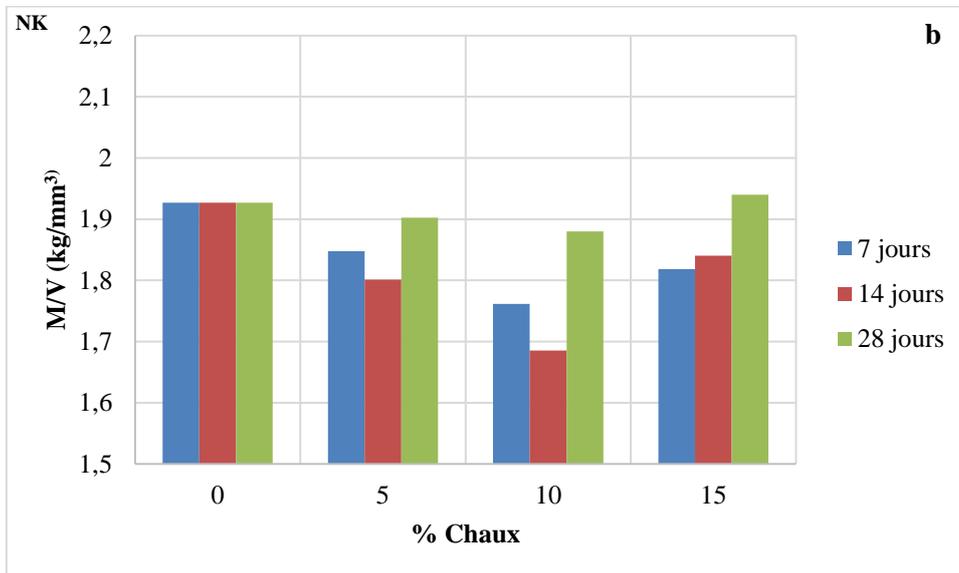
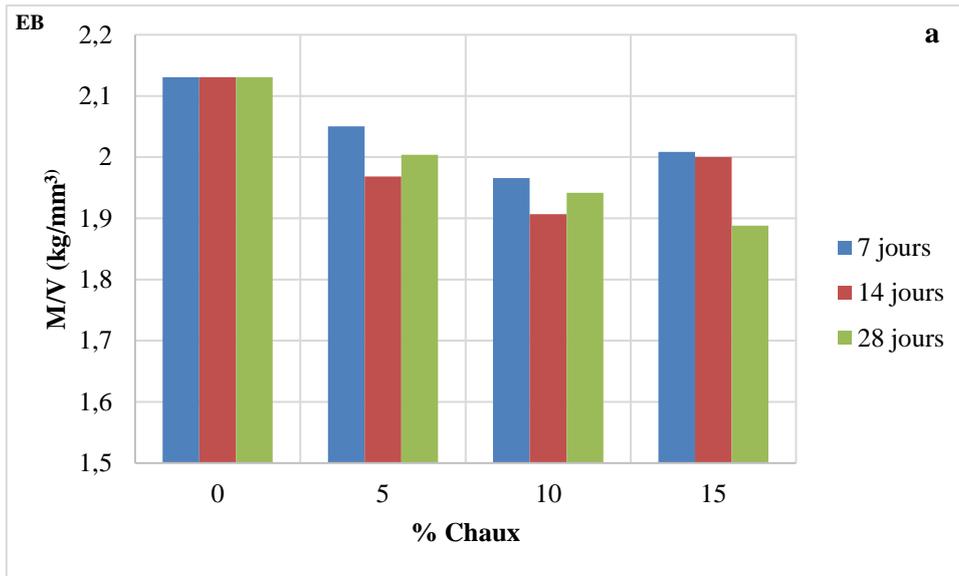
Les valeurs de WA en fonction du pourcentage de stabilisation et du temps de cure sont présentées par le tableau 29 et illustrées par la figure 32. Ces valeurs de WA varient peu au sein du même site. Les valeurs les plus élevées sont obtenues avec les briquettes à base des matériaux de Nsanmendouga. Elles y varient entre 25,54 % pour NS_5 après 14 jours et 30,17 % pour NS_15 après 7 jours de cure. Les valeurs les moins élevées sont obtenues sur les matériaux de Nkom où elles oscillent entre 13,94 % pour NK_10 après 28 jours de cure et, 17,69 % pour NK_15 après 14 jours de cure. Globalement, à l'exception des matériaux de Nkolebassimbi stabilisés à 5 % de chaux et ceux d'Ebogo stabilisés à 15 % après 7 et 14 jours de cure, les valeurs de WA croissent avec la teneur en chaux pour le même temps de curage.

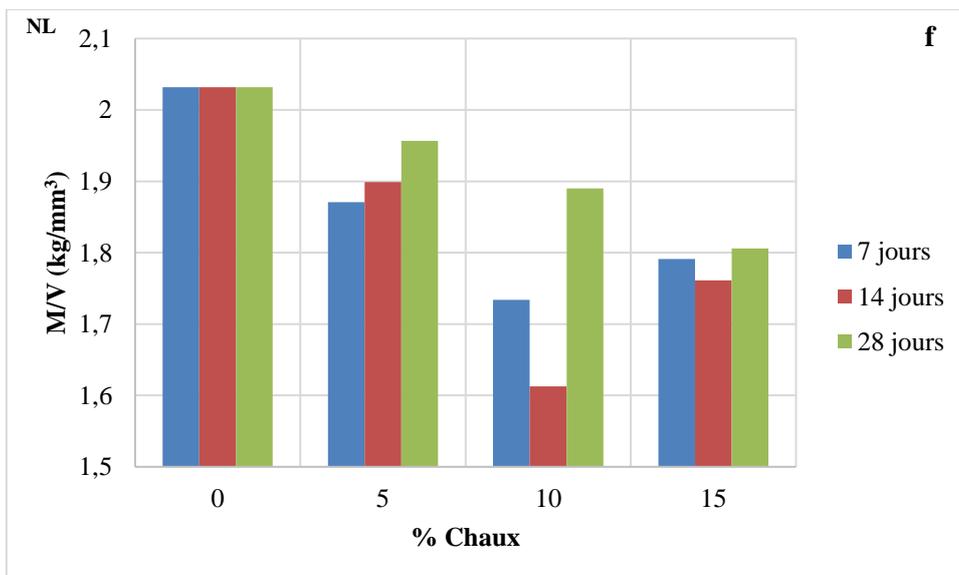
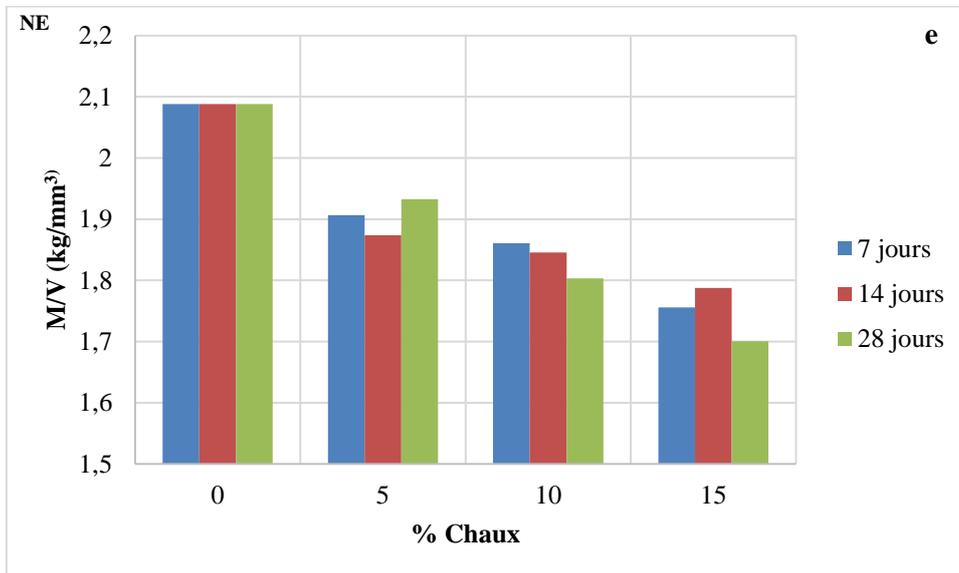
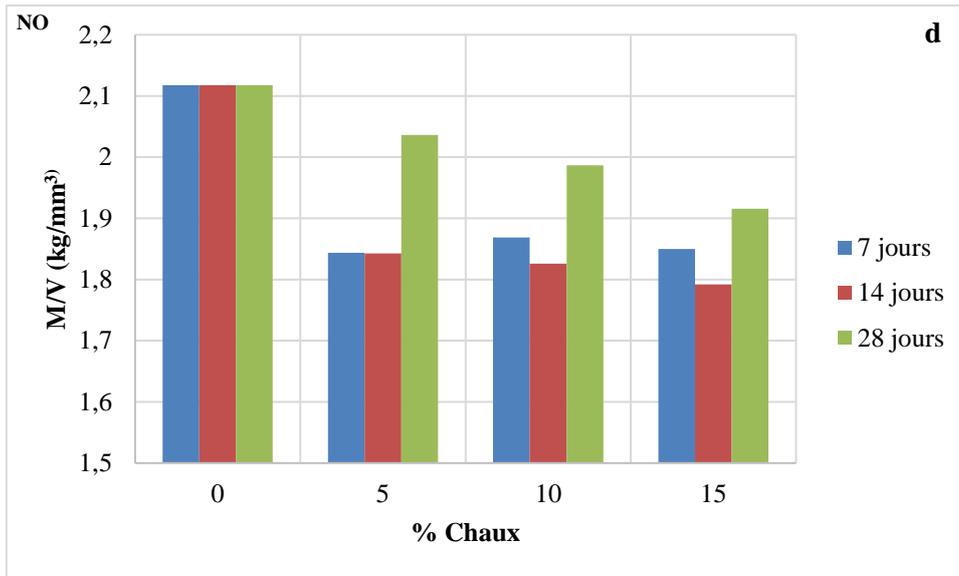
III.3.3. Résistance à la flexion

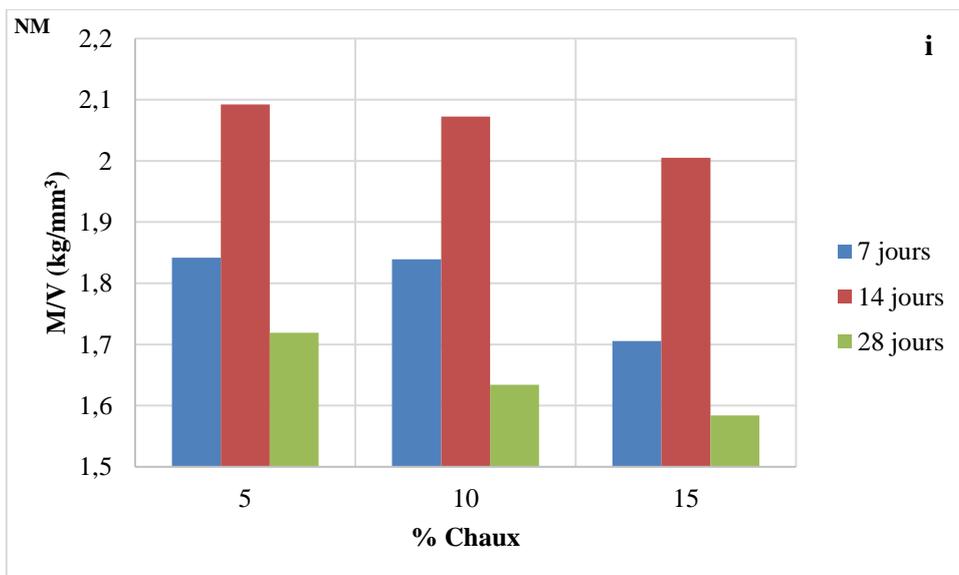
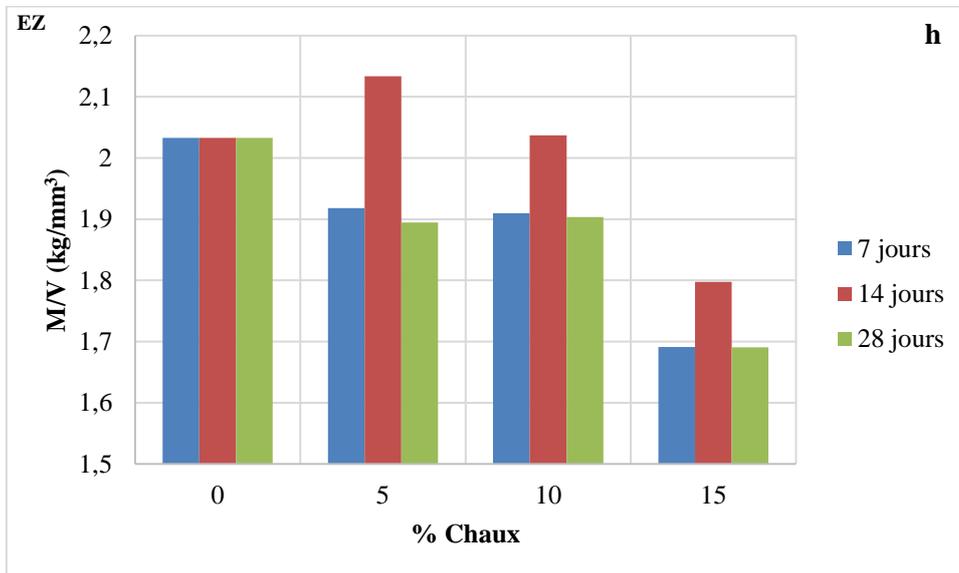
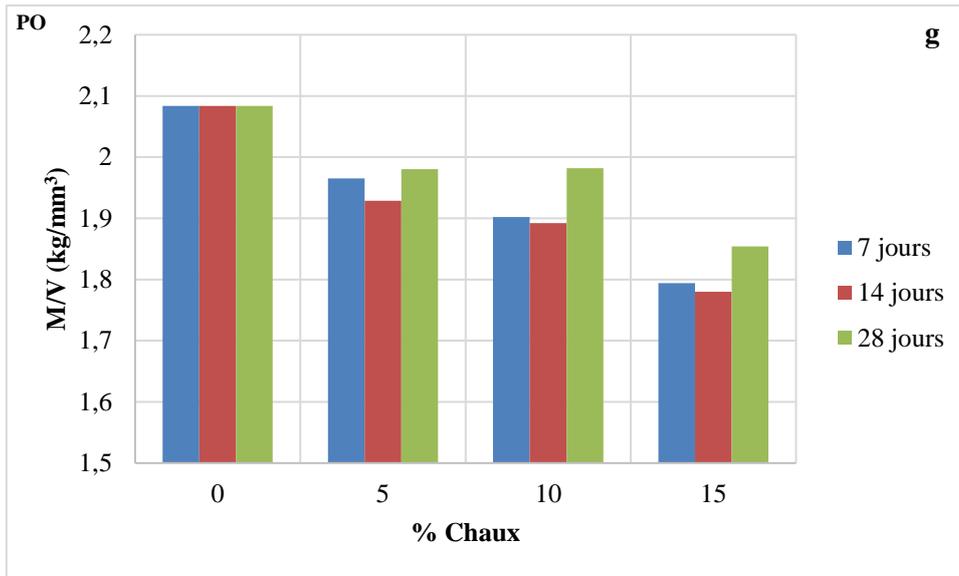
Le tableau 30 présente les valeurs de σ_f obtenues après stabilisation à 5, 10 et 15 % de chaux et à 7, 14 et 28 jours de temps de cure, des briquettes à base des argiles latéritiques de Sa'a. L'évolution de ces valeurs de σ_f est illustrée par la figure 33. Excepté les briquettes à base d'argiles latéritiques de Nkolebassimbi et de Nkolmgbana, le fait marquant est une augmentation des valeurs de σ_f lorsque de la chaux est ajoutée.

Tableau 28. Valeurs de masse volumique (kg/dm³) des briquettes de Sa'a stabilisées à la chaux

Echantillon	% chaux	7 jours	14 jours	28 jours
EB	0	2,13	2,13	2,13
	5	2,05	1,97	2,00
	10	1,97	1,91	1,94
	15	2,01	2,00	1,89
NK	0	1,93	1,93	1,93
	5	1,85	1,80	1,90
	10	1,76	1,69	1,88
	15	1,82	1,84	1,94
KK	0	1,90	1,90	1,90
	5	1,90	2,02	1,76
	10	1,78	2,08	1,68
	15	1,72	1,99	1,60
NO	0	2,12	2,12	2,12
	5	1,84	1,84	2,04
	10	1,87	1,83	1,99
	15	1,85	1,79	1,92
NE	0	2,09	2,09	2,09
	5	1,91	1,87	1,93
	10	1,86	1,85	1,80
	15	1,76	1,79	1,70
NL	0	2,03	2,03	2,03
	5	1,87	1,90	1,96
	10	1,73	1,61	1,89
	15	1,79	1,76	1,81
PO	0	2,08	2,08	2,08
	5	1,97	1,93	1,98
	10	1,90	1,89	1,98
	15	1,79	1,78	1,85
EZ	0	2,03	2,03	2,03
	5	1,92	2,13	1,89
	10	1,91	2,04	1,90
	15	1,69	1,80	1,69
NM	0	/	/	/
	5	1,84	2,09	1,72
	10	1,84	2,07	1,63
	15	1,71	2,01	1,58
NS	0	1,88	1,88	1,88
	5	1,84	1,91	1,73
	10	1,81	1,95	1,76
	15	1,76	1,95	1,66
EY	0	1,92	1,92	1,92
	5	1,84	1,84	1,83
	10	1,78	1,82	1,92
	15	1,79	1,77	1,87







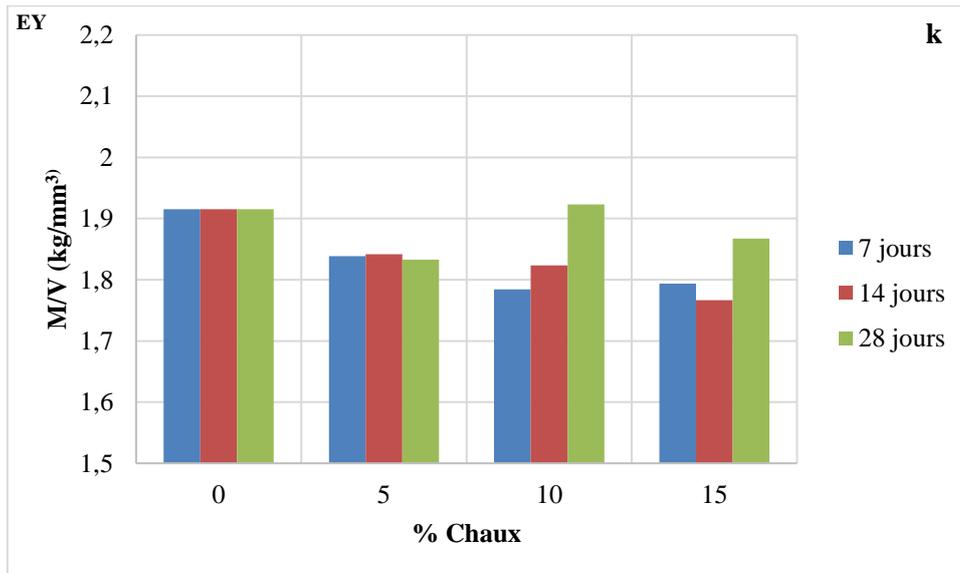
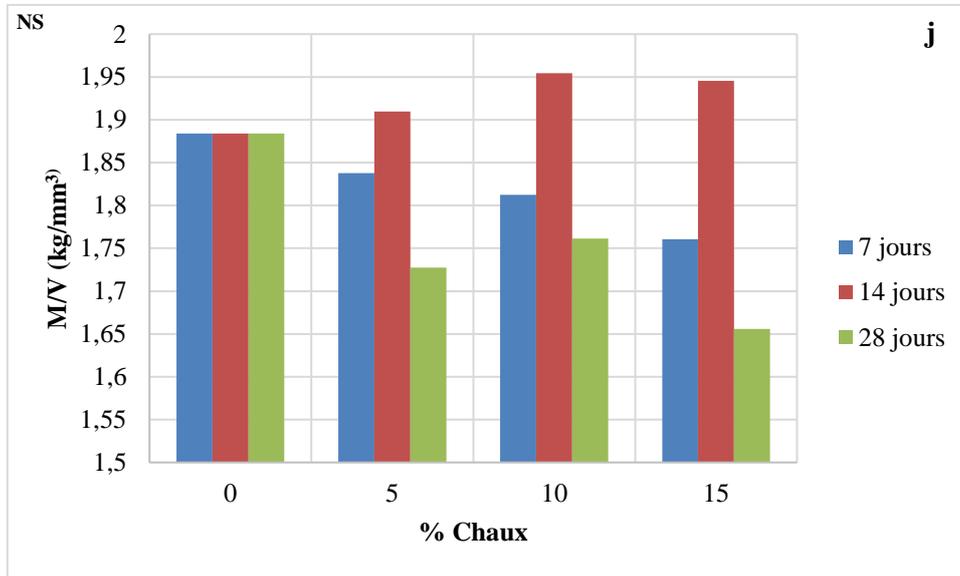
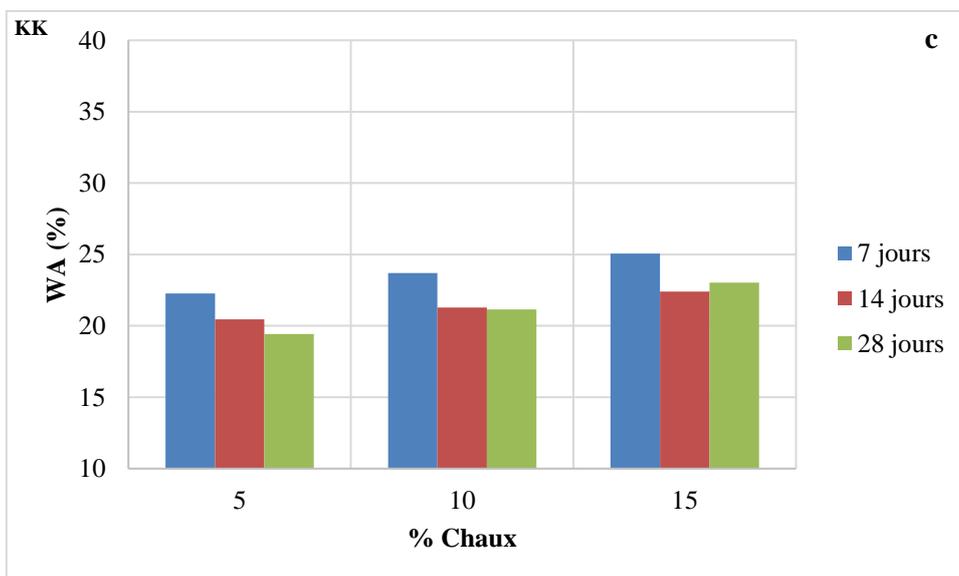
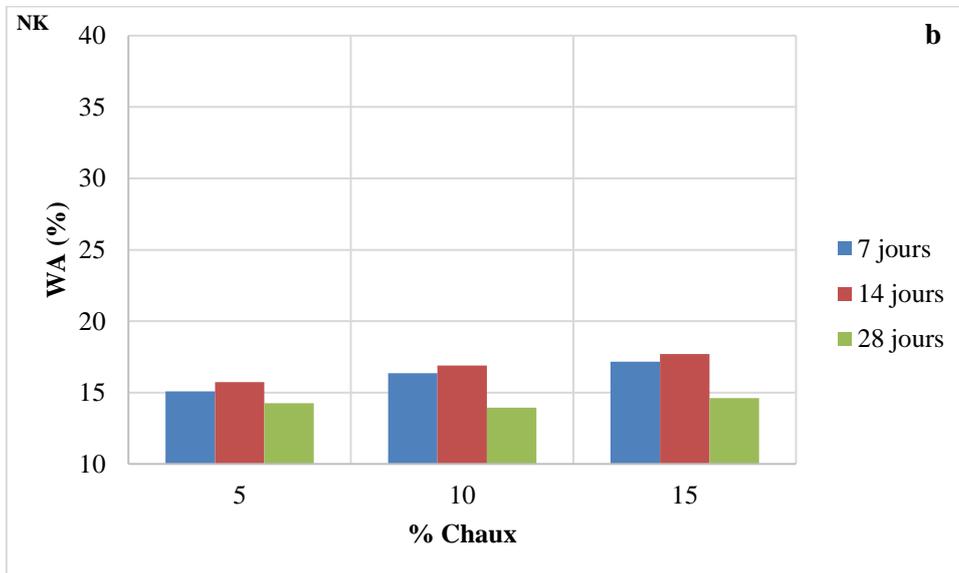
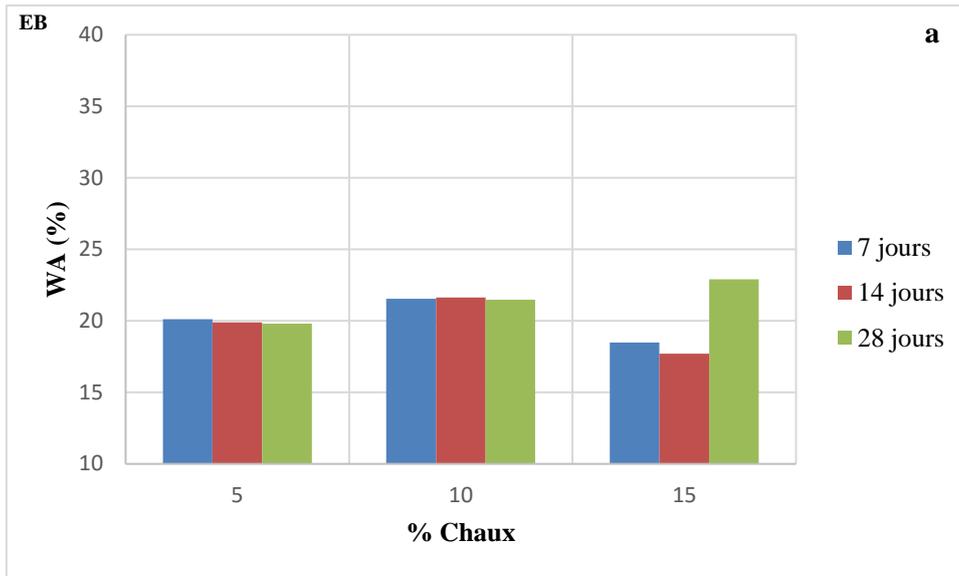
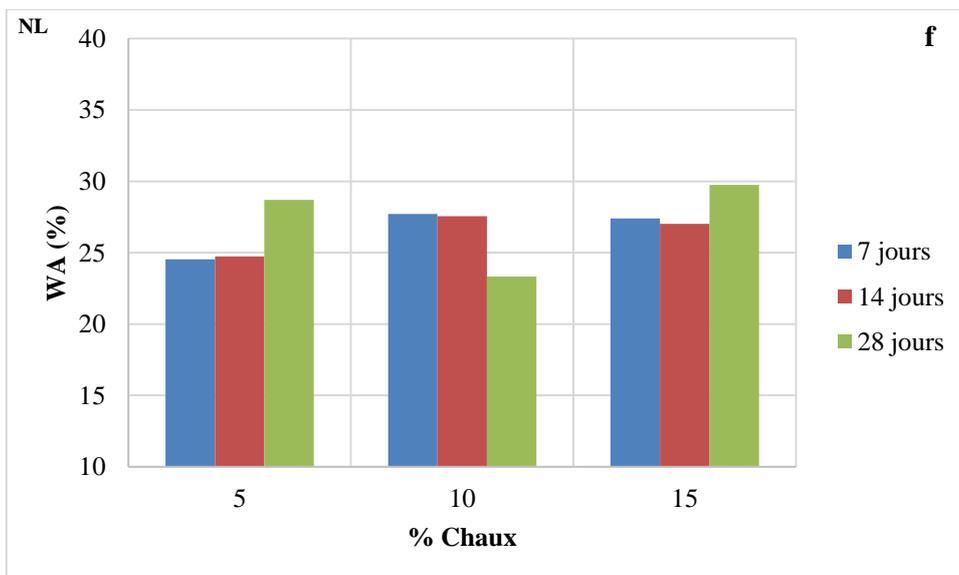
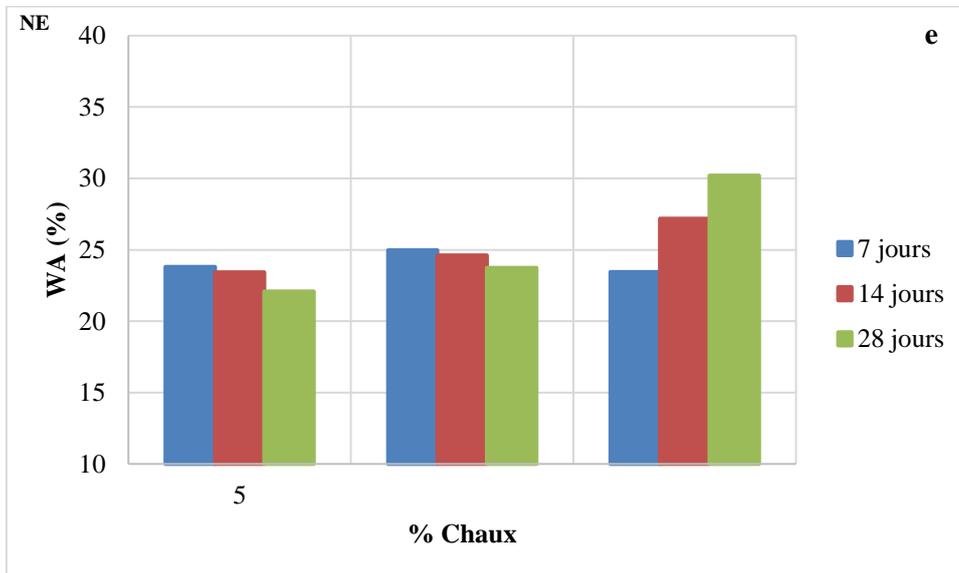
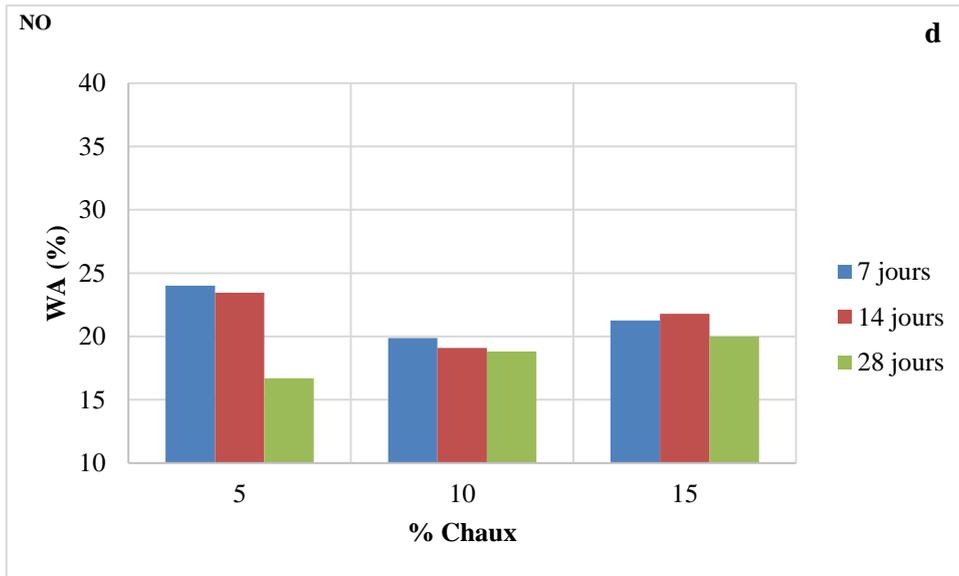


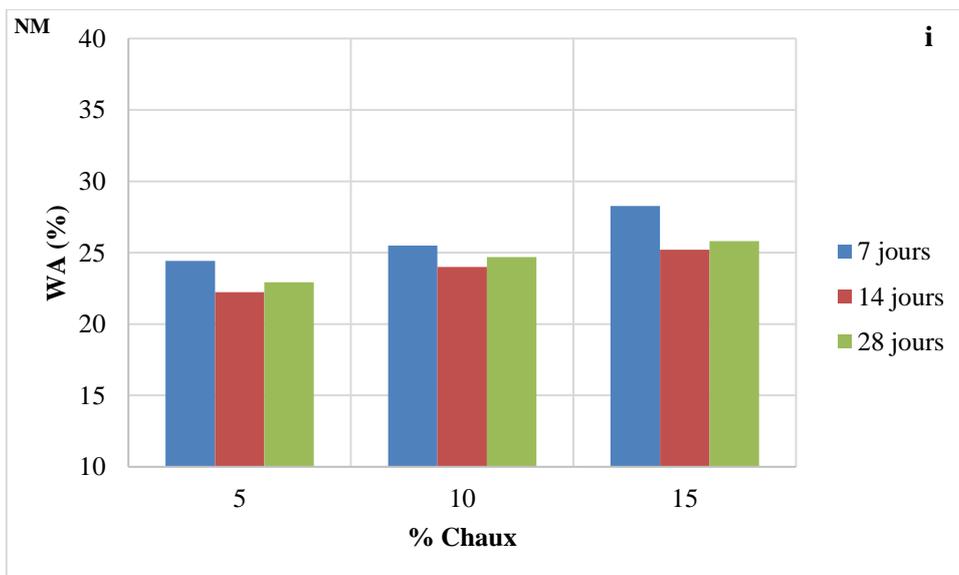
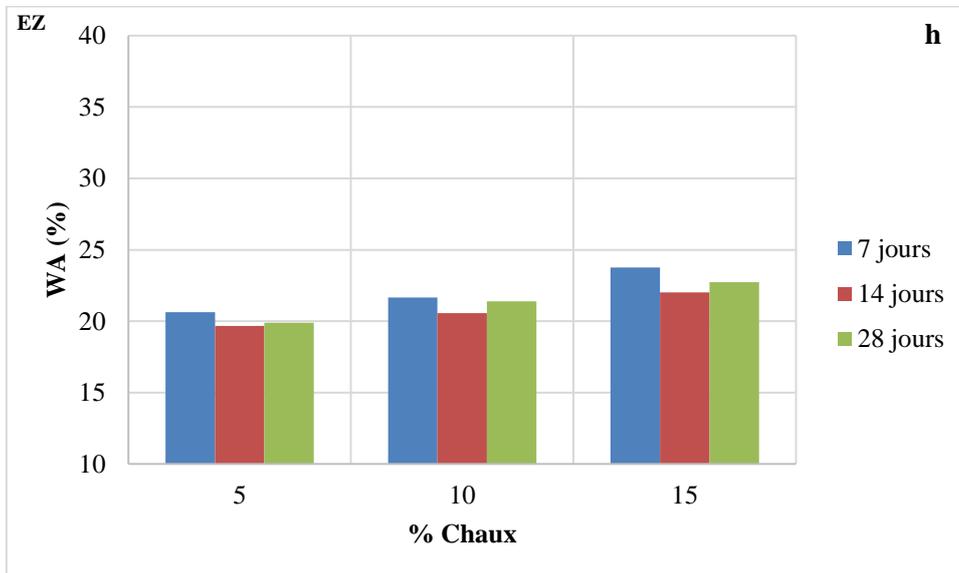
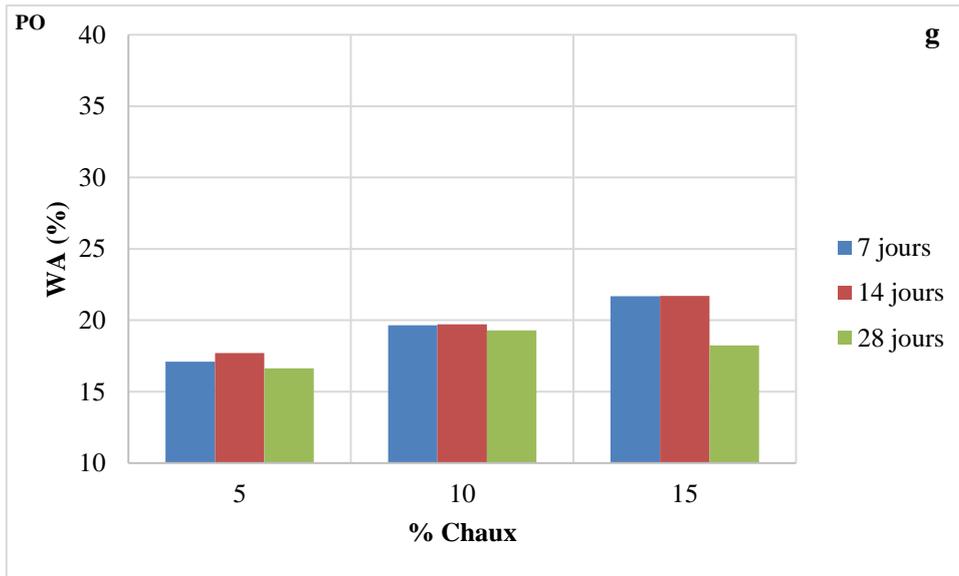
Figure 31. Valeurs de masse volumique des argiles latéritiques stabilisées à la chaux de Sa'a

Tableau 29. Valeurs d'absorption d'eau (%) des briquettes de Sa'a stabilisées à la chaux

Echantillon	% chaux	7 jours	14 jours	28 jours
EB	5	20,12	19,89	19,79
	10	21,54	21,63	21,48
	15	18,49	17,70	22,90
NK	5	15,08	15,74	14,26
	10	16,35	16,91	13,94
	15	17,16	17,69	14,61
KK	5	22,26	20,45	19,43
	10	23,70	21,28	21,14
	15	25,05	22,41	23,03
NO	5	24,00	23,46	16,71
	10	19,87	19,10	18,81
	15	21,27	21,78	20,01
NE	5	23,80	23,44	22,08
	10	24,97	24,60	23,73
	15	23,44	27,18	30,21
NL	5	24,54	24,74	28,70
	10	27,72	27,55	23,34
	15	27,40	27,02	29,75
PO	5	17,11	17,71	16,64
	10	19,66	19,71	19,30
	15	21,69	21,71	18,23
EZ	5	20,64	19,67	19,90
	10	21,66	20,56	21,38
	15	23,76	22,01	22,74
NM	5	24,43	22,24	22,93
	10	25,49	24,01	24,70
	15	28,27	25,22	25,82
NS	5	25,78	25,54	26,10
	10	28,20	26,51	27,25
	15	30,17	27,77	28,93
EY	5	25,49	25,06	26,38
	10	25,77	25,53	24,76
	15	27,19	27,05	26,79







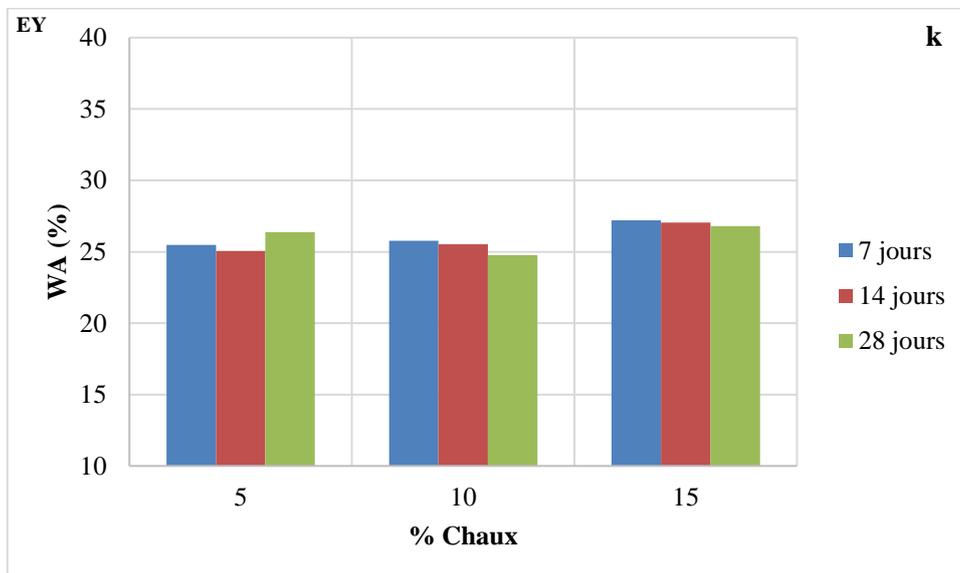
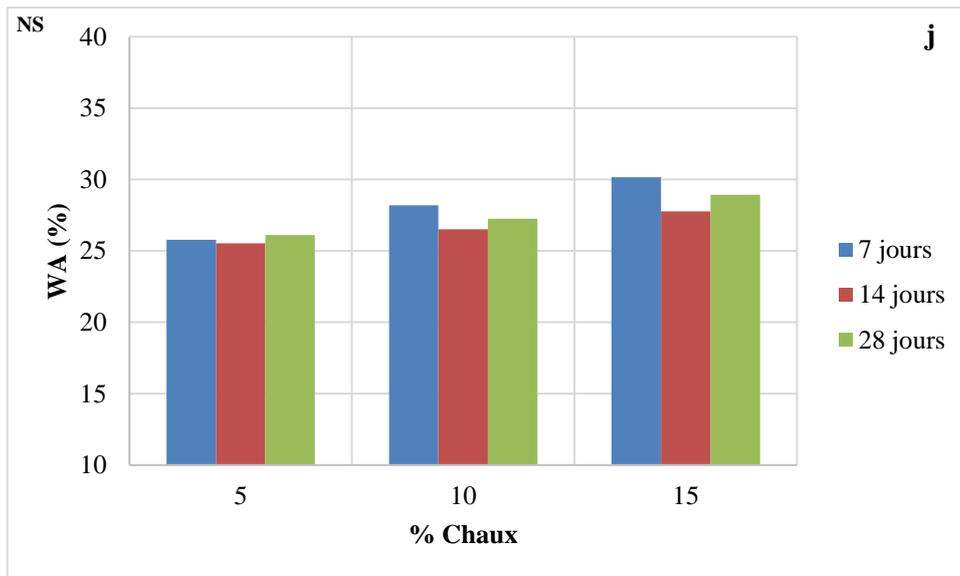
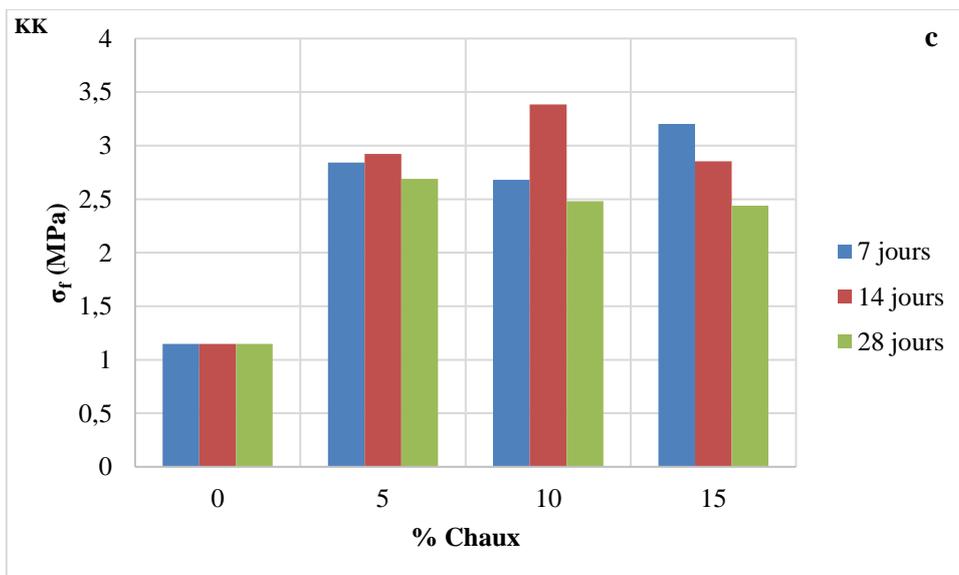
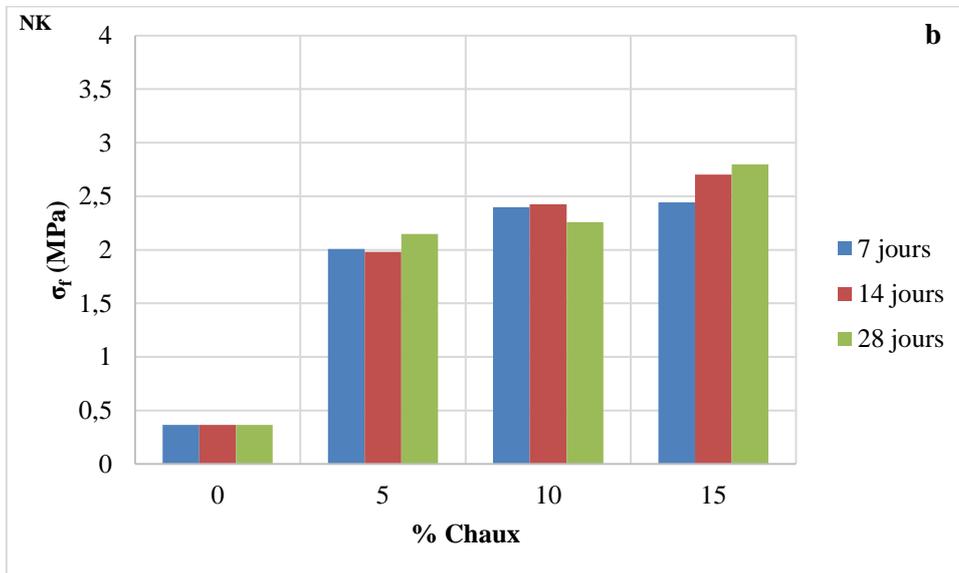
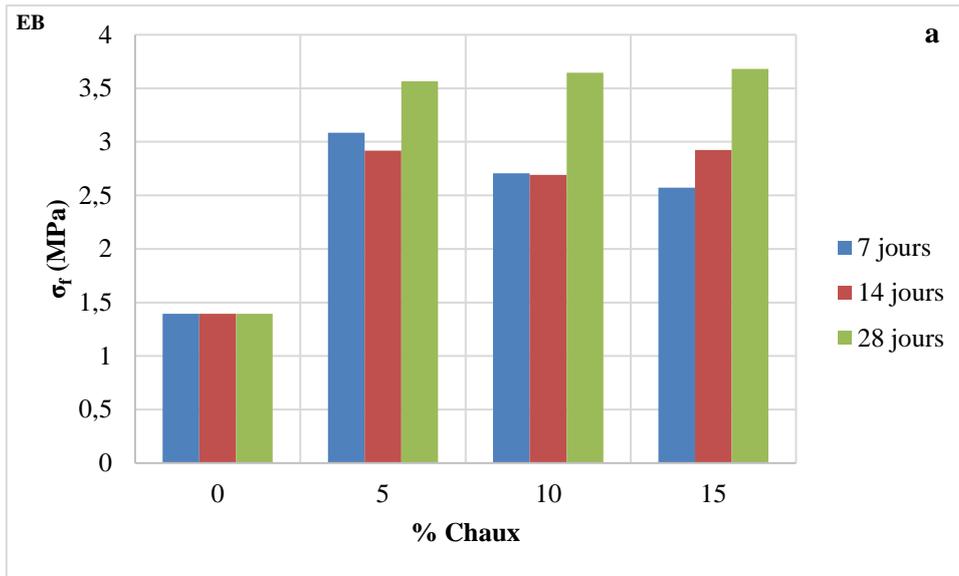
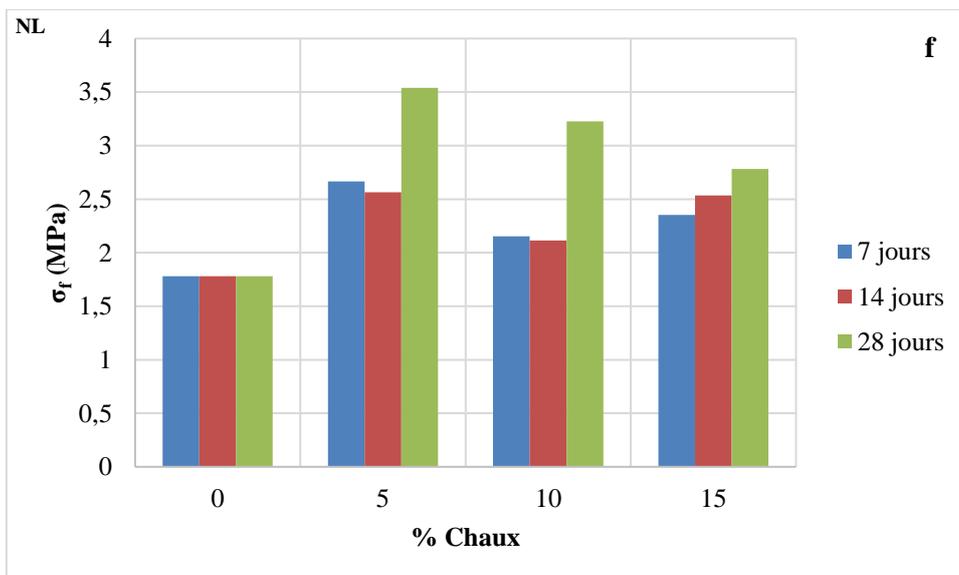
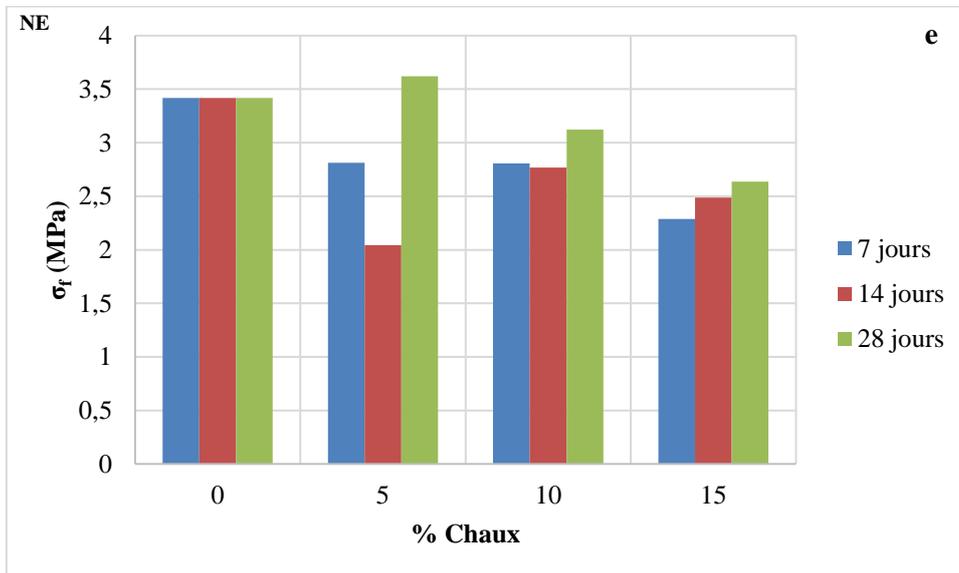
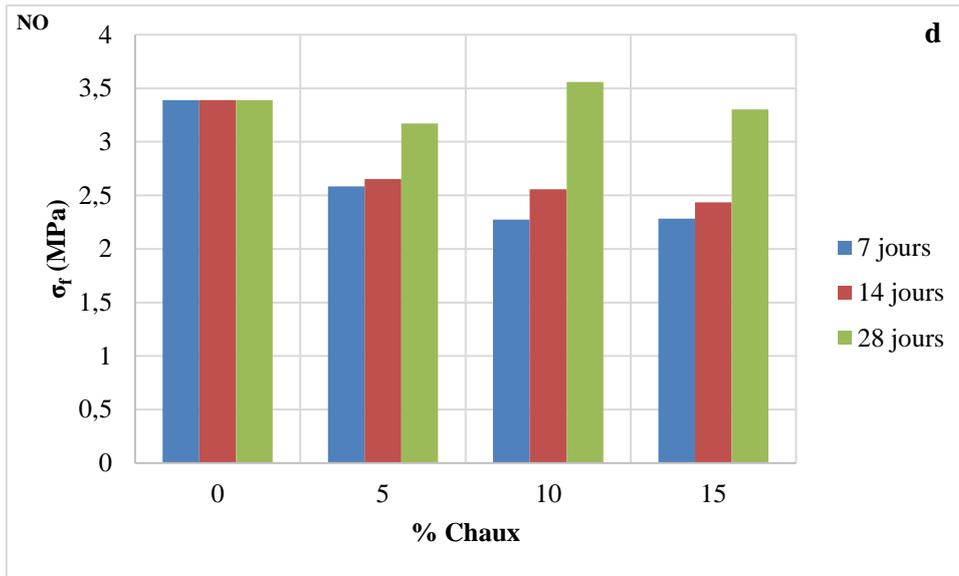


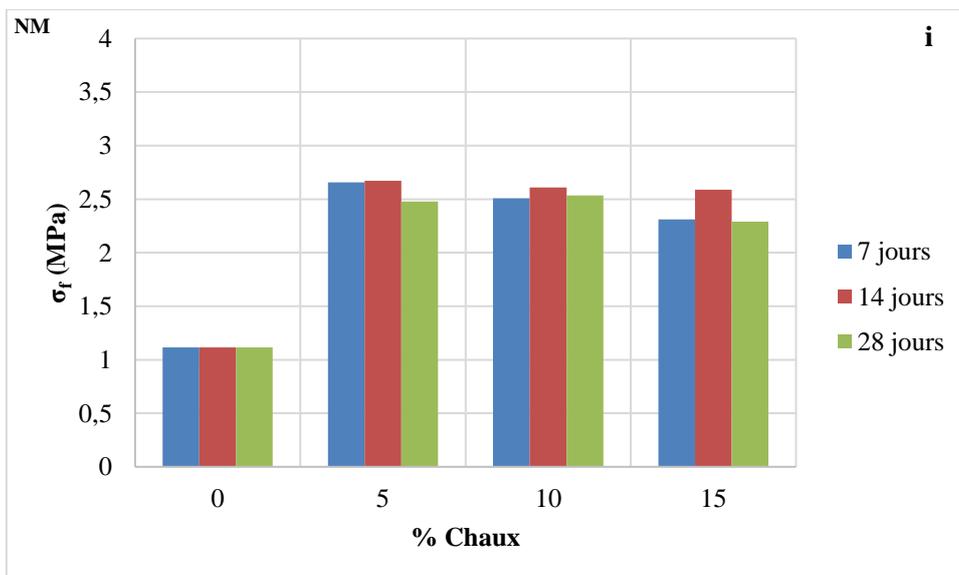
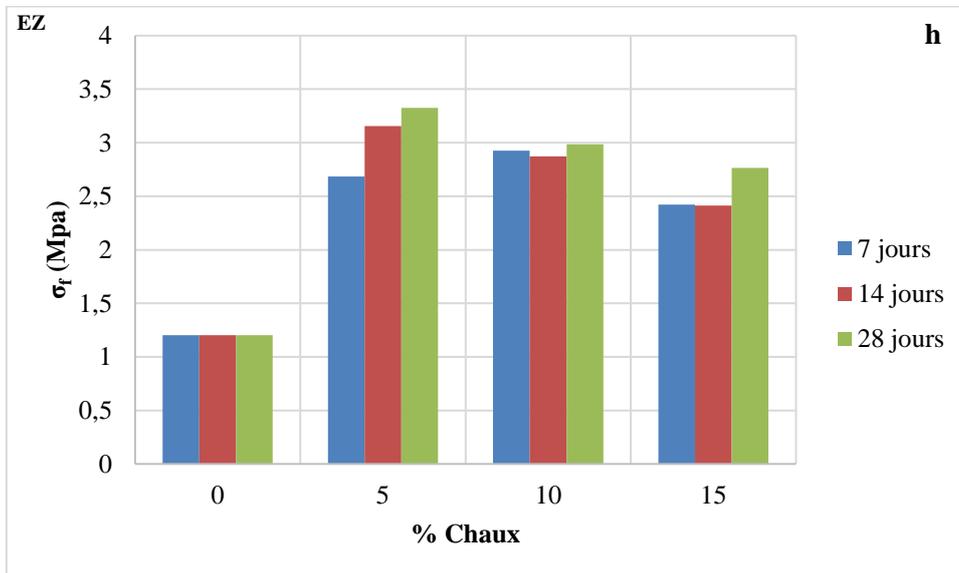
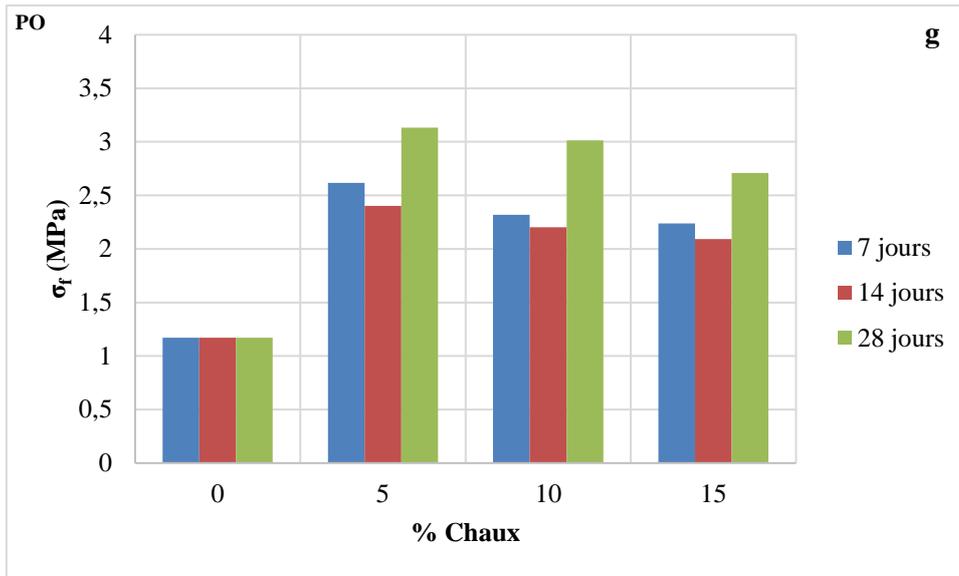
Figure 32. Valeurs d'absorption d'eau dans les argiles latéritiques stabilisées à la chaux de Sa'a

Tableau 30. Valeurs de résistance à la flexion (MPa) des briquettes de Sa'a stabilisées à la chaux

Echantillon	% chaux	7 jours	14 jours	28 jours
EB	0	1,39	1,39	1,39
	5	3,09	2,92	3,56
	10	2,71	2,69	3,64
	15	2,57	2,92	3,68
NK	0	0,36	0,36	0,36
	5	2,01	1,98	2,15
	10	2,40	2,43	2,26
	15	2,44	2,70	2,80
KK	0	1,15	1,15	1,15
	5	2,84	2,92	2,69
	10	2,68	3,38	2,48
	15	3,20	2,85	2,44
NO	0	3,39	3,39	3,39
	5	2,58	2,65	3,17
	10	2,27	2,56	3,56
	15	2,28	2,43	3,30
NE	0	3,42	3,42	3,42
	5	2,81	2,04	3,62
	10	2,81	2,77	3,12
	15	2,29	2,49	2,64
NL	0	1,78	1,78	1,78
	5	2,67	2,56	3,54
	10	2,15	2,11	3,23
	15	2,35	2,53	2,78
PO	0	1,17	1,17	1,17
	5	2,62	2,40	3,13
	10	2,32	2,20	3,01
	15	2,24	2,09	2,71
EZ	0	1,20	1,20	1,20
	5	2,68	3,16	3,33
	10	2,93	2,87	2,99
	15	2,42	2,41	2,77
NM	0	1,11	1,11	1,11
	5	2,66	2,67	2,48
	10	2,51	2,61	2,54
	15	2,31	2,59	2,29
NS	0	1,24	1,24	1,24
	5	2,71	2,73	2,67
	10	2,62	2,79	2,64
	15	2,30	3,01	2,52
EY	0	1,49	1,49	1,49
	5	2,79	2,79	2,81
	10	2,53	2,85	1,96
	15	2,62	2,54	3,13







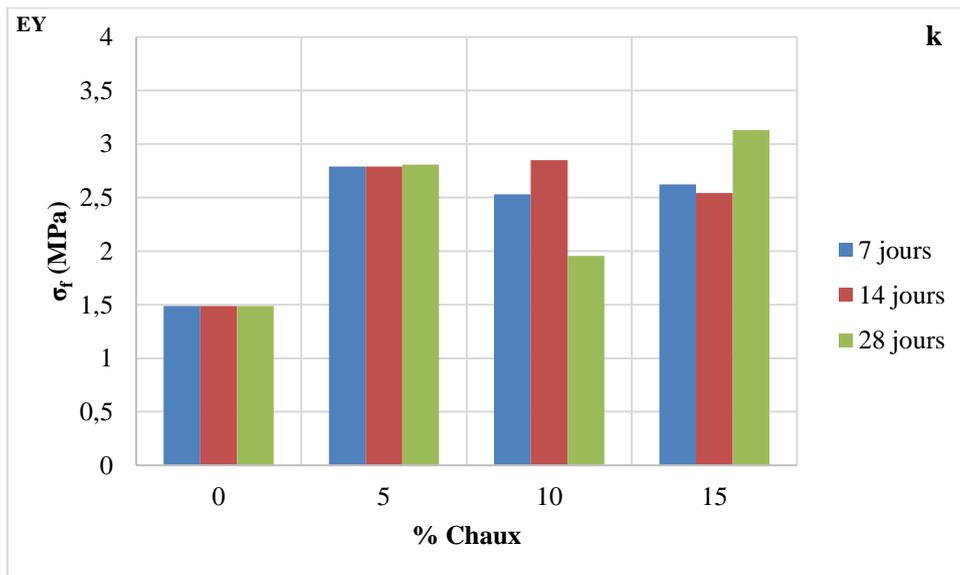
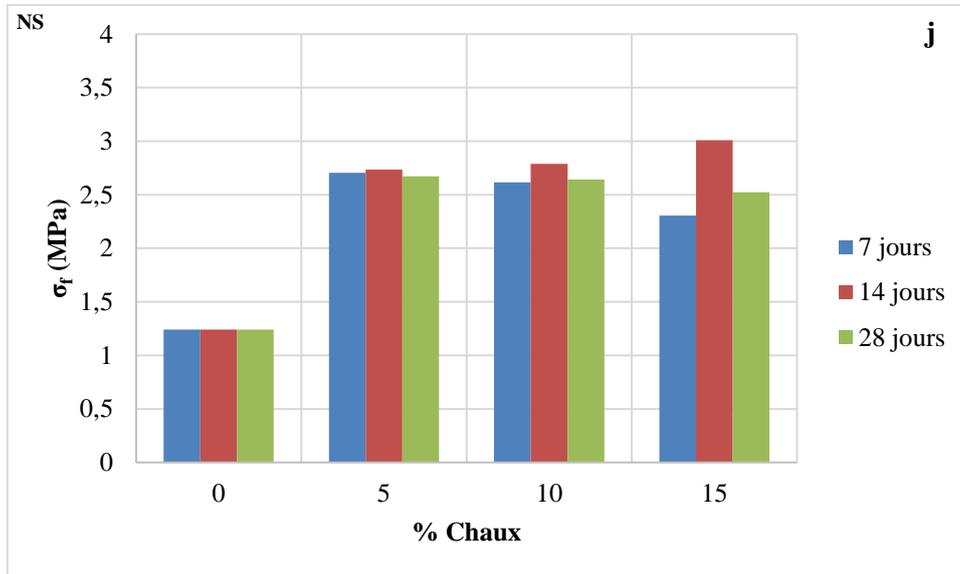


Figure 33. Valeurs de résistance à la flexion dans les argiles latéritiques stabilisées à la chaux de Sa'a

Excepté dans les briquettes de Nkom, les valeurs de σ_f ne sont pas proportionnelles au pourcentage de chaux dans les briquettes ; elles sont généralement plus élevées après stabilisation à 5 % de chaux qu'avec 10 et 15 %.

Les briquettes à base d'argiles latéritiques d'Ebogo, de Nkom, de Kokoé, de Nkolang, de Polo, d'Elig-Zogo, de Nkolmebanga, de Nsanmendouga et d'Eyené ont des valeurs de σ_f très faibles et inférieures à 2 MPa avant stabilisation à la chaux. Les argiles latéritiques de Nkolebassimbi et de Nkolmgbana donnent des briquettes dont la valeur de σ_f est supérieure à 2 MPa avant stabilisation. L'ajout de chaux dans les matériaux de ces deux localités réduit leurs valeurs de σ_f .

Conclusion

Les matériaux latéritiques superficiels de Sa'a sont des argiles sableuses à granularité étalée, excepté à Nkom où le matériau est un limon sableux. La plasticité de ces matériaux est faible à moyenne. Les briquettes à base de ces matériaux après cuisson sont de couleur rouge-brique et leur cohésion est bonne. Les valeurs de retrait linéaire croissent avec la température de cuisson. Les valeurs de taux d'absorption d'eau des matériaux stabilisés à la chaux sont plus élevées que celles obtenues après stabilisation aux argiles alluviales. Les valeurs de résistance à la flexion sont plus élevées après ajout d'argiles alluviales qu'ajout de chaux. Les matériaux stabilisés avec les argiles alluviales présentent de meilleures caractéristiques que ceux stabilisés avec la chaux. Les principaux faits d'observation et d'analyse pétrologique et géotechnique des matériaux étudiés sont discutés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE VI.

EXPLOITATION ET DISCUSSION

DES RESULTATS

Introduction

Le présent chapitre donne, en première partie, une signification aux données pétrographiques, minéralogiques et géochimiques des matériaux d'altération sur quartzites de la zone de Sa'a. Par la suite, des liens sont établis entre paramètres génétiques et paramètres géotechniques des graveleux latéritiques de ces roches. Enfin, le chapitre précise le comportement géotechnique des argiles latéritiques puis, ressort l'intérêt en géotechnique des graveleux et argiles latéritiques qui constituent la partie supérieure des profils d'altération dans la zone étudiée.

I. Influence de la structure de la roche mère sur les caractéristiques macromorphologiques et physico-chimiques et évolution géochimique des matériaux d'altération

Dans la zone intertropicale, les roches mères sont généralement recouvertes par deux grandes unités pédogénétiques : l'ensemble saprolitique et les sols. Le profil d'altération étudié présente, dans sa partie inférieure, un ensemble saprolitique constitué de quartzites pourris alternant avec des unités de sol. Cette organisation macromorphologique des matériaux d'altération étudiés est atypique et peut être liée à la structure de la roche mère. En fait, les quartzites micacés de la zone d'étude sont constitués de plaquettes de quartz de 1 à 2 cm d'épaisseur séparées par des lits de minéraux ferromagnésiens, millimétriques à plurimillimétriques. Le processus d'altération intense de ces lits ferromagnésiens entraîne la formation d'unités de sol (Q1a, Q2a, Q3a, Q4a et Q5a) composées de quartz, de muscovite, d'illite, de kaolinite, d'hématite et d'anatase qui intercalent les quartzites micacés pourris. La position des matériaux Q1a, Q2a, Q3a, Q4a et Q5a intercalant les quartzites pourris dans les diagrammes pH - Eh (Fig. 34) confirment que ces matériaux altérés sont des sols à l'instar des graveleux et argiles latéritiques de la partie supérieure du profil d'altération étudié. La formation de ces sols à l'intérieure de la zone saprolitique est due à l'altération rapide des lits de minéraux ferromagnésiens dans des conditions acido-réductrices (Fig. 34). De plus, l'épaisseur relativement faible (~5 m) du profil d'altération par rapport à ceux observés en zone équatoriale est due à la nature quartzitique de la roche mère. L'alternance de lits quartzitiques et de lits ferromagnésiens a conduit à une altération différentielle. Cette altération différentielle est due à l'infiltration d'eau dans les roches hétérogènes en climat tropical humide (Genthon *et al.*, 2017).

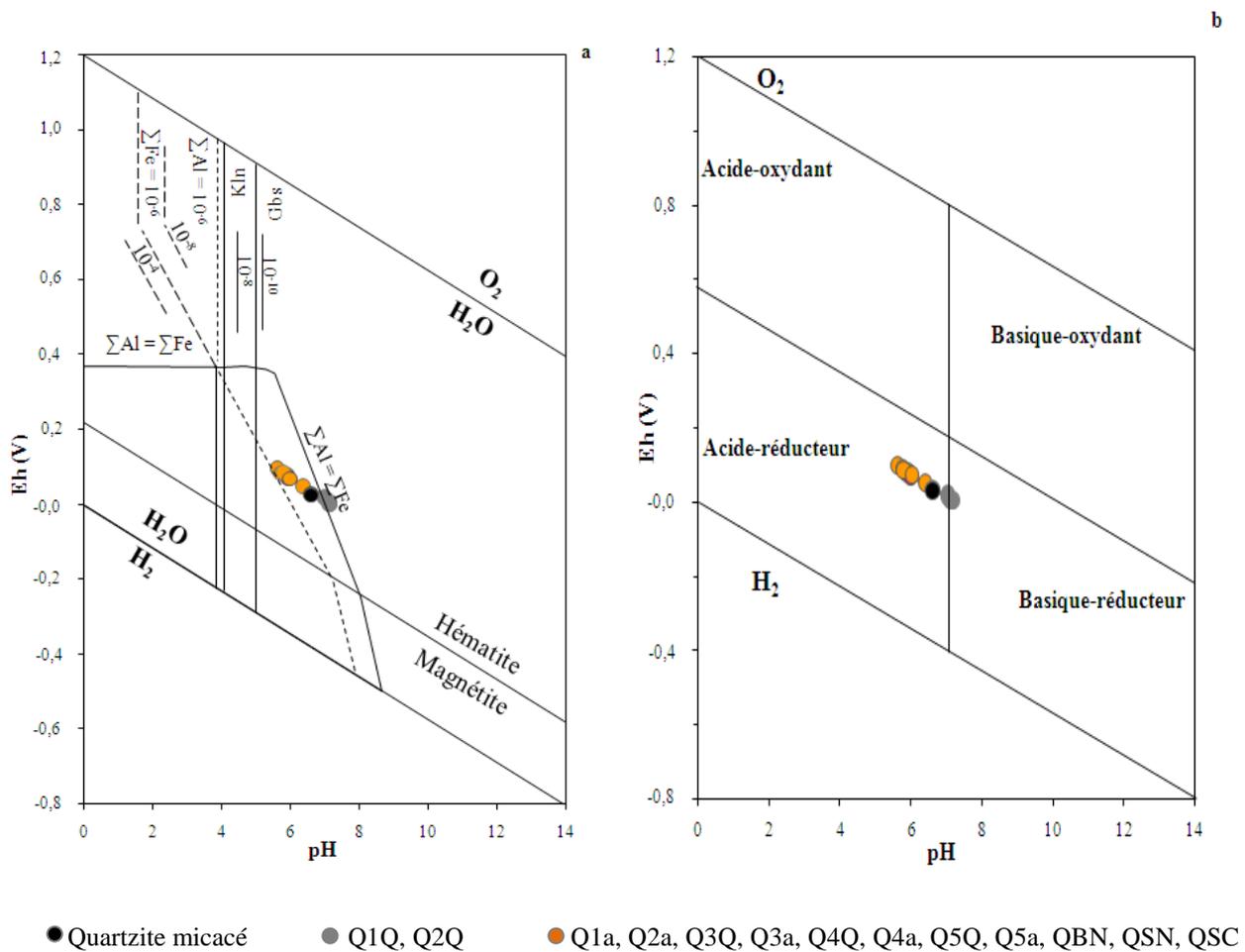


Figure 34. Position des matériaux d'altération de Sa'a dans les diagrammes Eh - pH

- (a) Position des matériaux d'altération de Sa'a dans le diagramme Eh - pH montrant les relations de solubilité entre hématite, gibbsite et eau à $T = 25^\circ C$ et $P = 1 \text{ atm}$ (d'après Norton, 1973 in Giorgis *et al.*, 2014)
- (b) Position des matériaux d'altération de Sa'a dans le diagramme Eh - pH montrant les environnements dans les conditions atmosphériques (d'après Garrels et Christ, 1965 in Giorgis *et al.*, 2014)

Les taux d'altération, plus élevés, associés à l'altération des roches à la base du profil d'altération s'expliquent par la réactivité intrinsèque élevée des assemblages de minéraux ferromagnésiens (Oelkers et Gislason 2001 ; Dessert *et al.*, 2003) augmentant la porosité dans la zone d'altération de base (Sak *et al.*, 2010 ; Gleeson *et al.*, 2011).

Le biplot de l'ACP des matériaux altérés étudiés (Fig. 35) montre deux groupes principaux de matériaux, les saprolites grossières et les sols, confirmant ainsi les observations macromorphologiques et les données physico-chimiques. Les saprolites grossières sont enrichies en SiO₂ (> 87 % en poids) tandis que les sols sont caractérisés par des teneurs élevées des autres oxydes majeurs et REE. Les valeurs de pH des matériaux altérés étudiés sont moyennement acides à légèrement basiques (pH ~5,60 – 7,15). Ces matériaux sont soumis à des processus d'hydrolyse par l'action des eaux de pluie, rencontrées dans la zone saturée du sol (Fig. 34b). L'eau dans la zone saturée et la dissolution incongruente des feldspaths et des minéraux ferromagnésiens contrôlent l'évolution des matériaux d'altération étudiés. La dissolution incongruente de ces minéraux conduit à la Kaolinitisation complète des unités de sol (Q1a, Q2a, Q3a, Q4a, et Q5a) dans la zone saprolitique et des sols QBN, QSN et QSC). Le phénomène d'altération différentielle observé dans la zone saprolitique est dû à la présence de lits de minéraux ferromagnésiens intercalant les lits quartzitiques, comme l'illustre les variations des valeurs de WIG (Fig. 36 ; Gong *et al.*, 2013) qui peut être considéré comme l'indice d'altération le plus sensible. En effet, cet indice prend en compte les valeurs de 7 oxydes au lieu de 04 comme c'est le cas pour CIA (Nesbitt et Young 1982), et 06 pour MIA (Babechuk *et al.*, 2014). Les unités de sol observées dans la partie saprolitique et les sols de la partie supérieure du profil d'altération, matériaux kaolinitisés, sont également faiblement (Q5a et QSC) à modérément (Q1a, Q1a, Q3a, Q4a, QBN et QSN) latérisés. Ce fait est différent de celui observé dans les profils d'altération en zone équatoriale où le processus de latéralisation est très prononcé (Bitom et Volkoff 1993 ; Ndjigui *et al.*, 2008 ; Kamgang *et al.*, 2009), en particulier au sommet des toposéquences. La latérisation faible à modérée des matériaux d'altération étudiés est similaire à celle observée dans les profils d'altération de bas de pente (Onana *et al.*, 2016b). Ce phénomène est probablement dû à la nature felsique de la roche mère. Les matériaux d'altération étudiés suivent une évolution parallèle à l'axe A – K, identique à celle observée dans les matériaux d'altération de bas de pente développés sur chloritoschistes en zone de Plateau sud Camerounais (Onana *et al.*, 2016b).

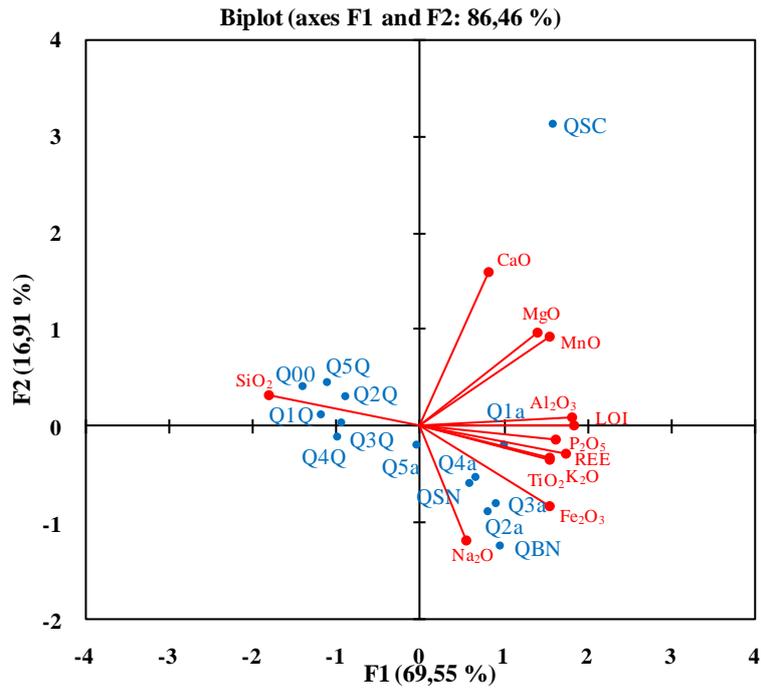


Figure 35. Biplot (selon De Lagarde, 1995) des matériaux d'altération sur quartzites micacés de Sa'a

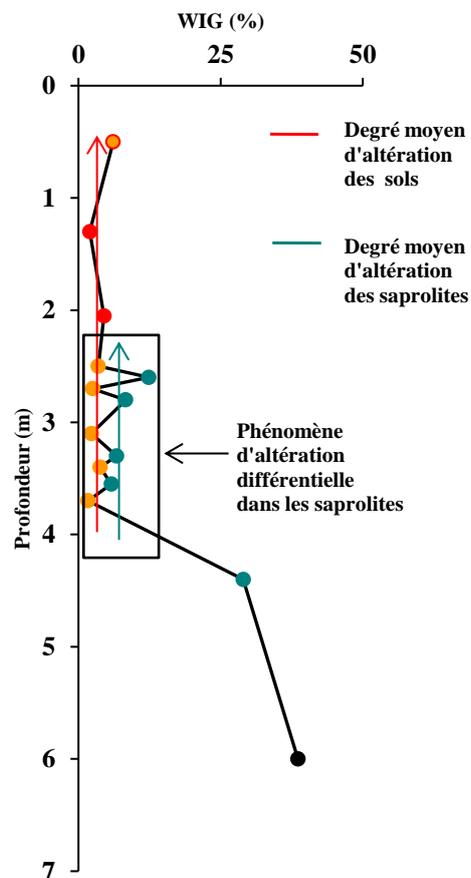


Figure 36. Variations du WIG (calculé d'après Gong *et al.*, 2013) le long du profil d'altération

Cependant, on observe un enrichissement en K moins marqué ($< + 30 \%$) probablement dû à une teneur en illite faible dans les matériaux d'altération étudiés. Pendant l'altération des quartzites micacés étudiés, pour des valeurs MIA de $\sim 95 \%$, correspondant à une hydrolyse de $\sim 95 \%$ des feldspaths et des minéraux ferromagnésiens, la latérisation est faible à modérée.

Les LILE sont fortement liés aux silicates ferromagnésiens et aux feldspaths dans les matériaux d'altération étudiés, ce qui justifie leur forte lixiviation du profil d'altération, sauf pour Cs qui est lié à la kaolinite dans les profils d'altération latéritique ($r_{\text{Cs-Al}} = 0,79$; Compton *et al.*, 2003; Ugur et Sahan 2012; Onana *et al.*, 2016b). L'anatase, l'hématite et l'apatite sont responsables de la corrélation positive entre U et Ti, Fe, Mo, Nb et Ta. L'uranium, Nb, Mo et Ta sont stables dans le milieu d'altération étudié. La présence des silicates ferromagnésiens et des feldspaths justifient l'association de Zr avec Si, Mg, Na et K, tandis que Hf est lié au Zr dans les feldspaths. Le zirconium est mobile dans les milieux d'altération. Cela a été démontré dans les matériaux d'altération sur roches volcaniques (Kurtz *et al.*, 2000). Seule l'apatite qui est fortement lixiviée dans l'environnement d'altération étudié contient W ($r_{\text{W-P}_2\text{O}_5} = 0,69$). Le zirconium, Hf et W sont instables dans le milieu d'altération étudié. Les corrélations positives entre les métaux de transition sont dues au fait qu'ils sont contenus dans l'anatase, la kaolinite et l'hématite. Le nickel est contenu dans l'apatite ($r_{\text{Ni-P}_2\text{O}_5} = 0,90$) avec les autres éléments ($r_{\text{V-P}_2\text{O}_5} = 0,74$, $r_{\text{Co-P}_2\text{O}_5} = 0,77$, $r_{\text{Cr-P}_2\text{O}_5} = 0,57$).

La faible teneur en REE des quartzites micacés peut être due à la faible proportion de minéraux accessoires, monazite, zircon, qui contrôlent les teneurs en REE. L'augmentation des teneurs en REE dans les matériaux d'altération par rapport aux quartzites micacés est un fait bien connu dû à l'altération surpergène des minéraux primaires (Braun *et al.*, 1998; Nyeck *et al.*, 2019). Les valeurs élevées du rapport $(\text{La/Yb})_N$ ($(\text{La/Yb})_N$: 6,30 – 35,78) indiquent un fractionnement significatif des éléments du groupe des terres rares causé par les processus d'altération et de pédogenèse dans les matériaux d'altération étudiés. Les REE sont associés à P_2O_5 dans les phosphates, à TiO_2 dans l'anatase et à K_2O dans l'illite ou la muscovite. Les LREE sont moins mobiles que les HREE dans l'environnement d'altération étudié. Ce phénomène bien connu est dû à la faible solubilité des LREE en conditions latéritiques par rapport aux HREE (Braun *et al.*, 1998). Les LREE restent donc liés à Al_2O_3 dans la kaolinite ($r = 0,92$), Fe_2O_3 dans l'hématite et K dans la muscovite et l'illite ($r = 0,83$), et ne sont pas éliminés lors de l'altération, bien que de nombreuses études aient montré que les REE (en particulier HREE et Ce) ont tendance à s'accumuler dans les oxydes et

oxyhydroxydes de Fe et Mn (De Carlo *et al.*, 1998 ; Bau, 1999 ; Hanilci, 2013). Ces résultats sont conformes à ceux de Compton *et al.* (2003) sur des sols latéritiques sur granites d'Afrique du Sud. Cependant, une partie des LREE, liée à Mg ($r = 0,72$) dans les minéraux ferromagnésiens, Ca ($r = 0,65$), Na ($r = 0,76$), Li ($r = 0,85$), Sr ($r = 0,67$) et Ba ($r = 0,62$) dans les feldspaths, est fortement lixiviée par l'environnement d'altération. Ceci est dû à l'altération rapide des minéraux ferromagnésiens qui sont instables en climat tropical (Taylor et Eggleton, 2001).

Les anomalies en Ce observées dans les sols étudiés sont un fait bien connu dans les environnements d'altération surpergène. Elles sont le résultat de la variabilité des conditions d'oxydoréduction (Neal et Taylor, 1989). Les anomalies positives en Ce dans l'horizon nodulaire sommital et l'horizon argilo-caillouteux meuble sont dues à l'oxydation de Ce^{3+} en Ce^{4+} . Le cérium est un élément très mobile dans les environnements d'altération surpergène, mais son état d'oxydation change et, cet élément demeure stable sous la forme de CeO_2 ou, stable à la surface des oxyhydroxydes de Fe et de Mn (Braun *et al.*, 1990 ; Compton *et al.*, 2003 ; Tematio *et al.*, 2017). En général, le cérium sous la forme Ce^{4+} est plus stable (anomalies positive de Ce) dans un environnement surpergène que sous la forme Ce^{3+} (anomalies négatives de Ce). Les anomalies négatives en Ce sont observées dans les quartzites micacés pourris et dans les unités de sol localisées à la base du profil d'altération, en raison des conditions réductrices qui y règnent (Neal et Taylor, 1989).

Des anomalies en Eu négatives ont été observées dans des matériaux d'altération (Babechuk *et al.*, 2014). Une Kaolinitisation importante des matériaux d'altération entraîne des pertes préférentielles en Eu par hydrolyse des plagioclases, car il a été démontré que les plagioclases s'altèrent rapidement au cours de l'hydrolyse. Ces anomalies en Eu indiquent donc la lixiviation des plagioclases dans les matériaux d'altération étudiés (Saleh, 2007).

II. Liens entre paramètres pétrologiques et paramètres géotechniques des graveleux latéritiques

II.1. Corrélations entre composants géochimiques et géotechniques

Il a été clairement démontré en géologie des altérations que le comportement géotechnique des matériaux et, celui des graveleux latéritiques en particulier, dépend de leur origine et de leur mode de formation (Ekodeck, 1984). L'altération influence les propriétés du sol telles la taille et la morphologie des particules, la granularité et la minéralogie. Ces

propriétés influencent le comportement mécanique de ce sol (Rocchi et Coop, 2016). La matrice de corrélation établie entre les données géochimiques et les données géotechniques indique uniquement deux corrélations significatives (Tab. 31). La première, est la corrélation inverse et modérée, entre IP et Fe_2O_{3t} (-0,50). La seconde, est la tendance corrélation directe entre CBR et Fe_2O_{3t} (0,45). Les graveleux latéritiques présentant des teneurs élevées en sesquioxydes ($\text{Fe}_2\text{O}_{3t} + \text{Al}_2\text{O}_3$) et, faibles en SiO_2 , se comportent mieux comme matériaux de corps de chaussée que ceux qui possèdent des teneurs élevées en SiO_2 et, faibles en $\text{Fe}_2\text{O}_{3t} + \text{Al}_2\text{O}_3$ (Ndzié Mvindi, 2019). Les graveleux latéritiques de la zone de Sa'a présentent des teneurs élevées en SiO_2 et, faibles en sesquioxydes par rapport à ceux développés sur gneiss, micaschistes et chloritoschistes (Ndzié Mvindi, 2019 ; Ngo'o Ze, 2020). Les caractéristiques géotechniques des graveleux latéritiques de Sa'a sont donc moins bonnes que celles des autres graveleux latéritiques. La dureté croît en fonction de l'augmentation de la teneur en fer ; les latérites les plus dures sont aussi les moins hydratées (Podwojewski et Bourdon, 1996). Les graveleux latéritiques de Sa'a présentent des valeurs de LOI et Fe_2O_{3t} , relativement plus faibles que celles obtenues sur les matériaux développés sur migmatites, charnockites, gneiss, micaschistes et chloritoschistes (Nzabakurikiza *et al.*, 2017 ; Onana *et al.*, 2017 ; Ndzié Mvindi *et al.*, 2017 ; Ngo'o Ze, 2020). Ces matériaux sont par conséquent moins indurés.

II.2. Corrélations entre paramètres d'altération chimique et paramètres géotechniques

Le compactage des concrétions latéritiques affecte les caractéristiques géotechniques du matériau (Cisse *et al.*, 2016). Le degré d'émiettement, transformation du matériau lors du compactage, dépend du degré de latéritisation et des caractéristiques physiques des particules (Ndzié Mvindi, 2019). Les relations entre paramètres d'altération chimique et paramètres géotechniques sont consignées dans le tableau 32. Les valeurs du potentiel de gonflement ε_s sont négativement liées à celles de CIA (-0,57) et de MIA (-0,63). L'altération réduit le comportement dans les graveleux latéritiques étudiés.

La matrice de corrélation appliquée aux données géotechniques et altérologiques normatives indique les valeurs du potentiel de gonflement ε_s sont négativement liées à celles de IRLP (-0,57) et IRIP (-0,52) (Tab. 33). Plus les graveleux latéritiques sont altérés et indurés, moins leur plasticité est bonne.

Tableau 31. Matrice de corrélation entre composants géochimiques et paramètres géotechniques dans les graveleux latéritiques de la zone de Sa'a

Variables	γ_s	LL	IP	OMC	MDD	CBR	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O _{3t}	PF	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O _{3t}
γ_s	1,00										
<2 mm	0,25										
<0,425 μm	0,26						N = 13				
<80 μm	0,23										
<2 μm	0,26										
LL	-0,34	1,00									
IP	0,02	0,35	1,00								
OMC	0,47	0,47	0,25	1,00							
MDD	-0,19	-0,66	-0,18	-0,94	1,00						
CBR	-0,30	-0,22	-0,28	-0,37	0,39	1,00					
SiO ₂	-0,40	0,18	0,20	-0,31	0,18	-0,48	1,00				
Al ₂ O ₃	0,21	-0,04	0,37	0,20	-0,12	0,32	-0,67	1,00			
Fe ₂ O _{3t}	0,38	-0,23	-0,50	0,22	-0,10	0,45	-0,86	0,21	1,00		
PF	0,30	0,04	-0,03	0,37	-0,30	0,38	-0,94	0,74	0,72	1,00	
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O _{3t}	0,40	-0,22	-0,28	0,26	-0,13	0,51	-0,98	0,56	0,93	0,89	1,00

p-value = 5 % ; * Les valeurs en gras indiquent les corrélations significatives.

Tableau 32. Matrice de corrélation entre paramètres d'altération et propriétés géotechniques dans les graveleux latéritiques de la zone de Sa'a

Variables	γ_s	< 80 μm	< 2 μm	Limon	Sable	Gravier	LL	IP	VBS	Gm	Ac	Pm	Pp	ε_s	OMC	MDD	CBR	CIA	MIA	IOL	
γ_s	1,00																				
<2 mm	0,25																				
<0,425 μm	0,26																				
<80 μm	0,23	1,00																			
<2 μm	0,26	0,99	1,00																		
Limon	0,25	0,99	1,00	1,00																	
Sable	0,20	0,32	0,33	0,34	1,00																
Gravier	-0,26	-0,78	-0,78	-0,79	-0,84	1,00															
LL	-0,34	0,17	0,22	0,21	-0,30	0,10	1,00														
IP	0,02	0,10	0,13	0,13	-0,13	0,03	0,35	1,00													
VBS	0,16	0,77	0,72	0,72	0,03	-0,46	0,41	0,12	1,00												
Gm	-0,25	-0,98	-0,97	-0,98	-0,45	0,86	-0,08	-0,06	-0,70	1,00											
Ac	-0,15	-0,78	-0,77	-0,77	-0,23	0,60	-0,11	0,45	-0,63	0,77	1,00										
Pm	0,16	0,83	0,87	0,87	0,21	-0,61	0,35	0,57	0,62	-0,81	-0,45	1,00									
Pp	0,13	0,86	0,87	0,87	0,20	-0,62	0,31	0,55	0,67	-0,83	-0,47	0,99	1,00								
ε_s	-0,17	0,04	0,08	0,09	0,09	-0,09	0,44	0,92	0,08	-0,04	0,48	0,50	0,47	1,00							
OMC	0,47	0,40	0,45	0,42	-0,20	-0,10	0,47	0,25	0,44	-0,31	-0,24	0,40	0,37	0,10	1,00						
MDD	-0,19	-0,34	-0,37	-0,35	0,30	-0,01	-0,66	-0,18	-0,50	0,23	0,25	-0,32	-0,31	-0,10	-0,94	1,00					
CBR	-0,30	-0,02	0,00	0,01	0,41	-0,26	-0,22	-0,28	-0,47	-0,05	0,01	-0,17	-0,18	-0,11	-0,37	0,39	1,00				
CIA	0,17	-0,15	-0,07	-0,07	0,00	0,08	-0,09	-0,55	-0,21	0,13	-0,38	-0,20	-0,29	-0,57	0,01	0,00	-0,04	1,00			
MIA	0,18	-0,10	-0,03	-0,03	0,01	0,05	-0,12	-0,59	-0,19	0,08	-0,43	-0,21	-0,29	-0,63	0,03	0,00	0,02	0,99	1,00		
IOL	0,38	0,10	0,15	0,15	0,03	-0,08	-0,18	-0,25	-0,17	-0,09	-0,14	-0,09	-0,13	-0,33	0,28	-0,15	0,52	0,26	0,32	1,00	

p-value = 5 %

Tableau 33. Matrice de corrélation entre paramètres d'altération normatifs et paramètres géotechniques dans les graveleux latéritiques de la zone de Sa'a

Variables	γ_s	< 80 μm	< 2 μm	Limon	Sable	Gravier	LL	IP	VBS	Gm	Ac	Pm	Pp	ε_s	OMC	MDD	CBR	DVRAR	IRLP	IRIP	
γ_s	1,00																				
<2 mm	0,25																				
<0,425 μm	0,26																				
<80 μm	0,23	1,00																			
<2 μm	0,26	0,99	1,00																		
Limon	0,25	0,99	1,00	1,00																	
Sable	0,20	0,32	0,33	0,34	1,00																
Gravier	-0,26	-0,78	-0,78	-0,79	-0,84	1,00															
LL	-0,34	0,17	0,22	0,21	-0,30	0,10	1,00														
IP	0,02	0,10	0,13	0,13	-0,13	0,03	0,35	1,00													
VBS	0,16	0,77	0,72	0,72	0,03	-0,46	0,41	0,12	1,00												
Gm	-0,25	-0,98	-0,97	-0,98	-0,45	0,86	-0,08	-0,06	-0,70	1,00											
Ac	-0,15	-0,78	-0,77	-0,77	-0,23	0,60	-0,11	0,45	-0,63	0,77	1,00										
Pm	0,16	0,83	0,87	0,87	0,21	-0,61	0,35	0,57	0,62	-0,81	-0,45	1,00									
Pp	0,13	0,86	0,87	0,87	0,20	-0,62	0,31	0,55	0,67	-0,83	-0,47	0,99	1,00								
ε_s	-0,17	0,04	0,08	0,09	0,09	-0,09	0,44	0,92	0,08	-0,04	0,48	0,50	0,47	1,00							
OMC	0,47	0,40	0,45	0,42	-0,20	-0,10	0,47	0,25	0,44	-0,31	-0,24	0,40	0,37	0,10	1,00						
MDD	-0,19	-0,34	-0,37	-0,35	0,30	-0,01	-0,66	-0,18	-0,50	0,23	0,25	-0,32	-0,31	-0,10	-0,94	1,00					
CBR	-0,30	-0,02	0,00	0,01	0,41	-0,26	-0,22	-0,28	-0,47	-0,05	0,01	-0,17	-0,18	-0,11	-0,37	0,39	1,00				
DVRAR	0,14	0,06	0,07	0,09	-0,01	-0,03	-0,01	0,27	-0,13	-0,05	0,31	0,07	0,06	0,27	0,19	-0,13	0,44	1,00			
IRLP	0,20	-0,11	-0,03	-0,03	-0,07	0,11	0,01	-0,54	-0,13	0,11	-0,41	-0,18	-0,27	-0,57	0,15	-0,15	-0,11	-0,36	1,00		
IRIP	0,40	0,18	0,24	0,24	0,02	-0,12	-0,10	-0,43	-0,06	-0,16	-0,42	-0,03	-0,10	-0,52	0,33	-0,23	0,33	0,32	0,66	1,00	

p-value = 5 %

II.3. Prédiction du CBR des graveleux latéritiques sur quartzites micacés

Le CBR est le paramètre géotechnique fondamental utilisé pour définir les caractéristiques d'un sol pour la conception des couches de chaussées (AFNOR, 1997). Puisqu'il s'agit d'une mesure indirecte de la résistance du sol de fondation, il est également utilisé pour évaluer le module de rigidité et la résistance au cisaillement de ce dernier (Nagaraj et Suresh, 2018). Vu l'importance de ce paramètre, la nécessité de trouver des moyens de déterminer les valeurs de CBR à partir de paramètres physiques simples afin de réduire le coût, le temps et l'énergie nécessaires à la réalisation de l'essai est impérative. Plusieurs relations statistiques ont été établies entre différents paramètres géotechniques (CEBTP, 1984 ; Taskiran, 2010 ; Yato Katte *et al.*, 2018 ; Nyemb Bayamack *et al.*, 2019 ; Taha *et al.*, 2019 ; Duque *et al.*, 2020). Les relations statistiques les plus récentes, établies sur des graveleux latéritiques développés sur roches sédimentaires et volcaniques prennent en compte 4 paramètres géotechniques, avec $r^2 = 0,95$ (Nyemb Bayamack *et al.*, 2019). L'influence de la nature argileuse sur la résistance à la compression et le CBR a été démontrée (Nagaraj et Suresh, 2018). Une analyse de régression, dans laquelle le CBR est considéré comme variable dépendante et, les paramètres minéralogiques, géochimiques et géotechniques, comme variables explicatives a été réalisée. Le modèle choisi est le meilleur modèle et le critère de sélection est le coefficient de détermination R^2 pour un intervalle de confiance de 95 %. Tous les paramètres ne suivant pas une loi normale ne sont pas pris en compte dans le modèle proposé. Les paramètres Ac, quartz et gibbsite sont donc exclus du calcul. La normalité des résidus a été vérifiée par le test de Shapiro et Wilk (1965) et, l'indépendance des résidus, par le test de Durbin et Watson (1950). L'analyse de régression appliquée aux données permet d'obtenir 11 modèles différents en fonction du coefficient de détermination R^2 (Tab. 34). Le modèle choisi est celui avec 6 paramètres. Ce modèle permet d'exprimer 96 % (R^2 ajusté = 0,96 ; Tab. 35) de la variabilité du CBR à l'aide des paramètres explicatifs choisis. Le test de Fisher (1971) a été réalisé pour l'analyse de la variance. La probabilité associée à F est inférieure à 0,0001, et indique que la prise de risque en concluant que les variables explicatives apportent une quantité d'information significative au modèle est de moins 0,01 % (Tab. 36). La contribution de chaque paramètre dans le modèle ainsi que les coefficients associés et les limites des intervalles sont représentés dans le tableau 37. L'équation du modèle obtenu est une association entre les paramètres minéralogiques, géochimiques et géotechniques. Cette équation est la suivante :

$$\text{CBR} = 822,64 - 295,95 \times \gamma_s + 1,23 \times (< \%2 \mu\text{m}) - 23,21 \times \text{VBS} + 4,72 \times \text{DSM} + 2,25 \times \text{Fe}_2\text{O}_{3t} - 3,52 \times \text{Goethite} \quad (27)$$

Tableau 34. Différents modèles de régression de la variable CBR

Nombre de variables	Variables	MCE	R ²	R ² ajusté	AIC de Akaike	SBC de Schwarz	PC d'Amemiya
1	SiO ₂	225,4	0,231	0,165	72,3	73,4	0,9
2	TEO / SiO ₂	151,8	0,529	0,435	67,9	69,6	0,6
3	γ _S / Sable / SiO ₂	72,8	0,796	0,729	59,0	61,2	0,3
4	γ _S / Gravier / VBS / SiO ₂	36,9	0,908	0,863	50,6	53,4	0,2
5	γ _S / VBS / Gm / Fe ₂ O _{3t} / Goethite	21,4	0,954	0,921	43,8	47,1	0,1
6	γ _S / < 2 μm / VBS / DSM / Fe ₂ O _{3t} / Goethite	11,7	0,978	0,956	36,0	39,9	0,1
7	γ _S / < 2 μm / Limon / Gravier / TEO / DSM / SiO ₂	4,0	0,994	0,985	21,5	26,0	0,0
8	γ _S / Limon / VBS / Ac / Pp / DSM / Fe ₂ O _{3t} / Goethite	1,6	0,998	0,994	8,4	13,5	0,0
9	γ _S / < 0,425 μm / Limon / VBS / Ac / Pp / TEO / Fe ₂ O _{3t} / Goethite	0,1	0,999	0,999	-32,9	-27,2	0,0
10	γ _S / < 0,425 μm / < 2 μm / LL / VBS / Pm / TEO / Al ₂ O ₃ / Fe ₂ O _{3t} / Goethite	0,0	1,00	1,00	-99,0	-92,8	0,0
11	Gravier / LL / Ac / Pm / ε _S / DSM / SiO ₂ / Al ₂ O ₃ / Fe ₂ O _{3t} / Kaolinite / Goethite	0,0	1,00	1,00		0,0	0,0

MCE : Moyenne des Carrés des Erreurs ; AIC : Akaike Information Criterion ; SBC : Schwarz Bayesian Criterion ; PC : Prediction Criterion

Tableau 35. Coefficients d'ajustement

Observations	13
Somme des poids	13,0000
DDL	6,0000
R ²	0,9782
R ² ajusté	0,9563
MCE	11,7392
RMCE	3,4263
DW	2,4177

DDL : Degré De Liberté ; MCE : Moyenne des Carrés des Erreurs ; RMCE : Racine de la Moyenne des Carrés des Erreurs ; DW : test de Durbin-Watson

Tableau 36. Analyse de la variance

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	6	3154,6417	525,7736	44,7878	0,0001
Erreur	6	70,4352	11,7392	-	-
Total corrigé	12	3225,0769	-	-	-

Calculé contre le modèle Y = Moyenne (Y)

Tableau 37. Paramètres du modèle

Source	Valeur	Erreur standard	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	822,64	96,05	8,56	0,0001	587,54	1057,74
γ_s	-295,95	31,70	-9,34	< 0,0001	-373,54	-218,36
<2 mm	0,00	0,00				
<0,425 μm	0,00	0,00				
<80 μm	0,00	0,00				
<2 μm	1,23	0,22	5,59	0,0014	0,69	1,76
Limon	0,00	0,00				
Sable	0,00	0,00				
Gravier	0,00	0,00				
LL	0,00	0,00				
IP	0,00	0,00				
VBS	-23,21	4,35	-5,33	0,0018	-33,87	-12,56
Gm	0,00	0,00				
Ac	0,00	0,00				
Pm	0,00	0,00				
Pp	0,00	0,00				
ε_s	0,00	0,00				
TEO	0,00	0,00				
DSM	4,72	1,45	3,26	0,0173	1,17	8,27
SiO ₂	0,00	0,00				
Al ₂ O ₃	0,00	0,00				
Fe ₂ O _{3t}	2,25	0,27	8,24	0,0002	1,58	2,92
Kaolinite	0,00	0,00				
Goethite	-3,52	0,46	-7,61	0,0003	-4,66	-2,39

La visualisation des données sur le graphique de comparaison des prévisions et des valeurs observées permet de remarquer une tendance linéaire de la droite mais aussi l'insertion de toutes les observations à l'intérieur de l'intervalle de confiance (Fig. 37). Ce fait est confirmé par le graphique de représentation des résidus normalisés (Fig. 38). Ce résultat est en accord avec les travaux qui ont démontré que le comportement géotechnique des sols est fonction de 02 principaux facteurs, la granularité et la composition minéralogique (Erguler, 2016).

III. Comportement géotechnique et mécanique des argiles latéritiques naturelles et des argiles latéritiques stabilisées aux argiles alluviales et à la chaux

La forte proportion de quartz peut influencer le volume de phase amorphe après le frittage (Kamseu *et al.*, 2007). Les faibles teneurs en alcalins dans les matières premières argileuses de Sa'a ne favorisent pas des températures de cuisson basses (Dondi *et al.*, 2001 ; Kamseu *et al.*, 2007). L'absence des éléments chimiques magnésiens ne favorise pas la production des phases vitreuses (Christidis, 2011). Ces faibles teneurs sont dues à une lixiviation rapide de ces éléments au cours de l'hydrolyse tels que le démontrent les bilans d'altération. La présence des oxydes de fer, des alcalins et des alcalino-terreux dans la matière première aurait induit une vitrification et une fusion rapide durant la cuisson (Baccour *et al.*, 2008 ; Pardo *et al.*, 2011). Ce processus diminuerait alors la porosité du matériau cuit et, par là, son degré d'absorption d'eau, augmentant sa résistance mécanique. La proportion élevée de sable dans les matériaux de Nkom s'explique par l'exploitation artisanale de sable à proximité du site de prélèvement. Les différentes proportions en fractions granulométriques (sables, limons et argiles) ont une influence significative sur les propriétés rhéologiques et céramiques des matériaux, il est souhaitable que la granularité d'une terre argileuse pour brique soit étalée (Sigg, 1991 ; Reeves *et al.*, 2006). Les valeurs de LL (20 %), LP (14 %) et IP (6 %), les plus faibles, sont obtenues dans les matériaux de Nkom. Les valeurs maximales de LL (47 %) et de IP (19 %) sont obtenues à Elig-Zogo. La valeur maximale de LP (31 %) est obtenue dans les argiles latéritiques de Nkolang. Les valeurs de RL obtenues avec les briquettes à base des mélanges de matériaux latéritiques des quartzites micacés de Sa'a et d'argiles alluviales de la Sanaga sont supérieures à celles obtenues sur les mélanges à base d'argiles latéritiques d'Ayos et d'argiles alluviales du Nyong (Ntouala *et al.*, 2016).

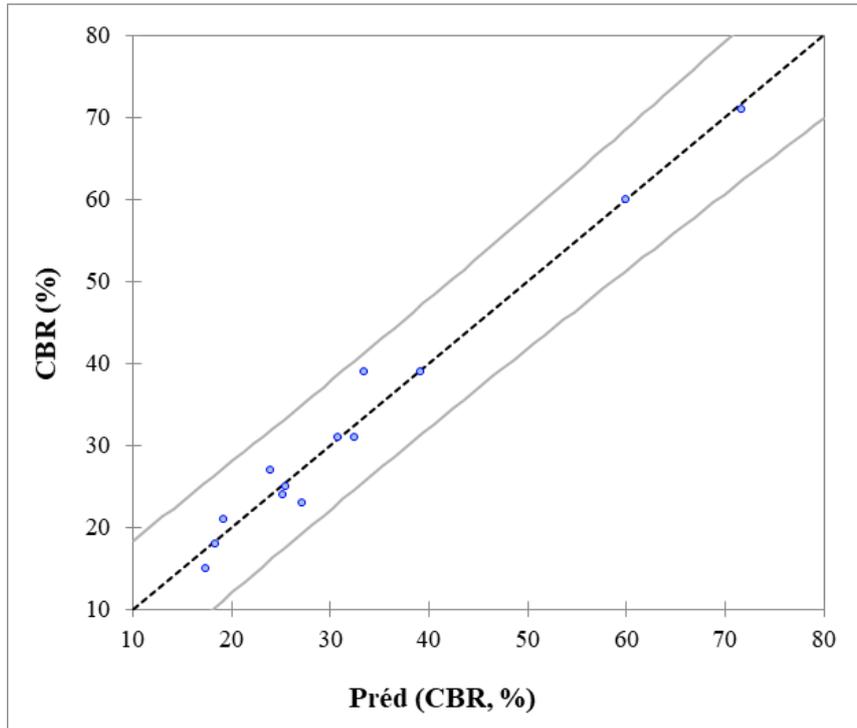


Figure 37. Distance entre les prédictions des valeurs de CBR et les observations

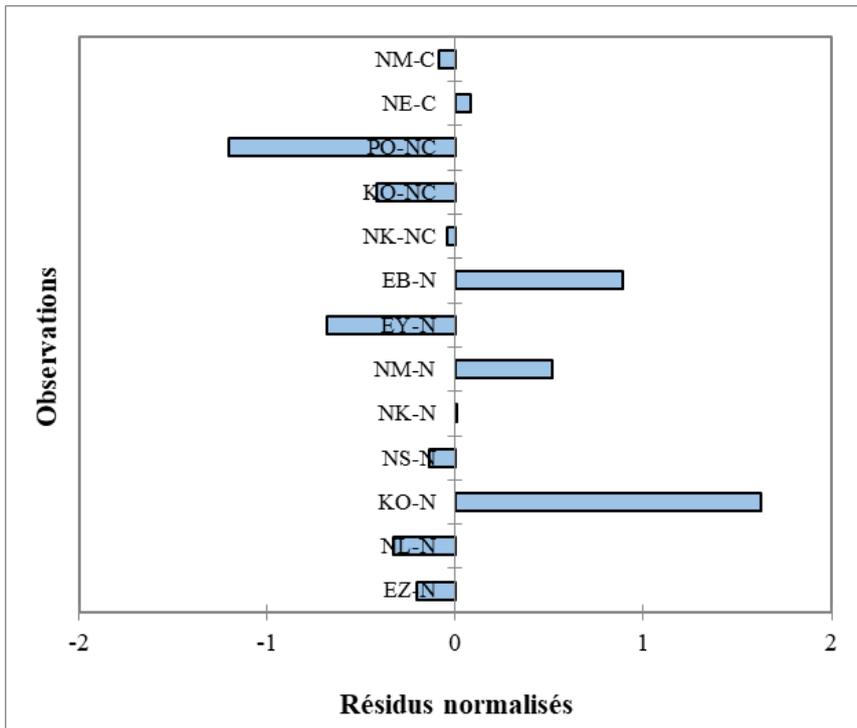


Figure 38. Représentation des résidus normalisés

Ces valeurs sont également supérieures à celles obtenues avec les mélanges à base des matériaux du même niveau développés sur granites de Batouri et d'argiles alluviales de la Kadey (Onana *et al.*, 2019). Ces valeurs de RL des briquettes à base de argiles latéritiques de Sa'a sont semblables à celles obtenues à Monatélé et Ebebda (Onana *et al.*, 2016a). Ce fait pourrait s'expliquer par la proximité géographique entre Sa'a, Ebebda et Monatélé. Le comportement des briquettes à base de matériaux de Nkom pourrait s'expliquer principalement par leur nature, des limons sableux. Ces valeurs négatives de RL ne traduisent pas un gonflement des briquettes après cuisson. Elles s'expliquent dans le cas des matériaux de Nkom par la faible proportion d'argiles (8,00 %) qui, si elle était plus élevée, aurait joué le rôle de liant.

Une faible cohésion est particulièrement observée sur ces briquettes du fait probablement de cette faible proportion d'argiles (Fig 39). De manière générale, les valeurs négatives de RL pourraient être attribuées à l'apparition de microfissures qui provoquent un gonflement apparent des matériaux. Ces fissures sont observables sur certaines briquettes. Le problème engendré par des valeurs élevées de RL est l'apparition d'importantes distorsions, ce qui est particulièrement observé sur les briquettes à base de matériaux de Nkolang et Nsanmendouga (Fig. 40). Les grandes variations des valeurs de RL peuvent être associées à la teneur élevée en minéraux argileux, à la faible proportion de feldspaths, d'alcalins et d'alcalino-terreux (Ndjigui *et al.*, 2016). La déformation reste proportionnelle pour la plupart des briquettes et ces dernières ne présentent pas de distorsion apparente. A l'exception des briquettes à base de matériaux argileux d'Elig-Zogo où le comportement est fortement influencé par l'intensité de la fracturation observable, les valeurs de RL les plus élevées sont obtenues à Nkolang, Nkolmgbana et Nsanmendouga. Ce fait pourrait s'expliquer par la proportion d'argile élevée dans les matériaux de ces sites. La position des matériaux étudiés (Fig. 41) dans l'abaque de maniabilité de Brain et Highly (1978) in Moutou *et al.* (2012) montre que, excepté les matériaux de Nsanmendouga qui présentent une valeur de RL élevée et, ceux de Nkom, qui ont une faible cohésion, toutes les argiles latéritiques de la zone de Sa'a présentent des propriétés de moulage acceptables. Les valeurs élevées de RL des argiles latéritiques de Nsanmendouga sont en accord avec les prédictions de la charte de maniabilité de Brain et Highly (Fig. 41), tout comme celles observées à des températures inférieures à 1050°C dans l'ensemble des briquettes, à l'exception de celles d'Elig-Zogo sus-évoquées. Ces faibles valeurs de RL sont également liées à la nature sableuse de ces matériaux où, le sable (silice libre), agit comme matériau de remplissage et améliore le contrôle du retrait (Nzeukou Nzeugang *et al.*, 2013).



Figure 39. Faible cohésion – effritement de briquettes de Nkom (illustration pour NK_100 après cuisson à 1050°C)



Figure 40 a et b. Distorsions observables sur les briquettes de Nsanmendouga (NS _100) après cuisson à 1050°C

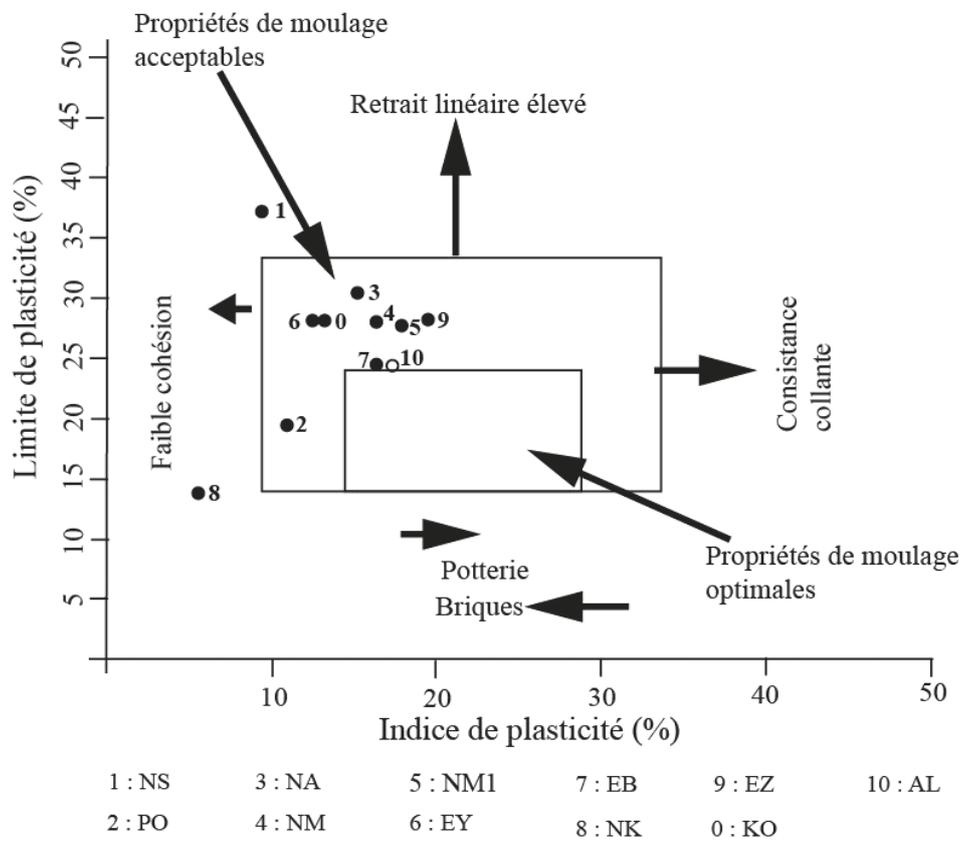


Figure 41. Position des matériaux latéritiques superficiels de Sa'a dans l'abaque de maniabilité de Brain et Highly (1978) in Moutou *et al.* (2012)

Pendant la cuisson, la variation de RL dépend principalement du degré de frittage et de la porosité initiale de l'argile crue (Milheiro *et al.*, 2006). L'augmentation de la température de cuisson provoque une fusion partielle du composé suivant les phases minéralogiques et donc chimiques présentes dans la matière de départ. Au fur et à mesure que la vitrification, formation de la phase vitreuse lors de la fusion partielle, a lieu, la porosité apparente du produit diminue progressivement et le matériau se rétrécit (Christidis, 2011). Ce liquide en fusion cimente les grains de minéraux qui s'y trouvent afin d'accroître les valeurs de résistance mécanique de produits (Kamseu *et al.*, 2007). Les valeurs des taux d'absorption WA obtenues avec les mélanges argileux de Sa'a sont semblables à celles obtenues à Batouri (Onana *et al.*, 2019). La faible diminution des valeurs de WA dans tous les argiles latéritiques étudiées à 900 et 950°C serait probablement liée à l'absence ou à une très faible formation de la phase vitreuse à ces températures (Melo *et al.*, 2003 ; Reeves *et al.*, 2006). Ce fait est en accord avec la faible proportion de fondants dans ces matériaux. La diminution considérable des valeurs de WA à 1050 et 1100°C pourrait être due à la formation d'une phase vitreuse qui induit une disparition progressive de la porosité lors du frittage (Milheiro *et al.*, 2006). La fermeture des pores ou leur isolement est provoqué par la pénétration du fluide qui va former la phase vitreuse à l'intérieur des pores (Baccour *et al.*, 2009 ; Celik, 2010 ; Manoharan *et al.*, 2011). Un comportement similaire est observé dans les matériaux du Plateau sud camerounais (Mbumbia *et al.*, 2000 ; Ntoulala *et al.*, 2016 ; Onana *et al.*, 2016b) et à Limbé (Diko *et al.*, 2011), en zone côtière du Cameroun. L'absorption d'eau est étroitement liée à la densification de la matrice d'argile, et permet d'avoir une idée sur le taux de grésification du tesson (Reeves *et al.*, 2006 ; Melo *et al.*, 2003). La baisse proportionnelle des valeurs de WA, au-delà de 1000°C, est liée à la formation considérable de la phase liquide qui a pénétré et isolé les pores (Manoharan *et al.*, 2011).

IV. Intérêts des graveleux et des argiles latéritiques de Sa'a en géotechnique routière et dans l'industrie du bâtiment

IV.1. Graveleux latéritiques en géotechnique routière

Les graveleux latéritiques ont de mauvaises performances si leur valeur de poids volumique des grains solides est inférieure à 25,8 kN/m³ et, des performances excellentes, si cette valeur est supérieure à 28,5 kN/m³ (Nwaiwu *et al.*, 2006). Les graveleux latéritiques de Sa'a présentent des valeurs de poids volumique des grains solides de 27,3 kN/m³ en moyenne, supérieures à 25,8 kN/m³. Ce fait prédit un comportement moyen à bon de ces matériaux en construction routière. Les courbes granulométriques individuelles des matériaux étudiés, en

majorité, ne s'insèrent pas à l'intérieur du fuseau de spécification pour couche de fondation (CEBTP, 1984 ; Fig. 42). Cependant, la courbe granulométrique moyenne s'insère à l'intérieur de ce fuseau. Puisque les matériaux sont souvent malaxés avant leur utilisation en chantier, ces matériaux sont donc utilisables en couche de fondation. Toutefois, il faudra veiller à homogénéiser le mélange le plus possible (Fig. 43). Pour une utilisation des graveleux latéritiques en construction routière, les spécifications de plasticité (CEBTP, 1984) stipulent que les valeurs de IP doivent être inférieures à 25 % pour les couches de fondation et, inférieures à 15 %, pour les couches de base. La valeur moyenne de IP (22 %) des graveleux latéritiques étudiés, proche de la limite 25 %, suggère la possibilité de leur utilisation en couche de fondation (CEBTP, 1984). La valeur minimale du module de classement G_m (1,74), supérieure à 1,5, indique que les matériaux étudiés sont utilisables en couche de fondation pour les routes à fort trafic et, dans une moindre mesure, en couche de base, pour les routes mineures ($< 0,3 \times 10^6$ esse, essieux standards équivalents). La valeur moyenne de P_m (470), supérieure à 250, indique que les graveleux latéritiques de Sa'a satisfont pleinement aux critères d'utilisation en couche de base, pour les routes rurales et les routes urbaines avec un trafic de $0,3 - 1,0 \times 10^6$ esse, ainsi que pour les couches de fondation. La valeur moyenne du produit de plasticité P_p (592) inférieure à 600, montre que ces matériaux sont utilisables en couche de fondation pour les trafics faibles à moyens T1, T2 et T3 ($T1 < 5 \times 10^5 < T2 < 1,5 \times 10^6 < T3 < 4 \times 10^6 < T3 < 4 \times 10^6 < T4 < 10^7 < T5 < 2 \times 10^7$) par essieux standards équivalents de 13 tonnes) selon Bagarre (1990). D'après le CEBTP (1984), les graveleux latéritiques doivent avoir une valeur de DSM supérieure ou égale à 1,90 et, une valeur de TEO, inférieure ou égale à 15 %, pour une utilisation en couche de fondation. Les valeurs moyennes de TEO (11,1 %) et de DSM (2,05) obtenues confirment que les graveleux latéritiques étudiés sont utilisables en couche de fondation. Les valeurs minimales de CBR à 95 % OPM admises pour les couches de fondation et les couches de base pour trafic moyen T3 sont respectivement de 30 et 80 % (CEBTP, 1984). La valeur moyenne de CBR des graveleux latéritiques étudiés, 33 %, est légèrement supérieure à la limite requise pour la couche de fondation. Ces matériaux sont donc utilisables en couche de fondation. Sept classes de portances CBR ont été définies au Cameroun (DEGN, 1987). Les graveleux latéritiques étudiés sont de la classe S5 et, par conséquent, utilisables en couche de fondation pour trafic faible à moyen T2/T3 et, en couche de base, pour trafic faible T1.

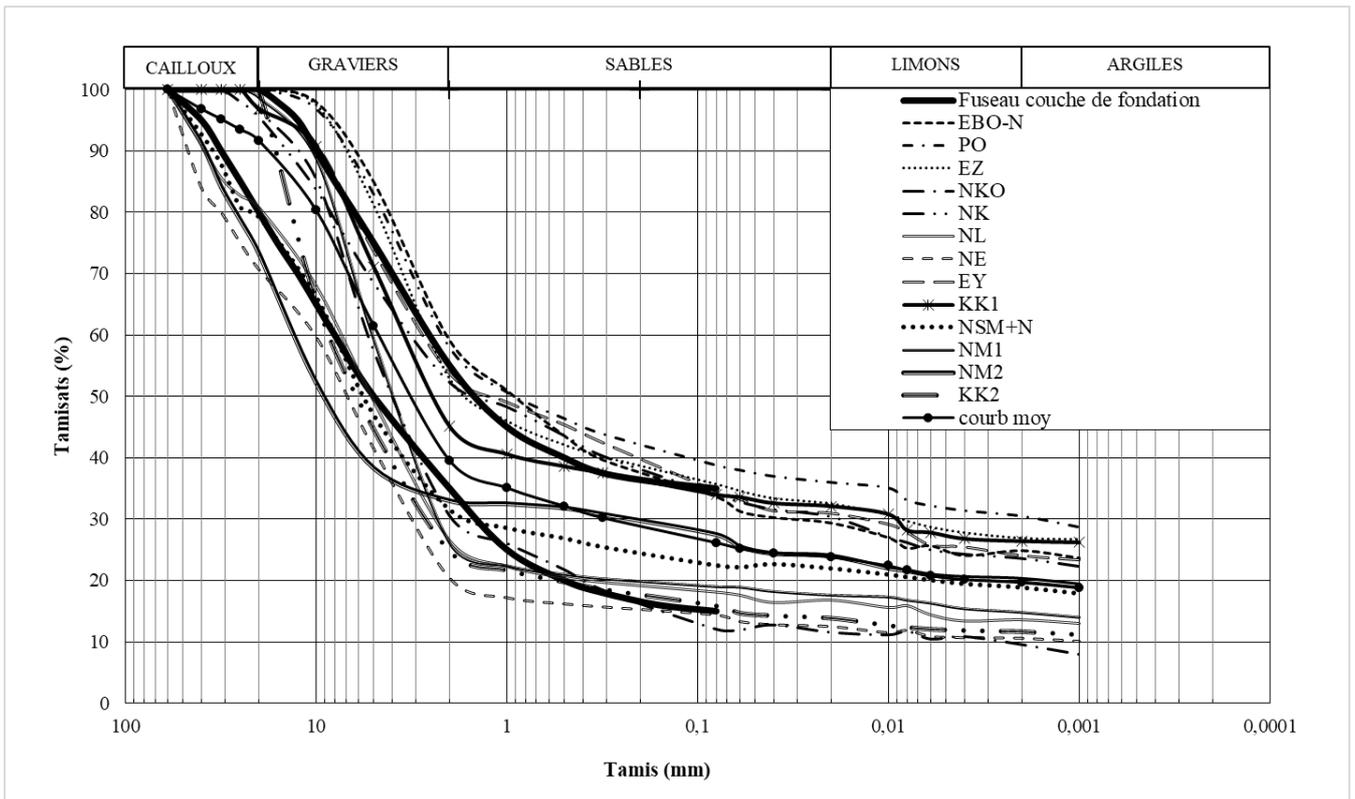


Figure 42. Courbes granulométriques des graveleux latéritiques de la zone de Sa'a à l'intérieur du fuseau de spécification pour couche de fondation (CEBTP, 1984)

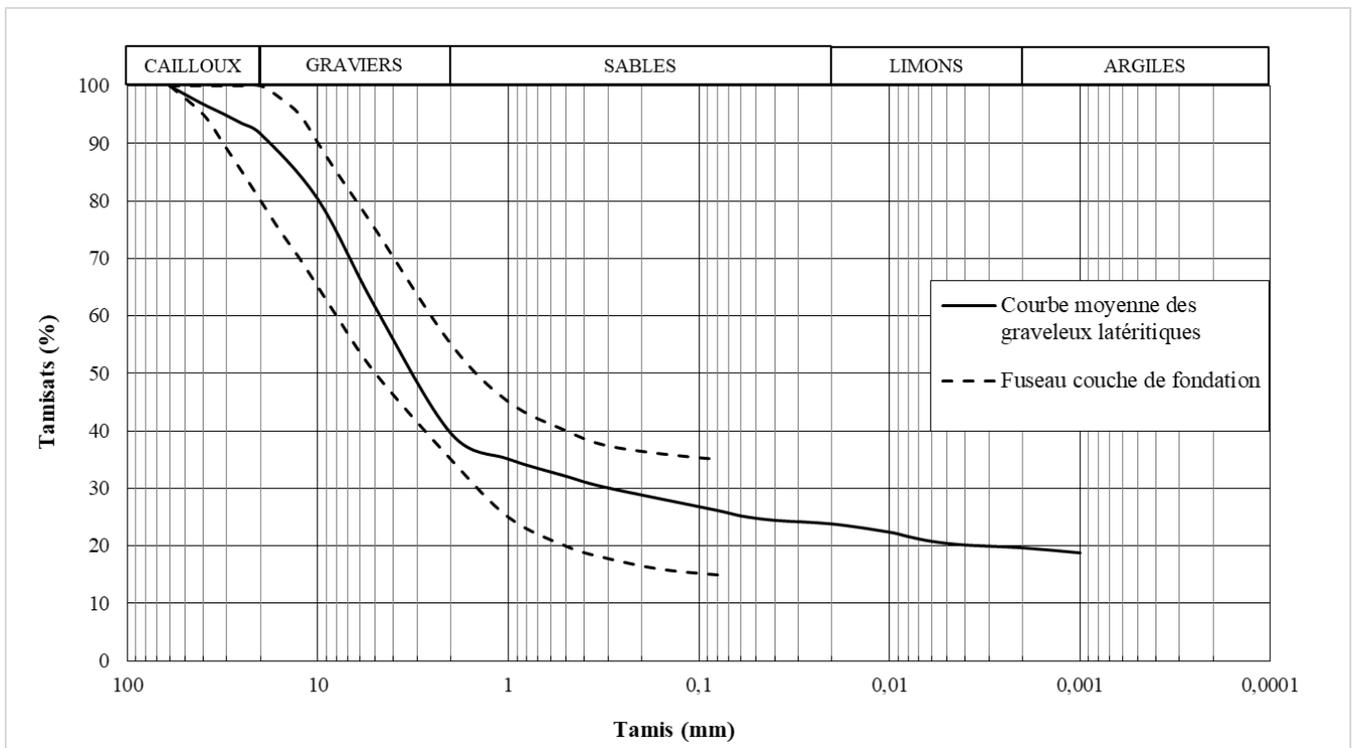


Figure 43. Courbe granulométrique moyenne des graveleux latéritiques de la zone de Sa'a à l'intérieur du fuseau de spécification pour couche de fondation (CEBTP, 1984)

IV.2. Argiles latéritiques dans l'industrie du bâtiment

Le diagramme de Winkler (1954) *in* Hajjaji *et al.*, 2002 ; Fig. 44) ressort les différents domaines d'utilisation des matériaux du point de vue granulométrique dans la construction. Ce diagramme montre que les matériaux argileux latéritiques superficiels de Kokoé, Polo, Nkolmgbana, Eyené, Ebogo et Elig-Zogo se prêtent à la fabrication des tuiles et briques de maçonnerie. Les matériaux de Nsanmendouga peuvent être utilisés pour la production des produits creux pendant que ceux de Nkolmebanga peuvent servir à la manufacture des briques perforées verticalement. Les matériaux de Nkolang, du fait de leur faible teneur en sable (17,20 %), et ceux de Nkom, du fait de leur très faible teneur en argiles (8,00 %), ne sont pas adaptés en l'état à la production des matériaux de construction du point de vue granulométrique. Une correction granulométrique qui peut se faire par ajout de sable à Nkolang, par ajout de fines à Nkom, ou par un mélange des deux matériaux devrait permettre de corriger la granularité, avant exploitation.

En combinant l'interprétation des valeurs de taux d'absorption d'eau et celles de résistance à la flexion, toutes les formulations avec des argiles alluviales qui présentent des résistances à la flexion supérieures à 2 MPa sont adaptées en briqueterie car, les valeurs de taux d'absorption d'eau des mélanges argiles latéritiques - argiles alluviales de Sa'a sont, quelle que soit la température de cuisson et la composition du mélange inférieures à 25 %. Ces formulations sont globalement celles de Nkolmebanga et de Kokoé, celles des mélanges à teneurs en argile alluviale supérieures ou égales à 20 % de Nsanmendouga, de Polo, d'Ebogo et d'Eyené, les mélanges de Nkolang et de Nkolmgbana, à une température de cuisson supérieures à 900°C, les mélanges à teneurs en argile alluviale supérieures ou égales à 40 % de Nkolebassimbi et, ceux à teneurs en argile alluviale égales à 60 % de Nkom entre 900 et 1100°C. L'utilisation des matériaux de Sa'a pour la production des tuiles est possible avec les mélanges à 60 % d'argiles latéritiques de Nkolmebanga (NM_60) à 900, 1000, 1050 et 1100°C, et ceux à 40 % du même matériau (NM_40) à 1000, 1050 et 1100°C. Les formulations à 60 % d'argiles latéritiques de Nsanmendouga et Eyené à 1050 et 1100°C sont adaptées pour la fabrication des tuiles. À Ebogo, Kokoé, Nkolmgbana, Nkolang et Polo, les formulations à 1000°C (NL_40), à 1050°C (EB_40, NL_40, PO_40 et NL_60), à 1100°C (KK_40, KK_60, EB_60, NE_40, NL_40, NL_60 et PO_40), sont appropriées avec la norme adoptée. Après stabilisation des argiles latéritiques de Sa'a à la chaux, leur utilisation pour la production des briques est possible pour les matériaux d'Ebogo, de Nkom, de Kokoé, de Nkolebassimbi, de Polo et d'Elig-Zogo, qui présentent une combinaison des valeurs de taux

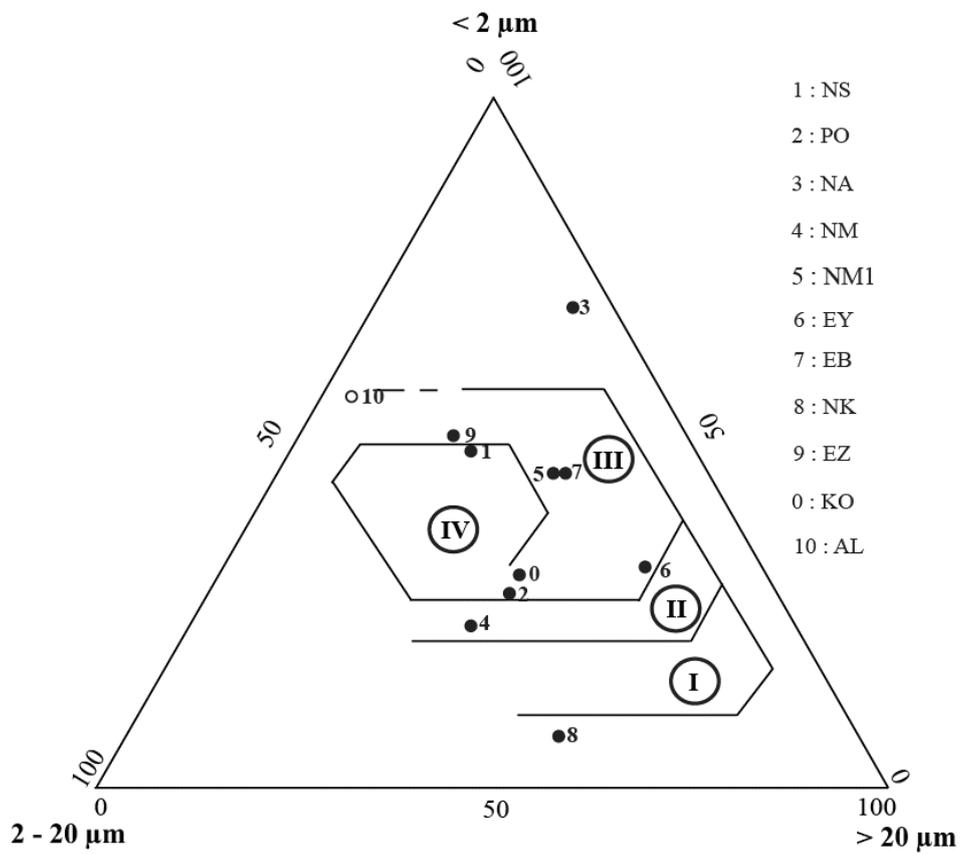


Figure 44. Position des matériaux latéritiques superficiels de Sa'a dans le diagramme de Winkler (1954) in Hajjaji *et al.* (2002).
 (I) Briques denses, (II) Briques perforées verticalement, (III) Tuiles et briques de maçonnerie et (IV) Produits creux.

d'absorption d'eau inférieures à 25 % et des valeurs de résistance à la flexion supérieures 2 MPa, quel que soit le pourcentage de chaux ajouté et le nombre de jours de cure. À Nkolmgbana, les argiles latéritiques étudiées sont utilisables en briqueterie lorsqu'ils sont stabilisés à 10 % de chaux et, ceci, quel que soit le temps de cure. Cependant, stabilisés à 15 % de chaux, ces matériaux ne sont utilisables en briqueterie qu'après 7 jours de cure. A Nkolang, seuls les matériaux stabilisés à 10 % de chaux après 20 jours de cure sont adaptés pour la production de briques. A Nkolmebanga, il est conseillé de stabiliser les matériaux à 5 %. Les matériaux de Nsanmendouga et d'Eyené, à cause de leurs valeurs d'absorption d'eau élevées, ne sont pas conseillés en l'état. L'utilisation de ces matériaux après stabilisation à la chaux pour la production des tuiles en l'état n'est pas possible du fait des valeurs de résistance à la flexion inférieures à 6,5 MPa.

Les argiles latéritiques naturelles de Sa'a, de par leurs caractéristiques mécaniques, ne sont pas adaptées pour la production des briques et/ou des tuiles. La comparaison des paramètres après stabilisation thermique, aux argiles alluviales et à la chaux, montre la stabilisation aux argiles alluviales est la mieux adaptée pour les matériaux étudiés. Le fait s'explique parce que dans les mélanges argiles latéritiques - argiles alluviales, le traitement est double, chimique puis thermique. Le traitement thermique entraînerait l'apparition de nouvelles phases minérales telles que la mullite qui se forme au dépend de la kaolinite. Cependant, deux modes, la stabilisation thermique et la stabilisation aux argiles alluviales, atteignent les exigences pour la fabrication des briques. Le choix du meilleur mode de stabilisation, pour ce qui est des briques, sera donc fonction de la capacité d'implémentation sur site. Selon Mbumbia *et al.* (2000), la température des fours traditionnels au Cameroun se situe autour de 1000°C. Excepté les mélanges à base d'argiles latéritiques de Nkom, Nkolang, Nkolebassimbi et Elig Zogo, à 900°C, il déjà possible de produire des briques avec 20 % d'argiles alluviales de la Sanaga, à cette température. Ces briques peuvent facilement être fabriquées dans ces localités, car ce mélange à 20 % d'argile alluviale présente de bonnes caractéristiques à des températures de cuisson pouvant aisément être atteintes *in situ* ou, lorsque la cuisson n'est pas possible, celui à 5 % de chaux. Pour la production de tuiles, une cuisson à plus de 1000°C et, avec 60 % d'argiles alluviales, est nécessaire pour les matériaux qui s'y prêtent. La stabilisation à la chaux ne permet pas de fabriquer des tuiles de caractéristiques acceptables.

Conclusion

Les quartzites micacés de Sa'a ont subi une hydrolyse qui a provoqué la lixiviation des éléments labiles et l'accumulation de Si. Les lits ferromagnésiens ont subi une lixiviation rapide, en conditions acides réductrices, qui a abouti à la formation des unités de sol intercalant les lits de quartzites micacés pourris. Les processus pédogénétiques dominants sont la transformation des minéraux primaires en argiles et oxyhydroxydes de fer, associés aux pertes en LREE, la translocation des REE et des argiles le long du profil d'altération, et l'addition de matière organique dans les horizons superficiels, en association avec l'accumulation des métaux de transition, certains HFSE et HREE. Les graveleux latéritiques dérivés des processus pédogénétiques sont de plasticité moyenne à élevée. Leur courbe granulométrique moyenne s'insère à l'intérieur du fuseau de spécification pour couche de fondation. La valeur moyenne de CBR associée aux autres caractéristiques indique que les graveleux latéritiques de Sa'a sont utilisables en couches de fondation pour trafic faible à moyen T2/T3 et, en couches de base pour trafic faible T1. Un modèle mathématique, à 06 paramètres, de détermination du CBR a été établi en utilisant les paramètres minéralogiques, géochimiques et géotechniques. Les argiles latéritiques de Sa'a possèdent une granulométrie adéquate pour une utilisation dans le bâtiment. Les matériaux stabilisés avec les argiles alluviales présentent de meilleures caractéristiques que ceux stabilisés à la chaux.

CONCLUSION GENERALE
ET PERSPECTIVES

La zone de Sa'a est une plaine d'altitude moyenne comprise entre 400 et 600 m. Elle est soumise à un climat équatorial de transition à 04 saisons inégalement réparties sur toute l'année. Le réseau hydrographique est dendritique et, le cours d'eau principal est la Sanaga. Le relief comprend trois unités morphologiques. La végétation appartient au grand domaine de la forêt humide semi-caducifoliée. Les matériaux d'altération rencontrés dans la zone de Sa'a sont majoritairement développés sur quartzites micacés. Ces matériaux d'altération sont l'objet du présent travail dont l'objectif principal double est (1) de démontrer que la composition et les caractéristiques des quartzites micacés contrôlent le type et l'étendue des processus d'altération en zone tropicale (2) et que les sols, graveleux et argiles latéritiques, dérivés des processus pédogénétiques qui affectent les saprolites dérivées de l'altération des quartzites micacés, sont utilisables dans les domaines de la construction routière et du bâtiment. La méthodologie du présent travail a consisté aux enquêtes bibliographiques, en l'acquisition des données de terrain et des données de laboratoire et, en l'exploitation des données analytiques. Les résultats obtenus montrent que, sur le plan pétrologique, les quartzites micacés de la zone d'étude sont constitués de plaquettes quartziques de 1 à 2 cm d'épaisseur, séparées par des lits de minéraux ferromagnésiens, sont millimétriques à multi-millimétriques. Le profil d'altération montre l'organisation macromorphologique atypique suivante :

	quartzites	micacés/saprolite	grossière
(SG)/Sol/SG/Sol/SG/Sol/SG/Sol/SG/Matériaux	nodulaires/Matériaux	argilo-caillouteux	meubles.

Les plaquettes de quartzites micacés ont subi une hydrolyse qui a provoqué la lixiviation des éléments labiles et l'accumulation de Si et, a transformé les quartzites micacés frais en saprolite grossière ou quartzite micacé altéré. L'altération des lits ferromagnésiens intercalant les plaquettes quartziques a conduit à la formation des unités de sol intercalant les quartzites micacés altérés (SG), dans des conditions acides réductrices. Dès lors, les processus pédogénétiques principaux qui ont influencé la mise en place du profil d'altération latéritique atypique de Sa'a sont la transformation des minéraux primaires, la translocation des terres rares et des argiles le long du profil, la formation des argiles et des oxyhydroxydes de fer associée aux pertes en terres rares légères, l'intervention de la matière organique dans les horizons de surface, en relation avec une accumulation des métaux de transition, certains HFSE et HREE. Tous ces phénomènes ont donné naissance aux graveleux latéritiques et argiles latéritiques qui constituent les sols dont les paramètres géotechniques ont été étudiés.

L'étude de la variabilité statistique des paramètres génétiques et géotechniques des graveleux latéritiques montre des corrélations entre IP et Fe_2O_3 et, entre le CBR et Fe_2O_3 . Ces graveleux latéritiques présentent de fortes teneurs en SiO_2 et de faibles teneurs en

sesquioxydes, ce qui amoindrit leurs performances géotechniques. L'indice de plasticité IP est corrélé à MIA. Les graveleux latéritiques étudiés sont de plasticité moyenne à élevée. Un modèle à 6 paramètres de l'équation de détermination du CBR a été établi en utilisant les paramètres minéralogiques, géochimiques et géotechniques. L'équation de ce modèle mathématique est :

$$\text{CBR} = 822,64 - 295,95 \times \gamma_s + 1,23 \times (< \%2 \mu\text{m}) - 23,21 \times \text{VBS} + 4,72 \times \text{DSM} + 2,25 \times \text{Fe}_2\text{O}_{3t} - 3,52 \times \text{Goethite}.$$

La limite de ce modèle est le nombre d'échantillons étudiés (N = 13), qui le rend discutable du point de vue de la finesse. La courbe granulométrique moyenne des matériaux s'insère à l'intérieur du fuseau de spécification pour couche de fondation. La valeur moyenne de CBR de 33 % dans les graveleux latéritiques de Sa'a, associée aux valeurs des autres paramètres géotechniques indique que, ces matériaux sont utilisables en couche de fondation pour trafic faible à moyen T2/T3 et, en couche de base pour trafic faible T1.

Les argiles latéritiques de Sa'a, de par leurs caractéristiques mécaniques, ne sont pas adaptés pour la production des briques et/ou des tuiles à l'état naturel. La comparaison des paramètres après stabilisation thermique, aux argiles alluviales et à la chaux, montre la stabilisation aux argiles alluviales est la mieux adaptée pour les matériaux étudiés. Le fait s'explique parce que dans les mélanges argiles latéritiques - argiles alluviales, le traitement est double, chimique puis thermique. Le traitement thermique entraînerait l'apparition de nouvelles phases minérales telles que la mullite qui se forme au dépend de la kaolinite. Cependant, deux modes, la stabilisation thermique et la stabilisation aux argiles alluviales, atteignent les exigences pour la fabrication des briques. Le choix du meilleur mode de stabilisation, pour ce qui est des briques, sera donc fonction de la capacité d'implémentation sur site. La température des fours traditionnels au Cameroun se situe autour de 1000°C. Excepté les mélanges à base d'argiles latéritiques de Nkom, Nkolang, Nkolebassimbi et Elig Zogo, à 900°C, il déjà possible de produire des briques avec 20 % d'argiles alluviales de la Sanaga, à cette température. Ces briques peuvent facilement être fabriquées dans ces localités, car ce mélange à 20 % d'argile alluviale présente de bonnes caractéristiques à des températures de cuisson pouvant aisément être atteintes in situ ou, lorsque la cuisson n'est pas possible, celui à 5 % de chaux. Pour la production de tuiles, une cuisson à plus de 1000°C et, avec 60 % d'argiles alluviales, est nécessaire pour les matériaux qui s'y prêtent. La stabilisation à la chaux ne permet pas de fabriquer des tuiles de caractéristiques acceptables.

En guise de perspectives, relativement aux graveleux latéritiques, il serait judicieux d'augmenter le nombre d'échantillons étudiés afin d'améliorer la robustesse et la finesse du modèle mathématique de détermination des valeurs de CBR, modèle qui prend en compte, les paramètres génétiques et certains paramètres physiques simples des graveleux latéritiques dérivés des quartzites micacés en zone équatoriale. L'amélioration de ce modèle permettra l'établissement de cartes iso-CBR dans les zones où se développent les graveleux latéritiques sur quartzites micacés, en vue de l'utilisation efficiente de ces matériaux en construction routière. Relativement aux argiles latéritiques développées sur quartzites micacés étudiées, il serait intéressant d'étudier les propriétés minéralogiques et géochimiques de ces phases chauffées, afin de mieux appréhender les transformations qui provoquent leur bon et/ou leur mauvaise aptitude à la fabrication des briques et des tuiles. De plus, des investigations devraient être menées sur les argiles latéritiques crus et cuits, afin d'étudier l'aptitude des argiles latéritiques étudiées dans la fabrication des blocs de terre crus et des blocs de terre stabilisés. Enfin, une étude des paramètres géotechniques des matériaux étudiés, stabilisés au ciment, liant hydraulique moins coûteux que la chaux, étude qui aurait dû être effectuée dans ce travail, doit être menée, afin de mieux établir un rapport qualité/prix, entre la stabilisation au ciment et la stabilisation à la chaux. Il faut signaler que cette étude avec le ciment a été faite, mais très malheureusement, les données obtenues ont été égarées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adeyemi GO, 1995. The influence of parent rock factor on some engineering index properties of the three residual lateritic soils in south western Nigeria. *Bulletin of International Association of Engineering Geology* 52, 3 – 8
- AFNOR, 1991. NF P 94 – 054 : Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau. Association Française de Normalisation, Paris
- AFNOR, 1992. NF P 94 – 057 : Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique. Méthode par sédimentation. Association Française de Normalisation, Paris
- AFNOR, 1993. NF P 94 – 051 : Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau. Association Française de Normalisation, Paris
- AFNOR, 1996. NF P 94 – 056 : Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique. Méthode par tamisage à sec après lavage. Association Française de Normalisation, Paris
- AFNOR, 1997. NF P 94 – 078 : Sols : reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR. Association Française de Normalisation, Paris
- AFNOR, 1998. NF P 94 – 068 : Sols : Reconnaissance et essai. Mesure de la capacité d'absorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux, Paris
- AFNOR, 1999. NF P 94 – 093: Sols : Reconnaissance et essais Détermination des références de compactage d'un matériau. Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié. Association Française de Normalisation, Paris
- Akaha CT, Adunola OO, 2016. Geotechnical and chemical evaluation of tropical red soils in a deltaic environment: implications for road construction. *International Journal of Geology, Earth and Environmental Sciences* 6(1), 19 – 29
- Anderson SP, Dietrich WE, Brimhall Jr. GH, 2002. Weathering profiles, mass-balance analysis, and rates of solute loss: linkages between weathering and erosion. *Geological Society of America Bulletin* 114, 1143 – 1158
- Anderson TW, Darling DA, 1954. A test of goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association* 49, 765 – 769
- Anonyme, 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, 44 p.

- ASTM C20, 2000. Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water. ASTM International, West Conshohocken, PA
- ASTM C531, 2000. Standard Test Methods for Linear Shrinkage and Coefficient of thermal Expansion of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacing, and Polymer Concretes. ASTM International, West Conshohocken, PA
- ASTM F 417, 1996. Standard Test Methods for Flexural Strength (Modulus of Rupture) of Electronic-Grade Ceramics. ASTM International, West Conshohocken, PA
- Babechuk MG, Widdowson M, Kamber BS, 2014. Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India. *Chemical Geology* 363, 56 – 75
- Baccour H, Medhioub M, Jamoussi F, Mhiri T, 2009. Influence of firing temperature on the ceramic properties of Triassic clays from Tunisia. *Journal of Material Processing and Technology* 209(6), 2812 – 2817
- Baccour H, Medhioub M, Jamoussi F, Mhiri T, Daoud A, 2008. Mineralogical evaluation and industrial applications of the Triassic clay deposits, Southern Tunisia. *Materials Characterization* 59, 1613 – 1622
- Bagarre E, 1990. Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière. ISTED - Paris, 143 p.
- Bagnouls F et Gaussen H, 1957. Les climats biologiques et leur classification. *Annales de géographie*, 193 – 220
- Bah B, Engels P, Colinet G, 2005. Légende de la carte numérique des sols de Wallonie (Belgique). Sous la direction scientifique de Bock L. - Avec la collaboration de Bracke C, Veron P, 55 p.
- Bau M, 1999. Scavenging of dissolved yttrium and rare earths by precipitating iron oxyhydroxide: Experimental evidence for Ce oxidation, Y–Ho fractionation, and lanthanide tetrad effect. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63(1), 67 – 77
- Bello AA, Osinubi KJ, 2010. Attenuative capacity of compacted three reddish brown tropical soils. *Journal of Control Science Science* 5(2), 39 – 54
- Berton Y, Le Berre P, 1983. Guide de prospection des matériaux de carrière. Manuels et Méthodes BRGM N5, BRGM, Orléans Ed, France, 160 p.
- Bitom D, Volkoff B, 1993. Altération déferruginisante des cuirasses massives et formation des horizons gravillonnaires ferrugineux dans les sols de l’Afrique Centrale humide. *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences IIA*, 1447 – 1454

- Bohi ZPB, 2008. Caractérisation des sols latéritiques utilisés en construction routière : le cas de la région de l'Agneby (côte d'Ivoire). Thèse Doctorat/PhD, ENPC - Paris, 123 p.
- Braun JJ, Pagel M, Muller J P, Bilong P, Michard A, Guillet B, 1990. Cerium anomalies in lateritic profiles. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 51, 597 – 605
- Braun JJ, Viers J, Dupré B, Polve M, Ndam J, Muller J, 1998. Solid/liquid REE fractionation in the lateritic system of Goyoum, East Cameroon: The implication for the present dynamics of the soil covers of the humid tropical regions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62(2), 273 – 299
- Brimhall GH, Dietrich WE, 1987. Constitutive mass-balance relations between chemical composition, volume, density, porosity and strain in metasomatic hydrochemical systems: results on weathering and pedogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57, 4419 – 4434
- Brindley GW, Brown G., 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.
- Celik H, 2010. Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry. *Applied Clay Science* 50, 245 – 254
- Charman J. H., 1988. Laterite in road pavements. London: CIRIA Special Publication 47, 71 p.
- Christidis GE, 2011. Industrial clays. European mineralogical union notes in Mineralogy 9(1), 341 – 414
- Cisse A, Lo PG, Diaw EB, Sene S, Diagne M, Gbaguidi I, Diop BO, Mbodj M, Niang K, Diedhiou MB, Sissoko G, 2016. Contribution to improving the quality of road base layers: concept of optimum maximum diameter and its application to the laterite of Sindhia (Senegal). *Research Journal of Environmental and Earth Sciences* 8(1), 1 – 7
- Compton JS, White RA, Smith M, 2003. Rare Earth element behavior in soils and salt pan sediments of a semi-arid granitic terrain in the Western Cape, South Africa. *Chemical Geology* 201, 239 – 255
- Cross W, Iddings JP, Pirsson LV, Washington HS, 1903. Quantitative classification of igneous rocks. Univ. Chicaco Press.
- De Carlo EH, Wen X-I, Irving M, 1998. The influence of redox reactions on the uptake of dissolved Ce by suspended Fe and Mn oxide particles. *Aquatic Geochemistry* 3, 357 – 389

- De Lagarde J, 1995. Initiation à l'analyse des données. Dunod Ed., 3^{ème} édition, Paris, 157 p.
- DEGN, 1987. Recommandation pour l'utilisation en corps de chaussée des graveleux latéritiques naturels. Bulletin du Ministère de l'équipement. Direction des études générales et de la normalisation, Cameroun, 16 p.
- Dessert C, Dupré B, Gaillardet J, François LM, Allègre CJ, 2003. Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle. *Chemical Geology* 202, 257 – 273
- Diko ML, Ekosse GE, Ayonghe SN, Ntasin EB, 2011. Physical characterization of clayey materials from tertiary volcanic cones in Limbe (Cameroon) for ceramic applications, *Applied Clay Science* 5, 380 – 384
- Dondi M, Guarini G, Ligas P, Palomba M, Raimondo M, 2001. Chemical, mineralogical and ceramic properties of kaolinitic materials from the Tresnuraghes mining district. Western Sardinia, Italy. *Applied Clay Science* 18, 145 – 155
- Duchauffour P, 2001. Introduction à la science du sol. Sol, végétation, environnement, 6^{ème} édition de l'Abrégé de pédologie. Eyrolles Ed., 332 p.
- Dumort JF, 1968. Carte géologique de reconnaissance du Cameroun au 1/500 000. Feuille Douala-Est. Publications, Direction des Mines et de la Géologie (Cameroun).
- Duque J, Fuentes W, Rey S, Molina E, 2020. Effect of grain size distribution on California Bearing Ratio (CBR) and modified Proctor parameters for granular Materials. *Arabian Journal for Science and Engineering* 45, 8231 – 8239
- Durbin J, Watson G, 1950. Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression I. *Biometrika* 37, 409 – 428
- Ekodeck GE, 1984. L'altération des roches métamorphiques du Sud Cameroun et ses aspects géotechniques. Thèse Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, IRIGM. Univ. Scientif. et Médic. Grenoble I, France, 368 p.
- Ekodeck GE, Kamgang KBV, 2002. L'Altérologie normative et ses applications : une expression particulière des roches aluminosilicatées du point de vue de leur évolution surpergène. Press. Univ. Yaoundé (Cameroun), Collect. Connaissances, 231 p.
- Ekodeck GE, Kamgang KB, 2011. Normative alterology and advanced applications a particular facet of aluminosilicate-bearing rocks petrology, with regard to their supergene evolution. Press. Univ. Yaoundé (Cameroun), collect. Connaissances, 225 p.

- Erguler ZA, 2016. A quantitative method of describing grain size distribution of soils and some examples for its applications. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 75, 807 – 819
- Fall M, 1993. Identification et caractérisation mécanique des graveleux latéritiques du Sénégal : application au domaine routier. Thèse de Doctorat INPL, 170 p.
- Fall M, Sarr M., 2007. Geotechnical characterization of expansive soils and their implications in ground movements in Dakar. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 66, 279–288.
- Fisher RA, 1971. The design of experiments. Macmillan Ed., 9^{ème} édition, 250 p.
- Genthon P, Join JL, Jeanpert J, 2017. Differential weathering in ultramafic rocks of New Caledonia: The role of infiltration instability. *Journal of Hydrology* 550, 268 – 278
- Giorgis I, Bonetto S, Giustetto R, Lawane A, Pantet A, Rossetti P, Thomassin J-H, Vinai R, 2014. The lateritic profile of Balkouin, Burkina Faso: Geochemistry, mineralogy and genesis. *Journal of African Earth Sciences* 90, 31 – 48
- Gleeson T, Smith L, Moosdorf N, Hartmann J, Dürr HH, Manning AH, van Beek LPH, Jellinek AM, 2011. Mapping permeability over the surface of the Earth. *Geophysical Research Letters* 38, L02401
- Gnotué T, Ganno S, Kouankap Nono GD, Nzenti JP, 2015. Mineralogy and geochemistry of Neoproterozoic siliceous manganese formations from Ntui-Betamba (Cameroon Pan-African Fold Belt): implications for mineral exploration. *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)* 104, 1123 – 1138
- Gong Q, Deng J, Wang C, Wang Z, Zhou L, 2013. Element behaviours due to rock weathering and its implication to geochemical anomaly recognition: A case study on Linlong biotite granite in Jiadong peninsula, China. *Journal of Geochemical Exploration* 128, 14 – 24
- Gong Q, Deng J, Yang L, Zhang J, Wang Q, Zhang G, 2011. Behaviour of major and trace elements during weathering of sericite-quartz schist. *Journal of Asian Earth Sciences* 42, 1 – 13
- Hajjaji M, Kacim S, Boulmane M, 2002. Mineralogy and firing characteristics of clay from the valley of Ourika (Morocco). *Applied Clay Science* 21, 203 – 212
- Hanilci N, 2013. Geological and geochemical evolution of the Bolkardaği bauxite deposits, Karaman, Turkey: transformation from shale to bauxite. *Journal of Geochemical Exploration* 133, 118 – 137

- Jarque C et Bera A, 1981. Efficient tests for normality, heteroskedasticity, and serial independence of regression residuals: Monte Carlo evidence. *Economics Letter* 7, 313 – 318
- Jiménez-Espinoza R, Vázquez M, Jiménez-Millán J, 2007. Differential weathering of granitic stocks and landscape effects in a Mediterranean climate, Southern Iberian Massif (Spain). *Catena* 70, 243 – 252
- Kamgang KBV, Onana VL, Ndome Effoudou Priso E, Parisot JC, Ekodeck GE, 2009. Behavior of REE and mass balance calculations in a lateritic profile over chlorite schists in South Cameroon. *Chemie Der Erde-Geochemistry* 69, 61 – 73
- Kamseu E, Leonelli C, Boccaccini DN, Veronesi P, Miselli P, Pellacani G, Melo UC, 2007. Characterization of porcelain compositions using two china clays from Cameroon. *Ceramic International* 33, 851 – 857
- Kamtchueng TB, Onana VL, Fantong WY, Akira U, Ntouala RFD, Wongolo DMH, Ndongo BG, Ngo'o Ze A, Kamgang KBV, Ondo JM, 2015. Geotechnical. Chemical and mineralogical evaluation of lateritic soils in humid tropical area (Mfou. Central-Cameroon): Implications for road construction. *International Journal of Geo-Engineering* 6(1), 1 – 21
- Kassogue M, Herbert G, Massiera M, 2002. Contrôle de la qualité sur les matériaux dans les couches de chaussée (Revêtement exclu). 4^{ème} Conférence spécialisée en Génie des transports de la Société Canadienne de Génie Civil, 10 p.
- Kurtz AC, Derry LA, Chadwick OA, Alfano MJ, 2000. Refractory element mobility in volcanic soils. *Geology* 28, 683 – 686
- Letouzey R, 1985. Notice explicative de la carte phytogéographique du Cameroun à l'échelle de 1/500 000. Institut de la Carte Internationale de Végétation, Toulouse, 240.
- Lilliefors H, 1969. On the Kolmogorov-Smirnov test for the exponential distribution with mean unknown. *Journal of the American Statistical Association* 64, 387 – 389
- 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.
- Manoharan C, Sutharsan P, Dhanapandian S, Venkatachalapathy R, Asanulla RM, 2011. Analysis of temperature effect on ceramic brick production from alluvial deposits, Tamilnadu, India. *Applied Clay Science* 54, 20 – 25
- Massamba Ndiaye, 2013. Contribution à l'étude de sols latéritiques du Sénégal et du Brésil. Thèse de Doctorat, Univ. Paris-Est, 149 p.

- Mbumbia L, Mertens A, De Wilmars J, Tirlocq, 2000. Performance characteristics of lateritic soil bricks fired at low temperatures: a case study of Cameroon. *Construction and Building Materials* 14, 121 – 131
- McDonough WF, Sun S-S, 1995. The composition of the earth. *Chemical Geology* 120, 223 – 253
- McLennan SM, Hemming SR, McDaniel DK, Hanson GN, 1993. Geochemical approaches to sedimentation provenance and tectonics. *Geological Society of America Special Papers* 284, 21–40
- Melo UC, Kamseu E, Djangang C, 2003. Effect of fluxes on the fired properties between 950 - 1050°C of some Cameroonian clays. *Tiles & Bricks International* 19, 57 – 69
- Mesida EA, 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
- Milheiro FAC, Freire MN, Silva AGP, Holoanda JNF, 2006. Densification behavior of red firing Brazilian kaolinitic clay. *Ceramic International* 31, 757 – 763
- 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 routes) Thèse Doctorat, Univ. Ouagadougou, 142 p.
- Millogo Y, Hajjaji M, Morel JC, 2011. Physical properties, microstructure and mineralogy of termite mound material considered as construction materials. *Applied Clay Science* 52, 160 – 164
- Moutou JM, Mbedi R, Elimbi A, Njopwouo D, Yvon J, Barres O, Ntekela HR, 2012. Mineralogy and Thermal Behaviour of the Kaolinitic Clay of Loutété (Congo-Brazzaville). *Research Journal of Environmental Earth Sciences* 4(3), 316 – 324
- Munsell Color Charts, 2000. Macbeth Division of Kollmorge Corporation, 2441 North Calvert Street Baltimore, Maryland 21218
- Murray HH, 2007. Applied clay mineralogy: occurrences, processing and application of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite and common clays, 1st Ed., Elsevier, Amsterdam, 180 p.
- Nagaraj HB, Suresh MR, 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.

- Nahon D, 2003. Altérations dans la zone tropicale. Signification à travers les mécanismes anciens et/ou encore actuels. *Comptes Rendus Geoscience* 335(16), 1109 – 1119
- Ndjigui PD, Bilong P, Bitom D, Dia A, 2008. Mobilization and redistribution of major and trace elements in two weathering profiles developed on serpentinites in the Lomié ultramafic complex, South-East Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 50, 305 – 328
- Ndjigui PD, Mbey JA, Nzeukou AN, 2016. Mineralogical, physical and mechanical features of ceramic products of the alluvial clastic clays from the Ngog-Lituba region, Southern Cameroon. *Journal of Building Engineering* 5, 151 – 157
- Ndzié Mvindi AT, 2019. Caractérisation minéralogique, géochimique et géotechnique des graveleux latéritiques de la zone Obala-Mbandjock (Centre Cameroun). Thèse Doctorat/PhD, Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 169 p.
- Ndzié Mvindi AT, Onana VL, Ngo'o Ze A, Nyassa Ohandja H, Ekodeck GE, 2017. Influence of hydromorphic conditions in the variability of geotechnical parameters of gneiss-derived lateritic gravels in a savannah tropical humid area (Centre Cameroon), for road construction purposes. *Transportation Geotechnics* 12, 70 – 84
- Neal CR, Taylor LA, 1989. A negative Ce anomaly in a peridotite xenolith: evidence for crustal recycling into the mantle or mantle metasomatism. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53, 1035 – 1040
- Nesbitt HW, Wilson RE, 1992. Recent chemical weathering of basalts. *American Journal of Science* 292, 740 – 777
- Nesbitt HW, Young GM, 1982. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57, 4419 – 4434
- Nesbitt HW, Young GM, 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. *Journal of Geology* 97, 129 – 147
- Ngo'o Ze A, 2020. Caractérisation minéralogique géochimique, géotechnique et stabilisation à la chaux des graveleux latéritiques de la zone d'Akonolinga (Sud - Cameroun). Thèse Doctorat/PhD, Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 210 p.
- Ngo'o Ze A, Onana V L, Ndzié Mvindi AT, Nyassa Ohandja H, Medjo Eko R, Ekodeck GE, 2019. Variability of geotechnical parameters of lateritic gravels overlying contrasted metamorphic rocks in a tropical humid area (Cameroon): Implications for road construction. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01488-0>

- Ngon Ngon GF, Yongue-Fouateu R, Bitom DL, Bilong P, 2009. A geological study of clayey laterite and hydromorphic material of the region of Yaoundé (Cameroun): a prerequisite for local material promotion. *Journal of African Earth Sciences* 55, 69 – 78
- Nguetnkam JP, Yongue-Fouateu R, Bitom D, Volkoff B, 2006. Etude pétrologique d'une formation latéritique sur granite en milieu tropical forestier sud-camerounais (Afrique centrale), mise en évidence de son caractère polyphasé. *Etude et Gestion des sols* 13(2), 89 – 102
- Nkoumou AJ-F, Mouhamadou BD, Fary D, Parisot JC, Ndiane D, 2004. Etude corrélative entre propriétés géochimiques et caractéristiques géomécaniques des latérites. *Journal des Sciences et Technologies* 3(1&2), 8 – 14
- Ntouala RFD, Onana VL, Kamgang Kabeyene V, Ekodeck GE, 2016. Mineralogical, geochemical and mechanical characterization of the Ayos (East-Cameroon) lateritic and alluvial clayey mixtures: suitability for building application, *Journal of Building Engineering* 5, 50 – 56
- Nwaiwu CMO., Alkali IBK, Ahmed UA, 2006. Properties of ironstone lateritic gravels in relation to gravel road pavement construction. *Geotechnical and Geological Engineering* 24(2), 283 – 284
- Nyassa Ohandja H, Ntouala RFD, Onana VL, Ngo'o Ze A, Ndzié Mvindi AT, Ekodeck GE, 2020a. Mineralogy, geochemistry and physic-mechanical characterization of clay mixtures from Sa'a (Center Cameroon): possibly use as construction materials. *SN Applied Sciences* 2, 1687. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03365-y>
- Nyassa Ohandja H, Onana VL, Noa Tang SD, Ngo'o Ze A, Ekodeck GE, 2020b. Behavior of major, trace, and rare earth elements in an atypical lateritic profile overlying micaceous quartzites, Centre Cameroon: imprint of the parent rock structure. *Arabian Journal of Geosciences* 13, 869. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05838-1>
- Nyeck B, Ngimbous RV, Ndjigui P-D, 2019. Petrology of saprolites developed on gneisses in the Matomb region, South Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 150, 107 – 122
- Nyemb Bayamack JF, Onana VL, Ndzié Mvindi AT, Ngo'o Ze A, Nyassa Ohandja H, Medjo Eko R, 2019. Assessment of the determination of Californian Bearing Ratio of laterites with contrasted geotechnical properties from simple physical parameters. *Transportation Geotechnics* 19, 84 – 95

- Nzabakurikiza A, Onana VL, Likiby B, Ndome Effoudou P, Kamgang Kabeyene BV, Ekodeck GE, 2012. Chemical and mineralogical methods in the identification of laterite gravels over migmatites for engineering purposes. *Revue CAMES-Série A*, 13(2), 28 – 33
- Nzabakurikiza A, Onana VL, Ngo'o Ze A, Ndzié Mvindi AT, Ekodeck GE, 2017. Geological, geotechnical. and mechanical characterization of lateritic gravels from Eastern Cameroon for road construction purposes. *Bulletin of Engineering Geology and Environment* 76(4), 1549 – 1562
- Nzeukou Nzeugang A, Fagel N, Njoya A, Kamgang Beyala V, Medjo Eko R, Melo Chinje U, 2013. Mineralogy and physicochemical properties of alluvial clays from Sanaga valley (Centre, Cameroon): Suitability for ceramic application. *Applied Clay Science* 83 – 84, 238 – 243
- Oelkers EH, Gíslason SR, 2001. The mechanism, rates and consequences of basaltic glass dissolution: I. An experimental study of the dissolution rates of basaltic glass as a function of aqueous Al, Si and oxalic acid concentration at 25°C and pH = 3 and 11. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65, 3671 – 3681
- Onana VL, 2010. L'altération surpergène des chloritoschistes de la série de Mbalmayo Bengbis (Sud Cameroun) et ses implications géotechniques. Thèse de Doctorat/PhD, Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 246 p.
- Onana VL, Ngo'o Ze A, Medjo Eko R, Ntoulala RFD, Nanga Bineli MT, Ngonon Owoudou B, Ekodeck GE, 2017. Geological identification, geotechnical and mechanical characterization of charnockite-derived lateritic gravels from Southern Cameroon for road construction purposes. *Transportation Geotechnics* 10, 35 – 46
- Onana VL, Ntoulala RFD, Mbey JA, Ngo'o Ze A, Kamgang KBV, Ekodeck GE, 2019. Mineralogy and preliminary assessment of the potential uses of alluvial clays from Batouri (Eastern-Cameroon). *Cerâmica* 65, 407–415. <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132019653752626>
- Onana VL, Ntoulala RFD, Ndome Effoudou E, Nguembou CY, Nguessi A, Kamgang Kabayene V, 2016a. Mineralogical, geochemical and geomechanical characterization of lateritic and alluvial clayey mixture products from Monatélé-Ebebda, as building materials. *Journal of Cameroon Academy of Science* 13(1 &2), 23 – 38
- Onana VL, Ntoulala RFD, Noa Tang SD, Ndome Effoudou E, Kamgang Kabeyene V, Ekodeck GE, 2016b. 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
- Oyelami CA, Van Rooy JL, 2016. A review of the use of lateritic soils in the construction/development of sustainable housing in Africa: A geological perspective. *Journal of African Earth Sciences* 119, 226 – 237
- Pardo F, Meseguer S, Jordán MM, Sanfeliu T, González I, 2011. Firing transformations of Chilean clays for the manufacture of ceramic tile bodies. *Applied Clay Science* 51, 147 – 150
- Philipponat G, Hubert B, 2000. Fondations et ouvrages en terre. Eyrolles Ed., 548 p.
- Podwojewski P, Bourdon E, 1996. Le processus d'induration des oxydisols goethitiques sur peridotites en Nouvelle-Calédonie: Un mode particulier d'induration de type plinthite. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 322(6), 453 – 459
- Reeves GM, Sims I, Cripps JC, 2006. Clay materials used in construction. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication 21, 513 p.
- Rocchi I, Coop MR, 2016. Mechanisms of compression in well-graded saprolitic soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 75(4), 1727 – 1739
- Rodrigues JKG, Reiffsteck P, Auriol JC, Ndiaye M, 2010. Rationalisation de l'utilisation des sols latéritiques en corps de chaussée durable et de faible coût. 23^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil. Session Ouvrages-Bitume, 11 – 22 pp.
- Sak PB, Navarre-Sitchler AK, Miller CE, Daniel CC, Gaillardet J, Buss HL, Lebedeva MI, Brantley SL, 2010. Controls on rind thickness on basaltic andesite clasts weathering in Guadeloupe. *Chemical Geology* 276, 129 – 143
- Saleh GM, 2007. Geology and rare-earth element geochemistry of highly evolved, molybdenite-bearing granitic plutons, Southeastern Desert, Egypt. *Chinese Journal of Geochemistry* 26 (4), 333 – 344
- Shapiro SS et Wilk MB, 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52, 591 – 611
- Sigg J, 1991. Les produits de terre cuite. Septima Ed., Paris
- Sikali F, Djalal ME, 1987. Utilisation des latérites en technique routière au Cameroun. In Séminaire Régional sur les latérites: Sols. Matériaux. Minerais. Douala (Cameroun), ORSTOM Ed., 277 – 288 pp.
- Souza GP, Sanchez R, De Holanda JNF, 2002. Characteristics and physical-mechanical properties of fired kaolinitic materials. *Cerâmica* 48, 102 – 107

- Suchel JB, Tsalefac M, 1995. Atlas régional du Sud Cameroun. Vol. Climatologie, ORSTOM Ed., 8 – 9
- Taha S, Gabr A, El-Badawy S, 2019. Regression and Neural Network Models for California Bearing Ratio Prediction of Typical Granular Materials in Egypt. *Arabian Journal for Science and Engineering* 44, 8691 – 8705
- Tardy Y, 1993. Pétrologie des latérites et des sols tropicaux. Masson Ed. (France), 461 p.
- Taskiran, 2010. Prediction of California bearing ratio (CBR) of fine grained soils by AI methods. *Advances in Engineering Software* 41, 886 – 892
- Taylor G, Eggleton RA, 2001. Regolith geology and geomorphology. Wiley, New York
- Tematio P, Tchaptchet WT, Nguetnkam JP, Mbog MB, Yongue Fouateu R, 2017. Mineralogical and geochemical characterization of weathering profiles developed on mylonites in the Fodjomekwet-Fotouni section of the Cameroun Shear (CSZ), West Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 131, 32 – 42
- Tockol I, 1993. Contribution à l'étude des graveleux latéritiques dans les pays du Sahel : cas des routes non revêtues. Thèse Doctorat Univ. de Moncton, 171 p.
- Ugur FA, Sahan H, 2012. Sorption behaviour of ^{137}Cs on kaolinite. *Ekoloji* 21(82), 34 – 40. doi: 10.5053/ekoloji.2011.825
- Vallerie M, 1995. Atlas régional du Sud Cameroun. Vol. Pédologie, ORSTOM éd., 6 – 7 pp.
- Villiers JF, Santoir C, 1995. Atlas régional du Sud Cameroun. Vol. Végétation, ORSTOM Ed., Paris, 255 p.
- Whitney DL and Evans BW, 2010 Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, 185 – 187
- Wilding LP, Dress LR, 1983. Spatial variability and pedology. In Wilding LP, Smeck N, Hall GF (eds) Pedogenesis and soil taxonomy. Wageningen, the Netherlands, 83 – 116 pp.
- Yato Katte V, Mfoyet Moupe S, Manefouet B, Wouatong ASL, Aleh Bezeng L, 2018. Correlation of California bearing ratio (CBR) value with soil properties of road subgrade Soil. *Geotechnical and Geological Engineering* 37, 217 – 234

Logiciels

- Adobe Illustrator 2003.11.0
- ArcGIS 2017.10.5
- Surfer 2014.14
- XLstat version 2014.5.03

ANNEXES

I. PUBLICATIONS



Behavior of major, trace, and rare earth elements in an atypical lateritic profile overlying micaceous quartzites, Centre Cameroon: imprint of the parent rock structure

Hervé Nyassa Ohandja¹ · Vincent Laurent Onana¹ · Sylvie Desirée Noa Tang² · Arnaud Ngo'o Ze¹ · Georges Emmanuel Ekodeck¹

Received: 14 February 2020 / Accepted: 12 August 2020
© Saudi Society for Geosciences 2020

Abstract

An atypical lateritic weathering profile overlying micaceous quartzites in central Cameroon was studied to understand its morphology and the behavior of major and trace elements (including rare earth elements; REE). Mineralogical analyses were performed by X-ray powder diffraction (XRPD). Major and trace element geochemistry were determined using X-ray fluorescence (XRF) and inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS), respectively. The studied micaceous quartzites consist of 1 to 2 cm thick quartzitic platelets separated by millimeter to multi-millimeter beds of ferromagnesian minerals (biotite, hornblende, garnet and, epidote), muscovite, graphite, and magnetite. According to chemical index of alteration, mafic index of alteration, index of lateritization, the A – Fe – Mg – Ca – Na – K diagrams, and the Weathering index of granite, the intense hydrolysis of ferromagnesian beds resulted in the genesis of soil unit consisting of quartz, muscovite, illite, kaolinite, anatase, and hematite which occur within rotten quartzites or coarse saprolites (CS). Thus, the weathering profile presents the following macromorphological organization: micaceous quartzite/CS-soil/CS-soil/CS-soil/CS-soil/CS-soil/nodular materials/loose stony clayey soil. The pH-Eh diagrams indicate that formation of these soils within the saprolitic zone is the result of differential weathering that occurred under acidic-reductant conditions, which enhanced the rapid weathering of ferromagnesian mineral beds. The main pedogenetic processes along the weathering profile are translocation of REE, the transformation of primary minerals into neoformed-clays and Fe-oxide-hydroxides formation (associated mainly with light REE losses), and the addition of organic matter in surface horizons (associated with an accumulation of transition metals, high field strength elements, and heavy REE).

Keywords Parent rock · Weathering · Oxidation · pH-Eh diagrams · Geochemistry · Equatorial zone

Introduction

Parent rock features, topography, climate, and biological activity are of primary importance in the development and

preservation or removal of saprolites (Islam et al. 2002). Petrological studies of weathered materials in the equatorial zone show that weathering profiles comprise from the bottom to the top two large units, saprolites and soils (Tardy 1993; Ndjigui et al. 2008; Babechuk et al. 2014; Gong et al. 2011, 2013; Onana et al. 2016; Nyeck et al. 2019). Overall, the saprolitic unit consists of a coarse saprolite (CS) and a fine saprolite (FS), while the soils consist of nodular horizons overlaid by loose clayey layers. Variations of this general morphological organization exist, but this general organization remains typical of weathered materials in the equatorial regions. From the petrographic point of view, saprolites preserve all or parts of the bedrock structures, hence the distinction between CS and FS. These structures are destroyed in soils during pedogenesis. Geochemical studies of major and trace elements, including rare earth elements (REE), have shown relationship between the nature of the weathered

Responsible Editor: Domenico M. Doronzo

Electronic supplementary material The online version of this article (<https://doi.org/10.1007/s12517-020-05838-1>) contains supplementary material, which is available to authorized users.

✉ Vincent Laurent Onana
onana.vl@gmail.com

¹ Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Yaoundé I, P.O. Box 812, Yaoundé, Cameroon

² Department of Geology, Higher Teacher Training College, University of Yaoundé I, P.O. Box 47, Yaoundé, Cameroon

materials along lateritic profiles and the element speciation (Kamgang et al. 2009).

Petrographic and mineralogical data are useful tools for the interpretation of the factors controlling the weathering of crystalline rocks and the typical development of weathered landforms (Jiménez-Espinosa et al. 2007). Major elements' geochemistry strongly reflects mineralogical transformations during the weathering process, and the distribution and mobilization of trace elements provide further insight into pedogenetic processes, like biological activity and/or redox state in a weathering profile. Linking the behavior of these trace elements to specific stages of hydrolysis is commonly achieved through the combined use of chemical weathering indices (Gong et al. 2013; Babechuk et al. 2014) and mass balance calculations (Kamgang et al. 2009; Onana et al. 2016). In particular, the REE behavior, in particular, gives further insights into the geochemical relationships between the different weathered materials as well as the redox processes that prevail during the pedogenetic process.

Saprolite is formed by products of in situ rock weathering and may be of various thicknesses showing various degree of alteration. The mineralogy of lateritic materials shows that saprolites, in addition to neoformed minerals such as clay mineral and Fe-oxyhydroxides, contain primary minerals inherited from the parent rock. So, this work characterizes the mineralogical and chemical composition of a weathering profile consisting of differential weathering of micaceous quartzites in Centre Cameroon. Our effort is to demonstrate how compositional and physical features of crystalline rocks control the type and extent of weathering processes in a tropical area.

Geological and morphological setting

The basement of the Sa'a area (series of Sa'a) consists of rocks belonging to the pan-African mobile zone (Gnotué et al. 2015). The geological formations are mainly metamorphic rocks consisting of mica schists, micaceous quartzites, and gneisses (Fig. 1). Mica schists are flaky rocks formed of muscovite, quartz, biotite, and garnet. They show intercalations of quartzites. Micaceous quartzites are the most abundant rocks in the study area and consist essentially of quartz associated with muscovite (Gnotué et al. 2015). They form thick benches and are at the origin of more or less uneven microreliefs frequent in the zone. Gneisses are in association with mica schists and micaceous quartzites. They are fine-grained rocks with regular quartzite intercalations.

The morphology of the study area shows quartzitic reliefs with asymmetrical flanks in the Sa'a area. There are two types of hills: half-orange-shaped hills and asymmetrical hillsides. The half-orange-shaped hills are few in number. The asymmetrical hills are separated by more recessed valleys. The

study area is subject to an equatorial transition climate (Suchel and Tsalefac 1995). The total annual rainfall varies between 1400 and 1500 mm. Mean annual air temperatures range from 22.9 to 25.8 °C with minimum temperatures in August (19.1 °C) and highs in March and April (31.1 °C).

Materials and methods

After a field description of the weathering profile (after Duchaufour 1977), 14 samples were collected for physico-chemical, mineralogical, and geochemical analyses. The pH and Eh data of samples were obtained using a Shott Geräte CG818 pH-Eh meter and their color by Munsell soil color charts (Munsell Color Charts 2000). The mineralogical and geochemical compositions were determined at the Geoscience Laboratories (Geo Labs) of the Ontario Geological Survey in Sudbury-Ontario (Canada) as previously described by Onana et al. (2016). The mineralogy of the weathered materials was determined by X-ray powder diffraction (XRPD) on powder samples. The analytical instrument is a PAN Analytical X'PERT PRO diffractometer equipped with a monochromator using a Co K α radiation of 1.7854 Å over a range of 2.5° to 35° 2 θ and a step size of 0.05° 2 θ /min at 40 kV and 45 mA. The major element composition of parent rock and weathered materials was determined by X-ray fluorescence (XRF) after loss on ignition (LOI). The powder samples were first ignited then melted with a lithium tetraborate flux before analyzing with a Rigaku RIX-3000 wavelength-dispersive X-ray fluorescence spectrometer. International reference materials used were BIR-1-1242 and BIR-1-1243. The in-house standards were MRB-29-8539, NPD-1-0964, and NPD-1-0965. The relative error values of the duplicated samples analyzed vary between 1 and 5%. Trace element concentrations (including REE) of parent rock and weathered materials were determined by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) using the IMC-100 analytical package. Samples were prepared by acid dilution and analyzed by acid digestion in closed beakers. The international and in-house material standards were SY-4-0395 and MRB-29-8497, respectively. The relative error values vary between 0.007 and 10%.

The proxies used to quantify the intensity of weathering are chemical index of alteration (CIA; Nesbitt and Young 1982), weathering index of granite (WIG) by Gong et al. (2013), mafic index of alteration (MIA), and index of lateritization (IOL) by Babechuk et al. (2014). The formulae of these weathering indices are as follows:

$$\text{CIA} = 100 \times \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \quad (1)$$

$$\text{WIG} = 100 \times [\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + (\text{CaO}^* - 10/3 \times \text{P}_2\text{O}_5)] / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2) \quad (2)$$

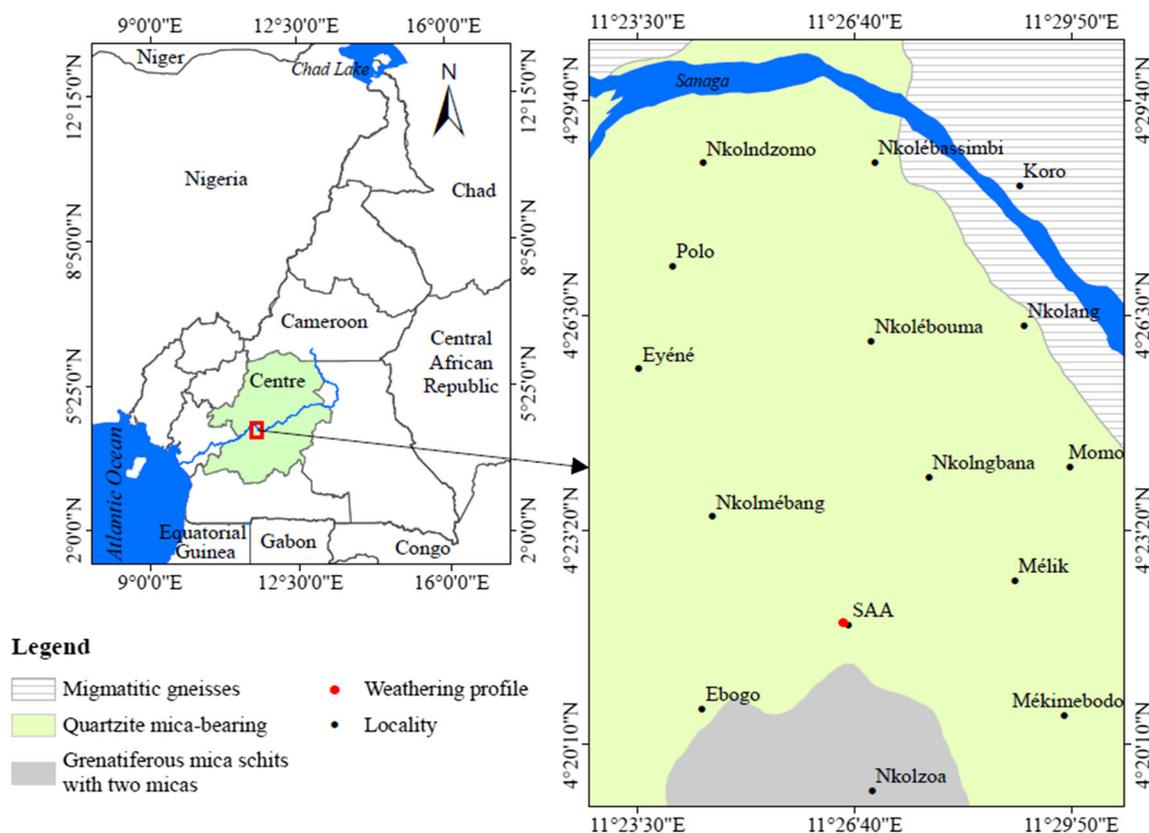


Fig. 1 Location and geological map of study area

$$MIA_{(0)} = 100 \times [(Al_2O_3 + Fe_2O_{3(t)}) / (Al_2O_3 + Fe_2O_{3(t)} + MgO + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \tag{3}$$

$$IOL = 100 \times (Al_2O_3 + Fe_2O_3) / (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3) \tag{4}$$

The IOL proxy uses mass (wt%) ratio of SiO₂, Fe₂O₃, and Al₂O₃ while CIA, WIG, and MIA are calculated using the molar contents of major elements. For CaO* value, if the mole fraction of CaO ≤ Na₂O, then the value of CaO* = CaO. If the mole fraction of CaO > Na₂O, then CaO* = Na₂O (McLennan et al. 1993). Although the WIG is the most sensitive proxy for studying weathering quantification given the number of oxides involved in its formula than MIA, it benefits from the fact that many diagrams are associated with it.

The CIA, WIG, MIA, and IOL values vary between 0 and 100%. Like CIA and MIA, higher IOL values correspond to high intensely weathered materials (Babechuk et al. 2014), while higher values of WIG correspond to less intensely weathered materials (Gong et al. 2013). Statistical analysis was run on chemical compounds determined on the 14 samples collected along the weathering profile (Table 1). A correlation matrix and standardized principal components analysis (PCA) were performed on these 14 variables using the XLSTAT 2014.5.03 software.

Braun et al. (1993) inferred that among the high field strength elements (HFSE), Th is one of the most insoluble in

weathered lateritic profiles in the equatorial zones. The geochemical mass balance calculations for the weathered materials are thus based on Th as an immobile element, and the depletion or accumulation factor is given by the following relationship (Brimhall and Dietrich 1987; Anderson et al. 2002):

$$T_{Th,j} = 100 \times [(C_{j,w}/C_{j,p}) / (C_{Th,w}/C_{Th,p}) - 1] \tag{5}$$

C_{j,w} and C_{j,p} are the element concentrations in the weathered sample and the parent rock, respectively. C_{Th,w} and C_{Th,p} are the concentrations of thorium in the weathered sample and the parent rock, respectively.

Results

Weathering profile outlines: macroscopic features and mineralogy

The studied weathering profile is located at the top of an interfluvial at an altitude of 562 m in the Sa'a area (Fig. 1). The weathering profile overlying micaceous quartzites is ~ 5 m thick and comprises a saprolitic set, a nodular set, and a loose clayey-stony horizon.

Table 1 pH, Eh, major (wt%), and trace element (ppm) data for Sa'a weathering profile

	Q00 Parent rock	Q1Q RMQ	Q1a SSM	Q2Q RMQ	Q2a SSM	Q3Q RMQ	Q3a SSM	Q4Q RMQ	Q4a SSM	Q5Q RMQ	Q5a SSM	QBN BNH	QSN TNH	QSC LSCH
Depth (m)	6	4.4	3.7	3.6	3.4	3.3	3.1	2.8	2.7	2.6	2.5	2.1	1.3	0.5
pH	6.61	7.15	6.01	6.62	5.81	7.06	5.74	7.16	5.60	7.01	6.38	5.97	5.92	5.90
Eh (mV)	27	3	71	31	83	9	86	2	95	17	48	68	76	77
SiO ₂	99.79	98.04	43.9	87.98	54.81	90.01	47.24	91.76	46.69	94.12	70.74	46.86	53.45	49.43
TiO ₂	0.05	0.09	4.08	0.37	1.86	0.41	4.06	0.18	2.28	0.10	0.94	2.37	1.10	2.14
Al ₂ O ₃	0.53	1.33	18.59	4.12	17.70	3.87	18.37	2.89	16.22	2.89	9.68	16.71	11.61	23.61
Fe ₂ O _{3t}	0.07	0.29	20.11	4.25	14.78	2.93	18.92	2.91	19.76	1.34	10.86	21.78	23.37	9.23
MnO	0.07	0.00	0.05	0.01	0.02	0.01	0.04	0.00	0.02	0.00	0.02	0.03	0.03	0.09
MgO	0.00	0.08	0.12	0.08	0.20	0.07	0.14	0.11	0.15	0.09	0.13	0.17	0.12	0.38
CaO	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.81
Na ₂ O	0.04	0.05	0.04	0.04	0.07	0.05	0.06	0.06	0.05	0.04	0.05	0.07	0.05	0.04
K ₂ O	0.15	0.36	0.50	0.33	0.93	0.31	0.65	0.29	0.66	0.37	0.50	0.85	0.45	0.73
P ₂ O ₅	0.00	0.01	0.20	0.04	0.11	0.02	0.12	0.02	0.12	0.01	0.09	0.11	0.20	0.15
LOI	0.11	0.33	10.89	2.52	9.14	2.29	9.79	1.59	9.72	1.27	6.51	10.08	9.10	13.03
Total	100.79	100.59	98.50	99.75	99.65	99.99	99.40	99.83	98.68	100.25	99.53	99.04	99.50	99.64
CIA (%)	68.1	73.2	96.7	90.2	93.8	89.5	95.7	86.6	95.2	85.4	93.7	94.1	95.1	96.2
WIG (%)	38.6	29.0	1.7	5.8	3.8	6.7	2.3	8.3	2.5	12.4	3.5	4.5	2.0	1.1
MIA (%)	60.3	65.8	95.2	86.4	91.4	86.0	94.0	79.9	93.1	80.0	90.8	91.4	92.3	94.0
IOL (%)	0.5	1.3	29.8	4.5	24.4	4.1	28.0	3.1	24.6	3.0	12.0	26.3	17.9	40.0
LILE														
Li	0.8	2.0	4.7	1.9	6.7	1.6	5.8	1.4	6.0	1.8	5.2	6.1	4.6	5.4
Rb	4.26	11.22	34.25	15.25	57.08	15.07	43.21	10.59	49.81	12.44	39.95	50.32	36.79	43.6
Cs	0.071	0.181	1.427	0.515	2.098	0.482	1.759	0.293	1.981	0.303	1.535	1.960	1.550	1.8
Sr	4.7	4.5	21.1	12.0	30.8	15.1	21.9	11.2	22.1	8.2	14.9	22.5	15.4	19.0
Ba	18.6	28.4	118.03	73.4	207.7	89.2	144.4	70.2	148.7	70.1	103.2	168.5	107.8	138.2
HFSE														
Th	1.058	2.308	13.227	4.299	14.640	3.776	13.653	2.415	17.009	2.091	13.447	24.601	24.700	24.7
U	0.255	0.375	7.268	1.178	4.461	0.934	5.765	0.881	6.983	0.422	4.721	7.810	7.882	7.8
Zr	49	134	186	81	155	78	205	105	184	58	139	262	151	207
Nb	1.264	1.883	45.843	7.373	29.558	14.405	36.123	11.956	30.949	2.167	19.700	34.499	20.401	27.500
Hf	1.20	3.54	4.94	2.02	3.87	1.98	5.05	2.21	4.62	1.51	3.65	6.57	3.88	5.20
Mo	0.22	0.13	8.03	1.69	6.37	1.50	5.27	1.50	8.51	0.92	4.78	8.43	10.10	9.30
W	0.15	0.26	3.63	0.86	1.41	0.35	1.00	0.23	1.33	0.22	0.92	1.64	1.06	1.40
Ta	0.088	0.149	2.650	0.464	1.766	0.753	2.152	0.303	1.821	0.132	1.347	2.322	1.329	1.800
Transition metals														
Sc	< 1.1	< 1.1	37.0	5.7	22.7	4.5	33.0	4.3	30.4	2.2	20.1	33.0	38.1	35.6
V	4.9	10.4	> 370	76	331.6	67.6	> 370	60.3	> 370	24.4	186.8	> 370	345.7	345.7
Cr	5	8	232	113	192	40	112	40	248	12	219	309	555	432
Co	0.31	0.14	7.76	1.46	4.74	0.94	9.56	0.71	5.25	0.46	3.94	5.09	5.86	5.5
Ni	0.5	0.8	39.5	11.6	24.3	5.0	31.4	3.5	29.2	2.4	19.1	28.9	28.5	28.7
REE														
La	6.1	5.8	34.1	13.3	36.1	13.8	29.3	7.4	28.8	5.6	22.6	29.7	23.6	23.1
Ce	11.84	11.62	39.81	15.58	46.28	13.02	41.82	8.13	45.02	7.55	44.51	58.69	65.86	63.36
Pr	1.28	1.319	5.631	2.038	6.278	1.916	5.318	1.031	5.856	1.005	5.05	6.283	5.382	4.882
Nd	4.21	4.68	17.44	6.34	19.46	5.63	17.09	3.19	19.29	3.35	17.33	21.87	19.33	18.83
Sm	0.742	0.934	2.989	1.012	3.157	0.878	2.8	0.536	3.611	0.558	3.279	4.062	4.288	3.788
Eu	0.2835	0.2805	0.7209	0.2339	0.6986	0.2002	0.6428	0.1442	0.7762	0.1132	0.7306	0.9458	0.9327	0.8827
Gd	0.449	0.748	2.525	0.79	2.291	0.639	2.194	0.474	2.614	0.618	2.475	3.209	3.061	2.561

Table 1 (continued)

	Q00 Parent rock	Q1Q RMQ	Q1a SSM	Q2Q RMQ	Q2a SSM	Q3Q RMQ	Q3a SSM	Q4Q RMQ	Q4a SSM	Q5Q RMQ	Q5a SSM	QBN BNH	QSN TNH	QSC LSCH
Tb	0.0653	0.1114	0.418	0.1104	0.354	0.0969	0.3381	0.0791	0.4046	0.1096	0.3799	0.5146	0.4965	0.4765
Dy	0.398	0.729	2.539	6.694	2.139	0.553	1.993	0.467	2.336	0.78	2.144	3.124	2.908	2.408
Ho	0.0836	0.1644	0.5413	0.1377	0.4344	0.0974	0.3902	0.0953	0.4329	0.2043	0.4161	0.6047	0.5413	0.4913
Er	0.260	0.548	1.696	0.408	1.208	0.274	1.113	0.264	1.295	0.589	1.190	1.820	1.632	1.132
Tm	0.0366	0.0866	0.2621	0.0583	0.1853	0.036	0.1708	0.0397	0.2004	0.0826	0.1867	0.2726	0.2617	0.2017
Yb	0.292	0.625	1.826	0.429	1.189	0.262	1.159	0.281	1.356	0.426	1.259	1.906	1.837	1.337
Lu	0.046	0.112	0.287	0.068	0.178	0.037	0.172	0.038	0.193	0.056	0.187	0.281	0.274	0.199
LREE	24.17	24.35	99.97	38.27	111.28	35.24	96.33	20.29	102.58	18.06	92.77	120.61	118.48	115.96
HREE	1.63	3.12	10.09	8.70	7.98	2.00	7.53	1.74	8.83	2.87	8.24	11.73	11.01	9.21
ΣREE	26.09	27.76	110.79	47.20	119.95	37.44	104.50	22.17	112.19	21.04	101.74	133.28	130.40	125.17
LREE/HREE	14.82	7.79	9.90	4.40	13.95	17.66	12.79	11.67	11.61	6.30	11.26	10.28	10.76	12.60
(La/Yb) _N	14.19	6.30	12.69	21.06	20.63	35.78	17.17	17.89	14.43	8.09	7.14	10.59	8.73	11.74
Ce/Ce* ₍₁₎	-	0.99	0.68	0.71	0.73	0.60	0.79	0.69	0.82	0.75	0.98	1.01	1.38	1.45
Eu/Eu* ₍₁₎	-	0.68	0.53	0.53	0.53	0.54	0.53	0.58	0.51	0.39	0.52	0.53	0.53	0.58
Ce/Ce* ₍₂₎	1.03	1.02	0.70	0.72	0.74	0.61	0.81	0.71	0.84	1.05	1.06	1.04	1.42	1.49
Eu/Eu* ₍₂₎	1.51	1.03	0.80	0.80	0.80	0.82	0.79	0.88	0.77	0.42	0.77	0.80	0.79	0.87

RMQ, rotten micaceous quartzite; SSM, soil material; BNH, bottom nodular horizon; TNH, top nodular horizon; LSCH, loose stony clayey horizon;

(La/Yb)_N = (La_{sample}/La_{chondrite})/(Yb_{sample}/Yb_{chondrite}); (La/Sm)_N = (La_{sample}/La_{chondrite})/(Sm_{sample}/Sm_{chondrite})

Ce/Ce*₍₁₎ = Ce_{sample}/Ce_{parent rock} / (La_{sample}/La_{parent rock})^{1/2} (Pr_{sample}/Pr_{parent rock})^{1/2}

Eu/Eu*₍₁₎ = (Eu_{sample}/Eu_{parent rock}) / (Sm_{sample}/Sm_{parent rock})^{1/2} (Gd_{sample}/Gd_{parent rock})^{1/2}

Ce/Ce*₍₂₎ = Ce_{sample}/Ce_{chondrite} / (La_{sample}/La_{chondrite})^{1/2} (Pr_{sample}/Pr_{chondrite})^{1/2}

Eu/Eu*₍₂₎ = (Eu_{sample}/Eu_{chondrite}) / (Sm_{sample}/Sm_{chondrite})^{1/2} (Gd_{sample}/Gd_{chondrite})^{1/2}

Micaceous quartzites

The micaceous quartzites of the Sa’a area are leucocratic to mesocratic rocks that split up into 1 to 2 cm thick quartzitic platelets. These platelets are separated from each other by millimetric to centimetric beds rich in ferromagnesian minerals (Fig. 2a). The studied micaceous quartzites have a granoblastic to grano-lepidoblastic texture (Fig. 2b–c). These rocks consist of quartz (50–60%), muscovite (10–15%), biotite (5–10%), hornblende (3–5%), garnet (3–5%), plagioclase (<3%), graphite, magnetite, titanite, epidote, and zircon.

Saprolitic set

The saprolitic set clearly highlights the process of differential weathering (Fig. 2d). It is 2.50 m thick and made up of an alternation of indurated and soil unit materials (Fig. 3).

The indurated materials (Q1Q, Q2Q, Q3Q, Q4Q, and Q5Q) represent coarse saprolite. These materials are olive yellow (2.5Y 6/6) in color. Their thicknesses are metric (Q1Q ~130 cm), decimetric (Q2Q, Q3Q, Q4Q ~17 cm) to multi-centimetric (Q5Q ~8 cm). Their

mineralogy consists of quartz, K-feldspar, muscovite, magnetite, and anatase (Fig. 4). These indurated materials are slightly acidic to slightly basic (6.62 ≤ pH ≤ 7.16; Table 1). The limits between indurated and interbedded soil unit materials are sharp.

The soil unit materials (Q1a, Q2a, Q3a, Q4a, and Q5a) alternate with the coarse saprolites. These materials are red (2.5YR 4/8) and their thicknesses are centimetric (Q1a, Q2a, Q4a, and Q5a, ~8 cm) to decimetric (Q3a, ~31 cm). They include rounded dark red (10R 3/6) to weak red (10R 4/4) ferruginous nodules (15–20%). The sizes of these nodules are millimetric to centimetric. The quartz blocks contained in these loose clayey materials are about 15 to 20%. Ferruginous nodules and quartz blocks are embedded in a friable red clay matrix (20–25%). These soil unit materials consist of quartz, muscovite, illite, kaolinite, anatase, rutile, magnetite, and hematite (Fig. 3). They are acidic to slightly acidic (5.60 ≤ pH ≤ 6.38; Table 1).

Nodular set

The nodular set consists of a reddish material (2.5YR 4/8) with a thickness between 1 and 1.5 m (Fig. 2). This set

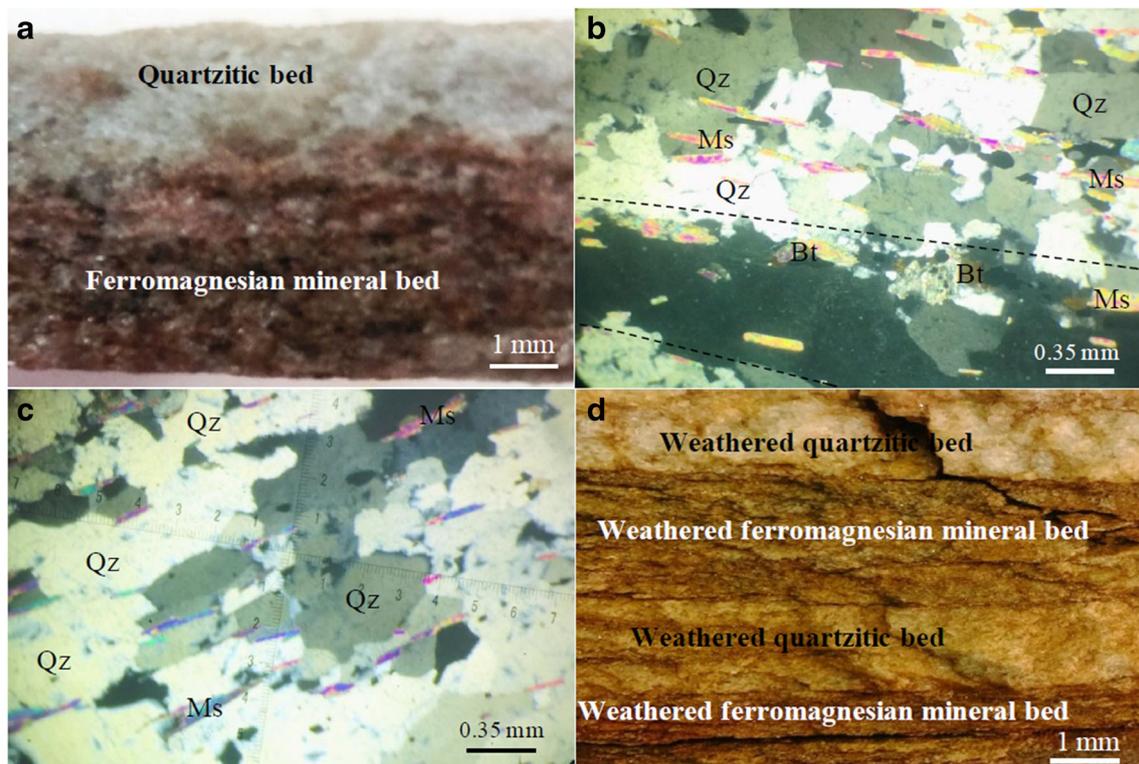


Fig. 2 **a** Hand parent rock sample with quartzitic and ferromagnesian facies. **b** Ferromagnesian mineral bed inside the micaceous quartzite. **c** Microphotograph of quartzitic facies. **d** Hand-weathered rock sample

showing evidence of differential weathering. Qz, quartz; Ms, muscovite; Bt, biotite (after Whitney and Evans 2010)

consists of fine materials at its bottom (QBN ~ 1 m) and coarse materials at its top (QSN ~ 0.5 m). Ferruginous nodules enclosed in these materials are abundant (70 to 80%) and embedded in a light red (2.5YR 6/8) clay matrix (20 to 30%). These nodules are millimetric in size at the bottom of the set and centimetric at the top. The quartz blocks (5–10 cm) represent 5 to 10% of the studied materials. These nodular materials consist of quartz, muscovite, illite, kaolinite, hematite, and anatase (Fig. 4), and they are medium acidic ($5.92 \leq \text{pH} \leq 5.97$; Table 1). The transition with the overlying loose stony clayey horizon is diffuse.

Loose stony clayey horizon

The loose stony clayey horizon is 0.8 to 1 m thick. At the bottom of this light red material (2.5YR 6/8), pebbles represented by the quartz blocks are of various sizes, centimetric to decimetric. These quartz blocks represent ~30% of this stony clayey horizon. Millimetric-sized ferruginous nodules represent ~20% of these materials. The quartz blocks and ferruginous nodules are embedded in a fine brownish friable clay matrix strewn with numerous roots. This stony clayey horizon consists of quartz, illite, kaolinite, hematite, and anatase (Fig. 4), and it is medium acidic ($\text{pH} = 5.90$; Table 1). Its uppermost part is covered by secondary shrub vegetation.

Geochemistry

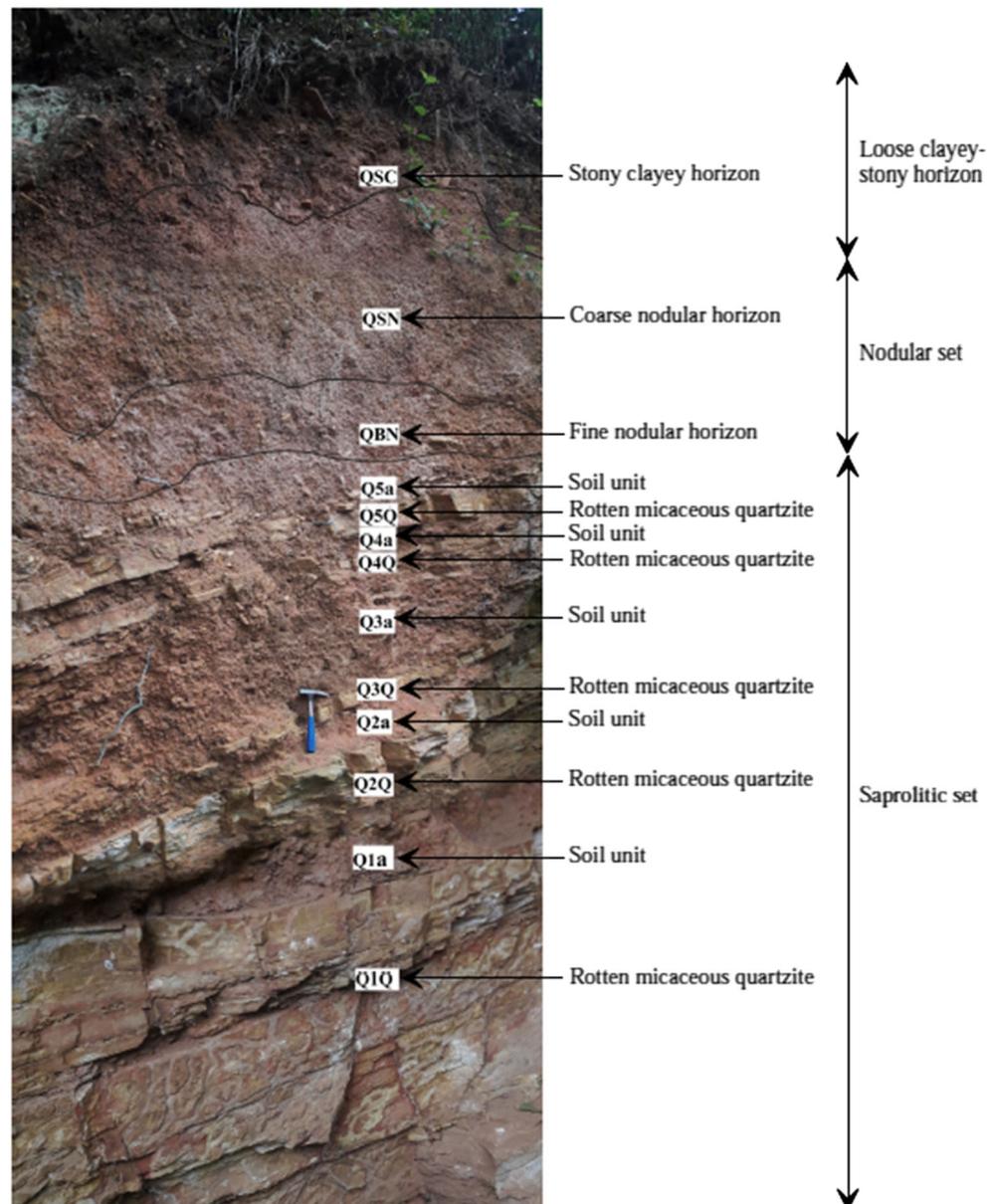
Major elements and extent of weathering

The coarse saprolites represented by platelets of rotten micaceous quartzites (Q1Q, Q2Q, Q3Q, Q4Q, and Q5Q) have CIA values ranging between 73.2 and 90.2%. The CIA values of the soil unit materials intercalating the rotten micaceous quartzites range between 93.7 and 96.7%. Nodular materials and superficial stony clayey materials have CIA values of 95.0% and 96.2%, respectively.

In the A – CN – K diagram (Nesbitt and Young 1982; Fig. 5a), the studied weathered materials show a parallel evolution along the A – K axis. This evolution is more pronounced in soil unit materials intercalating rotten micaceous quartzite beds (Q1a, Q2a, Q3a, Q4a, and Q5a) and soils (QBN, QSN, and QSC). This indicates a total leaching of Ca and Na in these materials, while K is retained in low concentrations (0.45–0.93wt%). The position of the rotten micaceous quartzites in the A – CN – K diagram shows that these materials still have small amounts of feldspars.

Weathering can also be quantified graphically in the A – Fe – Mg – Ca – Na – K system (Nesbitt and Young 1989; Nesbitt and Wilson 1992), combined with the MIA index (Babechuk et al. 2014; Fig. 5b–c). The A – L – F diagram (Fig. 5b) shows a very significant loss of mobile elements (Ca, Na, K, and Mg)

Fig. 3 Weathering profile



in the soil unit materials intercalating the rotten micaceous quartzite beds (Q1a, Q2a, Q3a, Q4a, and Q5a) and soils (QBN, QSN, QSC). This loss is moderate to high in rotten quartzites (Q1Q, Q2Q, Q3Q, Q4Q, and Q5Q). The studied weathering materials are more aluminous than ferruginous, except for QSN nodular materials (Fig. 4b). The AF – CNK – M diagram (Fig. 5c) shows that the hydrolysis of feldspars is proportional to that of ferromagnesian minerals. This hydrolysis is intense in soil unit materials and soils as compared with rotten quartzite beds.

In general, Figs. 5 and 6 show that kaolinitization predominates in soil unit materials intercalating rotten quartzite beds and in soils relative to rotten quartzite beds. The S – A – F diagram (Fig. 7) shows that the soil unit materials and soils fall in the weakly to moderately lateritization fields.

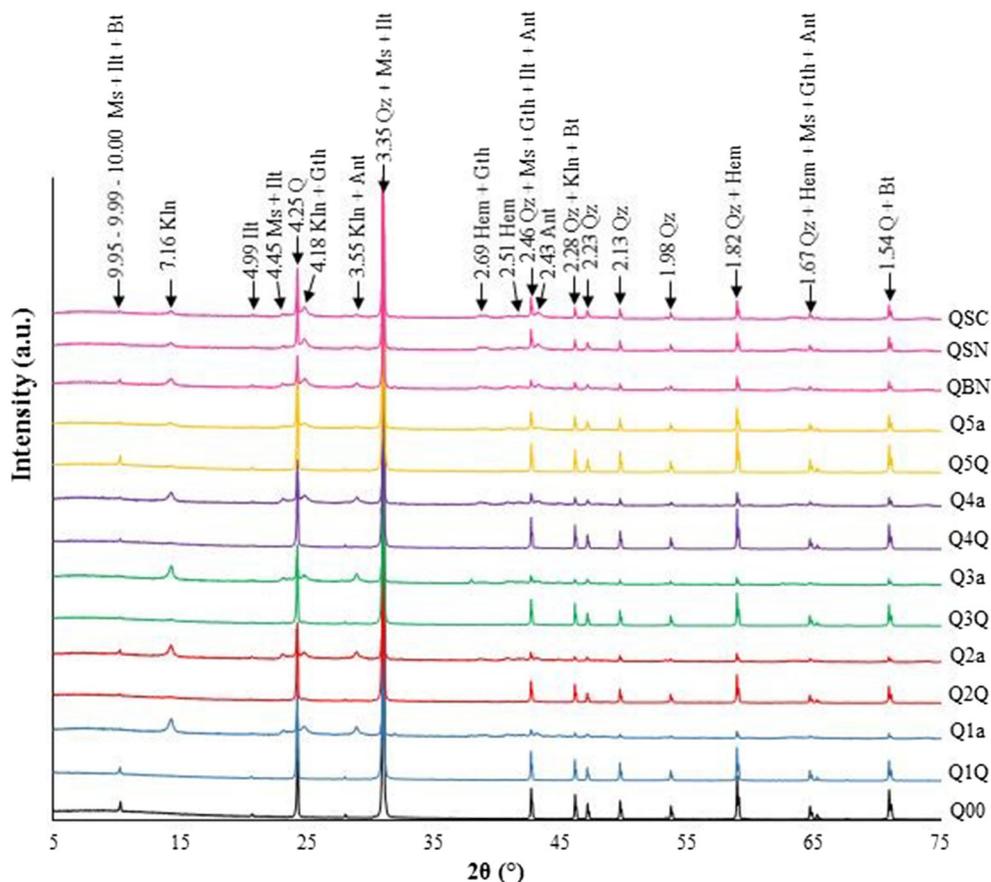
Trace elements

Large ion lithophile elements (Ba, Sr, Cs, Rb, Li)

Among large ion lithophile elements, Ba (18.6 ppm), Sr (4.7 ppm), and Rb (4.26 ppm) have significant contents in micaceous quartzites. These elements have similar behavior in the entire profile with Ba (up to 208 ppm) as the most abundant large ion lithophile elements (Table 1).

Lithium, Rb, Sr, and Ba are weakly leached in the rotten micaceous quartzites (Q1Q, Q2Q, and Q3Q; Table 2; Fig. 8a) and weakly enriched in the rotten micaceous quartzites Q4Q and Q5Q (< + 35%). These elements are moderately leached in soil unit materials intercalating rotten micaceous quartzites

Fig. 4 XRD patterns of the studied weathering profile. Qz, quartz; Kln, kaolinite; Ms, muscovite; Bt, biotite; Hem, hematite; Ant, anatase; Gth, goethite; Ill, illite (after Whitney and Evans 2010)



($< -52\%$) and moderately to strongly evacuated in the soil ($< -75\%$). Cesium is weakly enriched in all horizons of the studied weathering profile (+6% to +116%), except for the nodular horizon QSN, where it is slightly leached (-6%).

High field strength elements (U, Zr, Nb, Hf, Mo, W, Ta)

High field strength element contents are low in the entire weathering profile. The lowest values are encountered in the parent rocks and rotten micaceous quartzites (Table 1).

Uranium, Nb, Mo, and Ta are moderately leached in the Q1Q material at the bottom of the weathering profile ($\sim -40\%$). These elements are weakly enriched in the other weathered materials (Table 2; Fig. 8b), except for U, Nb, and Ta in the Q5Q (-13%) and QSN (-33%) horizons, where low losses are observed. Zirconium and Hf weakly accumulated at the bottom of the profile (+30%), then are moderately to strongly depleted from the profile. The same pattern is observed for W.

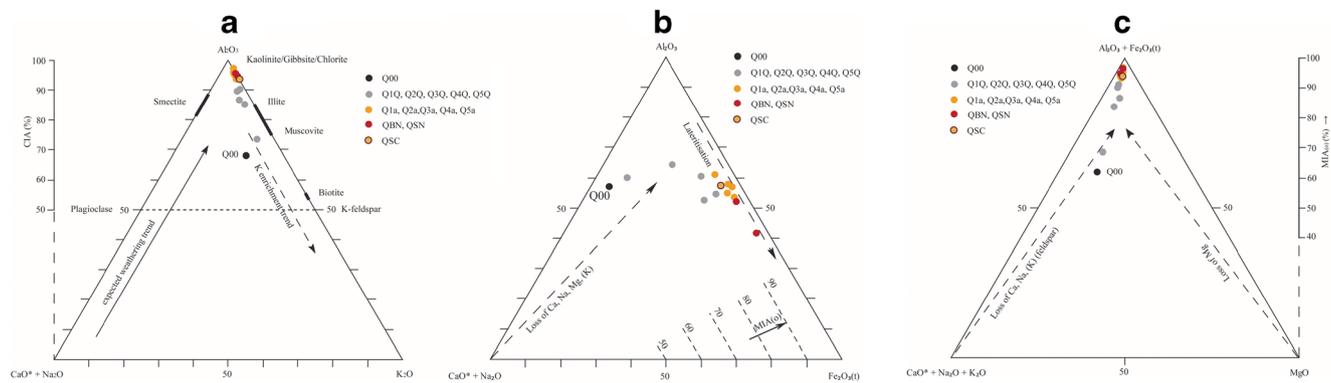
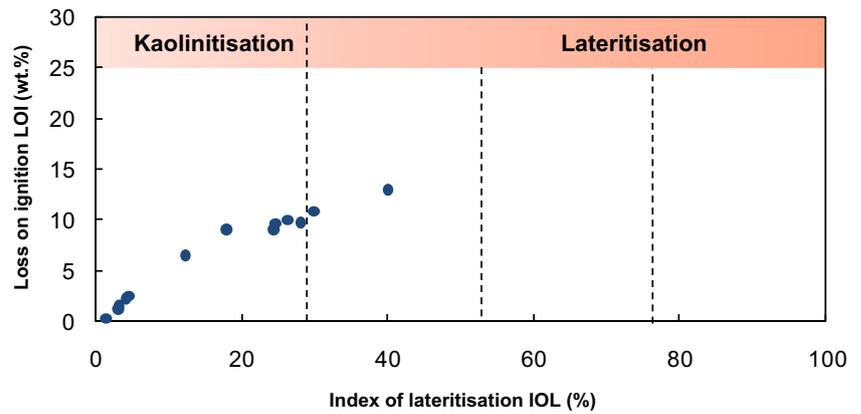


Fig. 5 a molar A – CN – K, b molar A – L – F, and c molar A – CNK – FM ternary plots illustrating the different weathering degrees of the studied materials

Fig. 6 Covariation of LOI with IOL



Transitional metals (V, Cr, Co, Ni)

Transition metal shows variable and low concentration in micaceous quartzites and rotten micaceous quartzite compared with the other part of the profile. Chromium and V are the most abundant transition metals with the highest values at the top of the profile (Cr = 555 ppm; V > 370 ppm; Table 1).

After very low losses (~ 15%) in the Q1Q materials located at the bottom of the studied weathering profile, V, Cr, and Ni accumulate (< + 700%) in all other weathered units (Table 2; Fig. 8c). Cobalt is strongly leached in Q1Q materials, while it is enriched in the rotten micaceous quartzites before being weakly evacuated in the soils.

Rare earth elements

The studied micaceous quartzites have low contents in REE (REE = 26.09 ppm), especially in heavy REE (HREE =

1.63 ppm; (LREE/HREE = 14.82). The chondrite-normalized (McDonough and Sun 1995) REE pattern reveals slight REE enrichment, high REE fractionation, and positive Eu anomalie (Eu/Eu* = 1.51; Fig. 9a).

REE contents are also relatively low in the weathering materials (REE = 21–133 ppm) with high LREE/HREE ratios. The lowest REE contents (21–41 ppm) are those of rotten micaceous quartzites, and the highest (101–133 ppm) are those of soil unit materials intercalating rotten micaceous quartzites and soils. Precisely, the highest REE grades occur in the basal nodular material QBN (133.28 ppm) and the lowest in the rotten micaceous quartzite Q5Q (21.04 ppm). REE patterns normalized to micaceous quartzite show relative REE enrichment in most of the weathered samples, negative Eu anomalies, positive, and negative Ce anomalies (Fig. 9b).

Compared with chondrite data (McDonough and Sun 1995), weathered materials show high LREE enrichment (Fig. 9c). Soil materials intercalating rotten micaceous

Fig. 7 Mass SiO₂ – Al₂O₃ – Fe₂O_{3(t)} (SAF) ternary plot illustrating the different weathering degrees of the studied materials

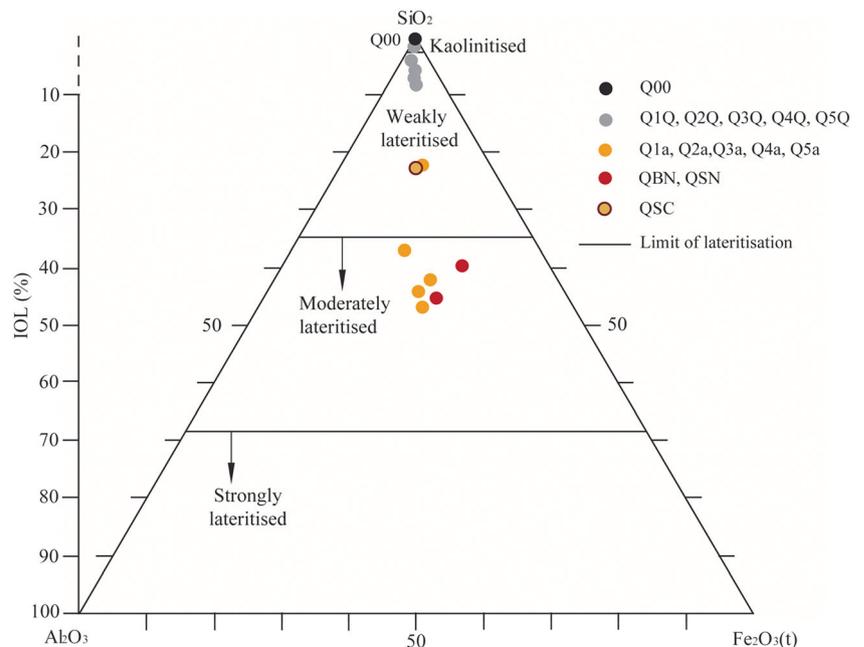


Table 2 Gains and losses of major and trace elements for Sa'a weathering profile

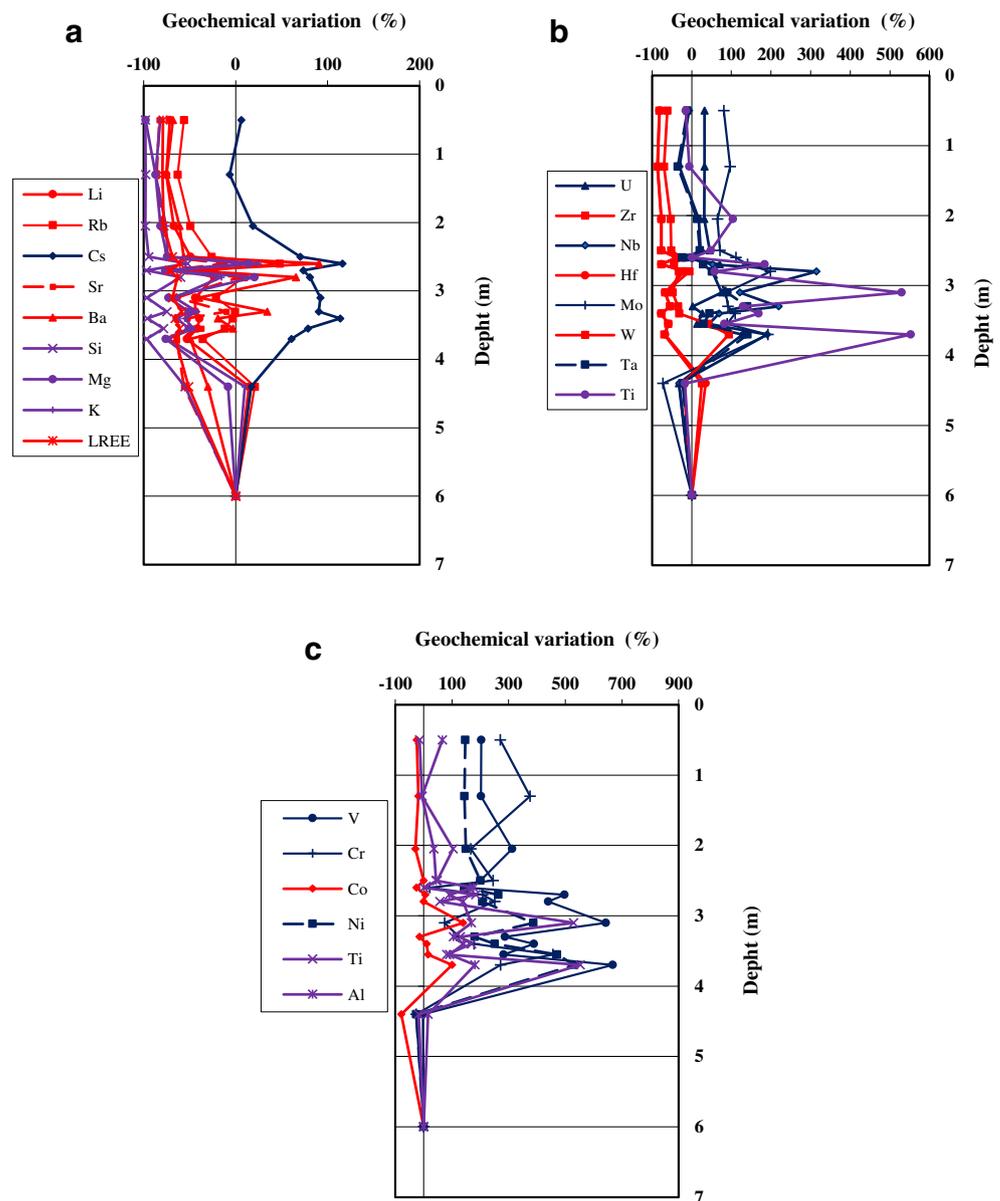
Profile zones	Losses (%)			Gains (%)	
	High 100–70	Average 70–40	Low 40–0	Low–moderate < 1000	High > 1000
QSC	Si, Mg, Ca, Na, K Li, Sr Zr, Hf LREE, HREE	Rb, Ba W	Ti Nb, Ta Co	Al, P Cs U, Mo Cr, V, Ni	Fe ³⁺ , Mn
QSN	Si, Mg, Ca, Na, K Li, Sr, Rb, Ba Zr, Hf LREE, HREE	W	Ti, Al, Mn Cs Nb, Ta Co	P U, Mo Cr, V, Ni	Fe ³⁺
QBN	Si, Mg, Ca, Na, K Sr Zr, Hf LREE	Mn Li, Rb, Ba W HREE	Co	Ti, Al, P Cs U, Nb, Mo, Ta Cr, Ni	Fe ³⁺
Q5a	Si, Mg, Ca, Na, K, Sr Zr, Hf	Li, Ba W LREE, HREE	Mn Rb	Ti, Al, P Cs U, Nb, Mo, Ta V, Cr, Ni	Fe ³⁺
Q5Q	Sr	Si, Na LREE	Mn, Ca U, Zr, Nb, Hf, W, Ta, Co HREE	Ti, Al, P, Fe ³⁺ Mg, K Li, Rb, Cs, Ba Mo V, Cr, Ni	
Q4a	Si, Mg, Ca, Na, K Sr Zr, Hf LREE	Li, Ba W HREE	Mn, Rb	Ti, Al, P Cs U, Nb, Mo, Ta Cr, Co, Ni	Fe ³⁺
Q4Q		Si REE	Mn, Ca, Na, K Li Zr, Hf, W	Ti, Al, Mg, P Cs, Rb, Sr, Ba U, Nb, Mo, Ta V, Cr, Ni	Fe ³⁺
Q3a	Si, Mg, Ca, Na, K	Li, Sr, Ba Zr, Hf, W REE	Rb	Ti, Al, Mn, P Cs, U, Nb, Mo, Ta Cr, Co, Ni	Fe ³⁺
Q3Q	Si HREE	Mg, Ca, Na, K Li, Zr, Hf, LREE	Mn, Rb, Sr W Co	Ti, Al, P Cs, Ba U, Nb, Mo, Ta V, Cr, Ni	Fe ³⁺
Q2a	Si, Ca, Na Zr, Hf	Mg, K	Mn Li, Rb, Sr, Ba W	Ti, Al, P Cs U, Nb, Mo, Ta V, Cr, Ni, Co	Fe ³⁺
Q2Q	Si, Na	Mg, Ca, K Li, Zr, Hf, REE	Mn Rb, Sr, Ba	Ti, Al, P Cs U, Nb, Mo, W, Ta V, Cr, Ni, Co	Fe ³⁺
Q1a	Si, Mg, Ca, Na, K	Li, Sr, Ba Zr, Hf, REE	Rb	Ti, Al, P, Mn Cs U, Nb, Mo, W, Ta Cr, Ni, Co	Fe ³⁺
Q1Q	Mo Co	Si, Mn, Ca, Na, P Sr LREE	Ti, Mg Ba U, Nb, W, Ta V, Cr, Ni HREE	Al, Fe ³⁺ , K Li, Rb, Cs Zr, Hf	

Calculations have been made using Th as conservative element following Brimhall and Dietrich (1987) and Anderson et al. (2002) approaches

quartzites and soils are especially enriched in all REE compared with chondrite. The normalized patterns show negative

Ce anomalies in soil unit materials intercalating rotten micaceous quartzites and soils ($0.60 \leq Ce/Ce^* \leq 0.82$). The upper

Fig. 8 Gains and mass losses of elements in the studied weathering profile



nodular material QSN ($Ce/Ce^* = 1.38$) and the superficial loose stony clayey material ($Ce/Ce^* = 1.45$) show positive Ce anomalies. The studied materials present negative Eu anomalies ($0.39 \leq Eu/Eu^* \leq 0.68$). $(La/Yb)_N$ ratio values are high in the studied materials and confirm the REE fractionation revealed by the high LREE/HREE ratios, especially in soils. The $(La/Yb)_N$ values vary between 6.30 (Q1Q) and 35.78 (Q3Q).

Geochemical correlations

The correlations between elements including Table SM1 as Pearson's correlation matrix are presented in the [supplementary data](#). In the studied weathered materials, Li is strongly bound to Rb ($r = 0.94$; $N = 13$), Sr ($r = 0.61$), and Ba ($r =$

0.69). Silicon is very strongly bound to Li, Rb, Sr, and Ba ($r = 0.89, 0.87, 0.78, 0.82$, respectively). Strong correlations also exist between Li, Rb, Sr, Ba, and Mg ($r = 0.88, 0.89, 0.83, 0.86$, respectively), Ca ($r = 0.73, 0.83, 0.94, 0.96$, respectively), Na ($r = 0.84, 0.84, 0.82, 0.81$, respectively), and K ($r = 0.96, 0.94, 0.74, 0.81$, respectively). Silicon is closely linked to Mg ($r = 0.95$), Ca ($r = 0.91$), Na ($r = 0.97$), and K ($r = 0.97$). Among HFSE, Mo is related to U ($r = 0.68$; $N = 13$; p value 0.05) and Nb ($r = 0.64$), while Nb is related to Ta ($r = 0.79$). Uranium is bound to Ti ($r = 0.77$) and Fe ($r = 0.90$). Molybdenum, Nb, and Ta are bound to U, and Zr is strongly bound to Si, Mg, Ca, Na, K, and Hf ($r = 0.87, 0.84, 0.69, 0.91, 0.84, 0.99$, respectively). Among transition metals, V is strongly bound to Co ($r = 0.88$) and Ni ($r = 0.78$). The latter two elements are also strongly linked to each other ($r = 0.83$).

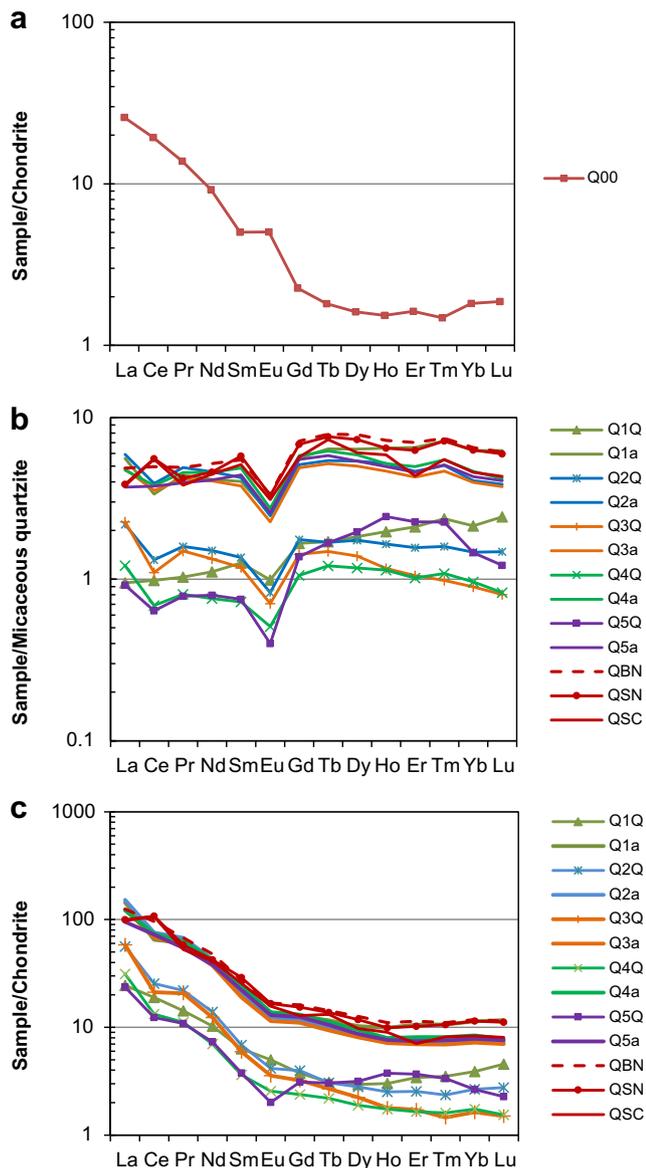


Fig. 9 REE patterns of (a) micaceous quartzite relative to chondrite, (b) weathered materials relative to micaceous quartzite, and (c) weathered materials relative to chondrite. Chondrite data are from McDonough and Sun (1995)

Vanadium, Co, and Ni are bound to Ti ($r = 0.89, 0.92, 0.75$, respectively), Al ($r = 0.65, 0.65, 0.59$, respectively), and Fe^{3+} ($r = 0.94, 0.85, 0.82$, respectively).

Discussion

Influence of the parent rock structure on macromorphological and physico-chemical patterns of the weathering profile

In the intertropical zone, parent rocks are generally overlain by two major pedogenetic units: the saprolitic set and soils.

The profile can have various levels called “horizons” (Tardy 1993; Bitom and Volkoff 1993; Ndjigui et al. 2008; Kamgang et al. 2009; Babechuk et al. 2014; Nyeck et al. 2019). The studied weathering profile presents at its bottom a saprolitic set consisting of rotten quartzites alternating with soil unit materials. This macromorphological organization of the studied weathering materials is atypical and can be linked to the structure of the parent rock.

In fact, micaceous quartzites in the study area consist of 1 to 2 cm thick quartzitic platelets separated by millimeter to multi-millimeter beds of ferromagnesian minerals. The intense weathering process of these ferromagnesian beds resulted in the genesis of soil unit materials (Q1a, Q2a, Q3a, Q4a, and Q5a) consisting of quartz, muscovite, illite, kaolinite, anatase, and hematite which intercalate the rotten quartzites. The pH and Eh values (Table 1) and the position of the materials Q1a, Q2a, Q3a, Q4a, and Q5a intercalating the rotten quartzites in the pH-Eh diagrams (Fig. 10) confirm that these weathered materials are actual soils. The formation of these soils inside the saprolitic zone is probably due to the rapid weathering of ferromagnesian mineral beds under acidic-reductant conditions (Fig. 10).

Furthermore, the relatively low thickness (~5 m) of the weathering profile compared with those observed in the equatorial zone is due to the dominant quartzitic nature of the parent rock. Alternating quartzitic and ferromagnesian beds led to a differential weathering. This highlights the influence of the infiltrative instability on differential weathering of heterogeneous rocks in tropical climate (Genthon et al. 2017). The higher weathering fluxes associated with basic rock weathering have been explained by the high intrinsic reactivity of ferromagnesian mineral assemblages (Oelkers and Gislason 2001; Dessert et al. 2003) increasing porosity in the basic weathering zone (Sak et al. 2010; Gleeson et al. 2011).

Geochemical evolution of the weathering profile

The PCA biplot of the studied weathered materials (Fig. 11) shows two main groups of materials, coarse saprolites, and soils, thus confirming the macromorphological observations and physico-chemical data. Coarse saprolites are enriched in SiO_2 (> 87wt%) while soils are characterized by high contents of other major oxides. The pH values of the investigated weathered materials are medium acidic to slightly basic ($5.60 \leq \text{pH} \leq 7.15$). These materials are subjected to hydrolysis processes by the action of rain waters, which constitute the saturated soil zone (Fig. 10b). Water in the saturated zone and the incongruent dissolution of feldspars and ferromagnesian minerals control the evolution of the studied weathered materials. The incongruent dissolution of these minerals leads to complete kaolinitization of the weathered materials in the saprolitic zone (Q1a, Q2a, Q3a, Q4a, and Q5a) and soils

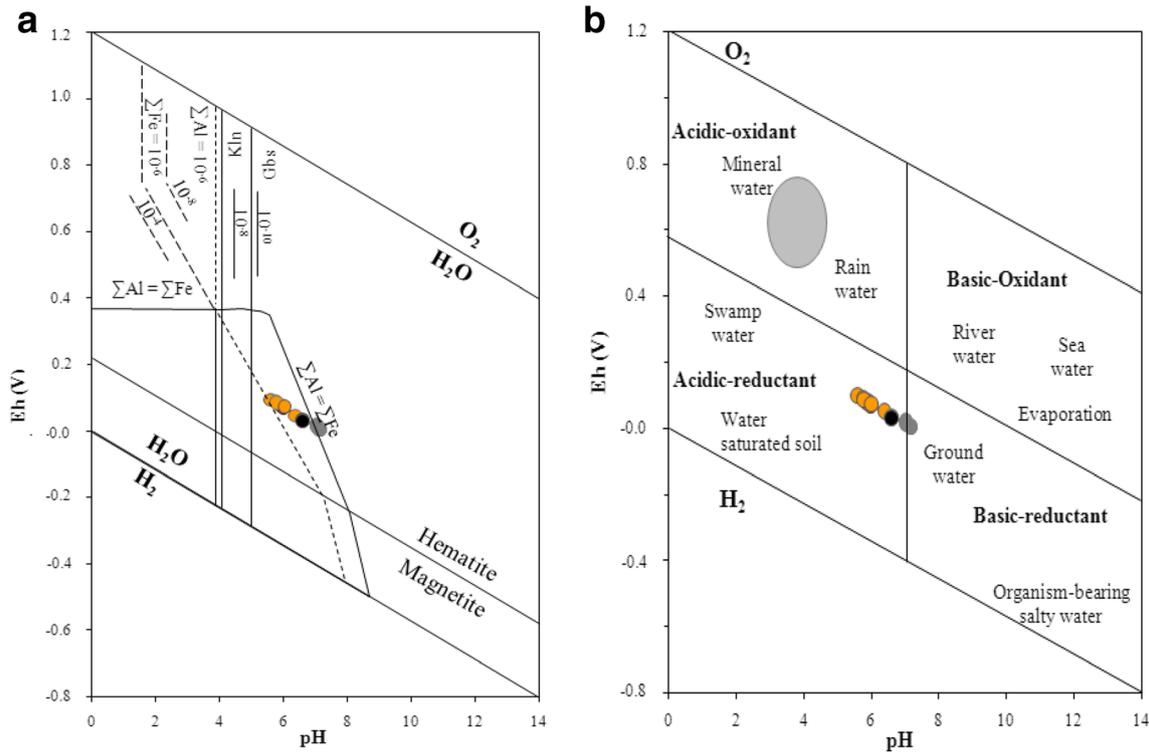


Fig. 10 Eh–pH diagrams showing conditions of formation of the studied weathered materials. **a** Eh–pH diagram showing environments under atmospheric conditions and the inferred conditions of formation of the studied weathered materials (after Garrels and Christ 1965 in Giorgios

et al. 2014), **b** Eh–pH diagram showing the solubility relationships between hematite or magnetite, gibbsite, and water at $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $P = 1\text{ atm}$ for the studied weathered materials (after Norton 1973 in Giorgios et al. 2014)

(QBN, QSN, and QSC). The differential weathering phenomenon observed in the saprolitic zone is probably due to the presence of ferromagnesian mineral beds intercalating the quartzite beds, as illustrated by the WIG (Figs. 11 and 12; Gong et al. 2013) which can be considered as the most sensitive weathering index; it takes into account the values of 7

oxides instead of 04 for CIA (Nesbitt and Young 1982), and 06 for MIA (Babechuk et al. 2014). Although, kaolinitized soil unit materials are also weakly (Q5a and QSC) to moderately (Q1a, Q2a, Q3a, Q4a, QBN, and QSN) lateritized. This fact is different from that observed in weathering profiles in equatorial zones where the lateritization process is very pronounced (Bitom and Volkoff 1993; Ndjigui et al. 2008; Kamgang et al. 2009), especially at the top of toposequences. The low to moderate lateritization of weathered materials is similar to that observed in low-slope weathering profiles (Onana et al. 2016). This phenomenon is probably due to the nature of the parent rock which is felsic. These weathered materials follow a parallel evolution to A – K axis identical to that observed in the low-slope weathered materials developed on chlorite schists in the Southern Plateau zone of Cameroon (Onana et al. 2016). However, there is less marked K enrichment (< +30%) probably due to lower illite contents in the studied weathered materials. During weathering of the studied micaceous quartzites, for MIA values of ~95%, corresponding to ~95% hydrolysis of feldspars and ferromagnesian minerals, lateritization is low to moderate.

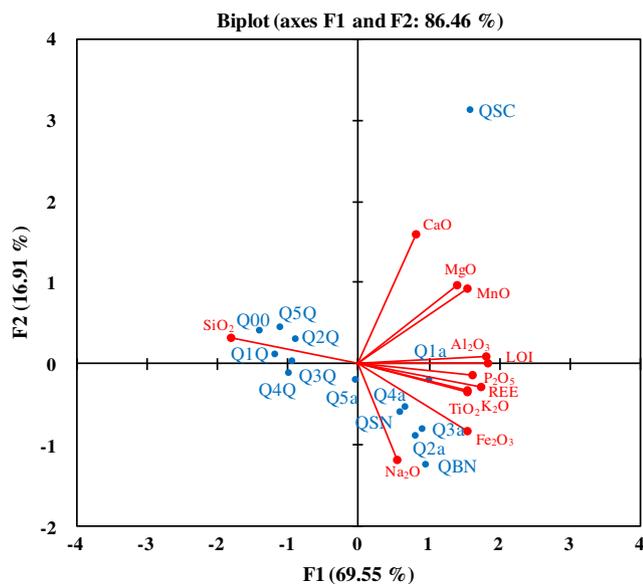


Fig. 11 Biplot of the studied weathered materials

LILE are strongly bound to ferromagnesian silicates and feldspars in the studied weathered materials (Table SM1), which justifies their strong leaching from the profile, except for Cs which is bound to kaolinite in lateritic profiles ($r_{Cs-Al} =$

0.79; Compton et al. 2003; Ugur and Sahar 2012; Onana et al. 2016). Anatase, hematite, and apatite are responsible for positive correlation between U and Ti, Fe, Mo, Nb, and Ta. Uranium, Nb, Mo, and Ta are stable in the studied weathering milieu. Ferromagnesian silicates and feldspars justify the association of Zr with Si, Mg, Ca, Na, and K while Hf is bound to Zr in feldspars. Zirconium is mobile in weathering environments. This has been demonstrated in weathered materials overlying volcanic rocks (Kurtz et al. 2000). Only apatite which is strongly leached in the studied weathering environment contains W ($r_{W-P_2O_5} = 0.69$). Zirconium, Hf, and W are unstable in the studied weathering milieu. The positive correlations between transition metals are due to the fact that they are contained in anatase, kaolinite, and hematite. Nickel is enclosed in apatite ($r_{Ni-P_2O_5} = 0.90$) with the other elements ($r_{V-P_2O_5} = 0.74$, $r_{Co-P_2O_5} = 0.77$, $r_{Cr-P_2O_5} = 0.57$).

The low REE contents in micaceous quartzites may be due to low proportion of accessory minerals (e.g., monazite, zircon) that control REE contents. The increase in REE contents in weathered materials as compared with micaceous quartzites is a well-known fact due to the supergene weathering of primary minerals (Braun et al. 1998; Nyeck et al. 2019). The high $(La/Yb)_N$ ratio values ($6.30 < (La/Yb)_N < 35.78$) indicate a significant fractionation of REE caused by weathering and pedogenesis processes in the weathered materials. REE are associated with P_2O_5 in phosphates, TiO_2 in anatase, and K_2O in illite or muscovite. LREE are less mobile than

HREE in the studied weathering environment. This well-known phenomenon is due to the low solubility of LREE under lateritic conditions compared with HREE (Braun et al. 1998). LREE, therefore, remain bound to Al_2O_3 in kaolinite ($r = 0.92$), Fe_2O_3 in hematite, and K in muscovite and illite ($r = 0.83$), and are not removed during weathering, although many studies have shown that REE (especially HREE and Ce) tend to accumulate in Mn and Fe-oxide-hydroxides (De Carlo et al. 1998; Bau 1999; Hanilci 2013). These results are consistent with that of Compton et al. (2003) on granitic soils from South Africa. However, a part of LREE, bound to Mg ($r = 0.72$) in ferromagnesian minerals, Ca ($r = 0.65$), Na ($r = 0.76$), Li ($r = 0.84$), Rb ($r = 0.85$), Sr ($r = 0.67$), and Ba ($r = 0.62$) in feldspars, is strongly lixiviated from the weathering environment. This is due to the rapid weathering of ferromagnesian minerals which are unstable in a tropical climate (Taylor and Eggleton 2001).

Cerium anomalies observed in the studied soils are a well-known fact in supergene weathering environments (Ndjigui et al. 2008). They result from the variability of redox conditions (Neal and Taylor 1989). Positive Ce anomalies in the top nodular horizon and loose stony clayey horizon are due to the oxidation of Ce^{3+} to Ce^{4+} . Cerium is a very mobile element in the supergene weathering environment, but its oxidation state changes and makes it to remain stable as CeO_2 or on the surface of the Fe- and Mg-oxyhydroxides (Braun et al. 1990; Compton et al. 2003; Tematio et al. 2017). In general, cerium as Ce^{4+} is more stable (positive Ce anomalies) in supergene environment than Ce^{3+} (negative Ce anomalies). The negative Ce anomalies are observed in the rotten quartzites and in the soil unit materials (at the bottom of the profile) as the result of reduction conditions (Neal and Taylor 1989).

Negative Eu anomalies have been observed in weathered materials (Babechuk et al. 2014). Extensive kaolinitization of the weathered materials results in the preferential losses of Eu from hydrolysis of plagioclase, as this mineral has been shown to alter quickly during weathering. These Eu anomalies indicate the leaching of plagioclases in the studied weathered materials (Saleh 2007).

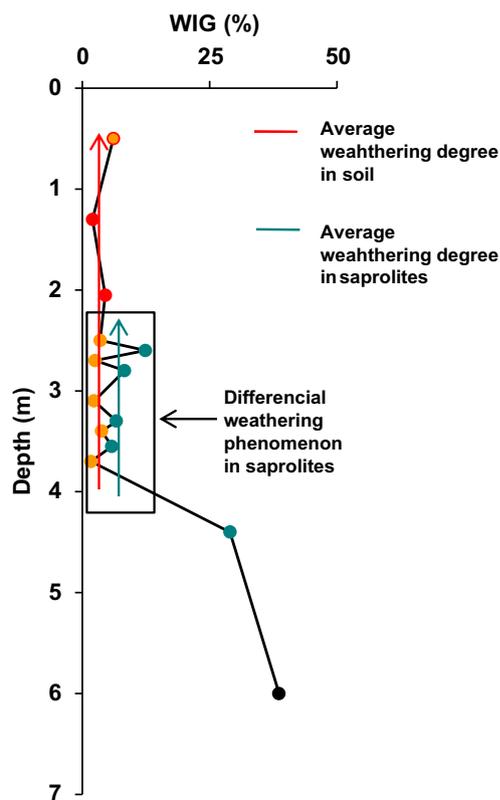


Fig. 12 Variation of WIG along the studied weathering profile

Conclusions

The characterization of an atypical lateritic weathering profile overlying micaceous quartzites in Centre Cameroon shows the following: (1) the micaceous quartzites in the study area consist of 1 to 2 cm thick quartzitic platelets separated by millimeter to multi-millimeter beds of ferromagnesian minerals; (2) the weathering profile presents an atypical macromorphological organization which is micaceous quartzite/CS-soil/CS-soil/CS-soil/CS-soil/CS-soil/nodular materials/loose stony clayey soil; (3) platelets of micaceous quartzites underwent hydrolysis that causes the leaching of

labile elements and silicon accumulation and transformed fresh micaceous quartzite into rotten materials (CS); (4) ferromagnesian mineral beds underwent rapid weathering that lead to the formation of soil unit materials intercalating the rotten micaceous quartzites in acidic-reductant conditions; (5) thus, the main pedogenetic processes are translocation of REE and clay through the weathering profile, transformation of primary minerals, clay, and Fe-oxide-hydroxides formation (associated mainly with LREE losses), addition of organic matter in surface horizons (associated with an accumulation of transition metals, some HFSE, and HREE).

Acknowledgments The authors are grateful to Geo Labs (Sudbury-Canada) for mineralogical and geochemical data. They also express their gratitude to two anonymous reviewers for improving the final manuscript.

References

- Anderson SP, Dietrich WE, Brimhall GH Jr (2002) Weathering profiles, mass-balance analysis, and rates of solute loss: linkages between weathering and erosion. *Geol Soc Am Bull* 114:1143–1158
- Babechuk MG, Widdowson M, Kamber BS (2014) Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India. *Chem Geol* 363:56–75
- Bau M (1999) Scavenging of dissolved yttrium and rare earths by precipitating iron oxyhydroxide: experimental evidence for Ce oxidation, Y–Ho fractionation, and lanthanide tetrad effect. *Geochim Cosmochim Acta* 63(1):67–77
- Bitom D, Volkoff B (1993) Altération déferruginisante des cuirasses massives et formation des horizons gravillonnaires ferrugineux dans les sols de l’Afrique Centrale humide. *CR Acad Sci II A*:1447–1454
- Braun JJ, Pagel M, Muller JP, Bilong P, Michard A, Guillet B (1990) Cerium anomalies in lateritic profiles. *Geochim Cosmochim Acta* 51:597–605
- Braun JJ, Pagel M, Herbillon A, Rosin C (1993) Mobilization and redistribution of REE and Th in syenitic lateritic profile: a mass balance study. *Geochim Cosmochim Acta* 57:4419–4434
- Braun JJ, Viers J, Dupré B, Polve M, Ndam J, Muller J (1998) Solid/liquid REE fractionation in the lateritic system of Goyoum, East Cameroon: the implication for the present dynamics of the soil covers of the humid tropical regions. *Geochim Cosmochim Acta* 62(2):273–299
- Brimhall GH, Dietrich WE (1987) Constitutive mass-balance relations between chemical composition, volume, density, porosity and strain in metasomatic hydrochemical systems: results on weathering and pedogenesis. *Geochim Cosmochim Acta* 57:4419–4434
- Compton JS, White RA, Smith M (2003) Rare earth element behavior in soils and salt pan sediments of a semi-arid granitic terrain in the Western cape, South Africa. *Chem Geol* 201:239–255
- De Carlo EH, Wen X-I, Irving M (1998) The influence of redox reactions on the uptake of dissolved Ce by suspended Fe and Mn oxide particles. *Aquat Geochem* 3:357–389
- Dessert C, Dupré B, Gaillardet J, François LM, Allègre CJ (2003) Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle. *Chem Geol* 202:257–273
- Duchaufour P (1977) Pédogénèse et classification. Masson, Paris
- Garrels RM and Christ CL (1965) *Solutions, Minerals, and Equilibria*. Harper and Row, New York
- Genthon P, Join J-L, Jeanpert J (2017) Differential weathering in ultramafic rocks of New Caledonia: the role of infiltration instability. *J Hydrol* 550:268–278
- Giorgios I, Bonetto S, Giustetto R, Lawane A, Pantet A, Rossetti P, Thomassin J-H, Vinai R (2014) The lateritic profile of Balkouin, Burkina Faso: geochemistry, mineralogy and genesis. *J Afr Earth Sci* 90:31–48
- Gleeson T, Smith L, Moosdorf N, Hartmann J, Dürr HH, Manning AH, van Beek LPH, Jellinek AM (2011) Mapping permeability over the surface of the earth. *Geophys Res Lett* 38:L02401
- Gnotué T, Ganno S, Kouankap Nono GD, Nzenti JP (2015) Mineralogy and geochemistry of Neoproterozoic siliceous manganese formations from Ntui-Betamba (Cameroon Pan-African Fold Belt): implications for mineral exploration. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 104: 1123–1138
- Gong Q, Deng J, Yang L, Zhang J, Wang Q, Zhang G (2011) Behaviour of major and trace elements during weathering of sericite-quartz schist. *J Asian Earth Sci* 42:1–13
- Gong Q, Deng J, Wang C, Wang Z, Zhou L (2013) Element behaviours due to rock weathering and its implication to geochemical anomaly recognition: a case study on Linlong biotite granite in Jiadong peninsula, China. *J Geochem Explor* 128:14–24
- Hanilci N (2013) Geological and geochemical evolution of the Bolkardaği bauxite deposits, Karaman, Turkey: transformation from shale to bauxite. *J Geochem Explor* 133:118–137
- Islam MR, Peuraniemi V, Aario R, Rojstaczer S (2002) Geochemistry and mineralogy of saprolite in Finnish Lapland. *Appl Geochem* 17: 885–902
- Jiménez-Espinosa R, Vázquez M, Jiménez-Millán J (2007) Differential weathering of granitic stocks and landscape effects in a Mediterranean climate, Southern Iberian Massif (Spain). *Catena* 70:243–252
- Kamgang KBV, Onana VL, Ndome Effoudou Priso E, Parisot JC, Ekodeck GE (2009) Behavior of REE and mass balance calculations in a lateritic profile over chlorite schists in South Cameroon. *Chem Erde-Geochem* 69:61–73
- Kurtz AC, Derry LA, Chadwick OA, Alfano MJ (2000) Refractory element mobility in volcanic soils. *Geology* 28:683–686
- McDonough WF, Sun S-S (1995) The composition of the earth. *Chem Geol* 120:223–253
- McLennan SM, Hemming SR, McDaniel DK, Hanson GN (1993) Geochemical approaches to sedimentation provenance and tectonics. *Geol Soc Am Spec Pap* 284:21–40
- Munsell Color Charts (2000) Macbeth Division of Kollmorge Corporation, 2441 North Calvert Street Baltimore, Maryland 21218
- Ndjigui P-D, Bilong P, Bitom D, Dia A (2008) Mobilization and redistribution of major and trace elements in two weathering profiles developed on serpentinites in the Lomié ultramafic complex, South-East Cameroon. *J Afr Earth Sci* 50:305–328
- Neal CR, Taylor LA (1989) A negative Ce anomaly in a peridotite xenolith: evidence for crustal recycling into the mantle or mantle metasomatism. *Geochim Cosmochim Acta* 53:1035–1040
- Nesbitt HW, Wilson RE (1992) Recent chemical weathering of basalts. *Am J Sci* 292:740–777
- Nesbitt HW, Young GM (1982) Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochim Cosmochim Acta* 57:4419–4434
- Nesbitt HW, Young GM (1989) Formation and diagenesis of weathering profiles. *J Geol* 97:129–147
- Nyeck B, Ngimbous RV, Ndjigui P-D (2019) Petrology of saprolites developed on gneisses in the Matomb region, South Cameroon. *J Afr Earth Sci* 150:107–122
- Norton SA (1973) Laterite and bauxite formation. *Economic Geology* 68:353–361

- Oelkers EH, Gislason SR (2001) The mechanism, rates and consequences of basaltic glass dissolution: I. an experimental study of the dissolution rates of basaltic glass as a function of aqueous Al, Si and oxalic acid concentration at 25°C and pH = 3 and 11. *Geochim Cosmochim Acta* 65:3671–3681
- Onana VL, Ntoulala RFD, Noa Tang SD, Ndome Effoudou E, Kamgang Kabeyene V, Ekodeck GE (2016) Major, trace and REE geochemistry in contrasted chlorite schist weathering profiles from southern Cameroon: influence of the Nyong and Dja Rivers water table fluctuations in geochemical evolution processes. *J Afr Earth Sci* 124: 371–382
- Sak PB, Navarre-Sitchler AK, Miller CE, Daniel CC, Gaillardet J, Buss HL, Lebedeva MI, Brantley SL (2010) Controls on rind thickness on basaltic andesite clasts weathering in Guadeloupe. *Chem Geol* 276: 129–143
- Saleh GM (2007) Geology and rare-earth element geochemistry of highly evolved, molybdenite-bearing granitic plutons, Southeastern Desert, Egypt. *Chin J Geochem* 26(4):333–344
- Suchel JB, Tsalefac M (1995) Atlas régional du Sud Cameroun. Vol. Climatologie, ORSTOM éd., 8–9
- Tardy Y (1993) *Pétrologie des latérites et des sols tropicaux*. Masson Ed. (France), 461 p
- Taylor G, Eggleton RA (2001) *Regolith geology and geomorphology*. Wiley, New York
- Tematio P, Tchaptchet WT, Nguetnkam JP, Mbog MB, Yongue Fouateu R (2017) Mineralogical and geochemical characterization of weathering profiles developed on mylonites in the Fodjomekwet-Fotouni section of the Cameroun Shear (CSZ), West Cameroon. *J Afr Earth Sci* 131:32–42
- Ugur FA, Sahan H (2012) Sorption behaviour of ^{137}Cs on kaolinite. *Ekoloji* 21(82):34–40. <https://doi.org/10.5053/ekoloji.2011.825>
- Whitney DL, Evans BW (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Am Mineral* 95:185–187



Mineralogy, geochemistry and physico-mechanical characterization of clay mixtures from Sa'a (Center Cameroon): possibly use as construction materials

Hervé Nyassa Ohandja¹ · Roger Firmin Donald Ntouala^{1,2} · Vincent Laurent Onana¹ · Arnaud Ngo'o Ze¹ · Aloys Thierry Ndzé Mvindi^{1,3} · Georges Emmanuel Ekodeck¹

Received: 23 May 2020 / Accepted: 18 August 2020
© Springer Nature Switzerland AG 2020

Abstract

Six lateritic clay samples and lateritic and alluvial clay mixtures were studied in order to evaluate their potential use as raw material for bricks and tiles manufacturing. Their mineralogical and geochemical compositions were determined by X-ray diffraction and X-ray spectrometry, respectively, together with some physico-mechanical characteristics. The main minerals for the raw materials are kaolinite, quartz, goethite, hematite, and muscovite. Fluxing oxides are in low proportion (≤ 1.55 wt%) and causes insufficient sintering during firing. The flexural strength (FS) values are lower than 2 MPa for lateritic clay bricks, due to the Fe_2O_3 content. This justifies their amendment with alluvial clays from the near Sanaga River. The lateritic and alluvial clay mixtures were done with respectively 100, 80, 60, 40, and 0 wt% of lateritic clay and fired at 900, 950, 1000, 1050, and 1100 °C. Linear shrinkage values increase with temperature and globally with alluvial clay content. Except for one sample-based product at 900 and 950 °C, water absorption values overall remain lower than 20% which is adequate for dense bricks and roofing tiles. For the mixtures, FS values globally increase with alluvial clay content except for a few samples at some temperatures. The studied clay mixtures can be used for bricks manufacture at the five tested temperatures. Some compositions with 40, 60, and 100 wt% of alluvial clays may be used for the production of roofing tiles above 1000 °C. Fluxes amendment is needed at 1050 and 1100 °C for other mixtures to increase their FS.

Keywords Lateritic and alluvial clays · Mineralogical and geochemical features · Linear shrinkage · Water absorption · Flexural strength · Bricks and roofing tiles

1 Introduction

The interest of clay material is not to be demonstrated either by their areas of use [1], or their abundance. Many works have focused on the valuation of these materials during the last decades. It, however, arises the problem of quality than quantity. The limiting factor in the use of lateritic clays (residual clays) is their high iron (Fe_2O_3) content [2, 7]. What do we then do with these abundant

materials, which by their genesis feature has a high level of Fe_2O_3 resulting in low mechanical properties of the final products for the recommended uses? Many authors have tried to improve the properties of these clayey materials. Among them, Andji et al. [2] proposed the addition of calcium clay (10 wt% CaCO_3) to significantly improve the mechanical strength of Gounioubé clays (Ivory Coast), while Ergul et al. [8] proposed the substitution of clayey materials by basaltic tuffs. The approach of lateritic and

✉ Vincent Laurent Onana, onana.vl@gmail.com | ¹Faculty of Science, Department of Earth Sciences, University of Yaounde I, P.O. Box 812, Yaounde, Cameroon. ²Faculty of Mines and Petroleum Industries, Department of Mining Engineering and Mineral Processing, University of Maroua, P.O. Box 46, Maroua, Cameroon. ³National Civil Engineering Laboratory, P.O. Box 349, Yaounde, Cameroon.



alluvial clay mixtures has also been addressed in Cameroon by Ngon Ngon et al. [5] and Ntoulala et al. [6]; Onana et al. [7]. Six lateritic clay samples have been collected and analyzed in the area of Sa'a. Experimental results obtained have shown the need to amend these materials. The aim of the present work is to highlight the effect that would have an addition of alluvial clays on the technological properties of lateritic clays of Sa'a to bring out their interest in construction.

2 Geographical and geological setting

The morphology of the study area shows quartzitic reliefs with asymmetrical flanks in the Sa'a area. There are two types of hills: half-orange-shaped hills and asymmetrical hillsides. The half-orange-shaped hills are few in number. The asymmetrical hills are separated by more recessed valleys. The current climate is of transitional equatorial type [9]. The total annual rainfall is between 1400 and 1500 mm. Mean annual air temperatures range from 22.9 °C to 25.8 °C with minimum temperatures in august (19.1 °C) and highs in March and April (31.1 °C). This area belongs to the Sanaga watershed, the largest in Cameroon. The hydrographic network is dense and structurally parallel to the North and dendritic to the South (Fig. 1).

The basement of the Sa'a area (series of Sa'a) consists of rocks belonging to the pan-African mobile zone [10, 11]. The geological formations are mainly metamorphic rocks consisting of mica schists, micaceous quartzites, and gneisses. Mica schists are flaky rocks formed of muscovite, quartz, biotite, and garnet. They show intercalations of quartzites. Micaceous quartzites are the most abundant rocks in the study area and consist essentially of quartz associated with muscovite [11]. They form thick benches and are at the origin of more or less uneven microreliefs frequent in the zone. Gneisses are in association with mica schists and micaceous quartzites. They are fine-grained rocks with regular quartzite intercalations. The study area is mainly the domain of ferrallitic soils. They are of variable thickness (2–5 m) depending on the nature of the bedrock and are mainly red at altitudes greater than 600 m, yellow under 500 m and ocher between these altitudes.

3 Materials and methods

Field investigation allows the collection of six lateritic clay samples by shaft sinking (Fig. 1). They are indexed EB, EY, KK, NL, NM, and PO. Alluvial clay sample (AL) was collected in the swampy valley of the Sanaga River.

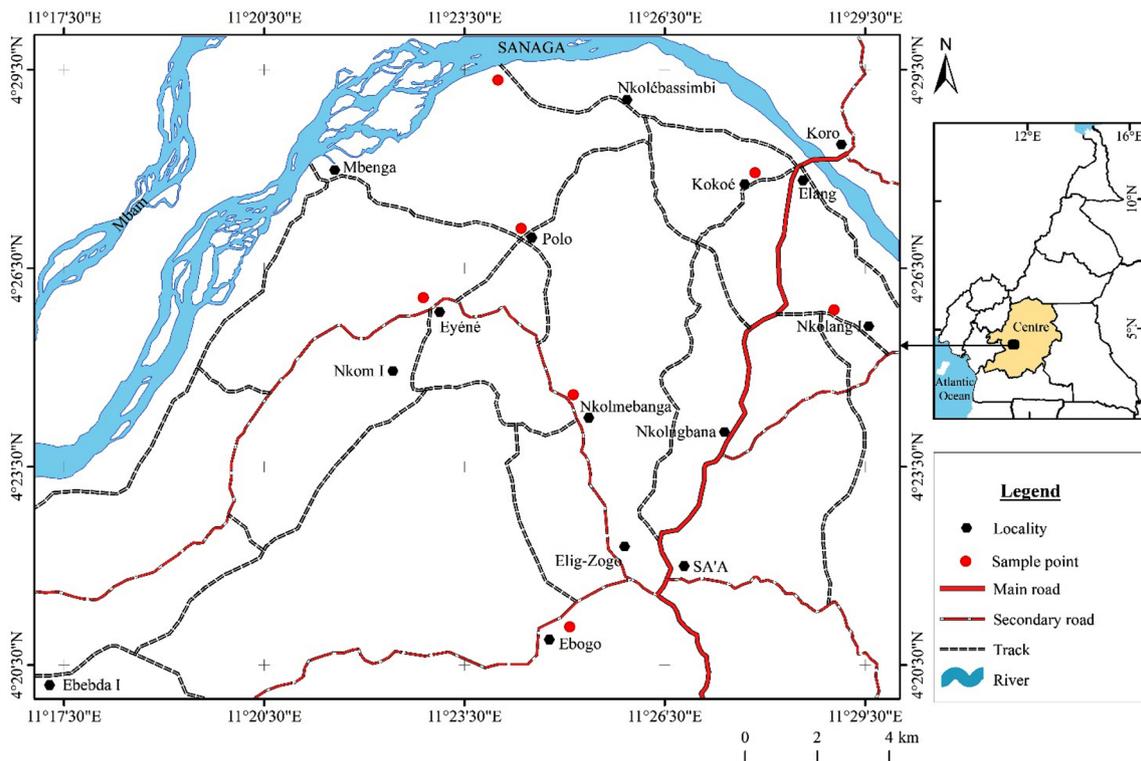


Fig. 1 Study area and samples location

The mineralogy of samples was determined by X-ray powder diffraction (XRPD) on powder samples. The analytical instrument used is a PANalytical X'Pert Pro diffractometer with a monochromator equipped with a cobalt K α radiation ($\lambda = 1.7890 \text{ \AA}$) over a range of 2.5 to $35^\circ 2\theta$ and a step size of $0.05^\circ 2\theta/\text{min}$ at 40 kV and 45 mA . Infrared spectra were recorded in diffuse reflectance mode using a Bruker Alpha-P Fourier Transform Interferometer. The spectra were recorded from 4000 to 400 cm^{-1} with a resolution step of 4 cm^{-1} . Chemical analysis for major elements was done after sample ignition by X-ray fluorescence on PAN analytical Axios Advanced PW 4400 equipment. Titrimetry is used for iron (II) oxide (FeO) dosage. The color of dry and fired samples was determined using the Munsell Soil colour charts.

Particle size data were obtained by sieving (AFNOR, 1996) for sizes greater than $80 \text{ }\mu\text{m}$ and by sedimentation (AFNOR, 1992) for sizes less than $80 \text{ }\mu\text{m}$.

The liquid limit (LL) was measured by Casagrande dish method and plastic limit (PL) by roller method. Measurements were realized according to ASTM D4318–2005 standard. Plasticity index (PI) was calculated as the difference between LL and PL.

For each lateritic clay sample, lateritic and alluvial clayey mixture was done with, respectively, $100 \text{ wt}\%$, $80 \text{ wt}\%$, $60 \text{ wt}\%$, $40 \text{ wt}\%$ and $0 \text{ wt}\%$ of lateritic clay. For the obtained mixtures, four test briquettes with length \times width dimension of $8 \times 4 \text{ cm}$ were elaborated using a laboratory hydraulic press. For each briquette, a mixture of 100 g of clay associated with 17 – 20% of water (on dry basis) was used. Bricks were air-dried for 7 days and oven-dried at 105°C for 24 h to remove moisture prior to its firing. The firing was done in a muffle furnace with a maximum temperature of 1250°C . These briquettes were subjected to five firing temperatures: 900 , 950 , 1000 , 1050 , and 1100°C . For all firing cycles, a heating rate of $5^\circ \text{C}/\text{min}$ and soaking time of 2 h at the required temperature was observed before furnace cooling at room temperature.

Linear shrinkage (LS) was determined using Eq. (1) below (ASTM C531–2000):

$$LS(\%) = [(L_0 - L_1) / L_0] \times 100 \quad (1)$$

where L_0 is the initial length (mm) of the brick after drying at 105°C for 24 h and L_1 is the length (mm) after firing.

Water absorption (WA), from Eq. (2) below, is evaluated according to the ASTM C20–2000 standard using the Archimedes' water displacement method [12]:

$$WA(\%) = [(W_2 - W_1) / W_1] \times 100 \quad (2)$$

where W_2 is the mass of 24 h water-soaked specimen and W_1 is the mass of dry fired briquette.

Flexural strength value (σ) was evaluated according to ASTM F417–1996 norm, following Eq. (3) below for each briquette test:

$$\sigma = 3PL / 2lh^2 \quad (3)$$

where P is the load at fracture (N), L is the distance between supporting knife edge (50 mm), l is the width of the briquette and h is the thickness of the briquette (mm).

4 Results and discussion

4.1 Mineralogy and geochemistry

Sa'a clayey materials consist of kaolinite (7.20 \AA , 4.46 \AA , 3.58 \AA , 2.34 \AA , 1.98 \AA), quartz (4.26 \AA , 3.34 \AA , 1.82 \AA), goethite (4.99 \AA , 4.16 \AA , 2.69 \AA , 1.67 \AA), hematite (2.69 \AA , 1.67 \AA , 1.45 \AA), and muscovite (10.03 \AA , 4.46 \AA , 3.34 \AA) (Fig. 2). SiO_2 which exist as the chief oxide (Table 1) with the proportion between 76.04 and 53.61% is associated with the presence of quartz, kaolinite, and muscovite. This proportion of quartz in the raw material influences the durability of bricks [13] and provided a uniform shape of the bricks [14].

Because kaolinite and gibbsite are present, SiO_2 is followed by Al_2O_3 (12.00 – 23.23%). The content of Fe_2O_3 (3.76 – 11.58%) can result in poor mechanical strength of the final products [2–7]. Alkali and alkali-earth oxides persist in very low proportions ($\leq 1.55\%$) which may result in inadequate sintering during firing due to poor formation of the vitreous phase. The very low proportion of alkalis in Sa'a clayey materials required a relatively high temperature for their maturation [15].

The high proportion of Fe_2O_3 present in the clay leads to the reddish color of the fired products and thus these clays cannot be used for white body production [16]. The loss on ignition of lateritic clays in KK, NM, and NL is fairly high ($> 10 \text{ wt}\%$), primarily due to the removal of structural water and organic matter in the upper weathering profile. During the firing phase, the organic matter in these materials may serve as a pore former [17].

4.2 Physical and mechanical characterization

The color of fired bricks codified by Munsell code (Table 2) are globally light red (2.5YR 7/8, 2.5YR 6/8, 2.5YR 6/6) at the five firing temperatures for alluvial clay, light red from 900 to 1000°C and red at 1050 and 1100°C for NL and EB base bricks. For NM base product, the color is globally light red from 900 to 1000°C for mixtures with 40 and $60 \text{ wt}\%$ of lateritic clays and red for mixtures with 80 and $100 \text{ wt}\%$, red at 1050 and 1100°C for the first group and reddish

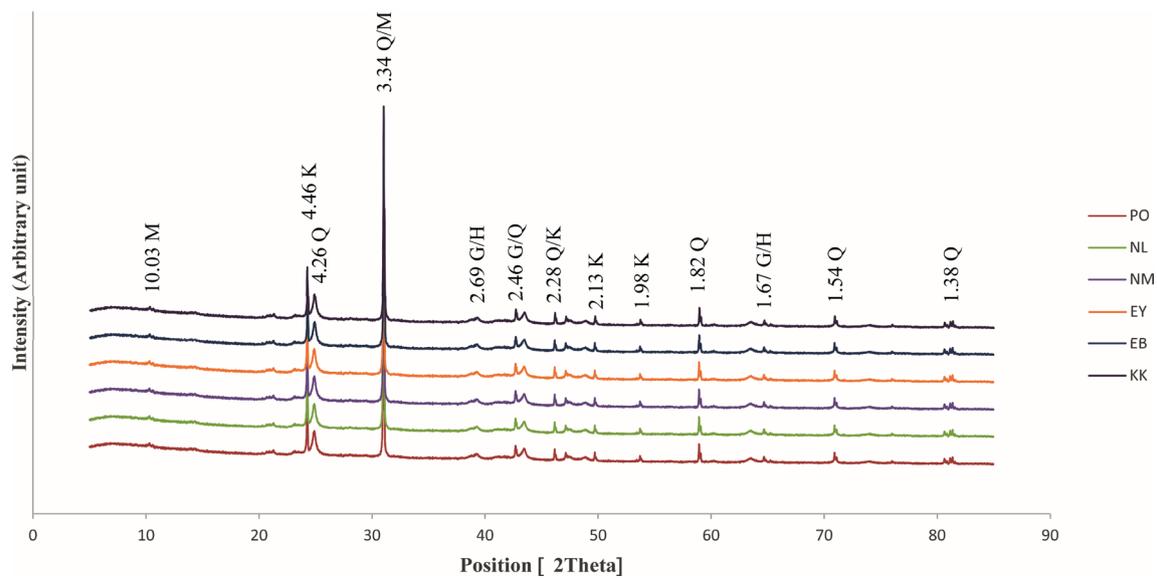


Fig. 2 XRD patterns of Sa'a lateritic clays (Q: quartz, M: muscovite, K: kaolinite, G: goethite, H: hematite)

Table 1 Chemical composition of raw material (wt%)

Oxides (wt%)	dl	NL-m	NM-m	EY -m	EB-m	KK-m	PO-m	AL
SiO ₂	0.04	53.61	54.77	63.26	76.04	59.91	70.35	61.43
Al ₂ O ₃	0.02	23.23	19.71	12.91	12.06	19.12	12.00	18.01
MnO	0.002	0.070	0.122	0.576	0.030	0.084	0.161	0.076
FeO	0.06	0.41	0.51	0.17	0.24	0.43	0.42	1.23
MgO	0.01	0.21	0.27	0.20	0.19	0.17	0.21	0.36
CaO	0.006	0.109	0.316	0.062	0.077	0.148	0.224	0.236
Na ₂ O	0.02	0.03	0.11	0.05	0.03	0.04	0.07	0.25
K ₂ O	0.01	0.76	1.55	0.93	0.82	0.17	1.11	1.29
Fe ₂ O ₃	0.01	7.53	9.31	11.58	3.76	8.04	6.02	4.85
TiO ₂	0.01	1.17	1.20	0.74	0.80	1.02	1.22	1.58
P ₂ O ₅	0.002	0.053	0.197	0.062	0.033	0.102	0.175	0.106
Cr ₂ O ₃	0.002	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01
LOI	0.05	12.65	11.51	8.85	5.73	11.20	7.70	9.77
Total	-	99.43	99.08	99.26	99.58	100.02	99.24	99.20

brown to dark reddish brown for the second. EY, KK and PO base products display light red color with 40 wt% of lateritic clay from 900 to 1000 °C and red color at the same temperatures for the three other mixtures. Their colors are red, dark red, reddish brown, or dark reddish brown at 1050 and 1100 °C. The 2.5YR colors are highly allied to the presence of Fe₂O₃ in the raw materials [18, 19].

Particle size distribution shows that Sa'a upper set weathering materials are mainly composed of sand, silts and clays (Table 3). The grain size is spread out (Fig. 3). In lateritic materials, sand proportion varies between 42.83 (EY) and 17.20 wt% (NL) while silt content varies between 40.00 (NM) and 11.50 wt% (EY). Clay's proportion varies from 48.30 (NL) and 24.00 wt% (NM). The

alluvial clayey material consists of 6.00, 40.00 and 54.00 wt% of sand, silt and clay respectively. NL and EB are sandy-clay, while PO, KK, and EY are heavy sandy-clay and NM is silty-sand according to the Belgian textural diagram.

From Winkler's diagram (Fig. 4), granulometry of NM materials is sufficient for common bricks, while EY, EB, KK and PO are fine for roofing tiles and masonry bricks, whereas NL is not graded. The size of these materials spreads encourages compaction [20]. The effects are decrease in porosity, permeability, compressibility, water absorption and swelling, and mechanical resistance increase. The fine-grained size of the studied clayey materials confers good binding properties [21].

Table 2 Munsell code (color) of fired bricks prepared with lateritic and alluvial clays mixtures from Sa'a region

Sample	Lateritic clay wt%	900 °C	950 °C	1000 °C	1050 °C	1100 °C
AL	00	2.5YR 7/8	2.5YR 7/8	2.5YR 7/8	2.5YR 6/8	2.5YR 6/6
NL	40	2.5YR 6/6	2.5YR 6/8	2.5YR 6/8	2.5YR 5/6	2.5YR 4/6
	60	2.5YR 6/8	2.5YR 6/8	2.5YR 6/8	2.5YR 5/6	2.5YR 4/8
	80	2.5YR 5/8	2.5YR 5/8	2.5YR 6/6	2.5YR 4/8	2.5YR 4/6
	100	2.5YR 6/8	2.5YR 6/8	2.5YR 6/8	2.5YR 5/8	2.5YR 3/6
NM	40	2.5YR 6/8	2.5YR 6/8	2.5YR 6/8	2.5YR 5/6	2.5YR 4/4
	60	2.5YR 6/8	2.5YR 6/8	2.5YR 5/8	2.5YR 4/8	2.5YR 4/6
	80	2.5YR 5/8	2.5YR 5/8	2.5YR 4/8	2.5YR 4/6	2.5YR 4/4
	100	2.5YR 5/8	2.5YR 5/8	2.5YR 4/6	2.5YR 4/4	2.5YR 3/4
EY	40	2.5YR 6/8	2.5YR 6/8	2.5YR 6/8	2.5YR 6/6	2.5YR 5/6
	60	2.5YR 5/8	2.5YR 5/8	2.5YR 5/8	2.5YR 5/6	2.5YR 4/4
	80	2.5YR 5/8	2.5YR 5/8	2.5YR 5/8	2.5YR 3/4	2.5YR 2.5/3
	100	2.5YR 5/6	2.5YR 5/6	2.5YR 5/6	2.5YR 3/3	2.5YR 3/2
EB	40	2.5YR 7/8	2.5YR 7/8	2.5YR 7/8	2.5YR 6/8	2.5YR 5/8
	60	2.5YR 6/8	2.5YR 6/8	2.5YR 6/6	2.5YR 5/6	2.5YR 4/6
	80	2.5YR 6/8	2.5YR 6/8	2.5YR 6/6	2.5YR 5/8	2.5YR 4/8
	100	2.5YR 6/8	2.5YR 6/8	2.5YR 5/8	2.5YR 4/6	2.5YR 3/6
KK	40	2.5YR 6/8	2.5YR 6/8	2.5YR 6/8	2.5YR 5/8	2.5YR 5/6
	60	2.5YR 5/8	2.5YR 5/8	2.5YR 5/6	2.5YR 5/6	2.5YR 4/6
	80	2.5YR 5/8	2.5YR 5/8	2.5YR 5/6	2.5YR 4/6	2.5YR 3/6
	100	2.5YR 5/8	2.5YR 5/8	2.5YR 5/8	2.5YR 4/6	2.5YR 3/6
PO	40	2.5YR 6/8	2.5YR 6/8	2.5YR 6/8	2.5YR 4/8	2.5YR 4/6
	60	2.5YR 5/8	2.5YR 5/8	2.5YR 5/8	2.5YR 4/6	2.5YR 4/4
	80	2.5YR 5/8	2.5YR 5/8	2.5YR 5/8	2.5YR 5/6	2.5YR 3/4
	100	2.5YR 5/8	2.5YR 5/8	2.5YR 5/8	2.5YR 4/4	2.5YR 4/4

Table 3 Physical properties of raw material

Parameter	Sample	NL	NM	EY	EB	KK	PO	AL
PSD (wt%)	Sand	17.20	34.33	42.83	36.20	37.33	37.60	6.00
	Silt	33.70	40.00	11.50	17.80	31.00	33.00	40.00
	Clay	48.30	24.00	26.00	46.00	31.00	28.00	54.00
Atterberg limits (%)	LL	46	44	40	40	41	30	43
	PL	31	28	28	24	28	19	25
	IP	15	16	12	16	13	11	18
VBS (g/100 g)		2.87	2.53	2.80	2.80	2.33	2.20	5.07

About the Atterberg limits, for EY and NM, the liquid limit (LL) ranges between 30% (PO) and 46% (NL) and the plasticity index (PI) between 12 and 16%, respectively (Table 3). The Casagrande plasticity chart classification of these materials shows that they are less cohesive soils with medium plasticity. The plasticity index projection and the plasticity limit values in the workability map (Fig. 5) indicates that all the clayey material tested has suitable molding properties. The plastic behavior of the samples and their adaptability for pressing are closely linked [22]. High plasticity would have been good for the extrusion process or hand-molding shaping [15].

Linear shrinkage values are rising with temperature and with alluvial clay content globally (Fig. 6). High shrinkage for ceramic applications should be avoided because contractions in ceramic products cause major distortions. NL briquettes give the highest shrinkage and are consistent with their high clay content. An amendment which may consist of enrichment with silt or sand may assist in the dimensional regulation of the materials studied. The small LS values at temperatures below 1050 °C are in line with the workability chart (Fig. 5). This weak shrinkage is also correlated with the sandy nature

Fig. 3 Particle size distribution curves of the lateritic and alluvial clays

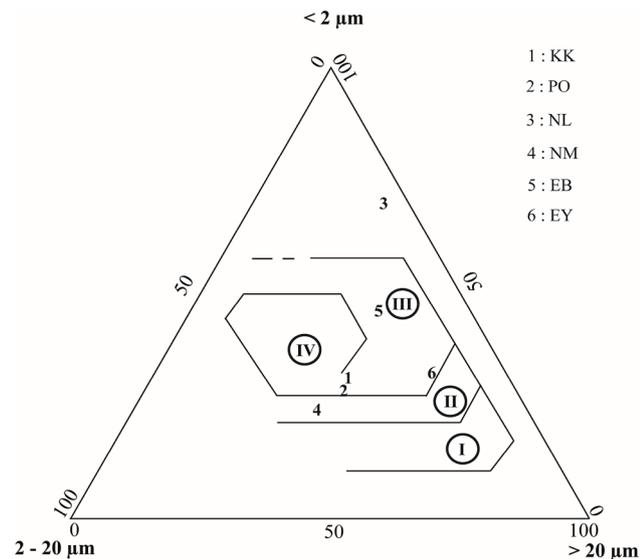
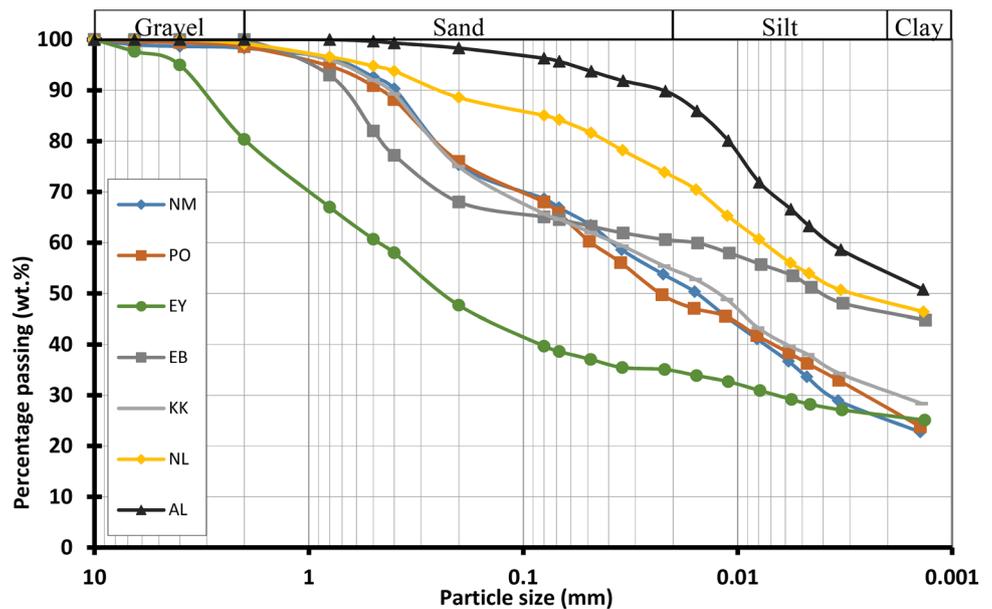


Fig. 4 Winkler diagram, (I) Common bricks; (II) Vertically perforated bricks; (III) Roofing tiles and masonry bricks; and (IV) Hollow products

of the sample, where free silica (sand) acts as a filler and enhances shrinkage control [23].

Water absorption values overall remain lower than 25% (Fig. 7) which is good for dense bricks [24]. The specified values for WA of Brazilian clay-based products by the same author are WA < 20 wt% for roofing tiles. These WA values are obtained at all the temperatures for mixtures with EB, EY, KK, NM and PO, and at a temperature above 950 °C for NL clay-based products. For the NL clayey mixtures, the highest WA values are obtained by the alluvial clay. WA values are most influenced by

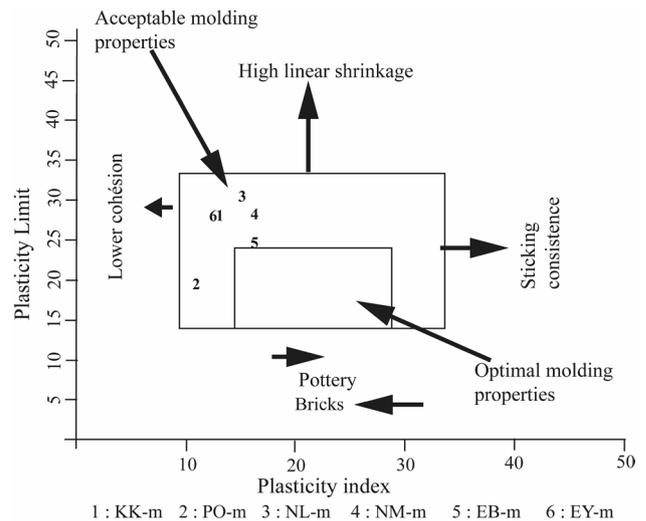


Fig. 5 Workability chart (after brain and highly in Moutou et al. [33])

temperature than alluvial clay content of the mixture. The same pattern is observed with of Ayos clayey mixtures [6]. Low drops in water absorption values in all samples are usually due to the absence or very low development of a vitreous phase [20, 25]. This is associated with a minimal amount of fluxing agents in all the samples (Table 1). The vitreous phase produced allows pores to be enclosed or adjacent pores to be separated by penetration of the liquid vitreous layer within the pores [13, 26, 27]. Globally flexural strength remains lower than 2 MPa for lateritic clays bricks except for KK and NM samples where FS is slightly greater than this standard. For the mixtures, FS increase with alluvial clay content

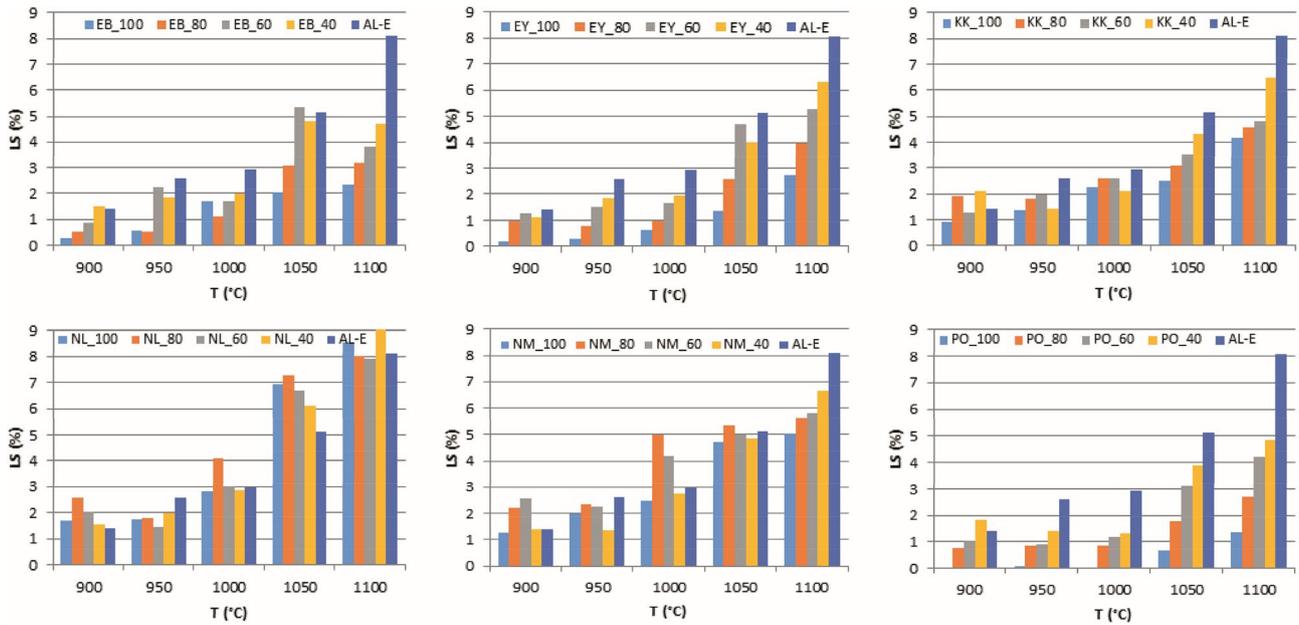


Fig. 6 Linear shrinkage of the fired products

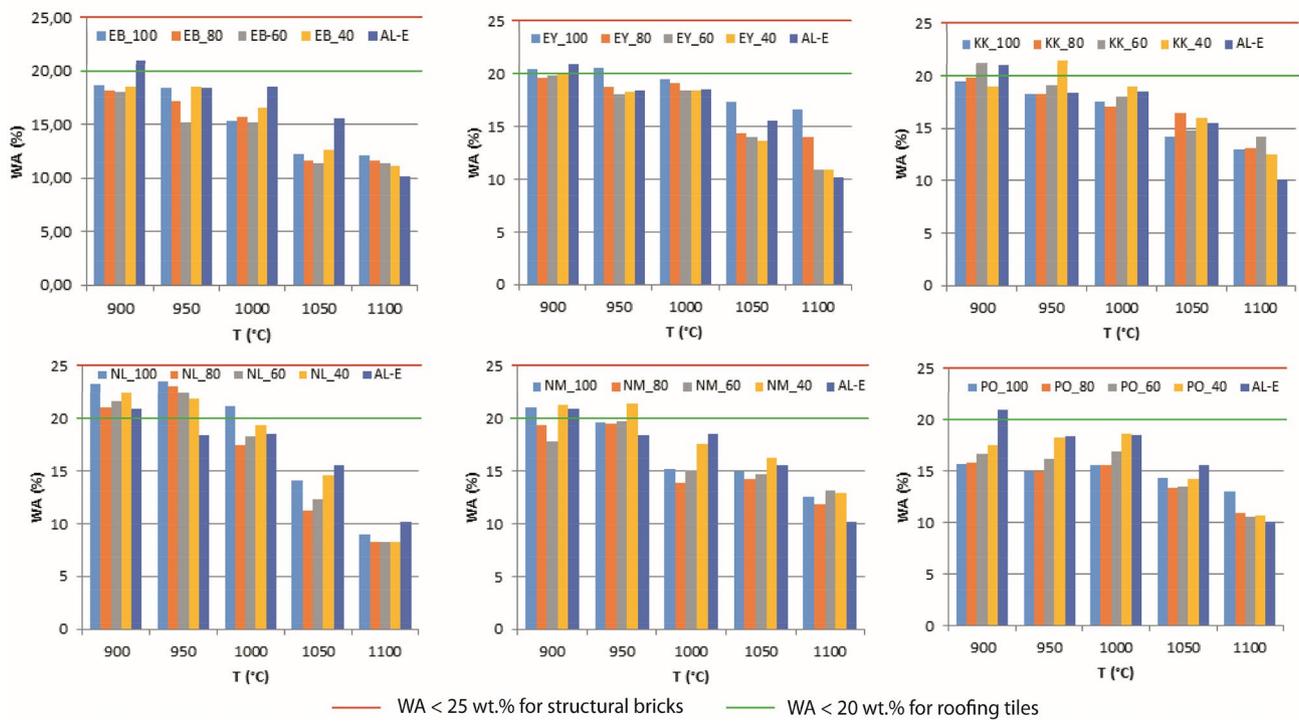


Fig. 7 Water absorption of the fired products

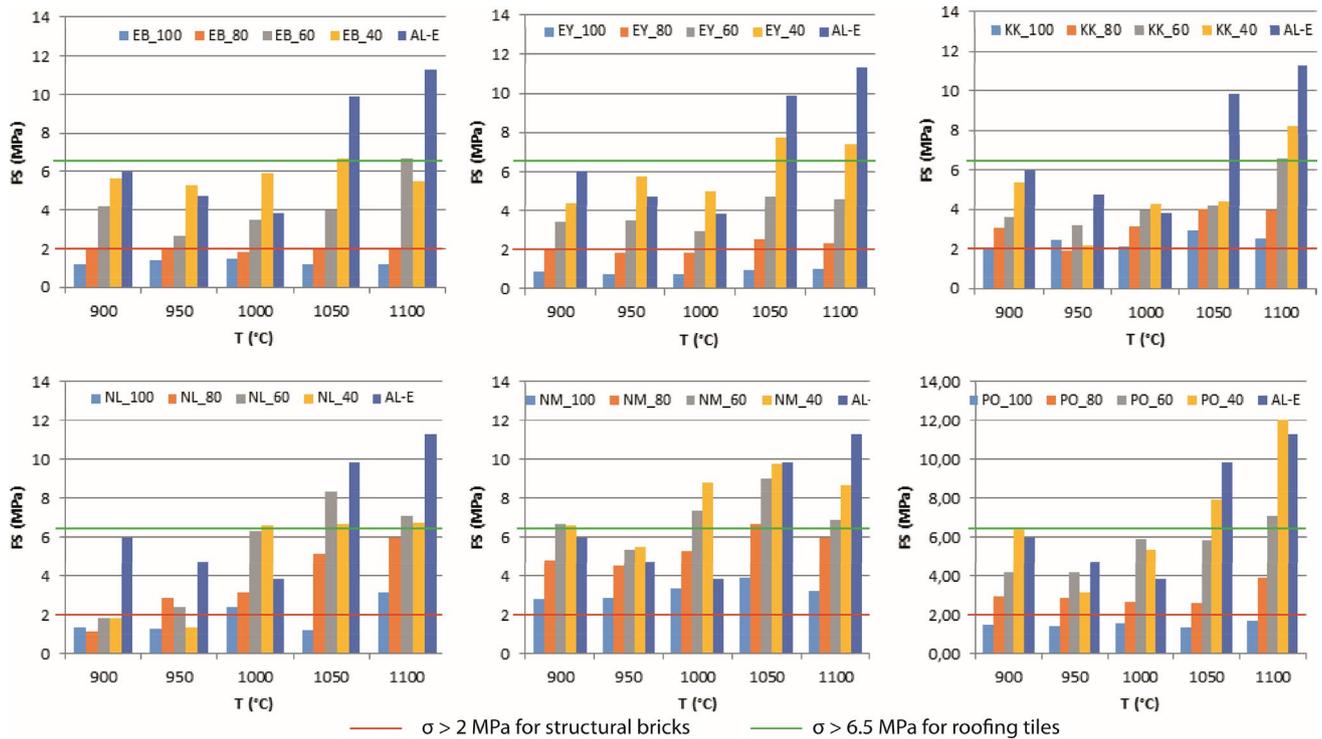


Fig. 8 Flexural strength of the fired products

except for a few samples at some temperatures (Fig. 8). The firing process heightens the flexural strength. It is due to the reduction of crack formation by decreasing porosity [28]. Higher values are obtained for NM materials. EB based product which has lower Fe₂O₃ content exhibit a low FS due to high wt% of SiO₂ (76.04%) while for EY bricks, low flexural strength is related to the high percentage of sand. Andji et al. [2] increase the mechanical strength of Gounioubé clays (Ivory Coast) by incorporating calcium clay (10 wt% CaCO₃); according to them, this is due to the formation of anorthite from the alumino-silicate content between 1100 and 1300 °C. Ergul et al. [8] conclude that low porosity ceramic products (13 wt%) and water absorption products (4 wt.%) are produced from a material consisting of 50 wt% tuffs and 50 wt% clay at a temperature of 1150 °C. In the present research, the temperatures range between 900 and 1100 °C. FS increase can be chemically related to mullite formation from 900 °C [29, 30]. Except for NL mixtures at 900 °C, the studied materials exhibit flexural strength values > 2 MPa and can be used for structural bricks manufacturing [24]. Flexural strength values quantified by Souza et al. [24] are 6.5 MPa for roofing tiles. This FS value is surpassed by NM₆₀ and NM₄₀ at 1000, 1050 and 1100 °C, by AL, NL₆₀, EY₄₀ at 1050 and 1100 °C and by KK₄₀ at 1100 °C. Fluxes amendment is needed

at 1050 and 1100 °C for the others mixtures with 60 wt% and 40 wt% of lateritic clay to increase their FS.

Lateritic clay materials from Sa'a area exhibit mineralogical and geochemical characteristics comparable to those of similar materials in the equatorial zone [31, 33]. They are predominantly silicic but characterized by relatively high Fe₂O₃ contents responsible for their red coloring. The parameters studied show the impact of the addition of alluvial clays with a low Fe₂O₃ content on these lateritic clays. The same trends are observed with the mixtures of Yaounde [5], Ayos [6] and Monatele-Ebebdá [7]. All this allows to conjecture these results to the equatorial zone.

5 Conclusions

The amendment of lateritic clay by alluvial clay changes the mineralogical and chemical properties of former materials and is favorable to the sintering at low temperatures. Mechanical characteristics such as WA and FS are improved with firing temperature but it's not the case of LS. This improvement is not always proportional to alluvial clay content and would be due to high Fe₂O₃ content on the alluvial clays of the Sanaga. The lateritic and alluvial clays mixtures of Sa'a could be used for bricks manufacture. Some compositions may be used for the production

of roofing tiles at temperatures above 1000 °C. Fluxes amendment is needed at 1050 and 1100 °C for other mixtures to increase their FS.

Acknowledgements The authors express their gratitude to GeoLabs (Sudbury-Canada) for mineralogical and chemical analyses and to Local Materials Promotion Authority (Cameroon) for physical and mechanical test.

Funding The research was supported by the state research subvention of the co-authors.

Compliance with ethical standards

Conflict of interest We have no concurrent submissions on the same topic and with this analysis data. There is no conflicts of interest.

Availability of data and material The raw data provide by the different laboratory are available.

References

- Murray HH (2007) Applied clay mineralogy: occurrences, processing and application of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite and common clays, 1st edn. Elsevier, Amsterdam
- Andji JYY, Abba Toure A, Kra G, Jumas JC, Yvon J, Blanchart P (2008) Iron role on mechanical properties of ceramics with clays from Ivory Coast. *Ceram Int* 35:571–577
- Mahmoudi S, Srasra E, Zargouni F (2008) The use of Tunisian Barremian clay in the traditional ceramic industry: optimization of ceramic properties. *Appl Clay Sci* 42:125–129
- Ngon Ngon GF, Yongue-Fouateu R, Bitom DL, Bilong P (2009) A geological study of clayey laterite and hydromorphic material of the region of Yaoundé (Cameroon): a prerequisite for local material promotion. *J Afr Earth Sci* 55:69–78
- Ngon Ngon GF, Yongue Fouateu R, Lecomte Nana GL, Bitom DL, Bilong P, Lecomte G (2012) Study of physical and mechanical applications on ceramics of the lateritic and alluvial clayey mixtures of the Yaoundé region (Cameroon). *Constr Build Mater* 31:294–299
- Ntoulala RFD, Onana VL, Kamgang Kabeyene V, Ekodeck GE (2016) Mineralogical, geochemical and mechanical characterization of the Ayos (East-Cameroon) lateritic and alluvial clayey mixtures: Suitability for building application. *J Build Eng* 5:50–56
- Onana VL, Ntoulala RFD, Ndome Effoudou E, Nguembou CY, Nguessi A, Kamgang Kabayene V (2016) Mineralogical, geochemical and geomechanical characterization of lateritic and alluvial clayey mixture products from Monatele-Ebebda, as building materials. *J Cameroon Acad Sci* 13(1 & 2):23–38
- Ergul S, Ferrante F, Pisciella P, Karamanov A, Pelino M (2009) Characterization of basaltic tuffs and their applications for the production of ceramic. *Ceram Int* 35:2789–2795
- Suchel JB, Tsalefac M (1995) Atlas regional du Sud Cameroun, ORSTOM (ed)
- Ngotue T, Nzenti JP, Barbey P, Tchoua FM (2000) The Ntui Betamba high grade gneisses: a northward extension of the pan-African Yaoundé gneisses in Cameroon. *J Afr Earth Sci* 31:369–381
- Ngotue T, Ganno S, Kouankap Nono GD, Nzenti JP (2015) Mineralogy and geochemistry of Neoproterozoic siliceous manganese formations from Ntui-Betamba (Cameroon Pan-African Fold Belt): implications for mineral exploration. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 104:1123–1138
- Dhanapandian S, Manoharan C, Ramkumar T, Gnanavel B, Sutharsan P, Shanthy M (2010) Effect of incorporation of granite and marble rejects in clay brick products: physico-mechanical analysis. *Acta Phys Pol A* 118(4):688–695
- Manoharan C, Sutharsan P, Dhanapandian S, Venkatachalapathy R, Asanulla RM (2011) Analysis of temperature effect on ceramic brick production from alluvial deposits, Tamilnadu, India. *Appl Clay Sci* 54:20–25
- Rajput RK (2008) Engineering materials. S. Chand and Company Ltd, New Delhi
- Jeridi K, Hachani M, Hajjaji W, Moussi B, Medhioub M, Lopez-Galindo A, Kooli F, Zargouni F, Labrincha J, Jamoussi F (2008) Technological behavior of some Tunisian clays prepared by dry ceramic processing. *Clay Miner* 43:339–350
- Dondi M, Guarini G, Ligas P, Palomba M, Raimondo M (2001) Chemical, mineralogical and ceramic properties of kaolinitic materials from the Tresnuraghes mining district, Western Sardinia, Italy. *Appl Clay Sci* 18:145–155
- Xu Y, Yan C, Xu B, Ruan X, Wei Z (2014) The use of urban river sediments as a primary raw material in the production of highly insulating brick. *Ceram Int* 40:8833–8840
- Segadaes AM, Carvalho MA, Acchar W (2005) Using marble and granite rejects to enhance the processing of clay products. *Appl Clay Sci* 30:42–52
- Meseguer S, Pardo F, Jordon MM, Sanfeliu T, Gonzalez I (2010) Ceramic behavior of five Chilean clays which can be used in the manufacture of ceramic tile bodies. *Appl Clay Sci* 47:372–377
- Reeves GM, Sims I, Cripps JC (2006) Clay materials used in construction. Special Publication, Geological Society, London, Eng. Geol
- Felhi M, Tlili A, Gaied ME, Montacer M (2008) Mineralogical study of kaolinitic clays from Sidi El Bader in the far north of Tunisia. *Appl Clay Sci* 39:208–217
- Marsigli M, Dondi M (1997) Plasticità delle argille italiane per laterizi e previsione del loro comportamento in foggatura. *L'Industria dei Laterizi* 46:214–222
- Nzeukou Nzeugang A, Fagel N, Njoya A, Kamgang Beyala V, Medjo Eko R, Melo Chinje U (2013) Mineralogy and physico-chemical properties of alluvial clays from Sanaga valley (Centre, Cameroon): Suitability for ceramic application. *Appl Clay Sci* 83&84:238–243
- Souza GP, Sanchez R, De Holanda JNF (2002) Characteristics and physical-mechanical properties of fired kaolinitic materials. *Cerâm* 48:102–107
- Melo UC, Kamseu E, Djangang C (2003) Effect of fluxes on the fired properties between 950–1050°C of some Cameroonian clays. *Tiles Bricks Int* 19:57–69
- Baccour H, Medhioub M, Jamoussi F, Mhiri T (2009) Influence of firing temperature on the ceramic properties of Triassic clays from Tunisia. *J Mater Process Technol* 209(6):2812–2817
- Celik H (2010) Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry. *Appl Clay Sci* 50:245–254
- Monteiro SN, Vieira CMF (2004) Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from Campos dos Goytacazes, Brazil. *Appl Clay Sci* 27:229–234
- Nzeukou Nzeugang A, El Ouahabi M, Aziwo B, Mefire MJR, Mouton HS, Fagel N (2018) Characterization of kaolin from Mankon. *NW Cameroon Clay Miner* 53(4):563–577
- Onana VL, Ntoulala RFD, Mbey JA, Ngo'o Ze A, Kabeyene KV, Ekodeck GE, (2019) Mineralogy and preliminary assessment of the potential uses of alluvial clays from Batouri (Eastern-Cameroon). *Cerâm* 65:407–415

31. Kamgang KBV, Onana VL, Ndome EP, Parisot J-C, Ekodeck GE (2008) Behaviour of REE and mass balance calculations in a lateritic profile over chlorite schists in South Cameroon. *Chem Erde - Geochem* 69(1):61–73
32. Millogo Y, Hajjaji M, Morel JC (2011) Physical properties, microstructure and mineralogy of termite mound material considered as construction materials. *Appl Clay Sci* 52:160–164
33. Moutou JM, Mbedi R, Elimbi A, Njopwouo D, Yvon J, Barres O, Ntekela HR (2012) Mineralogy and Thermal Behaviour of the

Kaolinitic Clay of Loutété (Congo-Brazzaville). *Res J Env Earth Sci* 4(3):316–324

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

II. DONNEES

Tableau A1. Matrice de corrélation des composants géochimiques dans les matériaux d'altération de la zone de Sa'a

Variables	Si	Ti	Al	Fe3+	Mn	Mg	Ca	Na	K	P	PF	Li	Rb	Cs	Sr	Ba	U	Zr	Nb	Hf	Mo	W	Ta	V	Cr	Co	Ni	LREE	HREE	REE	
Si	1,00																														
Ti	-0,41	1,00																													
Al	0,15	0,62	1,00																												
Fe3+	-0,54	0,75	0,56	1,00																											
Mn	-0,35	0,28	0,26	0,33	1,00																										
Mg	0,95	-0,30	0,30	-0,35	-0,39	1,00																									
Ca	0,91	-0,33	0,38	-0,28	-0,23	0,93	1,00																								
Na	0,97	-0,34	0,18	-0,44	-0,36	0,97	0,92	1,00																							
K	0,97	-0,33	0,26	-0,55	-0,36	0,94	0,86	0,92	1,00																						
P	-0,44	0,72	0,45	0,82	0,28	-0,34	-0,28	-0,40	-0,46	1,00																					
PF	-0,19	0,70	0,88	0,83	0,31	-0,02	0,12	-0,14	-0,15	0,72	1,00																				
Li	0,89	-0,20	0,28	-0,53	-0,36	0,88	0,73	0,84	0,96	-0,42	-0,15	1,00																			
Rb	0,87	-0,17	0,44	-0,40	-0,39	0,89	0,83	0,84	0,94	-0,35	0,06	0,94	1,00																		
Cs	0,27	0,32	0,79	0,27	-0,21	0,40	0,45	0,28	0,37	0,17	0,68	0,41	0,65	1,00																	
Sr	0,78	-0,12	0,52	-0,07	-0,26	0,83	0,94	0,82	0,74	-0,09	0,34	0,61	0,79	0,64	1,00																
Ba	0,82	-0,19	0,54	-0,14	-0,27	0,86	0,96	0,81	0,81	-0,19	0,31	0,69	0,85	0,66	0,96	1,00															
U	-0,63	0,77	0,39	0,90	0,40	-0,46	-0,47	-0,53	-0,63	0,80	0,66	-0,55	-0,52	0,05	-0,32	-0,39	1,00														
Zr	0,87	-0,26	0,01	-0,51	-0,30	0,84	0,69	0,91	0,84	-0,41	-0,33	0,83	0,71	0,05	0,56	0,53	-0,47	1,00													
Nb	0,15	0,45	0,57	0,56	0,08	0,29	0,41	0,32	0,06	0,44	0,66	0,00	0,17	0,43	0,60	0,43	0,44	0,19	1,00												
Hf	0,86	-0,26	-0,03	-0,59	-0,30	0,80	0,63	0,87	0,84	-0,44	-0,39	0,85	0,71	0,01	0,50	0,47	-0,51	0,99	0,09	1,00											
Mo	-0,20	0,40	0,61	0,82	0,23	0,00	0,14	-0,12	-0,24	0,65	0,83	-0,31	-0,12	0,40	0,29	0,26	0,68	-0,35	0,64	-0,45	1,00										
W	0,12	0,49	0,46	0,32	0,12	0,12	0,10	0,08	0,12	0,69	0,46	0,16	0,16	0,23	0,20	0,13	0,36	0,13	0,31	0,15	0,30	1,00									
Ta	-0,18	0,76	0,59	0,59	0,18	-0,12	0,02	-0,08	-0,19	0,62	0,72	-0,17	0,00	0,45	0,29	0,12	0,55	-0,12	0,79	-0,15	0,46	0,49	1,00								
V	-0,46	0,89	0,65	0,94	0,27	-0,27	-0,25	-0,34	-0,42	0,74	0,82	-0,36	-0,25	0,37	-0,02	-0,10	0,88	-0,35	0,61	-0,41	0,70	0,36	0,72	1,00							
Cr	-0,44	-0,06	-0,20	0,45	0,16	-0,42	-0,31	-0,43	-0,58	0,57	0,19	-0,65	-0,59	-0,24	-0,22	-0,31	0,36	-0,49	0,06	-0,54	0,43	0,24	0,00	0,16	1,00						
Co	-0,43	0,92	0,65	0,85	0,33	-0,30	-0,29	-0,38	-0,38	0,77	0,79	-0,27	-0,21	0,39	-0,09	-0,14	0,78	-0,37	0,43	-0,39	0,51	0,39	0,66	0,88	0,14	1,00					
Ni	-0,38	0,75	0,59	0,82	0,26	-0,28	-0,23	-0,37	-0,37	0,90	0,80	-0,31	-0,21	0,39	0,00	-0,08	0,71	-0,40	0,40	-0,43	0,60	0,70	0,63	0,78	0,49	0,83	1,00				
LREE	0,78	-0,01	0,30	-0,39	-0,35	0,72	0,65	0,76	0,80	-0,13	0,00	0,84	0,85	0,47	0,67	0,62	-0,42	0,77	0,26	0,80	-0,26	0,44	0,24	-0,20	-0,44	-0,12	-0,04	1,00			
HREE	-0,30	-0,33	-0,52	-0,05	0,23	-0,38	-0,29	-0,34	-0,39	0,02	-0,35	-0,47	-0,57	-0,66	-0,44	-0,41	-0,04	-0,33	-0,39	-0,33	-0,04	-0,37	-0,47	-0,28	0,43	-0,21	-0,25	-0,59	1,00		
REE	-0,30	-0,34	-0,52	-0,05	0,23	-0,38	-0,29	-0,34	-0,39	0,02	-0,35	-0,47	-0,56	-0,66	-0,44	-0,41	-0,05	-0,33	-0,39	-0,33	-0,04	-0,37	-0,47	-0,29	0,43	-0,21	-0,25	-0,58	1,00	1,00	

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

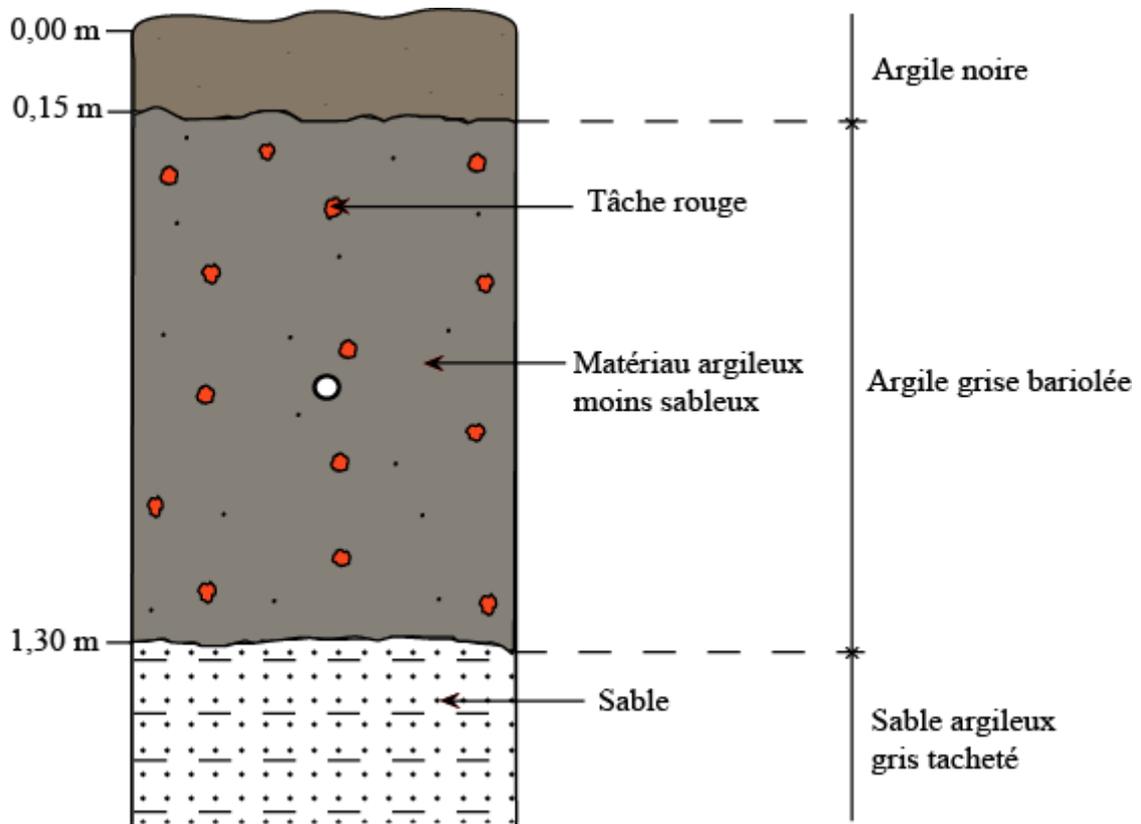


Figure A1. Profil des matériaux alluvionnaires de la région de Sa'a (centre Cameroun).

Tableau A2. Codes Munsell des couleurs des briquettes à base d'argiles latéritiques
et d'argiles alluviales de Sa'a après cuisson

Matériau	% argile latéritique	900°C	950°C	1000°C	1050°C	1100°C
AL	00	2,5YR 7/8	2,5YR 7/8	2,5YR 7/8	2,5YR 6/8	2,5YR 6/6
	40	2,5YR 7/8	2,5YR 7/8	2,5YR 7/8	2,5YR 6/8	2,5YR 5/8
EB	60	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 6/6	2,5YR 5/6	2,5YR 4/6
	80	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 6/6	2,5YR 5/8	2,5YR 4/8
	100	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 5/8	2,5YR 4/6	2,5YR 3/6
NK	40	2,5YR 6/8	2,5YR 6/6	2,5YR 6/6	2,5YR 5/8	2,5YR 5/6
	60	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 6/6	2,5YR 5/8	2,5YR 4/8
	80	2,5YR 6/8	2,5YR 5/8	2,5YR 6/6	2,5YR 4/6	2,5YR 3/6
	100	2,5YR 6/8	2,5YR 5/6	2,5YR 5/6	2,5YR 3/6	2,5YR 3/3
NA	40	2,5YR 6/6	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 5/6	2,5YR 4/6
	60	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 5/6	2,5YR 4/8
	80	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 6/6	2,5YR 4/8	2,5YR 4/6
	100	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 5/8	2,5YR 3/6
NE	40	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 4/6
	60	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 5/6	2,5YR 3/6
	80	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/6	2,5YR 4/6	2,5YR 4/6
	100	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 4/6	2,5YR 3/6
EZ	40	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 4/8	2,5YR 4/6
	60	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/6	2,5YR 4/6
	80	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/6	2,5YR 5/6	2,5YR 4/4
	100	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 4/6	2,5YR 4/4
NM1	40	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 6/6	2,5YR 5/6
	60	2,5YR 6/6	2,5YR 6/6	2,5YR 6/6	2,5YR 4/8	2,5YR 4/6
	80	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 4/6	2,5YR 4/4
	100	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 4/8	2,5YR 3/4
NM	40	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 5/6	2,5YR 4/4
	60	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 5/8	2,5YR 4/8	2,5YR 4/6
	80	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 4/8	2,5YR 4/6	2,5YR 4/4
	100	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 4/6	2,5YR 4/4	2,5YR 3/4
KO	40	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/6
	60	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/6	2,5YR 5/6	2,5YR 4/6
	80	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/6	2,5YR 4/6	2,5YR 3/6
	100	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 4/6	2,5YR 3/6
EY	40	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 6/6	2,5YR 5/6
	60	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/6	2,5YR 4/4
	80	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 3/4	2,5YR 2,5/3
	100	2,5YR 5/6	2,5YR 5/6	2,5YR 5/6	2,5YR 3/3	2,5YR 3/2
PO	40	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 4/8	2,5YR 4/6
	60	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 4/6	2,5YR 4/4
	80	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/6	2,5YR 3/4
	100	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 4/4	2,5YR 4/4
NS	40	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/6
	60	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 6/8	2,5YR 5/6	2,5YR 4/6
	80	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 4/8	2,5YR 4/6
	100	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 5/8	2,5YR 4/6	2,5YR 3/4