

UNIVERSITE DE YAOUNDE I  
FACULTE DES SCIENCES

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



UNIVERSITY OF YAOUNDE I  
FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE  
PROGRAMME  
SCIENCES-TECHNOLOGY  
AND GEOSCIENCES

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE  
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES



URFD-GEOSCIENCES ET APPLICATIONS

LABORATOIRE DE GEOSCIENCES DES FORMATIONS SUPERFICIELLES ET  
APPLICATIONS

LABORATORY OF GEOSCIENCES OF SUPERFICIAL FORMATIONS AND  
APPLICATIONS

**CARACTERISATION MINERALOGIQUE,  
GEOCHIMIQUE ET VALORISATION EN  
CERAMIQUE DES MATERIAUX ARGILEUX  
DE NGAT, MBALMAYO, SUD-CAMEROUN**

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

**Option** : Géosciences des Formations Superficielles et Applications

**Spécialité** : Géologie Minière et ressources pétrolières

Par

**NGO MAPUNA Elise Colette**

Matricule : 09X0424

Master en Sciences de la Terre

Sous la direction de

**BILONG Paul**

*Professeur*

Année académique 2024-2025

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

\*\*\*\*\*

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

\*\*\*\*\*

**CENTRE DE RECHERCHE ET  
DE FORMATION DOCTORALE  
EN SCIENCES TECHNOLOGIE  
ET GÉOSCIENCES**

\*\*\*\*\*



REPUBLIC OF CAMEROON

\*\*\*\*\*

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

\*\*\*\*\*

**POSTGRADUATE SCHOOL OF  
SCIENCE, TECHNOLOGY  
AND GEOSCIENCES**

\*\*\*\*\*

## ATTESTATION DE CORRECTION DE THESE DE DOCTORAT/PhD

\*\*\*\*\*

**Spécialité : Géologie Minière et Ressources Pétrolières**

**Option : Géosciences des Formations Superficielles**

**Nom et Prénoms de la candidate : NGO MAPUNA Elise Colette**

**Matricule : 09X0424**

**Titre de la thèse : « Caractérisation minéralogique, géochimique et valorisation en céramique des matériaux argileux de Ngat Cameroun, Mbalmayo, Sud-Cameroun ».**


**Date de soutenance : Vendredi, le 21 février 2025.**

Nous soussignés, membres du jury de soutenance de la thèse de Doctorat PhD, attestons que la candidate 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.

Fait à Yaoundé, le 13 Mai 2025

**Le Président du Jury**

  
R. YONGRE

**Les Membres**

  
N. ONANA

UNIVERSITE DE YAOUNDE I  
FACULTE DES SCIENCES

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



UNIVERSITY OF YAOUNDE I  
FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE  
PROGRAMME  
SCIENCES-TECHNOLOGY  
AND GEOSCIENCES

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

URFD-GEOSCIENCES ET APPLICATIONS

LABORATOIRE DE GEOSCIENCES DES FORMATIONS SUPERFICIELLES ET  
APPLICATIONS

LABORATORY OF GEOSCIENCES OF SUPERFICIAL FORMATIONS AND  
APPLICATIONS

**CARACTERISATION MINERALOGIQUE,  
GEOCHIMIQUE ET VALORISATION EN  
CERAMIQUE DES MATERIAUX ARGILEUX  
DE NGAT, MBALMAYO, SUD-CAMEROUN**

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

**Option** : Géosciences des Formations Superficielles et Applications

**Spécialité** : Géologie Minière et ressources pétrolières

Par

**NGO MAPUNA Elise Colette**

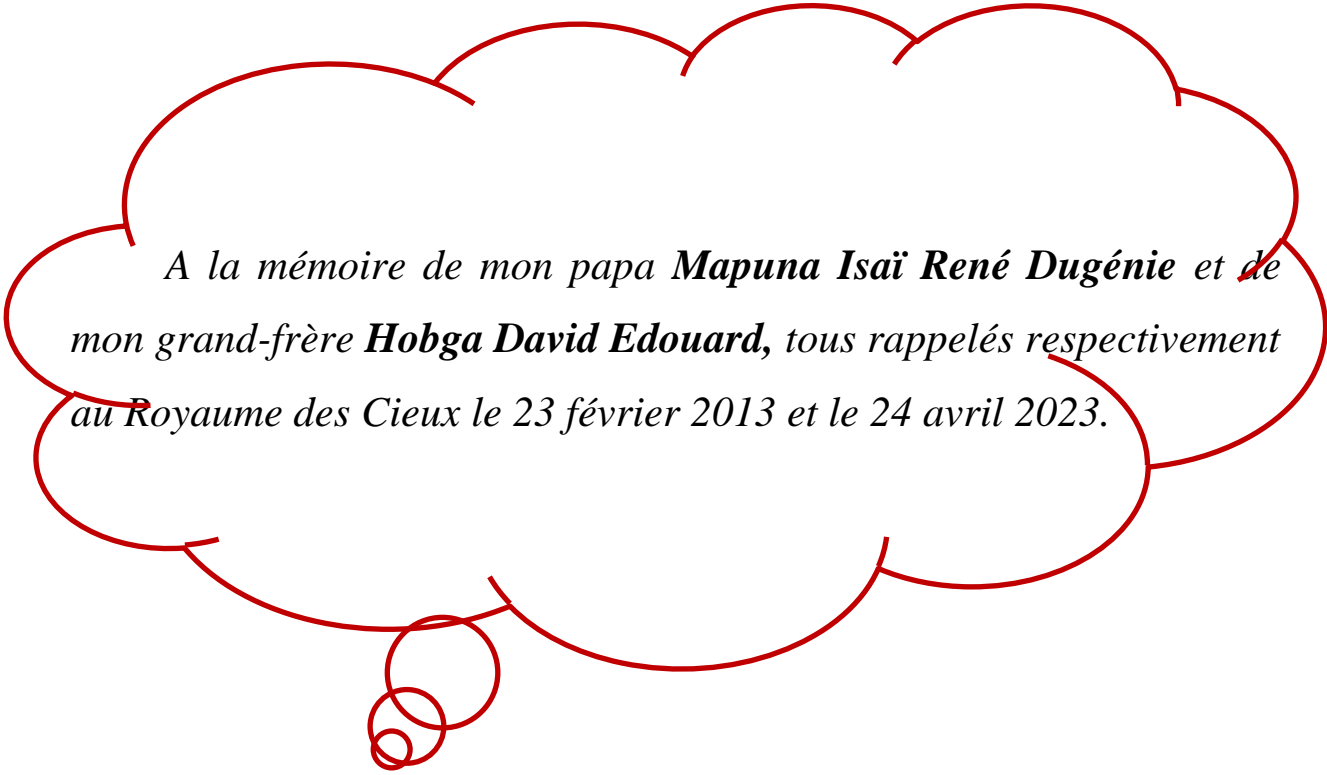
Matricule : 09X0424

**BILONG Paul**

*Professeur*

**Année académique 2024-2025**

*«Il y a un temps pour tout, un temps pour toute chose sous les  
cieux», **Ecclésiaste 3: 1.***



*A la mémoire de mon papa **Mapuna Isai René Dugénie** et de mon grand-frère **Hobga David Edouard**, tous rappelés respectivement au Royaume des Cieux le 23 février 2013 et le 24 avril 2023.*

# TABLE DES MATIERES

<b>DEDICACE</b> .....	Erreur ! Signet non défini.
<b>TABLE DE MATIERES</b> .....	<b>III</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>X</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>XIII</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>XVI</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES</b> .....	<b>XVIII</b>
<b>RESUME</b> .....	<b>XX</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XXI</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>1</b>
I. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE.....	2
II. OBJECTIFS DE L'ETUDE .....	3
III. ORGANISATION DU MEMOIRE.....	4
<b>PREMIERE PARTIE : REVUE DE LA LITTERATURE ET METHODOLOGIE</b> .....	<b>5</b>
<b>CHAPITRE I. CADRE NATUREL ET CONTEXTE GEOLOGIQUE DU SECTEUR D'ETUDE</b> .....	<b>6</b>
I. CADRE NATUREL .....	6
I.1. Localisation .....	6
I.2. Climat .....	6
I.3. Sols .....	8
I.4. Végétation.....	10
I.5. Géomorphologie .....	11
I.5.1. Hydrologie .....	11
I.5.2. Orographie .....	12
II. CONTEXTE GEOLOGIQUE .....	13
II.1. Géologie générale.....	13
II.2. Géologie du secteur d'étude .....	14

III. GEOGRAPHIE HUMAINE ET ECONOMIQUE .....	15
<b>CHAPITRE II. GENERALITES SUR LES ARGILES ET LA CERAMIQUE .....</b>	<b>18</b>
I. ARGILE ET MATERIAUX ARGILEUX .....	18
I.1. Définition.....	18
I.2. Genèse et évolution .....	19
I.3. Classification .....	21
I.4. Minéraux associés.....	21
I.5. Secteurs d'utilisation et valeur commerciale des matériaux argileux .....	22
I.6. Propriétés des argiles pour produits de terres cuites.....	23
I.6.1. Granulométrie .....	23
I.6.2. Plasticité .....	23
I.3.3. Composition minéralogique et chimique .....	24
II. CERAMIQUE.....	25
II.1. Définition .....	25
II.2. Classification des produits céramiques .....	25
II.2.1. Selon leur application .....	25
II.2.2. Selon leur mode d'élaboration et la forme finale .....	25
II.2.3. Selon leur composition chimique .....	26
II.3. Matières premières en céramique.....	26
II.4. Produits céramiques dans la construction .....	27
II.4.1. Terres cuites.....	28
II.4.2. Terres cuites vernissées .....	28
II.4.3. Terres cuites réfractaires.....	28
II.4.4. Briques .....	28
II.4.5. Faiences .....	28
II.4.6. Grès.....	29
II.4.7. Mosaïques .....	29
III. CUISSON DES PRODUITS CERAMIQUES .....	29
IV. STABILISATION DES BRIQUES DE TERRE.....	30

IV.1. Historique des briques de terre .....	30
IV.2. Historique des briques de terre au Cameroun.....	31
IV.3. Stabilisation proprement dite.....	31
IV.3.1. Sables et graviers .....	32
IV.3.2. Fibres.....	33
IV.3.3. Bitume.....	33
IV.3.4. Résine.....	34
IV.3.5. Ciment.....	34
IV.3.6. Chaux .....	34
IV.4. Stabilisation à la Cendre du <i>Pycnanthus angolensis</i> .....	35
<b>CHAPITRE III. MATERIELS ET PROCEDURES ANALYTIQUES.....</b>	<b>36</b>
I. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE .....	36
II. METHODES D'ETUDE SUR LE TERRAIN.....	36
II.1. Sondage et échantillonnage .....	36
II.2. Description macroscopique des matériaux.....	37
II.2.1. Couleur des matériaux .....	37
II.2.2. Texture des matériaux.....	38
II.3. Etiquetage des matériaux.....	38
III. METHODES D'ETUDE EN LABORATOIRE .....	38
III.1. Tests physico-chimiques .....	38
III.1.1. Humidité résiduelle ou teneur en eau naturelle (W).....	38
III.1.2. Granulométrie.....	39
III.1.3. Densimétrie .....	41
III.1.4. Porosité (n) .....	43
III.1.5. Limites de Consistance ou Limites d'Atterberg.....	43
III.1.6. Teneur en matière organique .....	45
III.1.7. Potentiel d'hydrogène (pH).....	46
III.1.8. Capacité d'échange cationique (CEC) .....	47
III.2. Analyses minéralogiques .....	47

III.2.1. Diffraction des rayons X .....	47
II.2.2. Spectrométrie infrarouge .....	48
III.2.3. Analyse thermique différentielle (ATD) et analyse thermogravimétrique (ATG) .....	49
III.3. Analyses géochimiques.....	50
III.3.1. Eléments majeurs .....	50
III.3.1. Eléments traces et terres rares .....	50
III.4. Analyse minéralogique sémi-quantitative.....	51
III.5. Essais céramiques .....	52
III.5.1. Confection des éprouvettes .....	52
III.5.2. Séchage.....	52
III.5.3. Cuisson .....	53
III.5.4. Détermination des paramètres géotechniques .....	53
III.5.4.4. Résistance à la flexion (RF) .....	56
III.5.4.5. Résonance.....	57
III.5.4.6. Cohésion.....	57
III.6. Effet de la cendre .....	58
<b>PARTIE II: RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>59</b>
<b>CHAPITRE IV. PETROLOGIE DES MATERIAUX ARGILEUX DE NGAT .....</b>	<b>60</b>
I. PETROLOGIE DES MATERIAUX ARGILEUX DE NGAT-CARRIERE.....	61
I.1. Description macroscopique .....	61
I.2. Caractérisation physico-chimique .....	62
I.2.1. Humidité résiduelle .....	64
I.2.2. Analyse granulométrique .....	64
I.2.3. Limites d'Atterberg.....	66
I.2.4. Densimétrie .....	68
I.2.5. Porosité (n).....	68
I.2.6. Potentiel d'hydrogène (pH).....	69
I.2.7. Matière organique .....	69
I.2.8. Carbone organique .....	70

I.2.9. Capacité d'échange cationique .....	70
I.3. Caractérisation minéralogique .....	71
I.3.1. Diffractogrammes des rayons X .....	70
I.3.2. Microscopie infra-rouge.....	71
I.4. Géochimie des matériaux argileux de Ngat-Carrière .....	73
I.4.1. Distribution des éléments majeurs .....	73
I.4.2. Distribution des éléments traces .....	76
I.4.3. Distribution des terres rares .....	78
II. PETROLOGIE DES MATERIAUX DE NGAT-PLANTATION .....	81
II.1. Description macroscopique .....	81
II.2. Caractérisation physico-chimique .....	81
II.2.1. Humidité résiduelle.....	82
II.2.2. Granularité .....	82
II.2.3. Limites d'Atterberg .....	84
II.2.4. Densimétrie.....	86
II.2.5. Porosité (n) .....	87
II.2.6. Potentiel d'hydrogène (pH) .....	87
II.2.7. Matière organique (MO).....	87
II.2.8. Teneur en carbone organique (CO) .....	87
II.3. Minéralogie des matériaux argileux de Ngat-plantation .....	88
II.3.1. Diffractogrammes de rayons X.....	88
II.3.2. Spectrométrie infrarouge .....	88
II.3.3. Comportement thermique des argiles de Ngat-Plantation .....	89
II.4. GEOCHIMIE DES MATERIAUX ARGILEUX DE NGAT-PLANTATION .....	92
II.4.1. Distribution des éléments majeurs.....	92
II.4.2. Distribution des éléments traces .....	94
II.4.3. Distribution des éléments terres rares.....	98
II.4.3. Distribution des éléments terres rares.....	99
III. Analyse minéralogique sémi-quantitative .....	99

<b>CHAPITRE V. PROPRIETES CERAMIQUES DES MATERIAUX ARGILEUX DE NGAT .....</b>	<b>103</b>
I. PROPRIETES CERAMIQUES DES MATERIAUX DE NGAT-CARRIERE .....	103
I.1. Retrait linéaire .....	103
I.2. Perte de masse .....	103
I.3. Absorption d'eau .....	104
I.4. Porosité .....	104
I.5. Résistance à la flexion .....	105
I.6. Densité apparente.....	105
I.7. Coloration des produits cuits .....	105
I.8. Sonorité et cohésion.....	106
II. EPROUVETTES DES MATERIAUX ARGILEUX DE NGAT-PLANTATION .....	108
II.1. Retrait linéaire .....	110
II.2. Perte de masse .....	110
II.3. Absorption d'eau .....	110
II.4. Résistance à la flexion.....	110
II.5. Couleur .....	111
II.6. Son et cohésion.....	111
III. MINERALOGIE DES EPROUVETTES APRES CUISSON.....	111
IV. EFFET DE LA CENDRE SUR LES EPROUVETTES DE NGAT .....	113
IV.1. Pétrologie de la cendre.....	115
IV.1.1. Description macroscopique de la cendre .....	115
IV.1.2. Composition minéralogique et géochimique de la cendre .....	115
V.1.4. Géochimie de la cendre .....	116
V. COMPOSITION GRANULOMETRIQUE DES MELANGES .....	119
VI. PROPRIETES CERAMIQUES DES MELANGES .....	120
VI.1. Retrait linéaire .....	120
VI.2. Densité apparente.....	121
VI.3. Perte de masse.....	121
VI.4. Absorption d'eau .....	121

VI.5. Résistance à la flexion .....	121
VI.6. Couleur, cohésion et résonance .....	121
VII. MINERALOGIE ET GEOCHIMIE DES MELANGES A 10 % DE LA CENDRE APRES CUISSON.....	124
VII.1 Minéralogie .....	126
VII.2. Géochimie .....	126
<b>CHAPITRE VI. INTERPRETATION ET DISCUSSION .....</b>	<b>128</b>
I. PETROLOGIE DES MATERIAUX ARGILEUX DE NGAT .....	128
I.1. Traits morphologiques .....	128
I.2. Caractères physico-chimiques .....	128
I.3. Caractères minéralogiques et géochimiques.....	130
II. PROPRIETES CERAMIQUE DES MATERIAUX DE NGAT .....	134
II.1. Propriétés physiques et évaluation céramique des argiles latéritiques de Ngat .....	134
II.2. Propriétés mineralogiques et évaluation ceramique des matériaux argileux de Ngat .....	140
II.3. Propriétés geochimiques et évaluation ceramique des matériaux argileux de Ngat	141
II. 4. Proprietes technologiques des produits ceramiques.....	142
III. INFLUENCE DE L'EFFET DE LA CENDRE SUR LES PROPRIETES DES BRIQUES DE TERRE CUITES .....	145
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>147</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>150</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>174</b>

# REMERCIEMENTS

Le cœur rempli de reconnaissance et de gratitude, je voudrais rendre grâce au **Dieu Tout-Puissant** qui m'a permis d'achever cette thèse malgré de nombreuses difficultés.

Ce travail est le fruit de la collaboration, et du soutien financier, matériel, physique et spirituel de nombreuses personnes. Il m'a permis de vivre une expérience très enrichissante au niveau académique et humain.

J'exprime ma profonde gratitude envers le Professeur **Bilong Paul** mon directeur de thèse, qui malgré ses lourdes responsabilités m'a suivi de bout en bout dans la réalisation de ce projet.

Je suis extrêmement reconnaissante envers le Professeur **Ndjigui Paul-Désiré**, qui malgré ses multiples occupations administratives et académiques, m'a tenu la main. Sa patience, son abnégation, son souci de précision et de concision, sa rigueur, son goût du travail bien fait, son esprit méthodique, ses conseils avisés et son soutien dans tous les domaines de la vie et en toutes circonstances ont été d'une aide incommensurable pour l'aboutissement de ce chef d'œuvre. Je suis heureuse qu'il trouve ici le témoignage de toute ma reconnaissance. Professeur une fois de plus **MERCI**.

Un grand merci est adressé au Professeur **Onana Vincent Laurent**, pour toute la peine qu'il a prise lors des différentes campagnes de terrain, pour le climat de fraternité qu'il a créé entre nous. Le temps qu'il a accepté de me consacrer, ses multiples conseils, son soutien psychologique et ses encouragements tout au long de ces années m'ont permis d'avancer dans les moments les plus difficiles.

Je dis également ma profonde reconnaissance aux Professeurs **Elisé Sababa** et **Ntouala Donald Firmin** pour leur patience, leur aide et pour les nombreux conseils.

J'exprime ma sincère gratitude aux **enseignants du Département des Sciences de la Terre de Yaoundé I** pour leur encadrement et conseils tout au long des années passées dans cette institution.

Je voudrais remercier également tous ceux qui m'ont aidé dans les différentes analyses, leur disponibilité et leurs multiples conseils. Je pense tout particulièrement aux Professeurs **Elimbi Antoine** et **Mbey Jean Aimé**, tous deux enseignants au Département de

Chimie Inorganique de l'Université de Yaoundé I et aussi au Professeur *Adate Thierry* de l'Université de Lausanne en Suisse.

Je voudrais remercier la secrétaire du Département des Sciences de la Terre, *Eyenga Marie Dorine* pour sa grandeur d'âme. Marie Do'o comme j'aime bien t'appeler Merci infiniment.

Ma profonde reconnaissance s'adresse à la *Mission de Promotion des Matériaux Locaux* pour m'avoir accordé des stages académiques dans leurs locaux, plus précisément au Maître de Recherches *Ndiguï Billong Guy*, aux messieurs *Suilabayuy Loweh* (le chef de laboratoire), et *Medzi Michel* pour tout le temps qu'ils m'ont accordé pour la manipulation de mes matériaux.

Au cours de ces nombreuses années de recherche, j'ai connu une nouvelle famille, celle du «*labo*», avec laquelle j'ai partagé les bons comme les mauvais moments. Je pense premièrement à mes aînés sur le plan académique, les Docteurs *Teutsontap Teussong, Mbanga Nyobe Jules, Bisse Salomon, Ngo'o Ze Arnaud, Ndzié Mvindi Thierry, Nyemb Bayamack Joel, Koa Na Lebogo Serges, Tene Joel et aussi à Medja Ekobo Jean Marc, Ngami Plastini, Nguimbous Rosalie, Assomo Ngono Gaël, Ngo Mandeng Francine Sidonie, Doum Mamotoc Justy, Mbiatso Yimgnia Théodore, Kessoum Adamou Jean Marc, Magnekou Takamte Rufine et NgoBassaheg Malong Florence* pour tous les conseils et l'aide qu'ils ont bien voulu me prodiguer. Deuxièmement à mes promotionnaires sur le plan académique les Docteurs *Ekoa Bessa Arnel, Ongboye Bassanak Paola, à Kenna Hermine Suzinie; Ngo Billong Pauline Totancine; Deffo Ferdinand et Secke Boris* pour tous les moments passés au laboratoire et pour les nombreux services qu'ils ont bien voulu me rendre. Troisièmement, je pense à mes cadets qui m'ont offert leur disponibilité et leur aide multiforme, il s'agit de *Njimanu Njong Vanisa, Menonmakoudji Codjo, Bayiha Paul, Tchokoté Song Céleste, Tsabassong Juliënne, Yonga Franck, Ambassa Bella, Ngo Ndje Ndjebet, Egbe Grace Besseng et Segue Willy*. Puissent pour ces derniers de trouver dans l'achèvement de ce travail les motivations dont ils ont besoin pour aller jusqu'au bout de leur thèse de Doctorat.

Un merci particulier à *Djou Ernest Serges, Gouban Hamadjida et Enock Embom Christophe*, sans qui certains volets de ce mémoire ne seraient achevés.

Un merci aux populations de Ngat, pour leur compréhension et leur assistance, en particulier à monsieur *Bekono Paul* notre guide sur le terrain pour son aide et sa disponibilité.

Un merci particulier aux familles *Ndog-Mbogmal* par Dibang et *Nyambon* par Nguibassal Komol.

Merci à mon feu père **Mapuna Isai René Dugénie**, «**Pacho**» comme je t'appelais affectueusement, je ne sais quoi dire pour décrire ce que tu as fait pour nous tes enfants. Tout ce que je peux dire c'est que tu as été un père aimant, attentionné et soucieux du devenir de tes enfants. Je me rappelle de tous les sacrifices que tu as faits particulièrement pour moi. Tout ce que je regrette c'est que tu sois parti très tôt mais je sais que quel que soit l'endroit où tu te trouves, tu es fière de moi, merci mon amour de papounet pour tout.

Madame **veuve Mapuna née Ngo Nonga Marie Madeleine Hypéra**, mère merci pour tant d'affection et de souffrances endurées. Je sais que tu aurais bien voulu voir encore ton mari vivant afin de célébrer ensemble ce particulier évènement. Mais hélas, le destin en a décidé autrement. Maman merci pour ton intarissable soutien et ta compréhension jamais prise en défaut.

Je n'oublie pas mes frères et sœurs: **Matimbhe Ma Mapouna Edouard, Nonga Mapuna Joseph René, Mapuna Paul Landry, Onana Yves; Mbog Nguene Vidal, Nonga Ndoum Joseph, Ngue Njayig Patrice, Ngo Mapuna Emilie Flore épouse Ngan Matip, Ngo Mapuna Pauline Maxi épouse Ndjock Lissou, Ngo Mapuna Suzanne Marie épouse Sikam Tchokote et Ngo Tjock Rose épouse Mbenda**. Merci pour votre soutien surtout moral qui m'a permis de cheminer dans un esprit serein et une ambiance relativement agréable pendant toutes ces années.

Toute ma gratitude va à l'endroit de mon beau-frère **Ngan Matip Jean-Pierre**. Celui-là qui m'a ouvert les portes de sa maison en Octobre 2009, pour toute sa disponibilité, sa patience et son soutien incommensurable. Tu as toujours eu confiance en moi et m'a encouragé à poursuivre dans cette voie. «**Nlom**» tu as toujours été là pour moi, quand même j'étais au bord du découragement. Merci pour ton amour et ton soutien multiforme.

Au révérend Pasteur **Nyemeck Oum Raymond**, et à toute la **Jeunesse d'Action Protestante et Evangélique (J.A.P.E)** de la paroisse Oyom-Abang Centre, je leur dis merci pour leur soutien et leurs multiples prières.

Je ne pourrai terminer ces remerciements sans y associer tant d'autres, dont leurs noms n'ont pas été cités par oubli et sans le soutien desquels je n'aurai pas achevé ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma plus profonde gratitude, de mon immense reconnaissance pour toutes ces années de soutien sans faille. Je ne pourrai jamais assez les en remercier.

# LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte de localisation de la zone d'étude. ....	7
Figure 2: Diagramme ombrothermique du secteur d'étude. ....	9
Figure 3 : Vue de la végétation du secteur d'étude .....	11
Figure 4: Réseau hydrographique de la zone d'étude. ....	12
Figure 5: Carte des unités morphologiques de la zone d'étude.....	14
Figure 6: Esquisse géologique du Sud-Cameroun. ....	16
Figure 7: Evolution des matériaux primaires et formation des argiles .....	20
Figure 8: Domaines d'application des argiles. ....	22
Figure 9: Prélèvement des matériaux .....	37
Figure 10: Matériels de détermination des limites d'Atterberg. ....	46
Figure 11: Presse hydraulique de laboratoire .....	53
Figure 12: démarche pour la fabrication des éprouvettes. ....	54
Figure 13: Mode opératoire relatif à la détermination du taux d'absorption d'eau. ....	56
Figure 14: Mode opératoire relatif à la détermination de la résistance à la flexion. ....	57
Figure 15: Carte des points de prélèvement des échantillons. ....	60
Figure 16: Photographie des matériaux argileux de Ngat-Carrière.....	63
Figure 17: Humidité résiduelle des matériaux de Ngat-Carrière.....	64
Figure 18: Granularité des matériaux argileux de Ngat-Carrière.....	65
Figure 19: Projection des matériaux de Ngat-carrière dans le diagramme textural belge. ....	66
Figure 20: Position des matériaux de Ngat-carrière dans l'abaque de plasticité de Casagrande .....	68
Figure 21: Diffractogrammes des rayons X des matériaux argileux de Ngat-Carrière.....	72
Figure 22: Spectres d'absorption infrarouge des matériaux étudiés .....	75
Figure 23: Composition en éléments majeurs dans les matériaux argileux de Ngat-Carrière. ....	77
Figure 24: Spectres des terres rares normalisés par rapport à la chondrite .....	81

Figure 25: Répartition graphique des valeurs de l'humidité résiduelle des matériaux de Ngat-Plantation. ....	82
Figure 26: Répartition granulométrique des matériaux argileux de Ngat-Plantation. ....	83
Figure 27: Courbes granulométriques des matériaux argileux de Ngat-Plantation.....	84
Figure 28: Diagramme textural de Picard montrant le positionnement des matériaux de Ngat-Plantation. ....	85
Figure 29: Positionnement des matériaux argileux de Ngat-plantation dans le diagramme de Casagrande.....	86
Figure 30: Diffractogrammes des rayons X des matériaux argileux de Ngat-Plantation.....	89
Figure 31 : Spectre des infra rouges des matériaux de Ngat-plantation.....	90
Figure 32: Courbes ATD/ATG des matériaux de Ngat-Plantation .....	91
Figure 33: Composition en éléments majeurs (%) des matériaux argileux de Ngat-Plantation. ....	93
Figure 34: Diagrammes de Harker de certains éléments majeurs. ....	95
Figure 35: Diagrammes de Harker entre le SiO <sub>2</sub> et certains éléments traces.....	97
Figure 36: Diagrammes binaires entre le Zr et certains éléments traces.....	98
Figure 37: Spectres des terres rares normalisés par rapport à la chondrite .....	101
Figure 38: Histogrammes de variation de la composition sémi-quantitative des matériaux de Ngat. ....	102
Figure 39: Histogrammes de variation des propriétés céramiques des éprouvettes de Ngat-Carrière. ....	107
Figure 40: Photographies des éprouvettes des matériaux de Ngat-Carrière. ....	109
Figure 41: Histogrammes de variation des propriétés céramiques des éprouvettes de Ngat-Plantation. ....	112
Figure 42: Minéralogie des spécimens cuits . ....	114
Figure 43: Photographie de la cendre.....	115
Figure 44: Diffractogramme des rayons X de la cendre de <i>Pycnanthus angolensis</i> . ....	116
Figure 45: Variation de la composition chimique de la cendre.....	117
Figure 46. Composition granulométrique des melanges.....	120

Figure 47: Histogrammes de variation des propriétés céramiques des mélanges à la cendre de Ilomba. ....	123
Figure 48: photographie des éprouvettes issus du mélange entre le matériau NPA4 et la cendre. ....	125
Figure 49: Diffractogrammes des Rayon X du matériau NPA4 mélangé à 10 % de la cendre. ....	126
Figure 50: Position des matériaux de Ngat-Carière dans le diagramme triangulaire de porosité et perméabilité.....	129
Figure 51 : Covariation comparée ICV-CIA dans les matériaux argileux de Ngat. ....	132
Figure 52: Covariation de PAF et IOL montrant le processus de formation des matériaux de Ngat. ....	132
Figure 53: Diagramme ternaire $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ pour les matériaux de Ngat.....	133
Figure 54: Position des matériaux de Ngat dans le diagramme de Winkler .....	136
Figure 55: Projection des matériaux de Ngat dans le diagramme de McNally.....	137
Figure 56: Position des matériaux argileux dans le diagramme de plasticité de Marsigli et Dondi.....	139
Figure 57: Position des matériaux argileux dans le diagramme ternaire $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{+Fe}_2\text{O}_3\text{+MgO+CaO+Na}_2\text{O+K}_2\text{O}$ de Fiori et al .....	143

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Répartition statistique mensuelle des pluies et des températures dans la région de Yaoundé.....	8
Tableau 2: Composition chimique des argiles utilisées dans la fabrication des produits de terre cuite.....	24
Tableau 3: Substances entrant dans la fabrication des produits céramiques.....	27
Tableau 4: Températures usuelles de cuisson des produits céramiques.....	30
Tableau 5: Composition des différents prélèvements .....	40
Tableau 6: Humidité résiduelle et granularité des matériaux argileux de Ngat-Carrière.....	65
Tableau 7: Limites de consistance des matériaux argileux de Ngat carrière. ....	67
Tableau 8: Densimétrie, porosité et pH des matériaux du site de Ngat-Carrière.....	69
Tableau 9: Valeurs de MO, CO et CEC des échantillons de matériaux argileux de Ngat-Carrière. ....	71
Tableau 10: Bandes caractéristiques des spectres infrarouges.....	73
Tableau 11:Composition en éléments majeurs (%) des matériaux argileux de Ngat-Carrière.	76
Tableau 12: Composition chimique (en ppm) en éléments traces des matériaux argileux de Ngat-Carrière. ....	79
Tableau 13: Teneurs en rares terres (ppm) des matériaux argileux de Ngat.....	80
Tableau 14: Composition granulométrique et humidité résiduelle des matériaux de Ngat-plantation (en %). ....	83
Tableau 15: Limites de consistance et Indice de plasticité des matériaux de Ngat-Plantation.	85
Tableau 16: Densimétrie, porosité, pH des matériaux argileux de Ngat-Plantation.....	87
Tableau 17: MO, CO et CEC des matériaux de Ngat-Plantation.....	88
Tableau 18: Teneurs en éléments majeurs (en %) des matériaux de Ngat-Plantation. ....	93
Tableau 19: Teneurs en éléments traces (en ppm) des matériaux de Ngat-Plantation.....	96

Tableau 20: Composition chimique des éléments terres rares dans les matériaux de Ngat-Plantation. ....	100
Tableau 21: Composition minéralogique sémi-quantitative. ....	101
Tableau 22: RL et PM des éprouvettes de Ngat-Carrière. ....	104
Tableau 23: AE et PO des éprouvettes des matériaux de Ngat-Carrière. ....	105
Tableau 24: RF et DA des éprouvettes en fonction de la température de cuisson. ....	106
Tableau 25: Couleur, cohésion et son des éprouvettes des matériaux de Ngat-Carrière. ....	108
Tableau 26: RL et PM des éprouvettes des matériaux de Ngat-Plantation. ....	110
Tableau 27: AE et RF des éprouvettes des échantillons de Ngat Plantation.....	111
Tableau 28: Couleur, son et cohésion des éprouvettes de Ngat-plantation.....	113
Tableau 29: Composition chimique des éléments majeurs de la cendre.....	116
Tableau 30:Composition en éléments traces de la cendre.....	118
Tableau 31 : Composition en éléments terres rares de la cendre .....	119
Tableau 32: Pourcentages granulométriques des mélanges .....	120
Tableau 33: RL; DA; PM; AE et RF des éprouvettes issues des mélange entre le matériau NPA4 et la cendre de Ilomba.....	122
Tableau 34: Couleur, cohésion et résonance des mélanges de l'échantillon NPA4.....	124
Tableau 35: Codification des éprouvettes après mélange avec 10 % de cendre et cuisson ...	126
Tableau 36: Eléments majeurs (%) des éprouvettes stabilisées avec 10 % de la cendre .....	127

# LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES

<b>ADECOL</b>	: Association pour le Développement des Communautés Locales
<b>AE</b>	: Absorption d'eau
<b>A.G</b>	: Analyse Granulométrique
<b>A.I.E.A</b>	: Association Internationale Pour l'Etude des Argiles
<b>Alc</b>	: Alcalin
<b>Alct</b>	: Alcalino terreux
<b>ASTM</b>	: American Society for Testing and Materials
<b>BTC</b>	: Briques de Terre Comprimée
<b>BUCREP</b>	: Bureau Central des Recensements et des Etudes de Population
<b>CEC</b>	: Capacité d'échange cationique
<b>cm</b>	: Centimètre
<b>CIA</b>	: Chimiical Index of Alteration
<b>CO</b>	: Carbone organique
<b>CRATerre</b>	: Centre de Recherche et d'Application pour la Construction en Terre
<b>da</b>	: Densité apparente
<b>dr</b>	: Densité réelle
<b>DRX</b>	: Diffraction des Rayons X
<b>ICV</b>	: Index of Chimiical Variability
<b>IDL</b>	: Indice de Latéritisation
<b>IITA</b>	: Institut International d'Agriculture Tropicale
<b>Ip</b>	: indice de plasticité.
<b>IR</b>	: Infra-rouge
<b>LA</b>	: limites d'Atterberg
<b>LL</b>	: limites de liquidité
<b>LP</b>	: limites de plasticité
<b>mm</b>	: Millimètre
<b>MPa</b>	: Méga pascal

<b>MIPROMALO</b>	: Mission de Promotion des Matériaux Locaux
<b>MO</b>	: Matière organique
<b>PAF</b>	: Perte au Feu
<b>pH</b>	: Potentiel d'hydrogène
<b>PM</b>	: Perte de masse
<b>PO</b>	: Porosité
<b>RF</b>	: Résistance à la flexion
<b>RL</b>	: Retrait linéaire
<b>SFC</b>	: Société Française de Céramique
<b>FRX</b>	: Fluorescence de rayons X
<b>µm</b>	: Micromètre
<b>Δ</b>	: Variation
<b>%</b>	: Pourcent

# RESUME

L'étude est réalisée dans la localité de Ngat, d'une altitude moyenne de 680 m et située dans le plateau Sud-camerounais. Elle comporte un volet fondamental portant sur la pétrologie des matériaux argileux et un volet appliqué portant sur leur possible utilisation comme matière première à la production des briques. Dans cette dernière partie, la cendre de bois d'Iomba transformée dans la ville de Ngoumou a été utilisée pour améliorer les caractéristiques technologiques de ces matériaux.

Les analyses physico-chimiques ont été effectuées au Département des Sciences de l'Université de Yaoundé I et à la MIPROMALO. La minéralogie et la géochimie des majeurs des poudres de matériaux ont été déterminées par diffractogrammes des rayons X et par fluorescence X (Lausanne, Suisse), respectivement. Les éléments traces et les terres rares sont déterminés par spectrométrie de masse (Laboratoire de Géosciences, Canada). Les essais céramiques ont été réalisés à la MIPROMALO et au Département de Chimie Inorganique de l'Université de Yaoundé I.

Les résultats obtenus sur le plan macroscopique, indiquent que les matériaux ont une couleur d'ensemble qui est le jaune avec des épaisseurs variables allant de 10 à 160 cm. Sur le plan physico-chimique, l'analyse granulométrique confirme leur nature argileuse avec des proportions d'argile comprises entre 25,13 et 61,15 %. Cette fraction est suivie de la fraction sableuse (23,51 - 60,18 %); ceci confère à ces matériaux des textures argilo-sableuse, argilo-boueuse et sablo-boueuse. Les limites d'Atterberg confèrent à ces matériaux une plasticité faible à moyenne. La matière organique (0,58 - 1,70 %) et la capacité d'échange cationique (14,75 - 16,06 meq/100g de sol) sont faibles. Les matériaux de Ngat sont constitués principalement de quartz et de la kaolinite et accessoirement de goéthite, anatase, et de gibbsite. Les données géochimiques confirment la dominance des minéraux silicatés par l'abondance de la silice (62,34 - 80,73 %) et de l'alumine (9,09 - 19,13 %). Les teneurs en fer sont faibles (1,81 - 6,26 %). Les teneurs en  $TiO_2$  sont à moyenne de 1,39 %. Celles des alcalins et alcalino-terreux sont inférieures à l'unité. La somme des oxydes fondants est faible et inférieure à 2,5 %. Les teneurs en Cr, V, Zr, Rb et Ba sont les plus élevées. La somme des terres rares oscille entre 60 et 105 ppm. Les corrélations entre la silice et les autres éléments majeurs sont négatives. La normalisation des terres rares réalisée par rapport aux valeurs de la chondrite montre des anomalies négatives bien prononcées en Eu. Sur le plan céramique, des éprouvettes ont été cuites à plusieurs paliers de température (800, 900, 1000 et 1100°C). La minéralogie des éprouvettes cuites est constituée du quartz, de l'anatase, de l'hématite, et de la mullite. Les valeurs du retrait linéaire sont faibles (0 - 7,30 %). Le taux d'absorption d'eau varie entre 11 et 23 %. En ce qui concerne la résistance à la flexion, ses valeurs sont modérées et comprises entre 1,25 et 12,17 MPa. Pour améliorer les caractéristiques technologiques de ces matériaux, la cendre de bois de Iomba a été ajoutée à ces derniers à plusieurs pourcentages. L'ajout de la cendre (10 %) montre des valeurs comprises entre 5,7 et 10,83 % pour le retrait linéaire, 15,01 et 22,95 % pour l'absorption d'eau et 6,8 à 7,44 MPa pour la résistance à la flexion. Les matériaux de Ngat sont favorables à la production des briques cuites utilisables dans l'industrie du bâtiment.

**Mots clés :** Minéralogie, Géochimie, Matériaux argileux, Céramique, Ngat, Sud-Cameroun

# ABSTRACT

The study is being carried out in the locality of Ngat, at an average altitude of 680 m and located on the South Cameroon plateau. It includes a fundamental section on the petrology of clay materials and an applied section on their possible use as a raw material for brick production. In the latter part, Ilomba wood ash processed in the town of Ngoumou was used to improve the technological characteristics of these materials.

Physico-chemical analyses were carried out at the Science Department of the University of Yaoundé I and at MIPROMALO. The mineralogy and geochemistry of the material powders were determined by X-ray diffractograms and X-ray fluorescence (Lausanne, Switzerland), respectively. Trace elements and rare earths were determined by mass spectrometry (Geosciences Laboratory, Canada). Ceramic testing was carried out at MIPROMALO and at the Inorganic Chemistry Department of the University of Yaoundé I.

Morphological results indicate that the overall color of the material is yellow, with variable thicknesses ranging from 10 to 160 cm. Physico-chemically, particle size analysis confirms their clayey nature, with clay proportions ranging from 25.13 to 61.15 %. This fraction is followed by the sandy fraction (23.51 - 60.18 %), giving these materials a clayey-sandy, clayey-muddy and sandy-muddy texture. Atterberg limits give these materials low to medium plasticity. Organic matter (0.58 - 1.70%) and cation exchange capacity (14.75 - 16.06 meq/100g soil) are low. The Ngat materials consist mainly of quartz and kaolinite, with minor amounts of goethite, anatase and gibbsite. Geochemical data confirm the dominance of silicate minerals, with abundant silica (62.34-80.73%) and alumina (9.09-19.13%). Iron content is low (1.81-6.26%). TiO<sub>2</sub> content averages 1.39%. Alkali and alkaline-earth contents are less than unit. The sum of flux oxides is low, below 2.5%. Cr, V, Zr, Rb and Ba contents are the highest. The sum of rare earths varies between 60 and 105 ppm. Correlations between silica and other major elements are negative. Rare earth normalization against chondrite values shows pronounced negative Eu anomalies. On the ceramic side, specimens were fired at several temperature levels (800, 900, 1000 and 1100°C). The mineralogy of the fired specimens consists of quartz, anatase, hematite and mullite. Linear shrinkage values are low (.0 - 7.30%). Water absorption varies between 11 and 23%. Flexural strength is moderate, ranging from 1.25 to 12.17 MPa. To improve the technological characteristics of these materials, Ilomba wood ash was added at various percentages. The addition of ash (10 %) shows values between 5.7 and 10.83% for linear shrinkage, 15.01 and 22.95% for water absorption and 6.8 to 7.44 MPa for flexural strength. ceramic properties of these materials. Ngat materials are ideal for the production of fired bricks for use in the construction industry.

**Keywords:** *mineralogy, geochemistry, clay materials, ceramic, Ngat, South Cameroon.*

# INTRODUCTION GENERALE

*«Demandez à l'Eternel la pluie, la pluie du printemps! L'Eternel produira des éclairs, Et il vous enverra une abondante pluie, Il donnera à chacun de l'herbe dans son champ», Zacharie 10:1.*

---

## I. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

L'argile est un terme appliqué aux matériaux ayant une granulométrie inférieure à  $2\mu\text{m}$  et aux familles de minéraux de composition chimique similaire et de structure cristalline commune (Velde, 1995). C'est aussi un petit groupe de minéraux composé des silicates d'aluminium hydratés, appelés minéraux argileux (Meimaroglou et Mouzakis, 2019). Selon les régions, l'argile se présente mélangée à d'autres constituants que sont le sable, la tourbe, la matière organique et les limons. Son utilisation à travers le monde est très ancienne. Elle a été largement utilisées comme composant principal des matières premières dans la fabrication de produits céramiques diversifiés (Murray, 2007; Semiz, 2017; Tsozue et al., 2017). Les matériaux argileux généralement à l'état de fines particules sont les constituants de nombreuses formations géologiques et des sols. Du point de vue géologique, les roches argileuses ou argilites sont des roches sédimentaires, résiduelles ou alluvionnaires composées pour une large part de minéraux spécifiques, aluminosilicates plus ou moins hydratés, eux-mêmes nommés argiles (Milot, 1964). Ces matériaux argileux sont soumis à l'influence de nombreux agents physico-chimiques et peuvent se présenter sous forme de produits résiduels d'altération, de produits altérés hydrothermalement et de dépôts sédimentaires dans les bassins versants (Murray, 2007; Ntouala et al., 2016). C'est une matière première abondante avec une étonnante variété de propriétés qui dépendent largement de sa structure minérale et de sa composition (Murray, 2007; Celik, 2010). Les principales caractéristiques étudiées des argiles sont leur minéralogie, leur composition chimique, leurs caractéristiques physico-chimiques et leurs propriétés technologiques. Les nombreuses propriétés physico-chimiques et minéralogiques des matériaux argileux leur confèrent un large spectre d'applications dans les domaines industriels (Murray, 2007).

Les matériaux argileux sont les principales matières premières entrant dans la fabrication des produits céramiques tels que les briques et les tuiles, en raison de leurs nombreuses propriétés spécifiques avant et après cuisson (Lee et Yeh, 2008; Mahmoudi et al., 2008; Semiz, 2017; Tsozue et al., 2017). les argiles sont largement utilisés dans la construction (Ngon Ngon et al., 2009). Leur valorisation en produits céramiques est un sujet de grand intérêt pour l'amélioration des habitats et la réduction des coûts de constructions. Ainsi, les matériaux argileux peuvent contribuer au développement durable de l'habitat pour les populations en voie de développement comme le Cameroun. Cependant, pour la plupart des poteries, la caractérisation des argiles se fait de manière empirique et peut aboutir à des tuiles et des blocs sans normes (Savazzini-Reis et al., 2017). Les travaux scientifiques sur les

argiles industrielles (Njopwouo, 1984; Elimbi et al., 2001; Njoya et al., 2006, 2007; Ngon Ngon, 2007; Fadil-Djenabou et al., 2015; Ndjigui et al., 2021) menés jusqu'à présent au Cameroun ont permis de découvrir des gisements potentiels ou indices intéressants pouvant être utilisés comme matières premières pour la fabrication des briques de terre et des tuiles. En effet, même lorsque les argiles proviennent de la même roche mère, des facteurs locaux tels que le microclimat peuvent influencer les propriétés des matériaux argileux (Kessoum Adamou et al., 2023).

La stabilisation du sol est utilisée pour améliorer les performances techniques de ce dernier. En 2012, la société française de céramique (SFC) a initié des travaux avec le soutien de l'Adema (Wacer, 2018) pour vérifier la pertinence de l'utilisation des cendres de bois comme matière première pour l'industrie céramique. De plus en plus des études se multiplient dans le monde sur l'utilisation des cendres de bois comme matériaux de construction. Des études ont été menées afin d'examiner les avantages pratiques de l'ajout de cendres dans les matériaux de construction tels que l'augmentation de la vitesse de traitement, la réduction de l'usure des équipements, l'amélioration des propriétés mécaniques et l'amélioration des systèmes de combustion (Lin et Weng, 2001; Qiao et al., 2008; Sandberg et al., 2011). Dans ce travail, l'incorporation de cendre de Ilomba dans les matériaux de Ngat, permettrait d'obtenir des briques en matériaux céramiques plus résistantes.

Il est donc indispensable de constituer une base de données scientifiques sur les matériaux argileux locaux susceptibles de stimuler la production ou la transformation industrielle et ainsi accroître leur utilisation dans la construction. Pour une bonne exploitation des matériaux argileux de Ngat, il est donc nécessaire de connaître leur morphologie, leur minéralogie, leur composition chimique et leurs propriétés céramiques.

## **II. OBJECTIFS DE L'ETUDE**

L'objectif principal du présent travail est de caractériser les matériaux argileux de la localité de Ngat afin d'évaluer leurs potentialités en céramique. Pour ce faire, il y a nécessité de:

- déterminer les caractéristiques morphologiques, physico-chimiques, minéralogiques et géochimiques de ces matériaux;
- analyser les spécimens des briques naturelles et stabilisées à la cendre de Ilomba;
- déterminer les propriétés technologiques de ces briques.

### **III. ORGANISATION DU MEMOIRE**

Après une introduction générale, le mémoire s'organise autour de six chapitres regroupés en deux parties et présenté comme suit:

La première partie intitulée revue de la littérature et méthodologie comporte trois chapitres. Le chapitre I est consacré au cadre naturel et contexte géologique du secteur d'étude; le chapitre II met un accent sur la revue de la littérature concernant les argiles et la céramique. Les méthodes d'étude utilisées sont présentées au chapitre III.

La deuxième partie présente les différents résultats obtenus lors de cette étude ainsi que leur discussion. Elle est subdivisée en trois chapitres: le chapitre IV présente les caractéristiques morphologiques, physico-chimiques, minéralogiques et géochimiques des matériaux argileux de Ngat; l'étude des propriétés technologiques des briques de terre et stabilisées à la cendre de Ilomba est développée au chapitre V et en fin le chapitre VI est consacré à l'interprétation et à la discussion des résultats obtenus.

Ce mémoire s'achève par une conclusion générale et par la présentation de quelques perspectives qui font ressortir les points saillants et les orientations futures de ce travail.

# **PREMIERE PARTIE : REVUE DE LA LITTERATURE ET METHODOLOGIE**

*«Mon âme, bénis l'Eternel! Que tout ce qui est en moi bénisse son saint nom! Mon âme, bénis l'Eternel, et n'oublie aucun de ses bienfaits!», Psaume 103:1-2.*

---

---

# CHAPITRE I. CADRE NATUREL ET CONTEXTE

## GEOLOGIQUE DU SECTEUR D'ETUDE

---

### Introduction

Le présent chapitre définit les cadres géographique et géologique, en insistant sur les données climatologiques, phytogéographiques et géomorphologiques de la zone d'étude.

### I. CADRE NATUREL

#### I.1. Localisation

La localité de Ngat se situe dans la région du Centre (plateau Sud-Camerounais), département du Nyong-et-So'o, arrondissement de Mbalmayo, à 15 km environ au sud de la ville de Mbalmayo entre les axes routiers Yaoundé-Sangmélina (nationale n° 9) et Yaoundé-Ebolowa (nationale n° 2). Sur le plan géographique, le secteur d'étude se situe entre les latitudes 03° 24' 30'' et 03° 30' 00'' Nord, et entre les longitudes 11° 23' 30'' et 11° 40' 00'' Est. Il est limité au Nord-Est par les villages Zoatoupsi et Nkolnguét, au Sud par les villages Abang et Avebe et à l'Ouest par les villages Mengueme et Mekomo ([figure 1](#)).

#### I.2. Climat

Le Cameroun offre une grande diversité climatique. Du Sud au Nord, on passe des climats humides (équatorial, subéquatorial, tropical à longue saison pluvieuse) aux climats tropicaux à nuance sèche. La localité de Mbalmayo est caractérisée par un climat équatorial peu contrasté à 4 saisons bien marquées ([Sighomnou, 2004](#)), et à forte humidité permanente. Les mouvements du Front intertropical (FIT) ainsi que d'autres facteurs en relation avec l'orographie, le système forestier et la proximité à la mer/océan entre autre déterminent les nuances totales sensibles ([Suchel et Tsalefack, 1995](#); [Sighomnou, 2004](#)).

Les paramètres météorologiques de la région de Yaoundé sur une période de 11 ans (2008-2018) obtenus au centre météorologique de Mvan sont inscrits dans le [tableau 1](#). Le mois le plus pluvieux est celui d'Octobre avec 338,9 mm de pluie et le moins pluvieux celui de Décembre avec 48,75 mm de pluie. La température moyenne est d'environ 24,86°C. Le mois le plus chaud est celui de Février avec une température égale à 25,47°C, alors que le mois le moins chaud est celui de Septembre avec une température de 22,38°C.

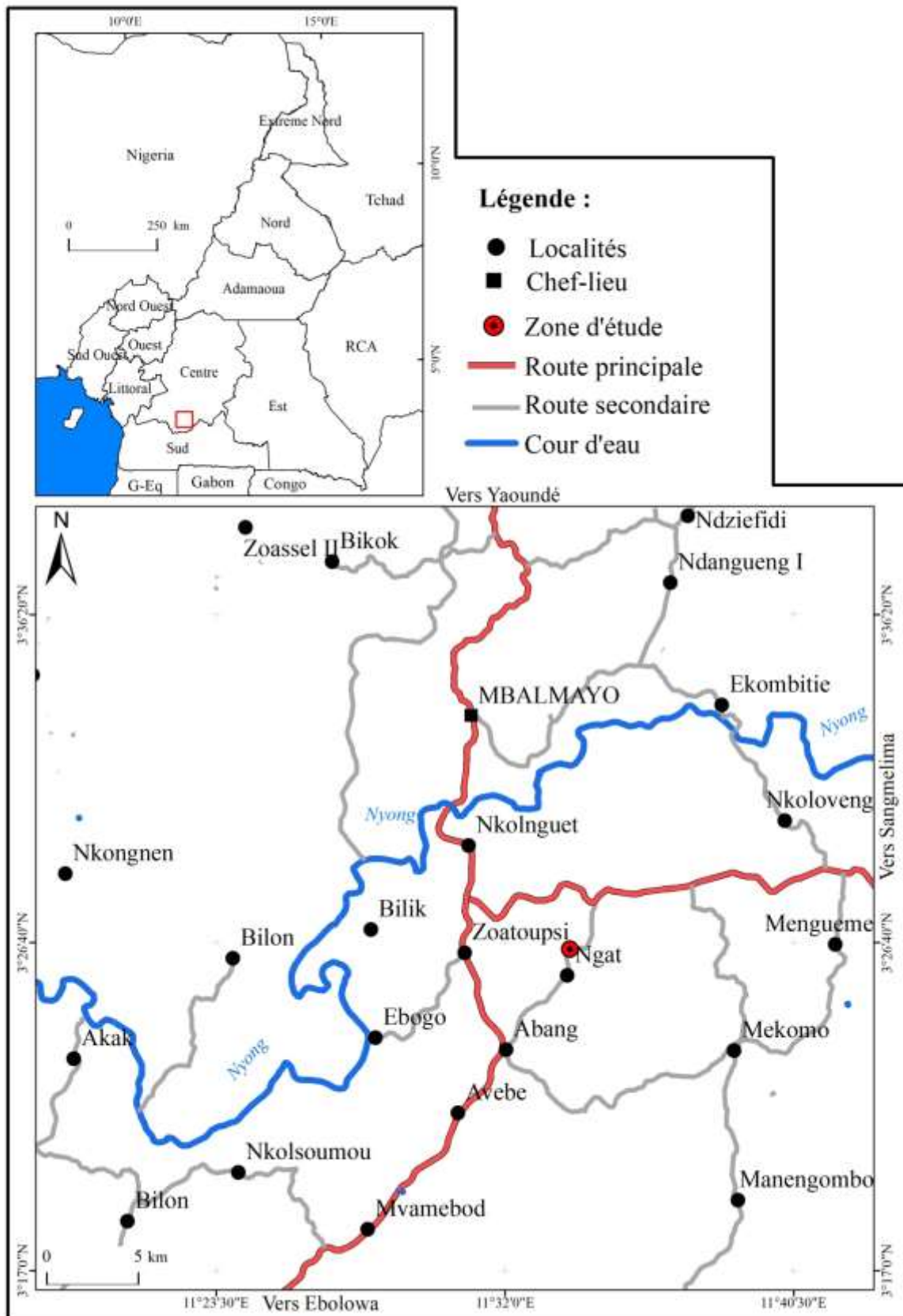


Figure 1: Carte de localisation de la zone d'étude.

Tableau 1: Répartition statistique mensuelle des pluies et des températures dans la région de Yaoundé (2008-2018).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
T°. moy	24,86	25,47	24,87	24,5	24	23,21	22,57	22,56	22,38	22,99	23,69	24,07	24,86 <sup>(a)</sup>
P cumulé	49,3	98,25	172,8	193	216,3	184,7	95,4	115,9	263,8	338,9	138,4	48,75	1915,5 <sup>(b)</sup>

(a) moyenne annuelle des températures, (b) cumule annuelle des précipitations

Source : Station météorologique de Mvan.

Un mois est sec si la somme des précipitations est inférieure ou égale au double de la température annuelle ( $P \leq 2T$ ) et humide dans le cas contraire (Bagnouls et Gaussen, 1957). Les petite et grande saisons des pluies s'étendent de mi-Mars à Juin et de Septembre à Novembre, respectivement. La petite saison sèche va de Juin à Août et la grande saison sèche de Décembre à Mars (Figure 2).

D'après Suchel et Tsalefac (1995), le climat de la série Mbalmayo-Bengbis donc du secteur d'étude est de type équatorial de transition nuancé des traits océaniques. Ce régime équatorial de transition est représenté par le Nyong et le Dja, mais aussi, par certains affluents de la rive gauche de la Sanaga. La durée de la saison sèche de Juillet-Août diminue très vite quand on remonte vers le Nord; l'étiage correspondant est donc moins important. La petite saison sèche dure plus longtemps au détriment de la grande saison des pluies (Santoir, 1995).

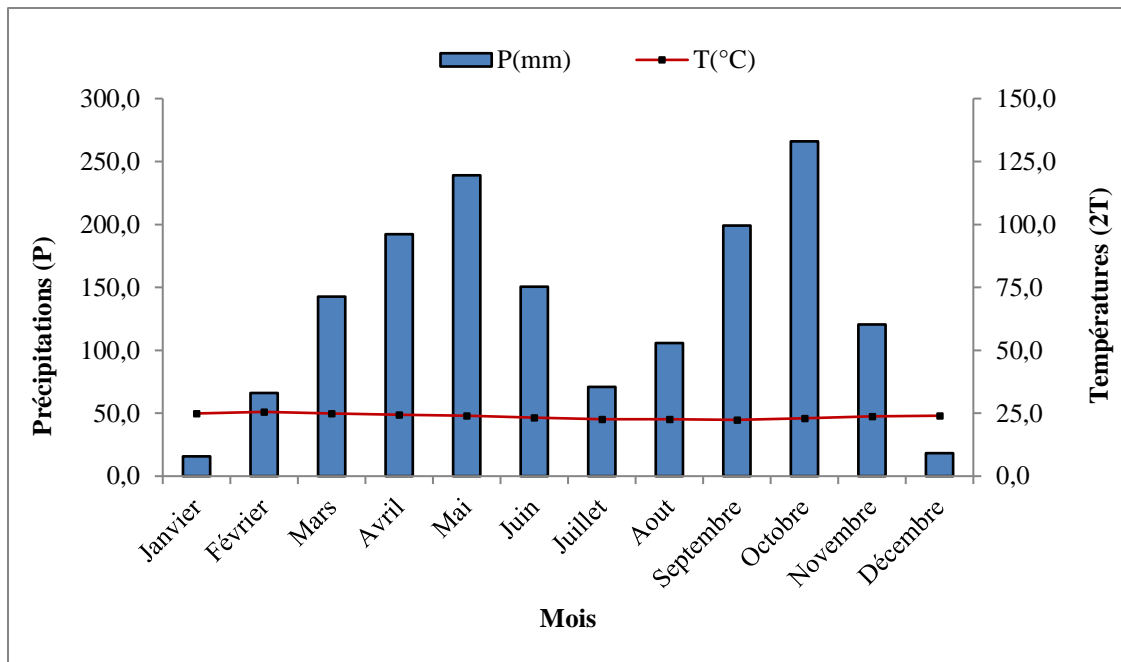
Le territoire national se situe dans la zone tropicale et se caractérise par une variété climatique qui favorise la formation et l'accumulation de divers minéraux dans les sols.

### I.3. Sols

Les sols de la région forestière du Sud-Cameroun sont de deux types : les sols ferrallitiques et les sols hydromorphes (Bilong, 1988 ; Bekoa, 1994).

Les sols ferrallitiques sont rouges ou jaunes et localisés sur les interfluves. Ils sont différenciés de la base vers le sommet en deux ensembles et un horizon:

- un ensemble d'altération: il est très épais et présente des similarités pétrologiques avec la roche parentale. Il est composé de deux horizons, la saprolite grossière à la base et la saprolite fine au sommet. L'ensemble d'altération est le siège de nombreuses transformations minéralogiques et chimiques aboutissant, en son sein, à l'accumulation de certains éléments.



P(mm) ; T(°C)

Figure 2: Diagramme ombrothermique du secteur d'étude (2008-2018).

- un ensemble médian d'accumulation d'oxydes et hydroxydes métalliques ou ensemble nodulaire ou ensemble glébulaire à blocs de cuirasse. Il est composé de trois horizons, un horizon à blocs de cuirasse entouré de deux horizons nodulaires. On assiste généralement à une dégradation de cet ensemble en un ensemble argileux meuble;
- un horizon supérieur argilo-sableux à argileux meuble surmonté d'une mince pellicule humifère (Bilong, 1988). Ces sols sont fortement désaturés et leurs teneurs en matière organique sont faibles.

Sur le plan minéralogique, ces sols sont constitués de minéraux tels que la kaolinite, la gibbsite, les oxyhydroxydes de fer et d'aluminium (Ndjigui et al., 1998; Bayiga et al., 2011). Du point de vue chimique, ils sont constitués en grande partie de la silice, de fer et d'aluminium et parfois d'autres éléments sidérophiles.

Les sols hydromorphes sont présents dans les zones marécageuses et les bas-fonds mal drainés. L'hydromorphie est permanente à cause de la nappe sub-affleurante. Ces sols sont caractérisés par une accumulation de matières organiques peu décomposées au-dessus de l'ensemble argilo-sableux gris (Bekoa, 1994). Ils retiennent jusqu'à 45 g d'eau pour 100 g de sol (Assako Assako, 1997). On en distingue deux types: les sols hydromorphes organiques et les sols hydromorphes minéraux:

- les sols hydromorphes organiques se localisent dans les bas-fonds. Ils sont caractérisés par une accumulation de matière organique peu décomposée au-dessus d'un ensemble sableux et argileux gris (Bekoa, 1994). Ces sols présentent des horizons à gley;
- les sols hydromorphes minéraux occupent les talwegs entre les interfluves. Ils sont humifères en surface, gris ou jaunâtres avec des tâches rouges ou jaunes parfois des concrétions en profondeur.

Le secteur d'étude, est occupé par les sols ferrallitiques rouges et jaunes sur les interfluves et hydromorphes dans les bas-fonds drainés.

#### I.4. Végétation

La végétation du plateau sud camerounais dans lequel se trouve la région de Mbalmayo est une forêt semi-décidue à savane dans sa partie nord et à forêt sempervirente au sud (Letouzey, 1985). Ainsi, du sud au nord on distingue:

- la forêt dense humide sempervirente ou « rain forest » de basse à moyenne altitude qui subit l'influence de l'Océan atlantique. L'essence principale rencontrée est le *Lophira alata* à bois rouge et dur, connu sous le nom « azobé »;
- la forêt congolaise riche en espèces primaires. Elle se situe dans le district du Dja et les espèces rencontrées sont les Méliacées et Sapotacées;
- la forêt péristre est située au nord des zones à Sterculiacées. Cette végétation domine la vallée de la Sanaga. On observe des galeries forestières le long des cours d'eau et quelques étendues de forêt au sommet des collines. La savane et la forêt s'interpénètrent plus ou moins profondément isolant de ce fait des étendues de savane au milieu de la forêt. On passe donc graduellement de la forêt « vierge » au profit de la savane. Cette transition est le siège d'une dynamique de végétation marquée par la transgression de la forêt sur la savane et semble dépendre non seulement du climat, mais surtout des facteurs morpho-pédologiques (Happi Youta, 1998; Kamgang et al., 2001).
- la forêt semi-décidue qui prolonge la forêt congolaise vers le Nord où elle entre en contact avec la savane.

La végétation de Ngat appartient au secteur forestier semi-caducifolié du grand domaine de la forêt dense humide Congo guinéenne (Villiers et Santoir, 1995). L'abondance des Sterculiacées caractérise cette forêt, avec *Sterculia Oblongai Rhinopetala*, *Tragacantha*, *Mansonia Altissima*, *Pterygota Kamerunensis*. A cette flore, s'ajoutent des Ulmacées (*Celtis*) et des Moracées. Les jachères forestières se couvrent de sisongo (herbe à éléphant) (Olivry, 1986). Les bas-fonds de la zone d'étude sont couverts de raphias et de sisongo (figure 3).

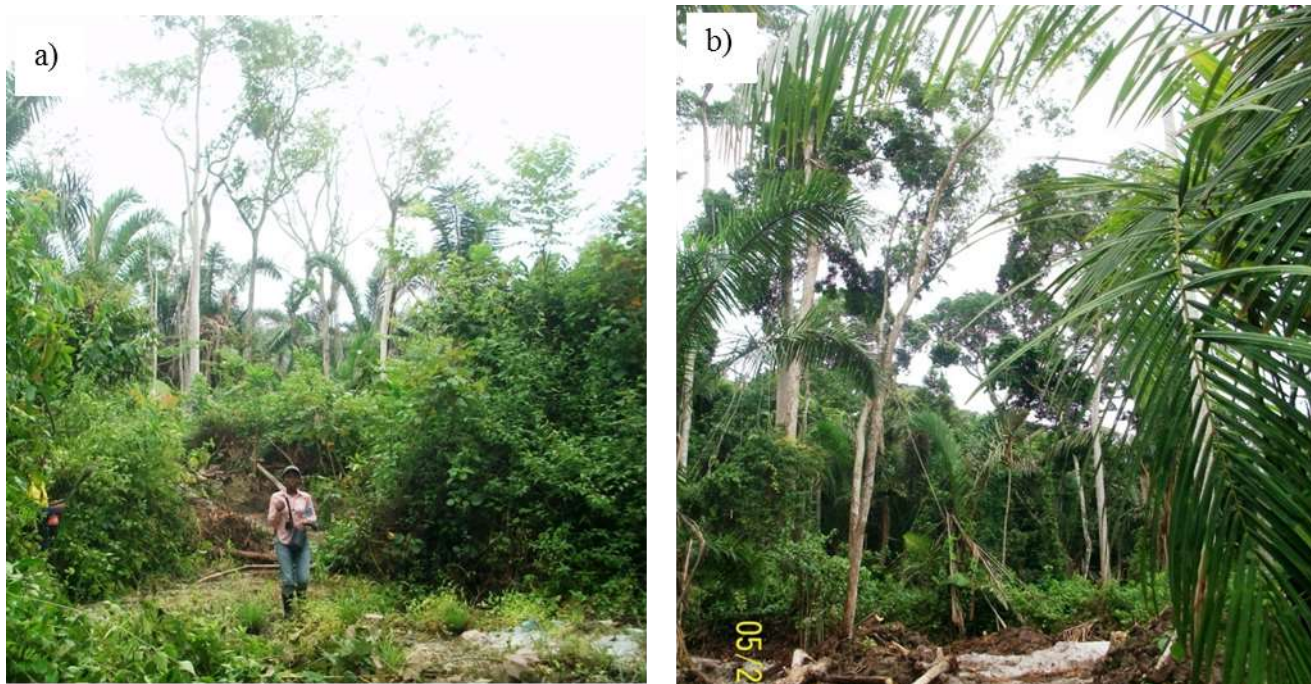


Figure 3 : Vue de la végétation du secteur d'étude : a) Sisongo, b) Raphias.

## I.5. Géomorphologie

### I.5.1. Hydrologie

Du point de vue hydrographique, le secteur de Ngat appartient au bassin du Nyong dont la superficie est de 27800 Km<sup>2</sup> (Santoir et Bopda, 1995) avec une orientation moyenne ENE-WSW. Le *Nyong* considéré comme le deuxième fleuve camerounais est le collecteur principal. Son principal affluent dans le secteur d'étude est le *So'o*. Ce dernier prend sa source à l'ouest de Sangmélima et est grossi par des affluents tels que *Awout*, *Koo*, *Minsolo*, *Mbembe* et *Manefala*. On dénombre aussi plusieurs cours d'eau qui se jettent dans le *So'o* ou directement dans le *Nyong*. Le *Nyong* et ses affluents ont un cours lent et sinueux avec rives et flats marécageux (Gazel et Guiraudie, 1965). *Mbamboa* est l'unique cours d'eau qui arrose le secteur d'étude. Le réseau hydrographique est dense et dendritique à tendance rectangulaire (Figure 4).

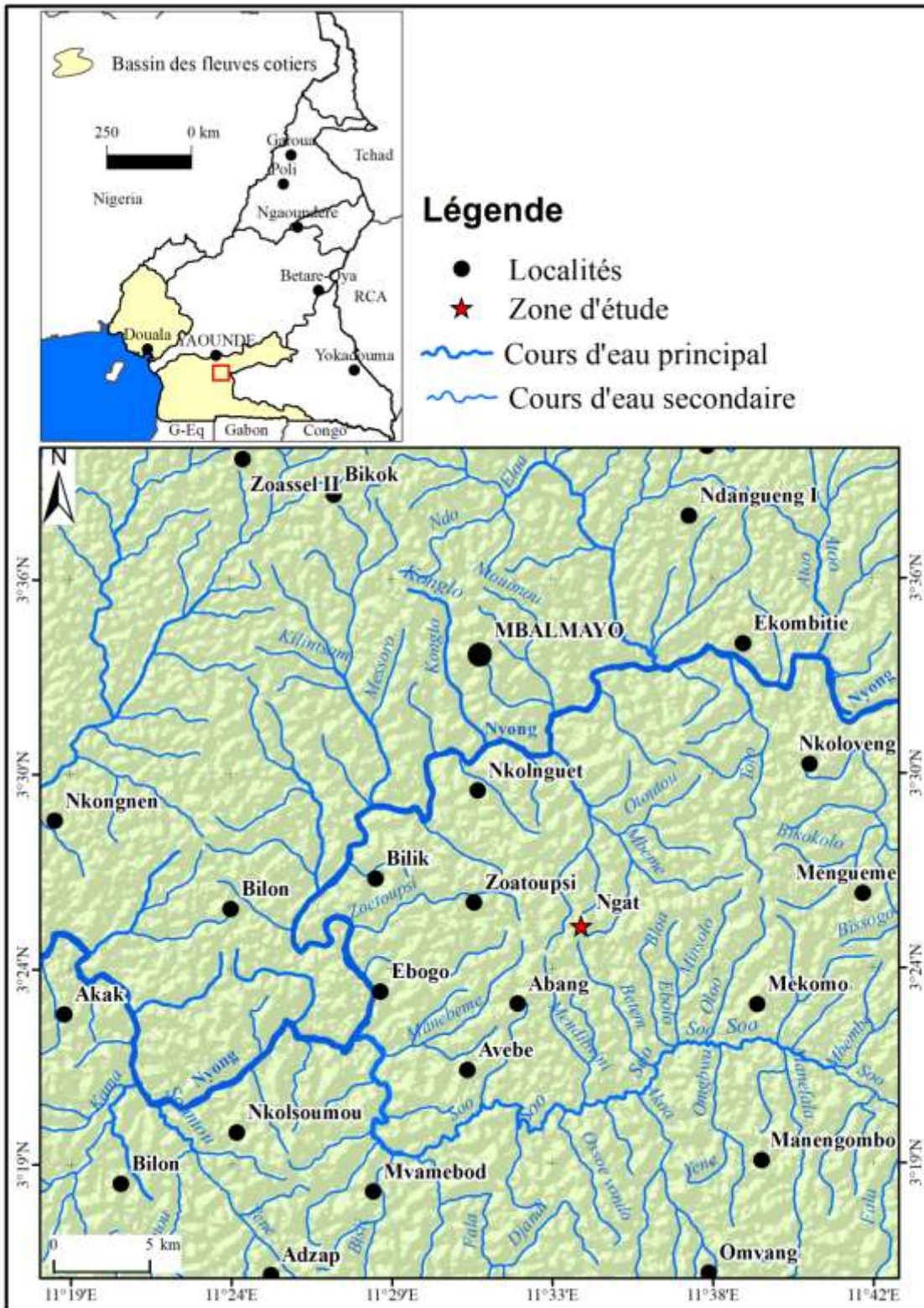


Figure 4: Réseau hydrographique de la zone d'étude.

### I.5.2. Orographie

La région de Mbalmayo appartient au grand plateau Sud Cameroun qui est l'unité de relief la plus importante du pays.

### **I.5.2.1. Morphologie du plateau sud-camerounais**

Le plateau sud-camerounais est une entité géomorphologique qui s'étend sur 600 km de l'Ouest à l'Est. Son altitude moyenne est de 700 m. Elle est voisine de 800 m au Nord, de 600 m au centre, remonte à 750 m à la latitude de Yaoundé et diminue par paliers vers le Sud. La présence de ces paliers laisse penser que le plateau sud-camerounais aurait été affecté par des mouvements tectoniques. Il est rattaché à la surface africaine I (Ségalen, 1962).

### **I.5.2.2. Morphologie du secteur d'étude**

Le secteur d'étude fait partie de la série de Mbalmayo-Bengbis. Le relief de ce secteur présente trois (03) unités morphologiques:

- une unité morphologique d'altitude inférieure à 670 m, représentant les bas-fonds marécageux;
- une unité morphologique d'altitude comprise entre 670 et 770 m, représentant les interfluves émoussés;
- une unité morphologique d'altitude supérieure à 770 m, représentant des rares inselbergs (Figure 5).

## **II. CONTEXTE GEOLOGIQUE**

### **II.1. Géologie générale**

Sur le plan géologique, le Camerounais se trouve dans la Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale. Cette chaîne comprend trois domaines géodynamiques à savoir le domaine septentrional ou Nord-ouest du Cameroun, le domaine central ou Adamaoua-yadé et le domaine méridional ou de Yaoundé (Toteu et al., 2006 ; Nzenti et al., 2006).

Le domaine sud correspond au craton du Congo représenté par le groupe de Yaoundé et aux séries intermédiaires (Nzenti et al., 1988 ; Nzenti, 1998). Il est constitué de deux grands ensembles à l'échelle régionale : Il dérive d'un métamorphisme de haute pression sur un matériau volcano-sédimentaire et appartient au panafricain (500 à 600 Ma). Son extension sur le territoire national couvre une superficie supérieure à 70 000 Km<sup>2</sup> (Nedelec et al., 1986; Nzenti et al., 1988; Mvondo et al., 2003 ; Metang et al., 2022).

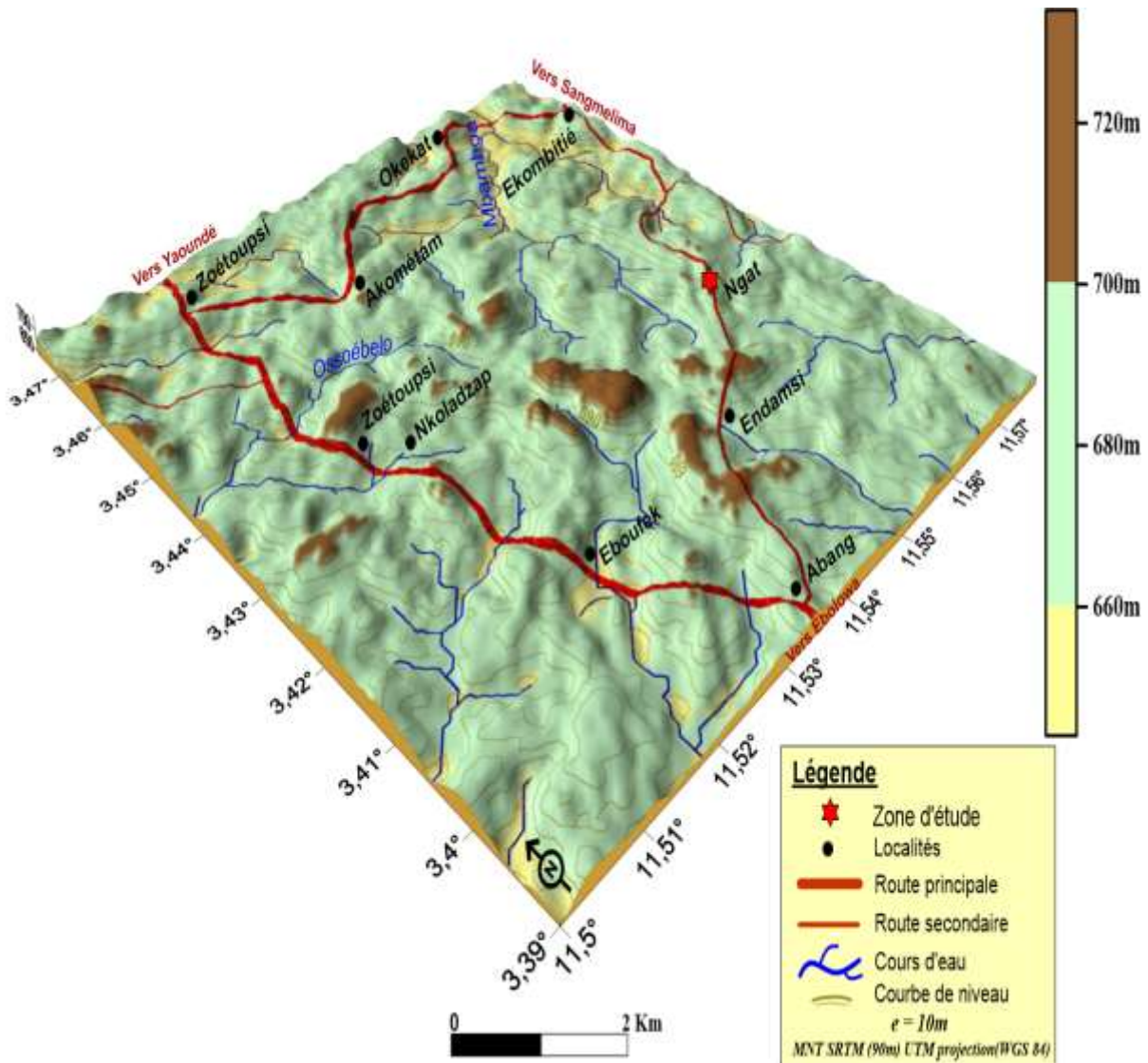


Figure 5: Carte des unités morphologiques de la zone d'étude.

-la série de Yaoundé dans la partie Nord est un ensemble de haut degré métamorphique composé de gneiss, migmatites, micaschistes, amphibolites et des roches à silicates calcites ;

-la série d'Ayos-Mbalmayo-Mbegbis dans sa partie sud est un ensemble faiblement métamorphique composé de schistes et de quartzites.

## II.2. Géologie du secteur d'étude

Les paragenèses minérales de la série de Mbalmayo-Mbegbis sont essentiellement de chloritoschistes et de micaschistes à rares niveaux quartzitiques (Nédelec et al., 1986; Toteu et al., 2006; Kamgang et al., 2009), (figure 6). Selon ces mêmes auteurs, cette zone est constituée par un ensemble varié de roches métamorphiques déformées du précambrien,

représentées par des chloritoschistes plus ou moins riches en calcite et des poches de quartzites.

### III. GEOGRAPHIE HUMAINE ET ECONOMIQUE

Ngat est l'un des 49 villages que compte l'arrondissement de Mbalmayo. La population totale estimée à environ 785 habitants avec 413 femmes et 372 hommes, (BUCREP, 2005). Les autochtones de cette localité sont les Mvele, le reste de la population est cosmopolite et constituée de presque toute la diversité ethnique du Cameroun. Les religions pratiquées sont le christianisme et l'islam. La population connaît une forte pression du fait de l'exode rural des jeunes à la recherche de l'emploi et pour des raisons scolaires. Aussi cette population est essentiellement vieillissante. Le village Ngat porte en son sein une école publique (maternelle et primaire) à cycle complet (ADECOL, 1997). L'agriculture est l'activité économique qui occupe la majeure partie de la population. Il existe deux types de cultures dans cette localité: industrielle et vivrière. La culture industrielle est basée sur le café et le cacao. La culture vivrière quant à elle, est basée essentiellement sur le maïs, le manioc et la banane plantain avec lesquelles on peut ajouter également l'arachide, le pistache, le macabo et le taro. Le vin de palme, la boisson alcoolisée traditionnellement appelée «*Odontol ou Arki*», le transport inter-village par moto, les échoppes, la vente des produits issus de la chasse et de la pêche, l'artisanat à base du rotin qu'on retrouve dans les bas fond de cette localité sont d'autres sources de revenus non négligeables de la localité. Dans le souci de préserver les essences forestières, une réserve dénommée «Reserve Forestière de Mbalmayo» a été créée dans la localité de Mbalmayo.

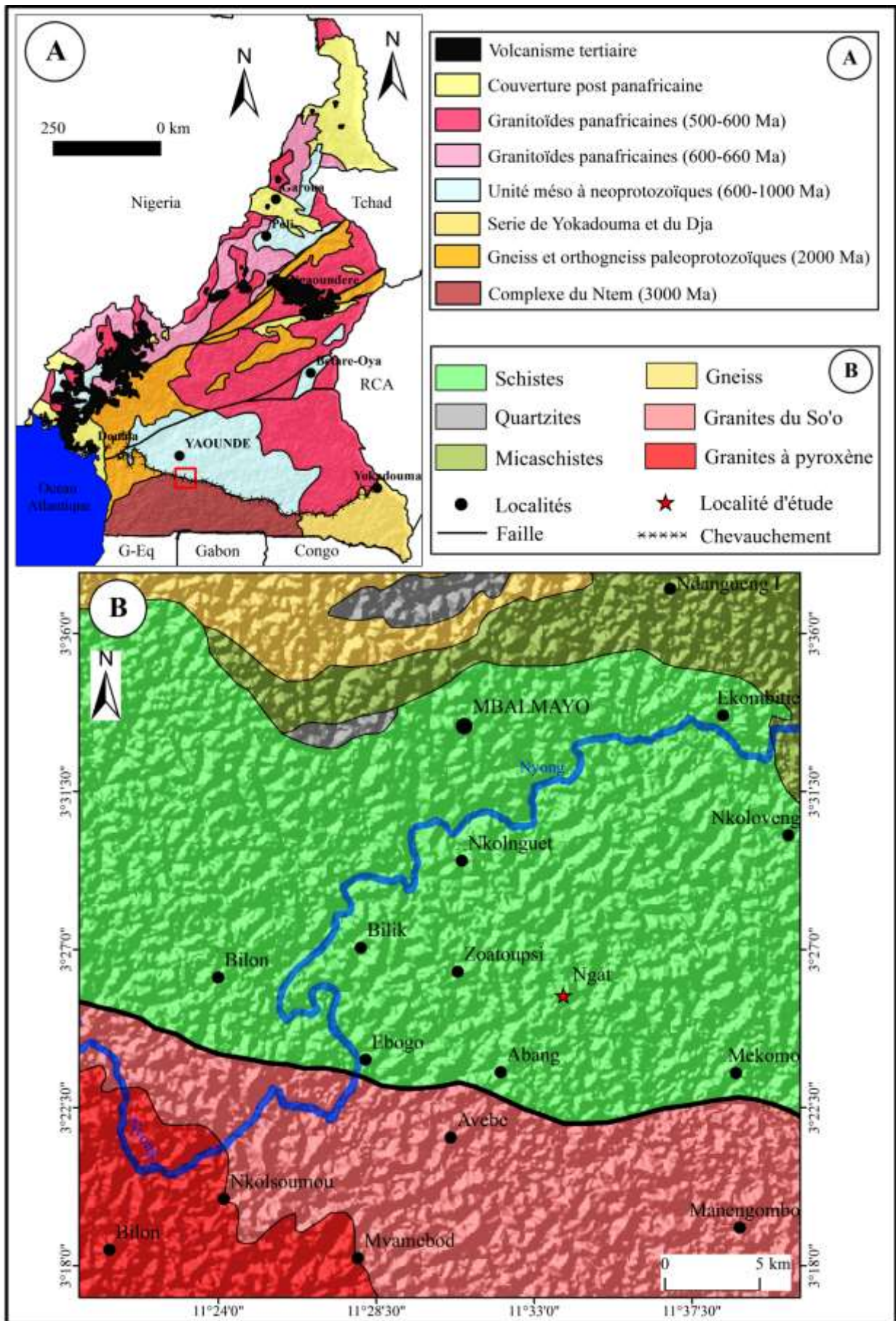


Figure 6: Esquisse géologique du Sud-Cameroun (Maurizot, 2006).

Les influences biotiques sont essentiellement humaines et se manifestent par les défrichements agricoles, l'exploitation forestière et les usages domestiques. D'une manière générale, il s'agit d'une dégradation de la forêt originelle. La faune est constituée de singes, d'hérissons, de rats, de porc-épics, de lièvres etc. Les cours d'eau tels que le *Nyong et le So'o* sont riches en poissons et en amphibiens.

## **Conclusion**

La zone d'étude appartient au grand domaine du plateau sud camerounais. Le domaine climatique correspondant est proche de celui de Yaoundé (climat équatorial à 4 saisons). Les sols de Ngat sont soit ferrallitiques, soit hydromorphes et couverts par une forêt dense semi-caducifoliée. Le *So'o* est le principal et l'unique grand collecteur du secteur d'étude. La géomorphologie du secteur d'étude présente trois unités morphologiques, et sa géologie comprend des chloritoschistes plus ou moins riches en calcite et des poches de quartzites. Après cette description du milieu naturel de la zone d'étude, le chapitre suivant présentera les généralités sur les argiles ainsi que sur la céramique.

---

# CHAPITRE II. GENERALITES SUR LES ARGILES ET LA CERAMIQUE

---

## Introduction

Ce chapitre est consacré aux généralités sur les argiles, ainsi que sur la céramique.

## I. ARGILE ET MATERIAUX ARGILEUX

### I.1. Définition

L'argile désigne toute roche ou minéral principalement composé de silicates d'alumine en feuillets (phyllosilicates) plus ou moins hydratés (Véné et Beauchamp, 2005). Ce terme est défini de différentes manières en fonction du domaine scientifique dans lequel on se trouve.

D'après le dictionnaire de géologie (Foucault et Raoult, 2001), le mot argile vient du latin « argila » et désigne soit un minéral argileux, soit une roche composée pour l'essentiel des minéraux argileux. C'est aussi tout matériau naturel, composé de grains fins, qui passe à l'état plastique en présence de teneurs en eau appropriées et durcit par séchage ou par chauffage (A.I.E.A, 1996 in Pialy, 2009).

Les céramistes définissent l'argile comme une matière première qui, en présence d'eau, forme une pâte plastique qui durcit après cuisson (Voinovitch et al., 1971; Caillère et Henin, 1985).

Le géologue ou le pédologue considère comme « argile » tout minéral de faible granulométrie dont la limite est fixée à 2 ou 4 microns selon les cas (Caillère et Henin, 1985).

En minéralogie, le mot argile signifie l'ensemble des minéraux appartenant à la famille des phyllosilicates, c'est-à-dire, les minéraux sous formes de feuillets constitués par juxtaposition des couches de silice et d'hydroxydes (Lanson et Bouchet, 1995).

Pour l'ingénieur du génie civil, le sol argileux désigne un sol qui contient une proportion appréciable de minéraux argileux et dont le comportement est influencé par la présence de ces derniers. Un sol argileux est un sol fin, plastique et cohérent, actif sur le plan électrochimique et dont le comportement est très sensible à la présence d'eau. L'influence de

la proportion en argiles sur les propriétés du sol augmente avec la quantité d'eau. Lorsque la quantité d'argile excède 50 % en masse, le comportement du mélange est gouverné par l'effet de l'argile (Khattab, 2002).

Les argiles alluviales sont celles que l'on trouve dans les vallées marécageuses et proviennent du transport par l'eau des argiles résiduelles ou sédimentaires, à partir des reliefs élevés jusqu'aux bas-fonds, le long des cours d'eau, mais aussi par les dépôts de matières en suspension.

Les matériaux latéritiques ou résiduels sont généralement développés *in situ* à la suite d'une altération météorique des roches. Ils sont localisés dans les zones de topographie haute telle que les interfluves. Ils s'observent au niveau supérieur des profils. Ces minéraux argileux sont constitués de minéraux du groupe de la kaolinite, des oxy-hydroxydes de fer, de quelques minéraux primaires. Leurs couleurs varient de brun-jaune à brun-rouge ou brun-foncé. Les teneurs en sable sont comprises entre 10 et 36 %, avec une moyenne de 30,4 %. Les teneurs en kaolinite sont assez fortes (65-75 %). Ce sont des argiles plus ou moins plastiques et sans carbonates. De nombreux réservoirs ont été mis en évidence dans la région de Yaoundé (Ngon Ngon, 2007).

## **I.2. Genèse et évolution**

Les argiles peuvent se former soit *in situ* (argiles résiduelles), soit dans un environnement de dépôt (argiles allochtones). Leur nature est liée à celle du matériau primaire, au climat et à la végétation, à la topographie, aux processus et mécanismes de l'altération, à l'environnement de dépôt (Velde, 1995) et à l'action du temps. En fonction des conditions qui dominent l'environnement de dépôt, les minéraux argileux sont en continuelle évolution (Thorez, 2003). Les mutations qui en résultent sont à l'origine des modifications structurelles et/ou de composition. Les minéraux argileux résultent de l'altération mécanique (physique/hérité) ou chimique (transformation ou néoformation) d'une roche préexistante (Millot, 1964) riche en silice ou en aluminium sous l'action de l'eau chargée du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Cette altération peut se faire:

- soit sur place (*in situ*): dans ce cas l'argile obtenue est dite « argile primaire ». Le plus souvent, elle est grossière (peu plastique) et présente les caractéristiques de la roche mère qui lui a donnée naissance (matériaux lithodépendants). On distingue deux processus d'altération: l'altération primaire résiduelle ou supergène (entre 5 et 25°C de température), (Meunier, 2003)

et l'altération hydrothermale (température supérieure à 50°C). Si l'argile résulte de la combinaison des ces deux processus d'altération, on parle alors de gisements primaires mixtes (Ekosse, 2010; Fernández-Caliani et al., 2010);

- soit par transport (par l'eau ou le vent) suivi du dépôt ou sédimentation dans un environnement lacustre ou côtier (lac, lagune, estuaire...). L'argile obtenue est dite «secondaire».

Il est à noter que les propriétés et la composition des minéraux argileux diffèrent selon les conditions climatiques (héritage, néoformation et transformation), topographiques (allitisation, monosialitisation et bisialitisation) et la nature de la roche mère (acide ou basique), (Figure 7). En milieu tropical chaud et humide se forme principalement la kaolinite sur roche acide (granite, rhyolite) et la smectite sur roche basique. Mais en climat tropical sec où le drainage est mauvais, la smectite peut se former par altération d'une roche acide comme le granite. La kaolinite résulte le plus souvent de l'altération des feldspaths alors que l'illite et la chlorite sont les minéraux hérités provenant de l'altération des micas (biotite et muscovite). Les smectites quant à elles proviennent de l'altération des plagioclases. Les minéraux argileux sont en continuelle évolution minéralogique pour atteindre un état d'équilibre thermodynamique selon l'agent d'altération (Thorez, 2003).

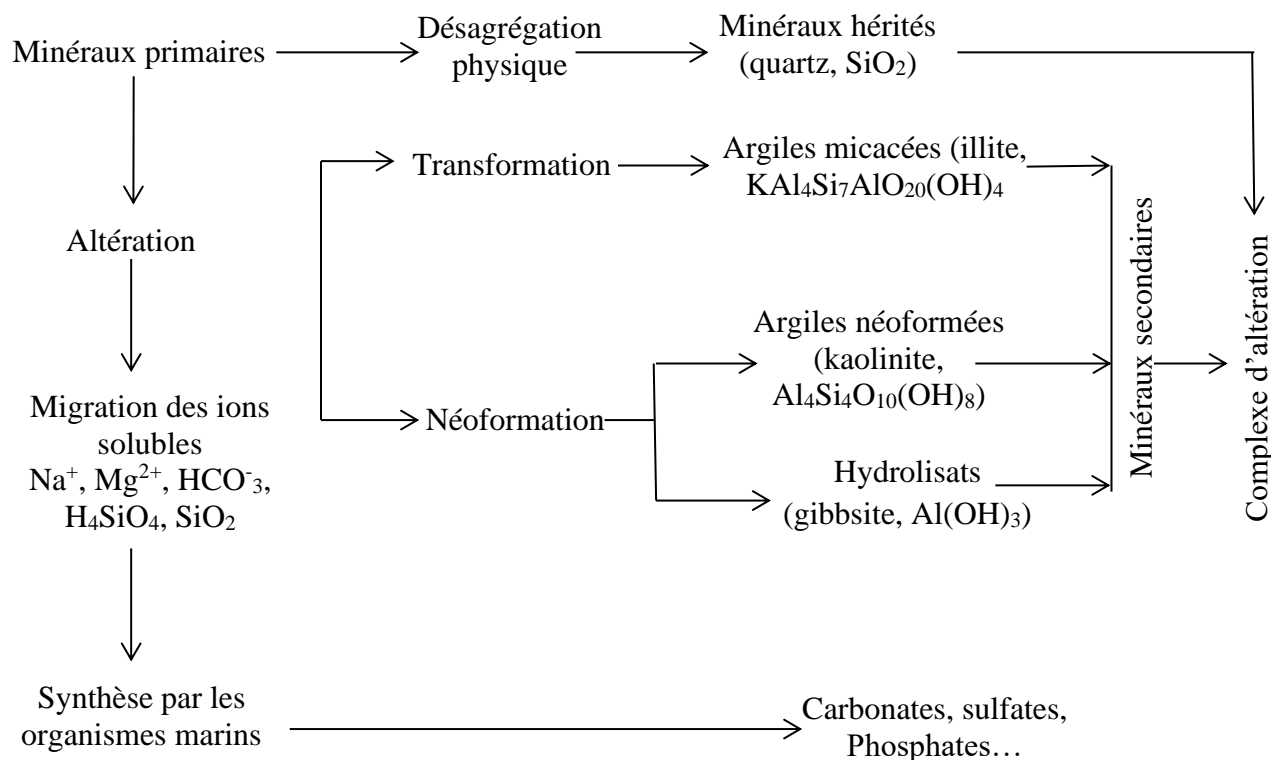


Figure 7: Evolution des matériaux primaires et formation des argiles (Landry et Mercier, 1992).

### I.3. Classification

Diverses classifications des minéraux argileux ont été proposées. La première, établie par l'AIPEA ([Association Internationale Pour l'Etude des Argiles, 1966-1972](#)), s'intéresse à la charge du feuillet et au nombre d'atomes métalliques en couche octaédrique. La deuxième prend en compte la distribution des substituants et le type de cations compensateurs ([Mering et Pedro, 1969](#)). La classification la plus utilisée est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet. Suivant le nombre de couches tétraédriques et octaédriques, on distingue:

- les argiles de type 1/1, elles sont constituées de feuillets comprenant une couche tétraédrique et une couche octaédrique (T-O), pour une distance basale comprise entre 0,71 et 0,73 nm. Ce type correspond au groupe de la kaolinite. Le feuillet est électriquement neutre et l'espace inter-lamellaire est dépourvu d'espèces chimiques, à l'exception de l'halloysite dont des molécules d'eau peuvent s'insérer dans l'inter-feuillet;
- les argiles de type 2/1, elles sont constituées de feuillets comprenant deux couches tétraédriques et une couche octaédrique (T-O-T), pour une distance basale comprise entre 0,91 et 1,5 nm selon le contenu de l'inter-feuillet. Lorsque le déficit de charge est nul, il n'y a pas de cation inter foliaire (l'inter-feuillet est inexistant). La distance basale est alors minimale et varie entre 0,91 et 0,94 nm. Ce sous-groupe est celui de la pyrophyllite et du talc. Lorsque le déficit de charge est maximal (compris entre 0,9 et 1), le cation compensateur n'est pas hydraté et la distance basale varie entre 0,96 et 1,01 nm. Ce sous-groupe est celui des micas et l'illite en fait partie. Le potassium présente unit les feuillets par de fortes interactions électrostatiques assurant une grande stabilité de l'illite;
- les argiles de type 2/1/1, elles sont constituées de feuillets comprenant deux couches octaédriques et deux couches tétraédriques (T-O-T-O), pour une distance basale de 1,4 nm. Ce type correspond au groupe des chlorites. Les minéraux de ce groupe sont répartis en deux: les chlorites vrais (chargée négativement) ont des liens de proximité avec le mica magnésien et les chlorites gonflants (pseudo-chlorites), des liens de proximité avec les smectites.

### I.4. Minéraux associés

Les minéraux argileux sont généralement associés à d'autres minéraux. Ces derniers jouent un rôle non négligeable dans les propriétés physico-chimiques des argiles et par conséquent, leurs comportements. Il s'agit de la silice ( $\text{SiO}_2$ ), des oxydes et hydroxydes de fer (hématite [ $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ], maghémite [ $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ], magnétite [ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ], goethite [ $\alpha\text{FeOOH}$ ],

lépidocrocite [ $\gamma\text{FeOOH}$ ], limonite [ $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ]), de certains feldspaths et carbonates (Millogo, 2008).

### I.5. Secteurs d'utilisation et valeur commerciale des matériaux argileux

Les principales propriétés des argiles entraînent leurs utilisations dans plusieurs domaines industriels (Figure 8) parmi lesquelles se trouve l'industrie céramique (Konta, 1995; Harvey et Murray, 1997; Murray, 2000).

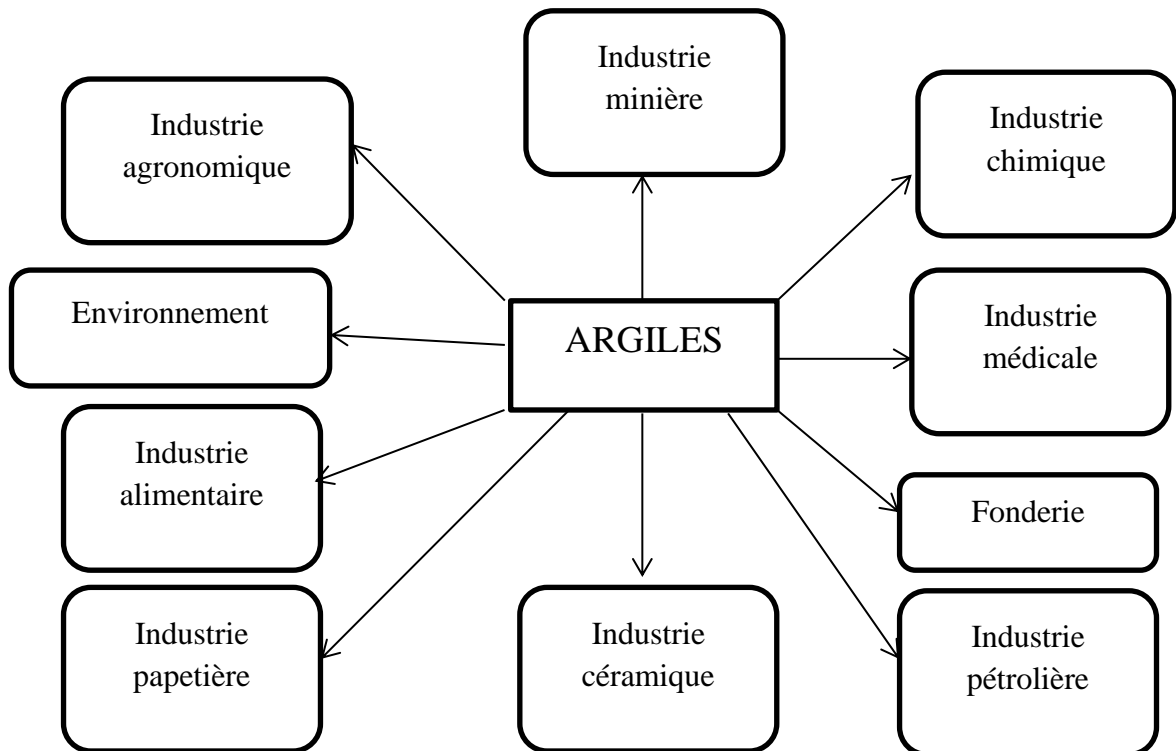


Figure 8: Domaines d'application des argiles.

Dans l'industrie chimique, l'argile sert à la décoloration des huiles, tant minérales que végétales (Dextreit, 1997; Mache, 2013).

Dans l'industrie pétrolière, l'argile sert de catalyseur dans la genèse du pétrole, déterminant une suite de transformation de diverses matières organiques (Dextreit, 1997).

Dans l'industrie pharmaceutique, l'argile est utilisée pour pallier les difficultés gastro-intestinales, combler les carences en macro et oligo-éléments (Liewig et al., 2012). Dans certains cas d'urgence, l'argile permet de purifier l'eau et de combattre ainsi les infections. L'eau ainsi purifiée peut être utilisée dans le cadre de la préparation dans certains actes chirurgicaux (Charié, 2007; Allègre, 2012).

Les argiles interviennent dans la protection de l'environnement. Elles sont actives dans le stockage de déchets radioactifs (Perromet, 2004).

Dans l'industrie alimentaire, les argiles peuvent être utilisées comme insecticides pour les grains de maïs; dans la filtration et la calcification des boissons et comme agent de décoloration des eaux de rivières (Djoufac et al., 2010).

Dans l'industrie céramique, l'argile constitue la matière première de base. Selon sa variété, elle est très utile en ce qui concerne:

- la fabrication des briques et tuiles (Sigg, 1991), des réfractaires (produits capables de résister à des températures supérieures à 1500°C) et des tuyaux en grès;
- la fabrication des carreaux pour sols et murs (Galos, 2011), des appareils sanitaires (cuvettes de WC, bidets, lavabos), des céramiques techniques, des abrasifs inorganiques et des céramiques domestiques (Vaisselle, objets en porcelaine, en faïence et en grès fin).

## **I.6. Propriétés des argiles pour produits de terres cuites**

Les argiles sont les constituants principaux des produits de terre cuite; de ce fait, les propriétés physico-mécaniques de ces derniers vont dépendre de la granulométrie, de la plasticité et de la composition minéralogique et chimique des argiles qui ont été utilisées (Borman, 2004; Murray, 2007; Ekosse, 2010; Diko et al., 2011).

### **I.6.1. Granulométrie**

La granulométrie est l'étude permettant la séparation des particules selon leur taille ou diamètre. Cette étude est très importante pour les minéraux industriels (Hart et al., 2011). En effet, certaines caractéristiques telles que l'aptitude au façonnage, le retrait (au séchage et à la cuisson) et la qualité du produit fini dépendent de la composition granulométrique. Il existe quatre fractions granulométriques: les graviers, les sables, les limons et les argiles. Mais d'un pays à l'autre on observe des légères variations dans la taille des particules.

### **I.6.2. Plasticité**

La plasticité est l'aptitude d'une matière à se déformer sous l'effet d'une force mécanique imposée, et à garder sa déformation après la disparition de cette force. C'est l'une des propriétés recherchées en céramique (Fenili et al., 2004; Murray, 2007; Claudio et Adriano, 2008; Andrade et al., 2011; Wetshondo, 2012). Elle dépend en partie de la teneur en

eau, de la granulométrie, de la composition minéralogique (Kerboul et Bossler, 1990; Bergaya et al., 2006; Andrade et al., 2011) et de la méthode employée pour sa détermination.

### I.3.3. Composition minéralogique et chimique

Les argiles employées dans l'industrie céramique sont de nature chimique et minéralogique très variables. Dans le cas des argiles kaolinitiques, plusieurs catégories sont distinguées en fonction de la teneur en alumine et de leur utilisation dans les industries :

- les argiles réfractaires essentiellement kaolinitiques et riches en alumine (25-45 %) renferment peu d'alcalins;
- les argiles pour produits blancs avec des teneurs en fer inférieures à 1 % (Murray, 2007), généralement kaolinitiques, sont moins riches en alumine que les précédentes;
- les argiles pour produits grésants contenant des fondants (alcalins et alcalino-terreux) sont généralement composées de kaolinite et d'illite;
- les argiles pour produits de terre cuite et de faïence sont très variées. Elles peuvent être impures avec un pourcentage élevé d'illite. Elles contiennent des minéraux argileux fondants et des minéraux non argileux (quartz, oxydes divers, matières organiques, carbonates) en proportions variables suivant le produit final (tableau 2). Ces argiles sont connues sous le nom "ball clays", elles sont généralement d'origine secondaire ou alluviale (Wilson, 1998).

Tableau 2: Composition chimique des argiles utilisées dans la fabrication des produits de terre cuite (Alviset, 2005; Kornmann, 2005).

Eléments majeurs	Proportion (%)	Effet et action
SiO <sub>2</sub>	35-80	Dégraissant, squelette du produit
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8-25	Augmente la plasticité et la refractarité
TiO <sub>2</sub>	0,3-2	Couleur jaune brun pâle
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2-8	Donne la couleur rouge, fondant
CaO	0,5-5	Réduit l'énergie de cuisson, augmente la L.d
MgO	0-3	-
Na <sub>2</sub> O	0,1-1	Fondant, grésant
K <sub>2</sub> O	0,5-4	Fondant, grésant
CO <sub>2</sub>	0-15	-
Limite de détection	3-18	-

## **II. CERAMIQUE**

### **II.1. Définition**

Les céramiques sont définies selon le Larousse comme étant « Art de fabriquer les poteries, fondé sur la propriété des argiles de donner avec l'eau une pâte plastique, facile à façonner, devenant dure, solide et inaltérable après cuisson ».

La société américaine ASTM définit une céramique comme étant: « un article ayant un corps vitrifié ou non, de structure cristalline ou partiellement cristalline, ou de verre, dont le corps est formé de substances essentiellement inorganiques et non métalliques, et qui est formé par une masse en fusion qui se solidifie en se refroidissant, ou qui est formé et porté à maturité, en même temps ou ultérieurement, par l'action de la chaleur ».

Les céramiques sont donc des matériaux inorganiques, non métalliques, nécessitant de hautes températures lors de leur fabrication.

### **II.2. Classification des produits céramiques**

Les céramiques peuvent se classer selon leur application, selon leur mode d'élaboration et la forme finale et selon leur composition chimique.

#### **II.2.1. Selon leur application**

Nous avons:

- des céramiques traditionnelles, à usage alimentaire, pour le bâtiment ou l'ornementation : poterie, vaisselle, faïence, porcelaine, carrelage, briques, tuiles;
- des céramiques techniques ou industrielles: des céramiques électroniques (faibles courants), ou céramiques fonctionnelles; céramiques diélectriques (isolantes), conductrices, magnétiques; des céramiques pour applications électrotechniques (fortes puissances); des céramiques réfractaires, pour applications thermiques; des céramiques pour les applications mécaniques: céramiques structurales; des céramiques pour l'usinage: abrasif (polissage), outils de coupe (plaquette de carbure); des céramiques pour les applications optiques: transparence, émission de lumière; des céramiques pour le nucléaire: combustible nucléaire.

#### **II.2.2. Selon leur mode d'élaboration et la forme finale**

Nous pouvons citer entre autre:

- des produits façonnés: pièce livrée sous sa forme définitive: des pièces frittées sous pression atmosphérique; des pièces frittées sous pression (HIP); des pièces électro-fondues;
- des produits non façonnés (PNF): produits livrés sous la forme de mortier destiné à être coulé ou projeté puis « cuit » sur place. La protection thermique de céramique pour revêtir une pièce.

### **II.2.3. Selon leur composition chimique**

Nous pouvons avoir:

- des monolithiques: oxydes (produits siliceux ( $\text{SiO}_2$ ), produits alumineux, avec 30 à 100 % d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ): aluminosilicates (argile, mullite), alumine-oxyde de chrome-silice (ACS), haute teneur en alumine, et les produits basiques, à base de magnésie ( $\text{MgO}$ ); non-oxydes : carbures, nitrures;
- des composites: matrice céramique à renfort céramique, ou matrice céramique à renfort métallique.

Traditionnellement, les différents secteurs de la céramique se classent en deux groupes:

- le groupe de la céramique « grossière » ou « de construction », elle est basée sur la recherche des propriétés telles que la résistance à la compression, à l'usure et la résistance aux agents chimiques. Elle comprend les secteurs des briques et tuiles, des tuyaux en grès, des produits réfractaires et des granulats d'argile expansée;
- le groupe de la « céramique fine » ou de la « céramique traditionnelle et industrielle », qui regroupe les secteurs des carreaux pour sols et murs, des céramiques ornementales, des appareils sanitaires, des céramiques techniques et des abrasifs inorganiques.

Mais, le terme « terres cuites » est de plus en plus utilisé pour désigner les briques et les tuiles à base d'argiles et lesquelles servent de matériaux dans de nombreuses branches du bâtiment et de la construction. Le plus souvent, les briques et les tuiles ont une appellation qui désigne non pas la technique de façonnage utilisée, mais l'usage auquel elles sont destinées: briques de parement, de pavage, (pleines, perforées ou creuses) ou de cheminées et des tuiles extrudées ou pressées. Une céramique peut être émaillée ou non, poreuse ou vitrifiée.

### **II.3. Matières premières en céramique**

Plusieurs substances sont considérées comme matières premières en céramique. Il s'agit de: argiles, sables argileux, latérites, kaolins, quartz, corindon, diamant...

Plusieurs auteurs à l’instar de [Galtier et al. \(1992\)](#); [Baïlon et Dorlot \(2000\)](#) donnent la synthèse de différentes substances entrant dans la fabrication des produits céramiques ([Tableau 3](#)).

*Tableau 3: Substances entrant dans la fabrication des produits céramiques.*

Produits Céramiques	Matières premières naturelles	Autres matières
Terres cuites (Briques et tuiles)	Argiles (illites-kaolinites) Sables argileux Latérites	Dégraissants (sables, feldspaths, chamottes, laitiers granulés de hauts fourneaux), <u>Ajouts spéciaux</u> plastifiants: carbonate de sodium; flocculants: chaux, ciment; colorants: oxyde de fer, bioxydes de manganèse et de titane.
Produits réfractaires: Briques d’argiles réfractaires; briques de silice; briques de magnésie et d’alumine.	Argiles pures (kaolinite) Produits silico-alumineux Matières riches en alumine: bauxites; trimorphes de néosilicates; Quartzite; dolomite; magnésie; chromite; forstérite; graphite; zircon	Chamottes; corindon fritté; carbure de silicium; mullite, fondue ou spinelle; chaux fondue; oxyde de zirconium.
Tuyaux en grès	Argiles	Chamottes, émail (craie dolomie, quartz, oxydes métalliques)
Carreaux pour sols et murs	Argiles et kaolins Feldspaths, quartz, carbonates (calcite, dolomite) et talc	Chamottes
Céramiques ornementales ou céramiques domestiques	Argiles plastiques Feldspaths et quartz	
Appareils sanitaires	Kaolins et argiles Feldspaths, quartz et calcite	
Céramiques techniques (isolants; condensateurs; filtres; produits biomédicaux,...)	Kaolins, pas ou peu d’argiles Feldspaths et quartz	Oxydes, carbures (SiC); nitrures; borures et divers ions métalliques
Abrasifs inorganiques	Corindon, diamant Feldspaths, quartz, néphéline Kaolins et argiles	Alumines spéciales fondues, carbure de silicium noir et vert (CBN), nitrure de bore
Granulat d’argile expansée	Argiles Feldspaths, quartz et carbonates	Auxiliaires de dilatation (huiles lourdes, coke,...), agents de démoulage (dolomite, composés de chaux) et fondants.

#### **II.4. Produits céramiques dans la construction**

Les produits céramiques prennent une part importante dans le domaine de génie civil, car, suivant leur mode de fabrication, ils ont des propriétés variées, bien différentes les unes des autres. A la base de tous les procédés de fabrication, il y a l'argile, qui, mélangée à l'eau, donne une pâte dont la propriété est de durcir à la chaleur. En faisant varier les différents

composants de la pâte, la quantité d'eau et le degré de chaleur, on modifie les caractéristiques du matériau, qui devient plus ou moins dur, plus ou moins poreux, etc...

#### **II.4.1. Terres cuites**

Composé d'argiles légèrement alcaires, le mélange est cuit à une température relativement basse (800 à 1000°C). La terre cuite ainsi obtenue est un matériau ordinaire, peu dur et poreux, qui résiste mal aux chocs. Elle est utilisée pour le gros œuvre sous forme de briques (pleines ou creuses), de tuiles, de boisseaux, de cheminée et autres éléments comme les hourdis de planchers et de toitures.

#### **II.4.2. Terres cuites vernissées**

Ce sont des terres cuites de même composition que les précédentes, mais dont la surface est recouverte d'un vernis ou d'un léger émaillage qui les protège contre l'humidité. Les carreaux de terre cuite vernissée sont ainsi d'entretien plus facile, mais leur teinte naturelle est parfois modifiée par le vernissage.

#### **II.4.3. Terres cuites réfractaires**

Par une addition de quartz au mélange de base, on obtient un produit résistant aux agents chimiques et aux températures élevées. Les terres cuites réfractaires servent à la fabrication de briques spéciales destinées aux revêtements intérieurs des foyers de cuisinières, fours ou barbecues.

#### **II.4.4. Briques**

La brique d'argile est l'un des plus anciens matériaux de construction connus. La brique servit en tout cas pour construire Babylone 3 000 ans avant Jésus-Christ, puis les ouvrages colossaux des Romains, la Grande Muraille de Chine et certaines cathédrales. Bien utilisée, elle défie les siècles et les intempéries.

#### **II.4.5. Faiences**

Les faiences sont des terres cuites recouvertes en surface d'un émail qui les rend imperméables aux liquides. Elles servent à l'exécution de poteries culinaires, de vaisselle plus ou moins décorée, d'appareils sanitaires ou de carreaux de revêtement.

#### **II.4.6. Grès**

Ils sont composés d'une pâte argileuse, additionnée de minéraux riches en feldspath. Ce mélange est cuit à une température voisine de 1300°C, température à laquelle les fondants, ainsi que le feldspath, provoquent la vitrification de la pâte. Les grès peuvent être utilisés dans l'équipement ménager (plats de cuisson, vases, etc.), mais aussi dans l'équipement des habitations (tuyaux d'écoulement d'appareils sanitaires ou revêtements de sols et de murs).

#### **II.4.7. Mosaïques**

Le terme "mosaïque" définit non pas un produit, mais un assemblage d'éléments de petites dimensions formant une fresque ou reproduisant un dessin. Par extension, on désigne par ce terme les carrelages réalisés à l'aide de petits éléments de 1 à 5 cm de côté. Suivant la forme de ces éléments, l'assemblage peut être: une "mosaïque simple", constituée à l'aide de ronds, de carrés ou de rectangles formant des rangées symétriques et répétitives sur toute la surface ; ou bien une "mosaïque de hasard", réalisée à l'aide de fragments de formes et de couleurs variées, disposés sans tenir compte d'un motif précis.

### **III. CUISSON DES PRODUITS CERAMIQUES**

En fabrication de produits de terres cuites comme dans tout autre processus d'élaboration de produits céramiques, la cuisson doit être considérée comme une phase fondamentale puisqu'elle confère aux produits finis leurs caractéristiques définitives et leur plus ou moins bonne aptitude à l'emploi.

La cuisson donne lieu à des transformations capitales du matériau argileux initial, et si ces transformations sont incomplètes, la composition physico-chimique finale peut varier notablement. Ces transformations correspondent surtout à des réactions à l'état solide, assez lentes, ce qui confère toute son importance à la notion de chronothermie ou de maintien de température en palier. Il s'agit donc d'une consolidation sans fusion totale du matériau céramique mis en forme et laquelle est souvent accompagnée d'une densification (élimination des pores) et d'un grossissement des grains (diminution du nombre de grains).

On comprend dès lors que le processus de cuisson présente des conséquences pratiques importantes liées principalement aux variations: pondérales (pertes en poids); dimensionnelles (dilatations et retraits); structurales qui conditionnent étroitement les caractéristiques du tesson cuit.

Le [tableau 4](#) présente les températures habituelles utilisées pour la cuisson de produits céramiques ([Jouenne, 1984](#); [Elfil et al., 1995](#); [Baïlon et Dorlot., 2000](#); [Djangang et al., 2008](#)).

*Tableau 4: Températures usuelles de cuisson des produits céramiques.*

<b>Produits céramiques</b>	<b>Température de cuisson (°C)</b>
Réfractaires	1400-1600
Porcelaines	1100-1400
Carreaux	1000-1250
Sanitaires	1200-1280
Vitreous	1200-1280
Faiences	900-1200
Poteries	900-1100
Terres cuites	800-1000
Grès	1100-1300

#### **IV. STABILISATION DES BRIQUES DE TERRE**

La stabilisation est une technique qui permet d'améliorer la portance et le comportement à l'eau d'un sol ou d'un matériau moyennant l'ajout d'un liant.

##### **IV.1. Historique des briques de terre**

L'utilisation de la terre crue remonte depuis l'Antiquité: en Mésopotamie, en Afrique et au Moyen-Orient (pour les civilisations romaines puis musulmanes), en Asie, les Moines Bouddhistes et les empereurs de Chine, en Amérique du Nord, en Europe au Moyen-âge, etc... Les civilisations ont construit des villes entières en terre ([Pignal, 2005](#); [Delbecque, 2011](#)). La terre crue est une tradition millénaire qui s'est perpétuée jusqu'aujourd'hui et qui, à travers la diversité de ses techniques, est universellement utilisée. Actuellement, plus d'un tiers de la population de la planète habite des constructions en terre. L'architecture de terre fait partie du patrimoine d'au moins quarante nations, réparties sur tous les continents ([Pignal, 2005](#)). Le point faible de la construction en terre crue est sa grande sensibilité à l'humidité et à l'eau. C'est pourquoi, la terre cuite a supplanté la terre crue sous toutes les latitudes, grâce à sa qualité, sa résistance aux intempéries, sa souplesse et depuis 150 ans grâce à son industrialisation ([Pignal, 2005](#); [Delbecque, 2011](#)).

## IV.2. Historique des briques de terre au Cameroun

En 1895, le Major *Hans Dominik*, chef du poste militaire de Yaoundé, installe une usine de briques sur la rive droite de la rivière Abiergué, qui sépare aujourd'hui la Briqueterie du quartier Messa. Cette usine et ses productions ont pour objectif de fournir les matériaux nécessaires à la construction des premiers bâtiments de la ville coloniale (Mveng, 1981). L'usine produisait 600 briques de terre cuites par jour, ainsi que des tuiles (Laburthe-Tolra, 1981). Le lieu de son implantation prend le nom de Briqueterie. La Briqueterie figure parmi les plus anciens quartiers de la ville de Yaoundé, fondée dans sa forme moderne en 1889 par les colonisateurs allemands en lieu et place de villages ewondos. Le quartier de la Briqueterie aurait connu (Essono, 2016) plusieurs dénominations dans la langue ewondo: *Ekudu*, *Meban*, *Ekozog*, et enfin le patronyme *Elig Fuda Mekengo*. Les appellations *Ebé Birig* puis *Birig Asi* (manufacture de briques, devenu briqueterie). Cette dernière dénomination est liée à l'implantation d'un établissement industriel de fabrication de briques en terre cuite pendant la période coloniale allemande.

## IV.3. Stabilisation proprement dite

Le Centre des Nations Unies pour les établissements humains a défini la stabilisation d'un sol comme étant, la modification des propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec une application particulière (United Nations, 1992). Mais la stabilisation est un problème complexe car de très nombreux paramètres interviennent. Il faut en effet connaître: les propriétés de la terre, les améliorations envisagées, l'économie du projet, les techniques de mise en œuvre de la terre choisie pour le projet et la maintenance du projet réalisé (Houben et Guiland, 2006).

La stabilisation est un ensemble de procédés physiques ou chimiques visant à améliorer les caractéristiques d'une brique de terre, en particulier sa résistance portante, sa sensibilité à l'eau et sa durabilité. Elle permet ainsi de réduire le volume des vides entre les particules solides, ou de colmater les vides et de créer des liens ou d'améliorer les liaisons existant entre les particules (Meukam, 2004). Stabiliser la terre, consiste à donner des propriétés irréversibles face aux contraintes physiques; en d'autres termes, à modifier les propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec une application déterminée (Randrianaivosoa, 2014).

D'après les travaux de [Symons \(1999\)](#) et [Winterkorn \(1975\) in Taallah \(2014\)](#), les principaux objectifs de la stabilisation des sols sont les suivants :

- l'obtention de meilleures caractéristiques mécaniques de la terre (augmenter les résistances à la compression, à la traction et au cisaillement),
- la réduction de la porosité et les variations de volume (réduire le retrait et le gonflement à l'eau),
- l'amélioration de la résistance à l'érosion du vent et de la pluie (réduire l'abrasion de surface et la perméabilité à l'eau).

On dénombre trois procédés de stabilisation ([Winterkorn, 1975 in Taallah, 2014](#)) permettant de valoriser les sols. Il s'agit de:

- la stabilisation physique, elle consiste à modifier les propriétés des sols par une amélioration des caractéristiques du matériau par correction de la granularité. Le mélange obtenu conduit selon le cas, soit à diminuer l'indice de plasticité de matériau de base, soit à lui conférer une cohésion;
- la stabilisation mécanique, elle améliore la brique de terre par modification de sa densité naturelle. Il s'agit du compactage qui consiste essentiellement en une réduction de la porosité du matériau par resserrement des particules. Les effets d'un compactage effectué dans de bonnes conditions se traduisent par une diminution de la perméabilité, de la compressibilité, de l'absorption d'eau et du gonflement. Le compactage à lui seul permet d'obtenir un matériau aux caractéristiques mécaniques élevées;
- la stabilisation chimique, elle est assurée par l'ajout d'autres matériaux ou de produits chimiques qui modifient ses propriétés, soit du fait d'une réaction physicochimique entre les particules de la terre et le produit ajouté soit en créant une matrice qui lie ou enrobe les particules. On peut citer, en particulier du ciment, de la chaux, du bitume, et de sous-produits industriels. Le choix et la quantité de matériau ou de produit chimique à ajouter dépendent de la nature du sol et du degré d'amélioration de la qualité du sol souhaité ([Akpokodje, 1985](#)). Il existe plusieurs «stabilisants» de la terre à bâtir (le sable ; la fibre ; le bitume ; la résine ; le ciment ; la chaux...).

#### **IV.3.1. Sables et graviers**

Les sables et les graviers permettent de structurer la terre trop argileuse en donnant un squelette au matériau. L'argile joue alors le rôle de liant. L'ajout de sable ou de gravier à la terre est donc un procédé de stabilisation physique qui modifie la granulométrie de la terre

afin d'améliorer sa compacité (Gate, 1994). Il permet également d'utiliser moins d'argile et ainsi d'épargner les gisements.

#### **IV.3.2. Fibres**

Les fibres sont utilisées pour apporter une armature à la terre. Elles sont d'origine animale (poils et crins de bétail), végétale (les pailles, les balles de céréales, le chanvre, les fibres de noix de coco, de palmier, ...) ou synthétique (acier, fibres de verre, cellophane). La paille est la fibre la plus employée pour stabiliser la terre. Elle s'adapte à l'état plastique, visqueux, et même à la compression. Elle réduit la fissuration au séchage et augmente la résistance à la traction. Elle contribue à la résistance de la terre à l'échelle du grain, mais n'interagit pas directement avec les plaquettes d'argile, à l'échelle microscopique (Houben et Guillaud, 1989). L'ajout des fibres permet:

- « d'empêcher la fissuration au séchage en répartissant les tensions dues au retrait de l'argile dans toute la masse du matériau;
- d'accélérer le séchage grâce aux canaux de fibres qui agissent comme un drainage de l'humidité vers l'extérieur. Inversement la présence de fibres augmente l'absorption d'eau;
- d'alléger le matériau en allégeant sa masse volumique et en améliorant ses propriétés d'isolation;
- d'augmenter la résistance à la traction (Houben et Guillaud, 1989).

L'efficacité de la stabilisation aux fibres dépend des caractéristiques de la terre et des interactions entre les fibres et la terre. La terre stabilisée aux fibres présentera une bonne résistance à la fissuration, au cisaillement, et à la compression, et une meilleure capacité d'absorption d'énergie sismique (Houben et Guillaud, 1989; Galán-Marín et al., 2010). Certains paramètres sont néfastes à la stabilisation aux fibres (Houben et Guillaud, 1989). Il convient d'éviter, une quantité trop importante de fibres pour ne pas diminuer les points de contact entre les fibres et la terre et diminuer donc la résistance du matériau. L'orientation des fibres est importante: les fibres doivent être placées dans toutes les directions.

#### **IV.3.3. Bitume**

Le bitume est un produit composé d'au moins 40 % d'hydrocarbures lourds. Il doit être mélangé à des solvants (gasoil, kérosène, naphta) ou à l'eau pour être utilisé comme stabilisant. Il permet d'imperméabiliser en entourant les grains de terre d'un film imperméable

et boucher les pores et fissures. L'emploi du bitume comme stabilisant reste limité (Houben et Guillaud, 1989).

#### **IV.3.4. Résine**

Les résines dérivent souvent de substances végétales comme par exemple de résidus du traitement du bois au cours de la fabrication de la pâte à papier. La résine est un hydrophobant qui réduit la sensibilité de la terre à l'eau (Houben et Guillaud, 1989).

#### **IV.3.5. Ciment**

Le ciment est considéré comme un liant inorganique, et le meilleur stabilisant des briques de terre comprimée (BTC), (Houben et Guillaud 1989). Le ciment permet d'enchaîner: il crée une liaison inerte qui s'oppose à tout mouvement. Il améliore la résistance à l'eau en créant des liens entre les particules de sables et graviers. Les meilleurs résultats sont obtenus avec des terres sableuses (Rigassi, 1995). Cinq ou six pourcents de ciment suffiraient pour avoir des résultats satisfaisants (Rigassi, 1995). La stabilisation au ciment diminue l'importance du retrait et du gonflement et nécessite peu d'eau. Le ciment diminue cependant la conductivité thermique de la terre. Plus il y aura de ciment dans un bloc de terre, plus la conductivité thermique se rapprochera de celle du ciment (Baffoue et al., 1997 in Mango Itulamy, 2019; Agridoc, 2004). L'inconvénient du ciment demeure son coût de production élevé et la nécessité des gisements calcaires.

La présence d'oxydes de fer (terres latéritiques) qui favorisent les réactions pouzzolaniques ou un indice de plasticité faible < 20 % (i.e., terres sableuses) sont des paramètres d'efficacité pour l'utilisation du ciment. Par contre, la matière organique, une eau chargée en sel, la présence des sulfates ou une terre trop argileuse (> 20 % d'argile) seraient des paramètres néfastes à l'utilisation du ciment comme stabilisant (Houben et Guillaud, 1989; Rigassi, 1995).

#### **IV.3.6. Chaux**

La chaux permet de former des liaisons chimiques stables entre les particules d'argiles. La chaux aérienne vive (CaO) ou la chaux éteinte  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sont utilisées pour les travaux routiers. Elles réagissent positivement avec les terres argileuses et nécessitent une teneur en eau relativement élevée qui dépend de la quantité de chaux utilisée. La chaux interagit avec les argiles et peu avec les sables. En général, la chaux ne convient pas pour la stabilisation des

BTC qui nécessitent peu d'eau et des terres sableuses (Gate, 1994). La chaux aérienne diminue le retrait et le gonflement, augmente la résistance à la compression, diminue la sensibilité à l'eau, la masse volumique sèche et la plasticité (Gate, 1994; Rigassi, 1995). La chaux nécessite des gisements calcaires mais demande moins d'énergie que le ciment pour sa fabrication. Il existe un dosage optimal pour chaque terre. La quantité de chaux pour stabiliser la terre est de l'ordre de 6 à 12 % en général (Rigassi, 1995; Agridoc, 2004). Une terre argileuse (jusqu'à 70 %) est favorable à l'utilisation de la chaux. Par contre, la présence des sulfates ou de matière organique est néfaste (Houben et Guillaud, 1989; Rigassi, 1995).

#### **IV.4. Stabilisation à la Cendre du *Pycnanthus angolensis***

*Pycnanthus angolensis* couramment appelé **Iomba** ou **arbre à suif** est un arbre sempervirent, monoïque ou dioïque de taille moyenne à grande pouvant atteindre 40 m de haut. L'écorce externe est de couleur brun grisâtre avec un extrudat brun orange. Il se rencontre dans la zone forestière d'Afrique tropicale. En agroforesterie, *Pycnanthus angolensis* est l'une des espèces d'arbres de la forêt humide des basses terres d'Afrique de l'ouest et d'Afrique centrale les plus importantes identifiées par le Word Agroforestry Centre pour un programme de domestication. Traditionnellement, le bois de *Pycnanthus angolensis* possède une grande valeur combustible. Il est utilisé pour la fabrication des planches fendues nommées « calabot » dans la zone côtière du Cameroun. Il est utilisé pour la fabrication des bardeaux pour les toits et les murs de maisons, ainsi que des planches pour des huisseries de portes et fenêtres.

#### **Conclusion**

Les argiles, grâce à leurs principales propriétés ont conduit l'Homme dans la recherche de son bien être à l'utiliser dans diverses industries parmi lesquelles se trouve la céramique. Leur abondance, leurs nombreux domaines d'application et leur faible coût de traitement sont à la base du développement socio-économique de la plupart des communautés. Au Cameroun, la valorisation des argiles ou matériaux argileux dans la céramique et plus particulièrement celui de la construction reste peu développée en partie, à cause de l'absence d'une banque de données complète et fiable pouvant expliquer la mise sur pied d'une unité de fabrication locale, semi-industrielle ou industrielle.

Pour mener à bien ce travail, il est important de connaître la démarche à adopter pour la valorisation des matériaux argileux Ngat en céramique. Ce sera l'objet du chapitre suivant.

---

# CHAPITRE III. MATERIELS ET PROCEDURES

## ANALYTIQUES

---

### Introduction

Toute étude scientifique doit s'appuyer sur une méthodologie qu'accompagne un matériel bien approprié. Le travail a débuté par une recherche bibliographique ayant conduit à l'ébauche du thème de recherche. Elle a été suivie par des campagnes de terrain au cours desquelles des sondages à la tarière manuelle et à l'aide des fosses ont été effectués, et enfin des matériaux argileux ont été prélevés. Ces derniers ont été décrits sur le plan macroscopique et certains parmi eux ont été sélectionnés pour des analyses de laboratoire.

### I. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

La recherche documentaire a consisté d'une part en l'exploitation de différentes cartes topographiques et géologiques, et d'autre part, aux consultations des thèses, articles, et ouvrages scientifiques en relation avec le thème d'étude. Ces études bibliographiques ont débouché à la meilleure compréhension de la thématique choisie ainsi qu'à la délimitation du secteur d'étude.

### II. METHODES D'ETUDE SUR LE TERRAIN

Cette phase a consisté à 06 campagnes de terrain au cours desquelles certains travaux ont été menés.

#### II.1. Sondage et échantillonnage

Une fois sur le terrain, le prélèvement des matériaux argileux s'est déroulé de deux manières: à la tarière manuelle pour le choix des différents points d'échantillonnage ([Figure 9 a](#)) et à l'aide des fosses ([Figure 9 b](#)) pour le prélèvement proprement dit. Ces fosses sont réalisées à l'aide d'une pelle et d'un plantoir. Les échantillons ont été collectés à des profondeurs différentes, entre 25 et 160 cm. Au total, 24 échantillons ont été prélevés sur 2 sites. Le site 1 (18 échantillons) est celui de Ngat lieu dit Carrière, il se trouve à proximité d'une ancienne carrière de sable. Le site 2 quand à lui se trouve à Ngat lieu dit Plantation (06

échantillons), il est localisé à côté de l'ancien camp des allemands à l'époque coloniale et dont les maisons qui existent encore de nos jours sont construites en bloc de terre.



Figure 9: Prélèvement des matériaux: a) sondage à la tarière manuelle, b) sondage à l'aide d'une fosse.

## II.2. Description macroscopique des matériaux

### II.2.1. Couleur des matériaux

Pour connaître la couleur des produits cuits, la méthode utilisée est celle de l'appréciation visuelle à la gamme des couleurs du code Munsell (2000). Ce code permet de repérer les couleurs naturelles des sols, il présente 322 couleurs standards classées systématiquement par leur notation Munsell. Pour décrire toutes les couleurs, ce code se sert de trois paramètres : le contraste, la teinte et la valeur. La teinte indique la relation au rouge, jaune, vert, bleu et violet. La valeur indique son éclaircissement et le contraste indique la variation au sein de cette valeur. Les couleurs indiquées sur la charte ont une même teinte, désignée par un symbole sur la bordure supérieure droite. La couleur devient de plus en plus claire de bas en haut. Le contraste augmente de gauche à droite. La valeur est indiquée par une échelle verticale à gauche de la charte. Le contraste est indiqué par l'échelle horizontale au bas de la charte. La nomenclature consiste à donner la couleur et la notation Munsell.

## **II.2.2. Texture des matériaux**

Le test au toucher a permis de déterminer la texture des différents matériaux prélevés. Il consiste à prendre une petite quantité du matériau à étudier, humidifier cette portion avec un peu d'eau et rouler la portion entre les doigts. Si l'on obtient un boudin, la texture est dite argileuse. Par contre, si le matériau s'effrite avec un dépôt lumineux sur les mains, la texture est limoneuse. Lorsqu'il n'adhère pas, la texture est dite sableuse.

## **II.3. Etiquetage des matériaux**

Une fois prélevé, les échantillons ont été étiquetés à l'aide d'un marqueur indélébile. La nomenclature adoptée comporte un préfixe constitué de NGB suivi des suffixes 1, 2, 3... désignant respectivement le numéro de l'échantillon. Exemple: NGB1, NGB2.....NGB18 pour les échantillons d'argile du site de Ngat-carrière. Pour les échantillons de matériaux argileux du site de Ngat-plantation, la nomenclature adoptée est aussi constituée de NPA suivie des chiffres 1, 2, ...représentant le numéro de l'échantillon, exemple: NPA1, NPA2.....NPA6.

## **III. METHODES D'ETUDE EN LABORATOIRE**

Ces méthodes permettent de présenter et d'expliquer les différentes analyses effectuées sur les matériaux argileux prélevés sur le terrain.

### **III.1. Tests physico-chimiques**

Les matériaux argileux récoltés sur le terrain ont été soumis aux analyses physico-chimiques telles que l'humidité résiduelle, la granulométrie, les limites d'Atterberg, la densité apparente, la densité réelle, la matière organique et la capacité d'échange cationique, le potentiel d'hydrogène. Ces analyses ont été effectuées aux laboratoires de Géologie des Formations Superficielles et Applications du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, à l'Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA) et à la Mission de Promotion des Matériaux Locaux (MIPROMALO).

#### **III.1.1. Humidité résiduelle ou teneur en eau naturelle (w)**

La teneur en eau initiale est un paramètre essentiel. En effet, l'eau renforce la cohésion naturelle de la terre en intensifiant l'interaction entre les particules d'argiles. Sans eau, il serait

impossible de construire un mur en terre (Fontaine et Anger, 2009). Humidité résiduelle est la quantité d'eau liée, restant dans le sol après séchage à l'air libre. Cette eau est extraite par séchage à l'étuve. La démarche consiste à:

- prendre un récipient propre, sec de masse  $M_1$  et le tarer;
- placer à l'intérieur de ce récipient un échantillon de sol humide;
- peser l'ensemble, qui représente la masse  $M_2$ ;
- placer cet ensemble à l'étuve à  $105^\circ\text{C}$  pendant 72 heures;
- une fois sorti de l'étuve, l'ensemble (récipient et échantillon) est refroidi et pesé à nouveau et cette masse représente  $M_3$ . L'humidité résiduelle ( $w$ ) s'exprime en pourcentage et est donnée par la formule:

$$w(\%) = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} \times 100$$

### III.1.2. Granulométrie

La granulométrie constitue le paramètre principal pour déterminer la qualité d'une terre (Jiménez et Guerrero, 2007). La granulométrie influence l'aptitude au façonnage et au séchage de la terre. Des terres qui n'ont pas la granulométrie requise pour des matériaux en BTC peuvent cependant donner des bons résultats en ajoutant des stabilisants adéquats (Moevus et al., 2012). Il existe plusieurs techniques de mesure de la granulométrie: tamisage, sédimentométrie, imagerie, diffraction laser, microscopie.

L'étude granulométrique d'un matériau naturel, terre ou sol, devant servir dans le domaine de la céramique est d'une importance capitale car c'est d'elle que dépendent les caractéristiques des produits finis qui en dérivent. La composition granulométrique des sols ou matériaux intervient donc pour une part importante dans leurs aptitudes au façonnage, au séchage et à la cuisson.

La granulométrie peut se définir comme étant une analyse qui permet de connaître la répartition des particules minérales inférieures à 2 mm selon les classes granulométriques (argiles; limons; sables) et de déterminer la répartition statistique des particules dans ces différentes classes. La méthode utilisée dans le cadre de ce travail est la sédimentométrie par voie humide. Elle est réalisée par la méthode à la pipette de ROBINSON-KÖLN (Rouiller, 1993). Elle permet de déterminer la texture du sol en séparant les fractions granulométriques: (les argiles, les limons fins et grossiers, les sables fins et grossiers). Dans les sols ferrallitiques

ou ferralsols, les oxydes de fer et les substances organiques assurent des liaisons avec les argiles. Pour mieux estimer la répartition de chaque fraction il est primordial de détruire ces liaisons. La méthode d'analyse granulométrique par la pipette de Robinson décrite par [Delaune et al. \(1991\)](#) a été choisie. La démarche consiste à:

- prendre 20 g de l'échantillon prélevé, le sécher au soleil et le mettre dans un bécher ;
- ajouter 10 ml d'eau de javel pour détruire le ciment (matière organique, oxyde de fer et d'aluminium);
- ajouter 20 ml d'hexamétaphosphate de sodium pour disperser les constituants minéraux et passer à l'agitateur rotatif pendant 2 h;
- verser la solution dans une allonge en ajoutant de l'eau jusqu'à atteindre 1000 ml;
- à l'aide de la pipette de Robinson et à une profondeur de 10 ml on procède au prélèvement qui se fait en 3 phases:
- à 46 secondes après la première agitation, on obtient la masse des argiles et celle des limons (grossiers et fins);
- à 4 minutes 48 secondes après la deuxième agitation, on obtient la masse des argiles et celle des limons fins;
- à 8 heures après la troisième agitation on obtient la masse des argiles ([Tableau 5](#)).
- avec la solution restante, on passe au lavage du sable. Le rinçage se fait jusqu'à l'obtention d'une eau claire au-dessus du sable. Après séchage à l'étuve, on utilise un tamis de 200 µm pour séparer les sables grossiers des fins.

*Tableau 5: Composition des différents prélèvements*

Prélèvements	Premier (après 46 s au repos)	Deuxième (après 4 min 48 s au repos)	Troisième (après 8 h au repos)
Composition des solutions	Limons grossiers + limons fins + Argiles	limons fins + Argiles	Argiles

s: seconde; min: minute; h: heure

Après ces différents prélèvements, les solutions recueillies sont placées à l'étuve à 40°C pour le séchage, et après cela on passe alors à la pesée. Connaissant au préalable le poids de l'assiette contenant chaque échantillon on détermine le poids de l'échantillon sec et ensuite on détermine le pourcentage des constituants de chaque échantillon après calcul. A la

fin, cinq fractions granulométriques sont déterminées à savoir l'argile (0 à 2 µm) et les limons (2 à 20 µm) fins par pipetage, les limons grossiers (20 à 50 µm) sont extrapolés par calcul à partir des résultats obtenus (Baize, 1988), et les sables fins (50 à 200 µm) et grossiers >200 µm par tamisage.

### III.1.3. Densimétrie

Elle nous permet de trouver les densités apparente et réelle des différents échantillons d'argile.

#### III.1.3.1. Densité apparente (da)

La densité apparente (da) est déterminée à partir des échantillons intacts. Le mode opératoire décrit par Bouassida et Boussetta (2007) consiste à prendre trois monolithes par échantillon et à les passer à l'étuve à une température comprise entre 70 et 85°C pendant 48 h. Ces monolithes sont pesés (P<sub>1</sub>). Ils sont paraffinés et pesés (P<sub>2</sub>). Les échantillons paraffinés sont ensuite immergés dans une éprouvette contenant un volume d'eau initial connu. La variation du niveau d'eau donne le volume de l'échantillon paraffiné (V<sub>2</sub>).

Par définition, la formule de la densité apparente est donnée par:

$$da = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} = \frac{W_d}{V \cdot \gamma_w}$$

Soit P<sub>3</sub> le poids de la paraffine, on a:

$$P_3 = P_2 - P_1;$$

Le volume V<sub>3</sub> de la paraffine est donné par la relation:

$$V_3 = \frac{P_3}{d_3} = \frac{P_2 - P_1}{d_3}$$

On déduit le volume V<sub>1</sub> de l'échantillon sec en écrivant que:

$$V_1 = V_2 - V_3 = V_2 - \frac{P_2 - P_1}{d_3}$$

Et on obtient:

$$da = \frac{P_1 \cdot d_3}{d_3 \cdot V_2 - (P_2 - P_1)}$$

Avec d<sub>3</sub> la densité de la paraffine (0,80).

### III.1.3.2. Densité réelle (dr)

La mesure de la densité réelle (dr) s'est faite à l'aide de la méthode par pesées successives.

Le mode opératoire est celui décrit par [Bouassida et Boussetta \(2007\)](#). Il consiste à:

- faire une prise d'essai par la méthode de quartage du tas conique et à la sécher à l'étuve à 105°C pendant 24 heures;
- écraser le matériau à l'aide d'une pulvérisette;
- après avoir nettoyé le pycnomètre et le barreau aimanté à l'eau distillée puis à l'alcool, les sécher à l'étuve à 105°C et les peser;

Soit  $P_1$ , le poids du pycnomètre sec contenant le barreau aimanté.

- introduire 10,50 à 11,00 grammes d'échantillon dans le pycnomètre de poids  $P_1$  et effectuer une seconde pesée;

Soit  $P_2$  le poids du pycnomètre contenant le barreau aimanté et la prise d'essai.

- ajouter de l'eau distillée et placer le tout sur l'agitateur magnétique pendant 10 minutes à une fréquence de 7,5 pour dégazer. Puis, remplir le pycnomètre jusqu'au trait de jauge;

Soit  $P_3$  le poids du pycnomètre contenant le barreau aimanté, la prise d'essai et l'eau distillée.

- vider le pycnomètre, le nettoyer et le remplir d'eau distillée jusqu'au trait de jauge et effectuer une dernière pesée.

Soit  $P_4$  le poids du pycnomètre contenant le barreau aimanté et l'eau distillée.

A la fin de la manipulation, les valeurs des différentes pesées ont permis la détermination des densités réelles.

Par définition:

$$dr = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w}$$

où  $W_s$  = Poids de l'échantillon sec

$V$  = Volume de l'échantillon

$\gamma_w$  = Poids volumique de l'eau (1 gf/cm<sup>3</sup>)

Connaissant  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  et  $d_w$  (densité de l'eau), nous pouvons écrire :

$$W_s = P_2 - P_1$$

Le poids de l'eau  $W'_w$  contenu dans le pycnomètre en présence de l'échantillon est:

$$W'_w = P_3 - P_2$$

Le volume  $V'_w$  de cette eau est:

$$V'_w = \frac{W'_w}{d_w \cdot \gamma_w}$$

$$D'o\grave{u} : V'_w = \frac{P_3 - P_2}{d_w \cdot \gamma_w}$$

Ainsi, le volume d'eau déplacée ( $\Delta V_w$ ) lorsqu'on ajoute l'échantillon dans le pycnomètre est donné par la relation:

$$\Delta V_w = V_w - V'_w$$

$$\Delta V_w = \frac{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)}{d_w \cdot \gamma_w}$$

Ce volume d'eau déplacé représente le volume  $V$  de l'échantillon introduit dans le pycnomètre :

$$V = \Delta V_w$$

Sachant que  $d_w \approx 1$  et  $\gamma_w = 1 \text{ gf/cm}^3$ , on obtient:

$$dr = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)}$$

#### III.1.4. Porosité (n)

Le calcul de la porosité s'est fait à partir du rapport ci-dessous:

$$n (\%) = \frac{dr - da}{dr} \times 100$$

#### III.1.5. Limites d'Atterberg

La plasticité est la capacité des matériaux à maintenir une déformation sans rupture (Peltier et Rumpler, 1959 in Mango Itulamy et al., 2019). La terre a un comportement élasto-plastique. Elle présente des déformations réversible et irréversible. La plasticité d'une terre dépend de la teneur en argiles et de la nature de ces argiles. Les limites d'Atterberg, c'est à dire limites de liquidité LL et de plasticité LP, sont les indicateurs de plasticité couramment employés (Moevus et al., 2012). Dans le domaine de la céramique, la plasticité est une des propriétés recherchées car elle facilite la fabrication et surtout le façonnage des produits céramiques dont elle assure la cohésion en crue. Susceptibles de fournir des indications sur la facilité plus ou moins grande de travail de sol (indicateur quantifiant la plasticité d'un sol), ces limites ont été mises au point par l'Agronome Suédois ATTERBERG en 1911 (Holtz et Kovacs, 1991; Callaud, 2004).

La plasticité définit la propriété d'un sol à subir des déformations sans réaction notable caractérisée par une fissuration (Houben et Guillard, 2006; Murray, 2007). Elle dépend

essentiellement du type et de la structure des minéraux argileux et de la granulométrie. La plasticité est évaluée par la méthode dite « limites d'Atterberg » par l'indice de plasticité (IP). Il existe diverses méthodes de mesure et de caractérisation de la plasticité des argiles (Andrade et al., 2011). Les résultats obtenus à partir de cet essai permettent de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'action des variations de la teneur en eau (Bouassida et Boussetta, 2007).

#### **III.1.5.1. Limites de liquidité (LL) et de plasticité (LP)**

Elles correspondent aux seuils de passage d'un matériau de l'état solide à l'état plastique (LP) et de l'état plastique à l'état liquide (LL). La limite de plasticité représente donc la teneur en eau d'un sol qui a perdu sa plasticité et se fissure en se déformant lorsqu'il est soumis à des faibles charges. Elles sont déterminées par la méthode décrite par Andrade et al., 2011.

#### **III.1.5.2. Limite de retrait (LR)**

La limite de retrait est la teneur en eau à partir de laquelle, lorsqu'un sol est séché, son volume ne diminue plus. Cette limite peut être estimée à partir de la relation suivante:

$$LR = 5,4 - 0,27 LL + LP.$$

#### **III.1.5.3. Indices de plasticité (IP) et de consistance (IC)**

A partir des résultats obtenus, on détermine l'indice de plasticité (IP). Cet indice définit l'étendue du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et de plasticité. Elle s'exprime par la relation

$$IP = LL - LP$$

L'essai s'effectue en deux phases d'après les standards ASTM D4318-2005:

- recherche de la teneur en eau LL pour laquelle une rainure de dimension normalisée, pratiquée dans le sol disposé dans la coupelle de Casagrande se ferme sous l'action de 25 chocs appliqués de manière normalisée;
- recherche de la teneur en eau LP pour laquelle un cylindre de sol de diamètre 3 mm, confectionné manuellement, se fissure lorsqu'on le soulève.

Pour déterminer la limite de liquidité, on utilise l'appareil de Casagrande. Cet appareil est constitué d'une coupelle de bronze, d'une base en caoutchouc dur et d'une came entraînée par

une manivelle ([figure 10](#)). On estime que le sol atteint la limite de liquidité lorsque, tombant d'une hauteur de 10 mm, on doit frapper la base 25 fois pour refermer, sur une distance de 13 mm.

Pour déterminer la limite de plasticité LP, on roule l'échantillon en forme de fuseau qu'on amincit progressivement; c'est la formation des boudins. La limite de plasticité est la teneur en eau du fuseau qui se brise en petits tronçons de 10 à 20 mm de long au moment où son diamètre atteint 3 mm. On échantillonne ces boudins que l'on pèse avant et après séchage à 105°C.

La moyenne arithmétique de la teneur en eau obtenue (sur 2 à 3 prises d'essais), comme pour la limite de liquidité LL, représente la limite de plasticité LP de l'échantillon ainsi analysé.

La comparaison de la teneur en eau naturelle W d'un sol et les limites d'Atterberg permet de se faire une idée de l'état d'un matériau qu'on peut caractériser par son indice de consistance IC. Cet indice est calculé selon [Costet et Sanglerat \(1981\)](#) et [Callaud \(2004\)](#) par la relation suivante:

$$IC = (LL - W) / (LL - LP) = (LL - W) / IP.$$

### **III.1.6. Teneur en matière organique**

Dans le domaine de la céramique et plus particulièrement de la briqueterie, les substances organiques affectent beaucoup les processus de stabilisation et de cuisson et par là la forme des produits finis ([Ceratec, 1997](#); [Guerraoui et al., 2008](#)). La teneur en matières organiques (MO) contenues dans le sol est égale au rapport de la différence entre le poids initial de l'échantillon P et la masse de l'échantillon après la réaction P' à la masse initiale d'essai P (100 grammes). La démarche pour l'obtention de la masse M' consiste à:

- peser 100 g d'échantillon et le mettre dans un bécher de 500 ml;
- ajouter 200 cc d'eau distillée et 20 cc d'eau oxygénée, 10 volumes;
- laisser reposer le mélange pendant 2 heures;
- sécher à l'étuve à 105°C;
- peser le mélange.



1: balance; 2: gamelle; 3: fiche de collecte de données; 4: outil à rainure; 5: base pesante; 6: coupelle lisse; 7: plaque; 8: spatule; 9: pissette; 10: assiettes  
 Figure 10: Matériels de détermination des limites d'Atterberg.

### III.1.7. Potentiel d'hydrogène (pH)

La valeur du  $pH_{\text{eau}}$  (acidité effective) et du  $pH_{\text{KCl}}$  (acidité de réserve) des échantillons de sols de Ngat a été obtenue par la méthode électrométrique au pH-mètre de marque HANNA de type HI 3220 pH/ORPMeter muni d'une électrode pH combinée et d'un agitateur magnétique de marque STIRRER B211. La détermination des différents pH a été réalisée sur des prises différentes, dans un rapport sol/solution 1/2,5 et en triplicats (Mathieu et Pieltain, 2003).

Le protocole adopté est le suivant: mettre dans un bécher, 05 g de sol sec (< 2 mm), ajoutés 30 ml soit d'eau distillée, soit d'une solution de KCl, puis agités pendant 15 mn à l'aide d'un agitateur manuel. Après avoir laissé reposer pendant 15 mn  $\pm$  5 mn, la mesure des pH est effectuée dans le surnageant.

### **III.1.8. Capacité d'échange cationique (CEC)**

La capacité d'échange cationique représente pour une argile, la quantité maximale de cations de toute sorte que 100 g d'argile peuvent fixer à leur surface. Sa mesure permet de déterminer la charge globale de structure d'une argile donnée. Elle s'exprime en milliéquivalent pour 100 g d'argile et elle est caractéristique de chaque type d'argile. La détermination de la CEC s'est faite avec l'acétate d'ammonium à pH 7 en trois phases successives:

- la saturation du complexe absorbant par l'ion  $\text{NH}_4^+$ ,
- l'extraction des cations échangeables,
- le lavage de la terre à l'alcool afin d'éliminer la solution saturante  $\text{NH}_4^+$  remplissant les pores.

La capacité d'échange cationique effective est déterminée par la somme des cations échangeables déterminée à pH 7 et l'aluminium échangeable du sol ([Jones, 1999](#)).

### **III.2. Analyses minéralogiques**

La connaissance des différentes espèces minérales des matériaux argileux s'est faite après analyse par diffraction des rayons X (DRX) au Laboratoire de l'Institut des Sciences de la Terre de l'Université de Lausanne (Suisse), par microscopie infrarouge (IR), par analyse thermique différentielle (ATD) et analyse thermogravimétrique (ATG) au laboratoire de Chimie Inorganique de l'Université de Yaoundé I et par Microscopie Electronique par Balayage (MEB) au Laboratoire de l'Université Polytechnique de Man en Côte d'Ivoire.

#### **III.2.1. Diffraction des rayons X**

Cette analyse s'est faite à l'aide d'un diffractomètre de type pan analytical X PERT PRO. Elle constitue une des techniques les plus efficaces et les plus répandues pour l'identification des minéraux. Elle permet l'identification et la détermination des principaux minéraux présents dans un échantillon. Le principe de cette méthode est basé sur la diffraction des rayons-X par le réseau cristallin selon la loi de Bragg. Le diffractogramme obtenue est caractéristique de l'échantillon analysé et l'intensité des pics (et/ou la surface selon les hauteurs) est fonction de la quantité de chaque phase minérale présente dans cet échantillon ([Holtzapffel, 1985](#)).

## II.2.2. Spectrométrie infrarouge

La spectroscopie infrarouge (IR) est une méthode d'analyse non destructrice qui permet de montrer la présence de groupements atomiques spécifiques dans une phase donnée. Elle est largement utilisée dans l'étude de la cristallinité des minéraux, surtout les kaolins utilisables dans l'industrie papetière.

Son principe est basé sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Les bandes d'absorption infrarouge sont dues aux vibrations des atomes autour de leur position d'équilibre. La masse des atomes, les forces de liaison et leur arrangement dans la molécule ou dans le cristal déterminent la fréquence des vibrations. Ainsi, toute substance définie chimiquement et cristallographiquement possède un spectre infrarouge caractéristique. Lorsque la longueur d'onde apportée par le faisceau infrarouge est voisine de l'énergie de vibration d'une molécule, cette dernière absorbe le rayonnement et l'on enregistre une diminution de l'intensité réfléchié ou transmise. Les analyses peuvent être effectuées en moyen infrarouge (domaine compris entre  $4000\text{ cm}^{-1}$  et  $400\text{ cm}^{-1}$ ) ou en proche infrarouge (domaine compris entre  $11000\text{ cm}^{-1}$  et  $4000\text{ cm}^{-1}$ ). Le principe de base de la spectrométrie repose sur la mesure de l'interaction entre un rayonnement électromagnétique et la matière à différentes fréquences. Elle permet d'obtenir des informations cristalochimiques sur la matière à partir de son interaction avec le rayonnement incident. Selon la fréquence de ce rayonnement (ultraviolet, visible, infrarouge...), l'interaction matière rayonnement concerne divers types de niveaux d'énergie de la matière (Truche, 2010).

Le spectromètre à Infra Rouge de marque BRUKER a été aussi utilisé pour confirmer l'identification des constituants des matériaux analysés par DRX (diffractométrie des rayons X). La technique d'atténuation totale de réflexion (ATR) a été appliquée pour obtenir des informations sur les matériaux. Au cours de la manipulation, 10 mg de poudre d'échantillon à analyser sont prélevés à l'aide d'une spatule et disposés sur le platine en diamant, du spectrophotomètre IR Alpha-P en absorbance. L'appareil est connecté à un ordinateur qui donne directement le spectrogramme IR à l'aide du logiciel OPUS-65/MEAS. Comme le diffractogramme de rayons X, le spectre infrarouge dépend de la structure du solide. Les bandes d'absorption infrarouge sont dues aux vibrations des atomes autour de leur position d'équilibre. La masse des atomes, les forces de liaison et leur arrangement dans la molécule déterminent la fréquence des vibrations. Ainsi, toute substance définie chimiquement et cristallographiquement possède un spectre infrarouge caractéristique (Maglione et Carn, 1975). Même en faibles quantités dans des mélanges polyphasés, la kaolinite est reconnue

grâce à ses bandes d'absorption spécifiques  $\nu\text{OH}$  vers  $3700\text{ cm}^{-1}$  (Brindley et al., 1986; Joussein et al., 2001). Des tables établies par de nombreux auteurs (Petit et al., 1995; Fialips et al., 2000) permettent d'attribuer les absorptions aux différents groupes chimiques présents dans le matériau analysé.

### III.2.3. Analyse thermique différentielle (ATD) et analyse thermogravimétrique (ATG)

#### III.2.3.1. Principes

Les analyses thermiques (thermo-différentielle et gravimétrique) permettent d'exprimer l'évolution d'une propriété du matériau analysé en fonction de la température à laquelle il est soumis. Elles caractérisent non seulement les argiles du point de vue minéralogique, mais également de suivre leur comportement thermique (Mackenzie, 1957).

L'analyse thermique différentielle (ATD) repose sur l'étude de la chaleur dégagée ou absorbée par la matière pendant les transformations physiques ou chimiques qu'elle subit. On enregistre, au cours d'un cycle thermique à vitesse contrôlée, la différence de température entre l'échantillon et un matériau de référence thermiquement inerte, du moins dans le domaine de température balayé. Tout changement de phases, cristallisation ou réaction chimique qui consomme ou libère de la chaleur au sein de l'échantillon fait apparaître une différence entre la température de celui-ci et celle de la référence. Cette différence atteint son maximum lorsque la vitesse de consommation ou de libération de la chaleur par l'échantillon cesse d'être supérieure à la vitesse d'échange de chaleur entre cet échantillon et son environnement. La différence diminue ensuite plus ou moins lentement, jusqu'à ce que l'équilibre des températures soit de nouveau atteint (Bouaziz et Rollet, 1972).

L'ATD est donc une technique adaptée pour la caractérisation des phénomènes endo ou exothermiques, à cinétique rapide, propres aux minéraux et autres constituants des matériaux argileux ; sachant que seuls sont caractérisables les phénomènes brutaux (non diffusifs). Les résultats des analyses ATD ne dépendent que de la seule nature minéralogique des constituants. Ils sont aussi influencés par l'atmosphère de chauffage, la conductivité thermique de l'échantillon et celle de la référence, la nature du thermocouple, la vitesse de chauffe, la taille des particules et bien d'autres facteurs (Smykatz-Kloss, 1974). L'intérêt de l'ATD pour l'étude des céramiques porte sur trois points essentiels:

- la mise en évidence des phénomènes de transition de phases;
- l'identification des phases cristallines mises en jeu après interprétation des phénomènes endothermiques ou exothermiques enregistrés à des températures caractéristiques;

- l'évaluation de la température de cuisson du matériel étudié en fonction des phases apparues.

L'analyse thermogravimétrique (ATG) quant à elle consiste à enregistrer les variations de masse au cours d'un cycle thermique, liées à des réactions chimiques ou à des départs de constituants volatils adsorbés ou combinés dans un matériau. Les températures où interviennent ces pertes de masses constituent des informations complémentaires à celles obtenues par ATD pour l'identification des phénomènes physico-chimiques impliqués, les deux caractérisations sont souvent effectuées simultanément dans le même appareil.

### **III.2.3.2. Mode opératoire**

L'ATD et l'ATG ont été effectuées simultanément entre 0 et 900°C sous balayage d'air à l'aide d'un dispositif de marque Setaram Scientific et Industrial Equipment, série Setsys 24. Le matériau de référence était l'alumine préalablement calcinée à 1500°C. L'échantillon et la référence étaient placés dans deux creusets identiques en Pt. Pour chaque acquisition, les masses de poudre d'échantillon et de référence étaient chacune exactement de 80 mg. La chaleur spécifique est une propriété thermique dépendante de la masse d'un matériau. Celle des 2 poudres utilisées pouvant fluctuer avec la température (des variations importantes pouvant être observées pour les températures les plus élevées), une masse identique a été choisie afin de limiter une dérive trop importante de la ligne de base. La vitesse de chauffe était de 10°C/min.

### **III.3. Analyses géochimiques**

Ces analyses ont été réalisées par XRF au laboratoire de l'Institut des Sciences de la Terre de l'Université de Lausanne pour les majeurs et par ICP-MS au laboratoire de Géosciences de Sudbury au Canada pour les traces et les terres rares.

#### **III.3.1. Eléments majeurs**

Les analyses géochimiques des éléments majeurs ont été réalisées par la méthode de la fluorescence de rayons X (XRF). Les échantillons ont été soumis à la perte au feu. D'abord, les poudres ont été chauffées à 105°C sous l'azote dans le but d'éliminer l'eau et par la suite, elles ont été chauffées à nouveau à 1000°C sous oxygène pour éliminer des éléments volatils et le fer oxydé.

#### **III.3.1. Eléments traces et terres rares**

Les poudres ont été préparées pour des analyses à l'ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry), dans le but de déterminer les concentrations en éléments

lithophiles par attaque acide dans un récipient clos. Les poudres ont été traitées dans un mélange diacide (HCl+HClO<sub>4</sub>) à 120°C contenu dans un récipient clos pendant une semaine. Après cette phase, les échantillons obtenus ont été dissous à nouveau dans des solutions acides (HCl+HClO<sub>4</sub>) et chauffés à sec une fois avant d'être à nouveau dissous dans un mélange triacide (HNO<sub>3</sub>+HCl+HF) chauffés à 100°C. Les échantillons dissous ont été analysés à l'aide de l'ICP-MS de type Perkin Elmer Elan 9000. Dans un premier temps, l'analyse a été réalisée en utilisant une bande analytique IM 100 dans laquelle un poids moyen d'instrument répond pour trois matériaux de référence certifiés et préparés de la même manière que le blanc pour chaque élément. Les solutions standards ont été préparées pour 30 échantillons en commun avec un contrôle après le passage de 10 échantillons à chaque fois. Les données sont reportées pour une large gamme de métaux de transition. A cause de l'incertitude des concentrations en éléments dans les matériaux de référence certifiés très faibles, les limites de détection pour la bande IM100 sont plus élevées que les capacités maximales (limites supérieures) de l'instrument. Quand certaines concentrations ont été trouvées en deçà de la limite de détection pour la bande IM100, les solutions ont été analysées de nouveau en utilisant un second groupe de 4 solutions synthétiques d'égales concentrations contenant 14 terres rares, Y, U, Th, Hf, Zr, Nb, Ta, Rb, et Sr.

#### III.4. Analyse minéralogique sémi-quantitative

Les déterminations semi-quantitatives des phases minérales ont été effectuées à l'aide de la méthode développée par [Yvon et al. \(1982\)](#) et [Moore et Reynolds, \(1997\)](#). Cette méthode utilise les résultats de l'analyse chimique, la composition idéale de chaque minéral et la diffraction des rayons X. La composition semi-quantitative des phases minérales de l'échantillon est évaluée en utilisant la relation:

$$T(x) = \sum_1^n Mi \times Pi(x)$$

Où:

*T(x)*: pourcentage d'oxyde de l'élément chimique «x»;

*Mi*: pourcentage du minéral «i» dans l'échantillon contenant l'élément chimique «x»;

*Pi (x)*: proportion de l'élément « x» dans le minéral «i» (calculée à partir de la formule minérale idéale).

Pour le calcul, nous supposons ce qui suit:

TiO<sub>2</sub> est associé à l'anatase sous forme d'oxyde de titane pur;

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> est associé à la goethite;

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a été attribué à la Kaolinite;

### **III.5. Essais céramiques**

Ces essais ont été effectués dans les laboratoires de la MIPROMALO à Yaoundé et du Département de Chimie Inorganique de l'Université de Yaoundé I.

#### **III.5.1. Confection des éprouvettes**

C'est la fabrication des éprouvettes de terre à l'aide de la presse hydraulique de laboratoire (Figure 11) à partir des échantillons de matériaux argileux. Pour chaque échantillon 20 éprouvettes ont été confectionnées.

##### **III.5.1.1. Préparation de la pâte**

La préparation a pour but d'éliminer les cailloux et les impuretés, homogénéiser et humidifier le matériau pour obtenir une bonne pâte. Pour cela, les matériaux sont préalablement broyés à l'aide d'un mortier, puis tamisés à 2 mm.

##### **III.5.1.2. Façonnage**

Le façonnage donne à la pâte une cohésion suffisante et améliore son état plastique. Il se fait soit par mouillage additionnel, soit par une injection de vapeur d'eau. Les éprouvettes ont été confectionnées à l'aide d'une presse hydraulique de laboratoire et d'un moule de dimensions 80 × 40 × 20 mm.

#### **III.5.2. Séchage**

Le séchage des produits façonnés avant frittage a pour but d'éliminer l'eau qui a été ajoutée au cours du façonnage. Les briquettes obtenues sont ainsi séchées à l'air libre pendant sept jours puis, à l'étuve à 105°C pendant 24 h, pour éviter un séchage brusque lors de la cuisson et par conséquent des fissurations.



Figure 11: Presse hydraulique de laboratoire (MIPROMALO).

### III.5.3. Cuisson

La cuisson donne aux produits séchés leurs caractéristiques finales, adaptées à leur utilisation en construction. Elle a été réalisée dans un four programmable de type FP34G et de température maximale 1250°C. La température augmente de 5°C toutes les minutes jusqu'à atteindre celle souhaitée. Les briques ont été cuites à plusieurs paliers de température par échantillon et ce, à chaque température (800, 900, 1000 et 1100°C) pendant deux heures. Après cette étape plusieurs paramètres géotechniques sont déterminés.

L'organigramme de la fabrication d'une éprouvette est présenté à [la figure 12](#).

### III.5.4. Détermination des paramètres géotechniques

#### III.5.4.1. Retrait linéaire (RL)

Le mode opératoire a consisté à prendre les dimensions (L x l x h) des éprouvettes à l'aide d'un pied à coulisse à lecture digitale de 0,01 mm de précision pour une incertitude de  $\pm 0,03$  mm après étuvage à 105°C pendant 24 h. Ces dimensions ont ensuite été reprises après cuisson au four à la température initialement fixée.

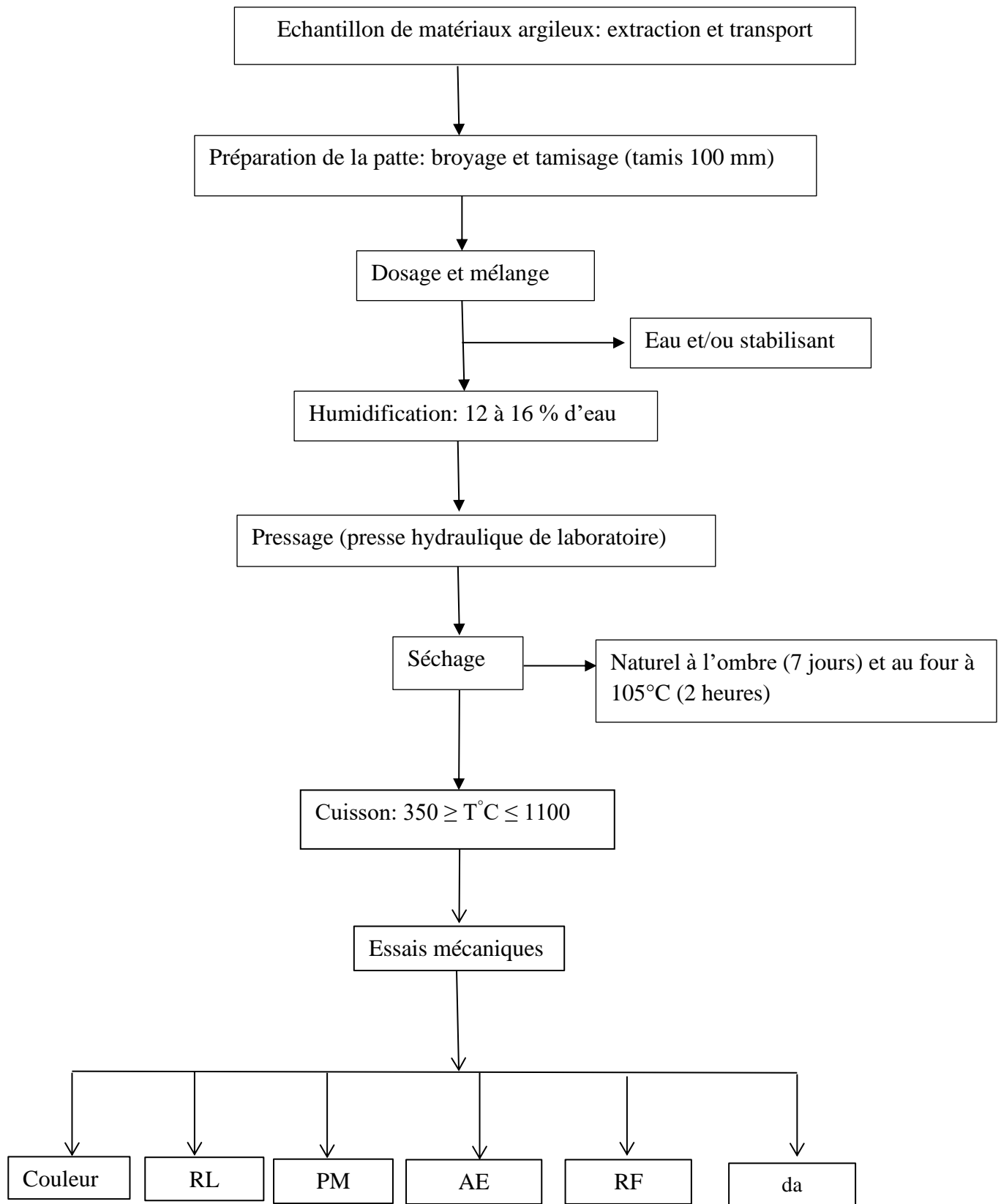


Figure 12: Démarche pour la fabrication des éprouvettes.

Selon la norme [ASTM C531-2000](#), le retrait linéaire (RL) en pourcentage est exprimé par la relation:

$$RL = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100$$

Où  $L_0$ : longueur de l'éprouvette après séchage à 105°C (mm);

$L_1$ : longueur de l'éprouvette après cuisson (mm).

#### **III.5.4.2. Perte de masse (PM)**

Le mode opératoire consiste à passer l'échantillon à analyser à l'étuve à 105°C pendant 24 h pour une dessiccation complète, puis à le peser pour obtenir la masse  $M_s$ . L'échantillon est ensuite passé au four à la température de cuisson choisie pendant 2 h et pesé dès la sortie du four. La perte de masse s'exprime selon la norme [ASTM D7348-2008](#), par la formule:

$$PM = \frac{M_s - M_c}{M_s} \times 100$$

#### **III.5.4.3. Absorption d'eau et Porosité (AE)**

Selon la Fédération Belge des Briques (2008), le caractère absorbant d'une brique est définie par certains facteurs tels: le nombre et les dimensions des pores, les liaisons entre les pores, les pores fermés ou ouverts. La notion de porosité permet donc d'avoir une idée sur le nombre de pores présents dans un matériau. Elle représente le rapport entre le volume des pores et le volume total et a une influence déterminante sur un certain nombre de propriétés de la brique (absorption d'eau, bonne adhésion au mortier, isolation thermique, résistance au gel et vieillissement). L'absorption d'eau devient de ce fait, une image de la porosité. Cette absorption d'eau (AE) exprimée en pourcentage est obtenue par immersion du produit cuit de masse ( $M_s$ ) après étuvage à 105°C dans l'eau pendant 24h ([ASTM C20-2000](#)). Après immersion ([figure 13](#)), l'éprouvette est éponagée avec un chiffon absorbant. Le taux d'absorption d'eau et la porosité d'un matériau sont donnés par les formules:

$$AE = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

Où  $M_s$ : masse de la briquette après cuisson (g),

**Mh**: masse de la briquette après 24 h d'immersion (g).

$$P_O (\%) = \text{Abs} \times M_s / 100$$

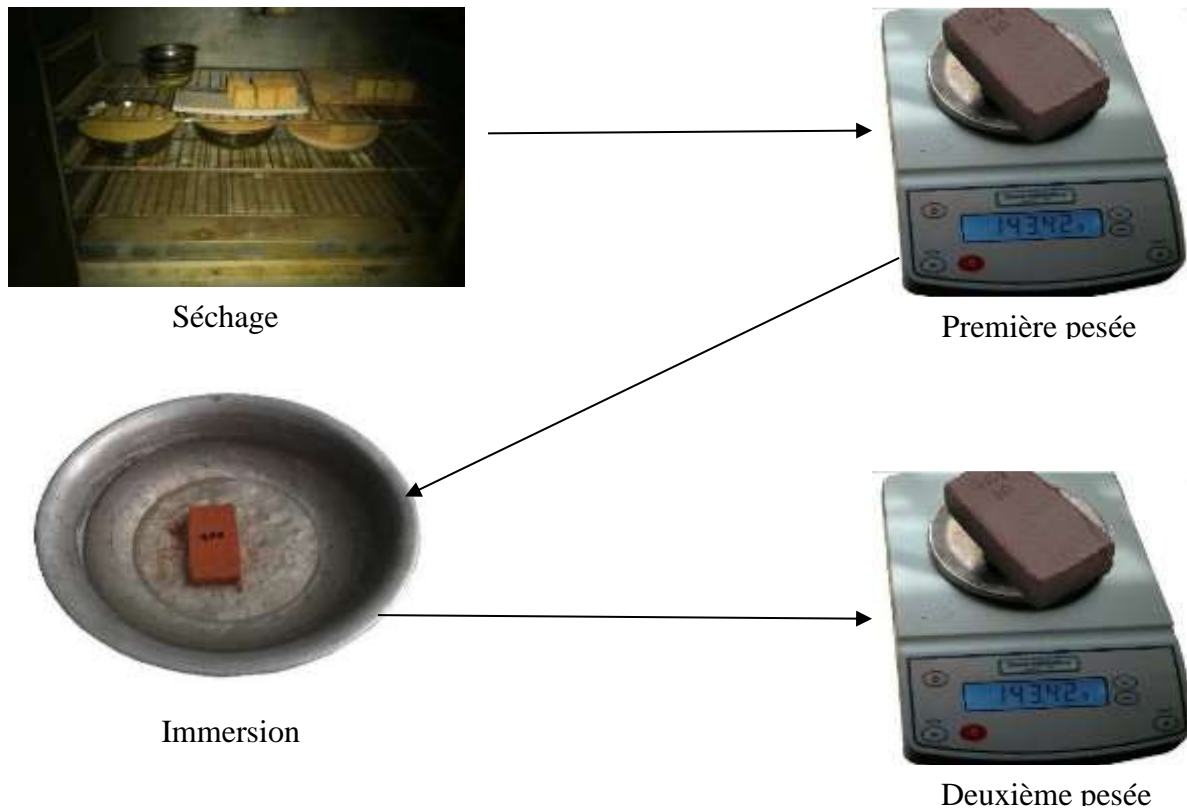


Figure 13: Mode opératoire relatif à la détermination du taux d'absorption d'eau.

#### III.5.4.4. Résistance à la flexion (RF)

La résistance à la flexion (RF) est la contrainte limite qu'un matériau peut supporter avant la rupture en flexion. Les essais ont été effectués à l'aide d'une presse hydraulique à flexion de force maximale 50 kN qui utilise la méthode des trois points (figure 14). L'éprouvette est placée sur deux appuis cylindriques et horizontaux fixés sur un piston de mouvement vertical. Un troisième cylindre immobile est placé au-dessus, parallèlement et symétrique aux deux précédents. Le socle des deux cylindres a une vitesse ascensionnelle de 0,05mm /min jusqu'à la rupture de l'éprouvette de matériau. La lecture sur un écran permet de déterminer la charge produisant cette rupture. La résistance à la flexion est donnée par la norme [ASTM F 417-1996](#) et d'après la relation:

$$R_F = \frac{3LF}{2le^2}$$

Où  $R_F$ : la résistance à la flexion en  $N/mm^2$ ;  $L$ : distance entre les appuis (50 mm),  $e$ : l'épaisseur de l'éprouvette,  $I$ : la largeur de l'éprouvette (mm) et  $F$ : la force maximale de l'appareil.

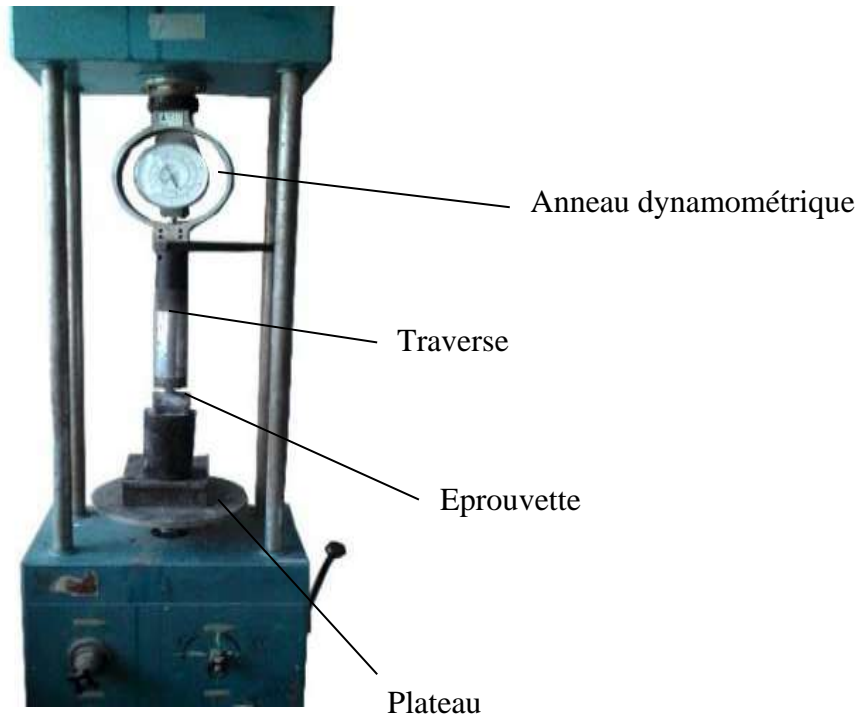


Figure14: Mode opératoire relatif à la détermination de la résistance à la flexion.

### III.5.4.5. Résonance

La résonance est le phénomène permettant d'illustrer la sensibilité de certains systèmes physiques (électriques, mécaniques...) à certaines fréquences. Le but est de tester la capacité du matériau à accumuler de l'énergie (sonore). Le principe consiste à soumettre le matériau à des excitations périodiques, proches d'une fréquence dite «de résonance». Le matériau se constitue donc en siège d'oscillations de plus en plus importantes, jusqu'à atteindre le régime d'équilibre. Mais, dans l'impossibilité d'acquérir l'appareil de mesure, l'utilisation d'une barre métallique reste le meilleur instrument pour apprécier le son émis

### III.5.4.6. Cohésion

La cohésion désigne la force qui s'exerce entre les particules du matériau, s'opposant à leur séparation. Elle est évaluée en testant l'effritement de l'éprouvette. La cohésion est dite mauvaise lorsque l'éprouvette s'effrite. Elle est dite bonne lorsque l'éprouvette présente une grande résistance.

### **III.6. Effet de la cendre**

Pour améliorer la qualité des éprouvettes des argiles de Ngat, une stabilisation a été réalisée. Le liant utilisé dans le cadre de ce travail est la cendre de bois appelé Ilomba.

Les conditions expérimentales de dosage entre le matériau argileux et la cendre sont les suivantes:

- premier mélange: 95 % d'échantillon d'argile pour 05 % de cendre;
- deuxième mélange: 90 % d'échantillon d'argile pour 10 % de cendre;
- troisième mélange: 85 % d'échantillon d'argile pour 15 % de cendre;
- quatrième mélange: 80 % d'échantillon d'argile pour 20 % de cendre.

Après ces différents mélanges, des éprouvettes seront confectionnées et passeront au four à plusieurs paliers de température (350, 600, 800, 900, 1000, 1100°C). Après tout ceci, des paramètres cités plus haut (retrait linéaire, perte de masse, absorption d'eau, densité apparente, porosité, et résistance à la flexion) seront évalués.

### **Conclusion**

Les travaux de terrain ont permis d'identifier, de localiser, de décrire et de collecter les échantillons de la localité de Ngat. Les différents échantillons rigoureusement sélectionnés ont fait l'objet d'analyses préliminaires et approfondies. Les analyses préliminaires ont concerné la détermination du taux de matière organique, l'étude granulométrique par sédimentométrie et la plasticité (limite de plasticité, limite de liquidité et indice de plasticité). Les essais céramiques ont été effectués sur des éprouvettes confectionnées. Les propriétés mécaniques (absorption d'eau, retrait linéaire, cohésion, résonance et résistance à la flexion...) ont été déterminées. Les analyses approfondies ont porté sur la minéralogie et la géochimie des échantillons. L'analyse minéralogique s'est effectuée par diffraction des rayons X, par microscopie infrarouge (IR), par analyse thermique différentielle (ATD) et analyse thermogravimétrique (ATG) et par microscopie électronique à balayage (MEB). L'analyse géochimique est obtenue par Fluorescence des rayons X (XRF) et ICP-MS. Les chapitres suivants présentent les résultats desdits travaux (observations de terrain, études minéralogiques, géochimiques et propriétés céramiques).

## **PARTIE II: RESULTATS ET DISCUSSION**

*«L'Eternel fait mourir et Il fait vivre. Il fait descendre au séjour des morts et Il en fait remonter. L'Eternel appauvrit et Il enrichit, Il abaisse et Il relève. De la poussière Il retire le pauvre, du fumier Il relève l'indigent, pour les faire asseoir avec les grands», 1 Samuel, 2:7-8.*

---

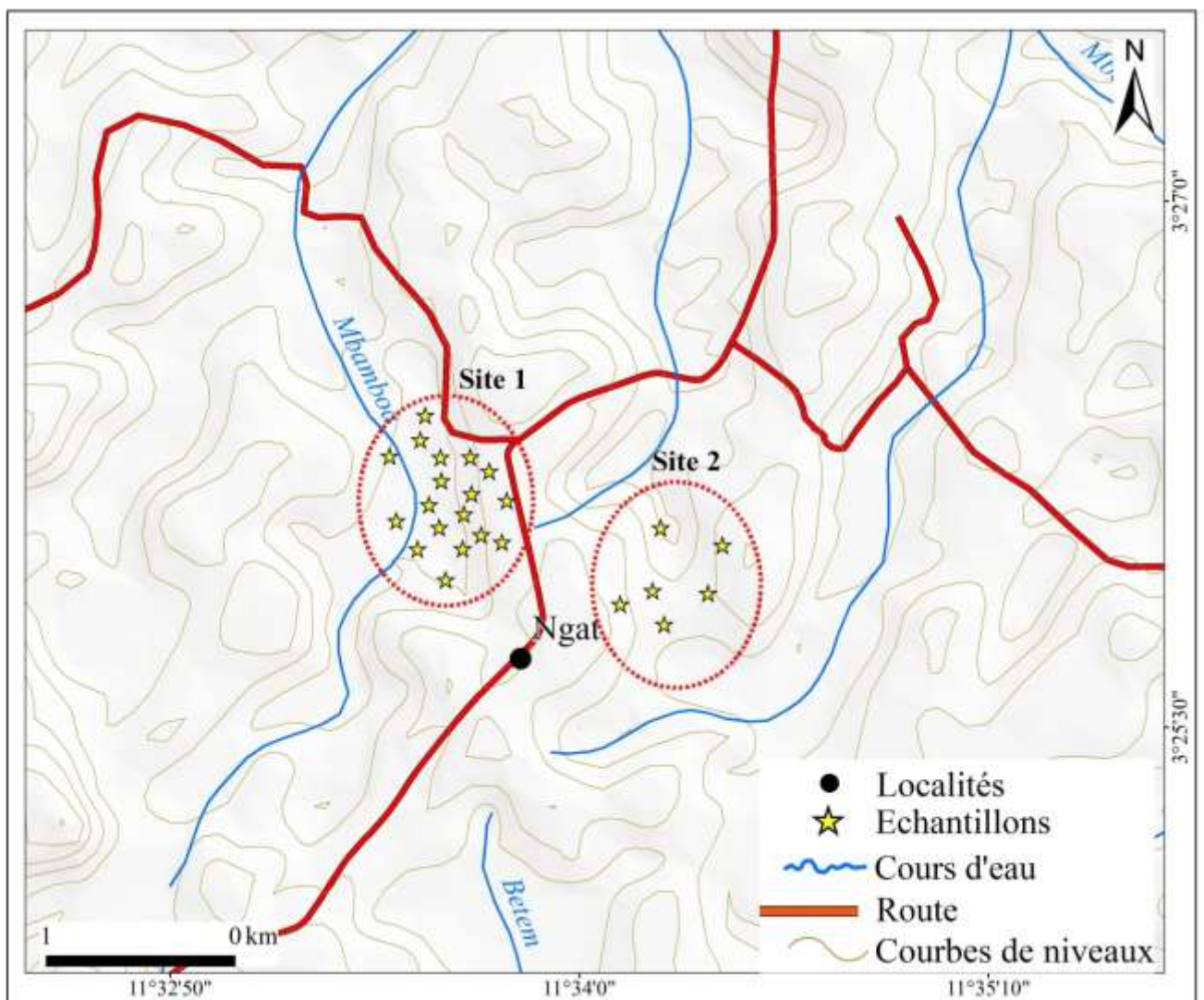
---

# CHAPITRE IV. PETROLOGIE DES MATERIAUX ARGILEUX DE NGAT

---

## Introduction

Ce chapitre renseigne sur l'organisation morphologique, les compositions minéralogique et chimique des matériaux argileux récoltés à Ngat. Les matériaux ont été prélevés dans deux sites: Ngat-Carrière (Site 1), et Ngat-Plantation (Site 2), (figure 15).



Une fois sur le terrain 24 échantillons ont été prélevés. 18 sur le site 1 et 08 sur le site 2. Tous ces échantillons ont été analysés sur le plan physico-chimique. Sur la base de la teneur en argile, 12 échantillons ont été sélectionnés pour les analyses minéralogique, géochimique et les essais céramiques.

## **I. PETROLOGIE DES MATERIAUX ARGILEUX DE NGAT-CARRIERE**

### **I.1. Description macroscopique**

Dix-huit échantillons ont été prélevés sur ce site. Ces échantillons sont décrits sur la base de la couleur, de la texture et de l'épaisseur. La [figure 16](#) montre les photographies de quelques matériaux:

Le matériau NGB1 a une profondeur de prélèvement allant de 40 à 89 cm. Sa couleur est jaune clair (10YR5/6) avec une texture argilo-sableuse. Ce matériau est parcemé de tiges et de radicelles ([figure 16 a](#)).

Le matériau NGB2 est prélevé à coté d'une cacaoyère à une profondeur de 63 à 110 cm. Sa texture est argileuse. La présence de racines et des tiges caractérise ce matériau ([figure 16 b](#)). Sa couleur est jaune olive (2.5Y6/6).

Le matériau NGB3 a été prélevé à une profondeur comprise entre 70 et 140 cm. Sa texture est sablo-limoneuse avec une couleur grise (10YR5/1). Il est parsemé de taches de couleur rouge (10R4/6) et jaune. Cet échantillon est parsemé de radicelles, ([figure 16 c](#)).

Le matériau NGB4 à une couleur de jaune clair (10YR5/4) avec une profondeur de 20 à 85 cm. Sa texture est limono-argileuse ([figure 16 d](#)).

Le matériau NGB5 a une texture sablo-limoneuse, et une couleur grise (10YR6/1). Il contient des taches de couleur jaune brunâtres (10YR6/8) et quelques radicelles. Sa profondeur varie de 40 à 87 cm, ([figure 16 e](#)).

Le matériau NGB6 de couleur jaune rougeâtre (5YR5/6) a une texture argileuse avec une profondeur de prélèvement qui oscille de 45 à 79 cm. Les radicèles sont intercalées dans sa matrice ([figure 16 f](#)).

NGB7 est un matériau prélevé à côté d'une palmeraie. Sa profondeur est de 70 à 105 cm. Sa couleur est le jaune clair (10YR5/6), ([figure 16 g](#)).

Le matériau NGB8 de texture, argilo-sableux est parsemé de quelques radicelles. Il est de couleur brun olive clair (2,5Y5/3), et sa profondeur de prélèvement va de 30 à 100 cm, (figure 16 h).

Les matériaux NGB9, NGB10, NGB11 et NGB12 ont une couleur jaune rougeâtre (5YR5/6 ; 5YR5/8) avec une texture limono-argileus. Leur profondeur de prélèvement est 20 à 70 cm.

Le matériau NGB13 de couleur grise a une texture sableuse. Sa profondeur oscille entre 25 et 55 cm. Il est prélevé sous un couvert végétal trop épais.

NGBB14, NGB16, NGB17 et NGB18 sont prélevés sous une cacaoyère avec pour profondeur de prélèvement allant de 45 à 94 cm. Leur texture est sablo-argileuse. Ils sont parsemés de racines et de tiges. Leur couleur d'ensemble est le marron foncé (10YR3/3 ; 10YR3/4).

## **I.2. Caractéristiques physico-chimiques**

Cette caractérisation concerne l'humidité résiduelle, l'analyse granulométrique, les limites de consistance, la densimétrie, la porosité, le potentiel d'hydrogène, la matière organique, le carbone organique et la capacité d'échange cationique.



Figure 16: Photographie des matériaux argileux de Ngat-Carrière.

### I.2.1. Humidité résiduelle

Les résultats de l'humidité résiduelle sont représentés dans le [tableau 6](#) et l'illustration est faite par la [figure 17](#). Les valeurs de l'humidité résiduelle pour les matériaux argileux du site de Ngat-Carrière présentent des teneurs en eau naturelle assez considérables. Ces valeurs varient de 15,79 à 30,94 %.

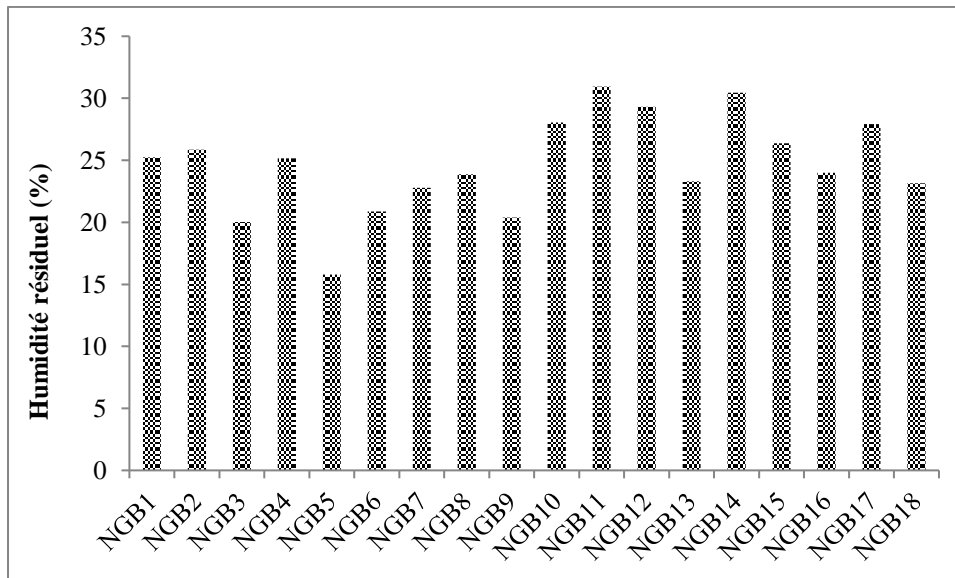


Figure 17: Humidité résiduelle des matériaux de Ngat-Carrière.

### I.2.2. Analyse granulométrique

Les résultats de cette analyse montrent que les proportions des éléments varient d'un matériau à un autre ([figure 18](#)).

Les résultats de l'analyse granulométriques montrent que les proportions d'argiles ont des valeurs comprises entre 25,13 à 60,16 % ([tableau 6](#)). La fraction des limons varie de 10,05 % à 24,70 %. En ce qui concerne la fraction sableuse, ses proportions oscillent entre 23,51 et 60,18 % ([tableau 6](#)).

La projection de ces matériaux dans le diagramme textural ([Picard, 1971](#)) révèle que ces derniers ont des textures argilo-boueuse (08 échantillons), argilo-sableuse (07 échantillons), sablo-boueuse (02 échantillons) et sablo-argileuse (01 échantillon), ([Figure 19](#)).

Tableau 6: Humidité résiduelle et granularité des matériaux argileux de Ngat-Carrière.

-	Hr	Granulométrie			
-	-	Argiles	Limons	Sables	Total
NGB1	25,24	45,77	24,70	29,54	100,01
NGB2	25,85	59,27	10,05	30,68	100,00
NGB3	20,03	45,86	11,33	42,81	100,00
NGB4	25,16	60,14	16,26	23,61	100,01
NGB5	15,79	42,93	13,1	43,97	100,00
NGB6	20,88	33,45	15,81	50,73	99,99
NGB7	22,77	50,58	14,26	35,16	100,00
NGB8	23,87	41,61	15,49	42,89	99,99
NGB9	20,38	36,68	14,07	49,25	100,00
NGB10	28,05	52,58	14,16	33,26	100,00
NGB11	30,94	46,97	17,68	35,35	100,00
NGB12	29,31	45,89	13,21	40,89	99,99
NGB13	23,29	25,2	14,19	60,61	100,00
NGB14	30,46	49,64	17,96	32,39	99,99
NGB15	26,37	58,44	15,62	25,94	100,00
NGB16	24,00	41,85	17,94	40,2	99,99
NGB17	27,91	51,35	10,96	37,69	100,00
NGB18	23,14	56,22	11,85	31,93	100,00

Hr: Humidité Résiduelle

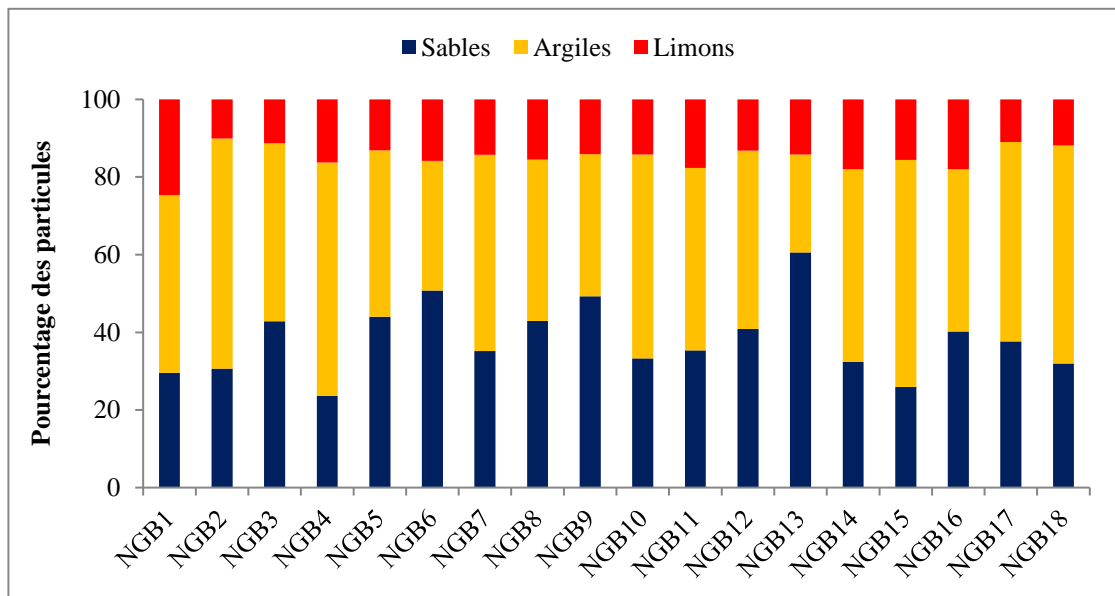


Figure 18: Granularité des matériaux argileux de Ngat-Carrière.

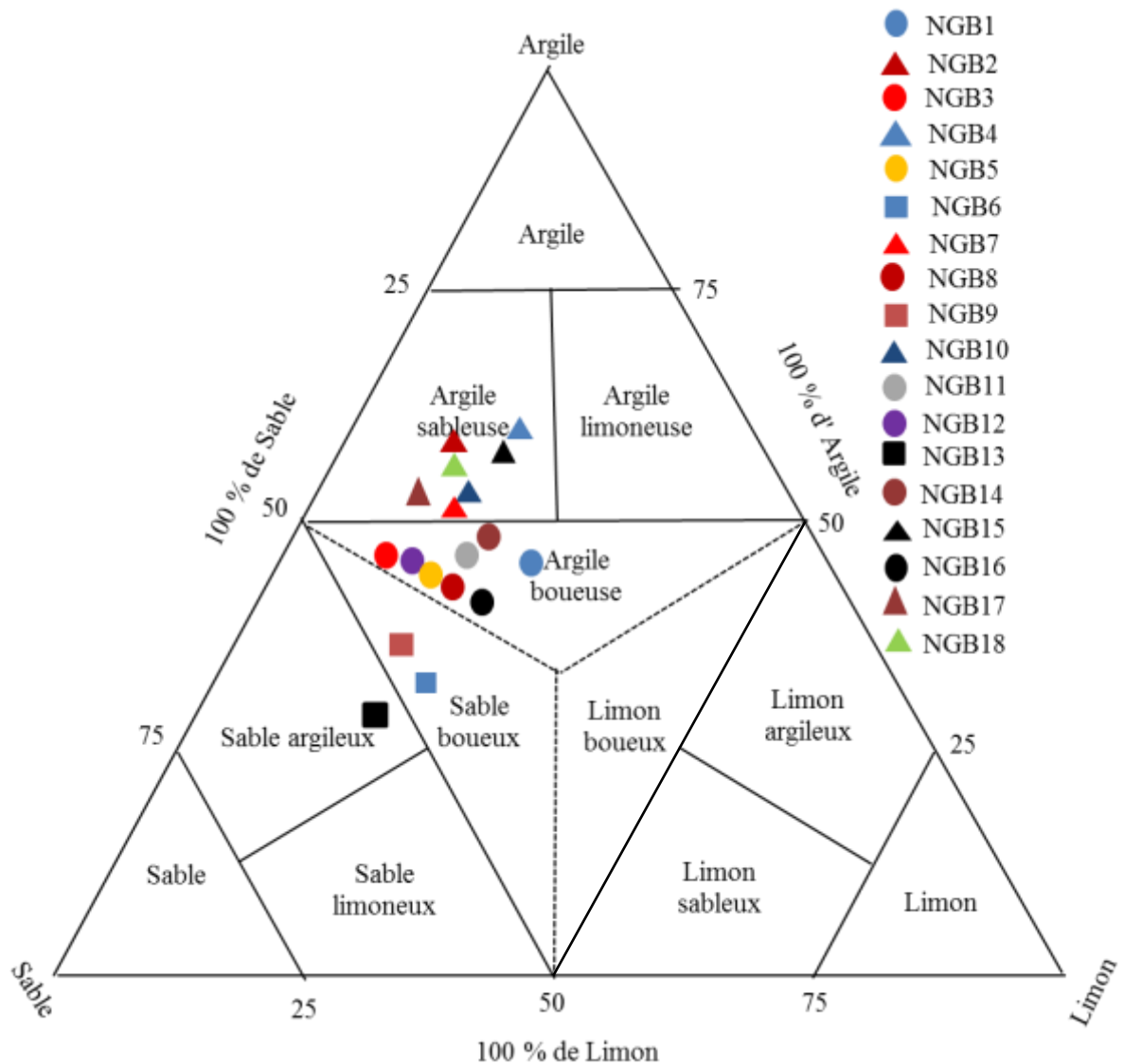


Figure 19: Projection des matériaux de Ngat-carrière dans le diagramme textural belge (Picard 1971).

### I.2.3. Limites d'Atterberg

Les résultats des essais de consistance obtenus sur les matériaux argileux de Ngat-Carrière comprennent les limites de liquidité (LL), et plasticité (LP), ainsi que les indices de plasticité (IP) et de consistance (IC). Les valeurs des limites d'Atterberg LL, LP, IP et IC pour les matériaux de Ngat-Carrière sont globalement faibles à modérées. Les valeurs de la limite de liquidité se situent entre 25,17 et 49,6 %. Celles de la limite de plasticité varient entre 13,64 et 26,18 %. L'indice de plasticité a des valeurs comprises entre 4,97 et 28,7 %.

Quant à l'indice de consistance, ses valeurs vont de 0,18 à 1,89 %. Seulement trois valeurs de ce dernier paramètre ont une valeur supérieure à l'unité (tableau 7).

Plotés dans l'abaque de plasticité de Casagrande (1948), quatre échantillons de matériaux argileux de Ngat-Carrière tombent dans les domaines de la plasticité et

compressibilité faible car ayant leur limite de liquidité est inférieure à 30 %, tandis que le reste c'est-à-dire 14 échantillons tombent dans le champ avec des limites de liquidité comprise entre 30 et 50 % (figure 20).

Tableau 7: Limites de consistance des matériaux argileux de Ngat carrière.

-	<b>LIMITES D'ATTERBERG</b>				
	LL	LP	Ws	Ip	Ic
NGB1	33,29	22,25	18,66	11,04	0,72
NGB2	36,65	26,18	21,68	10,47	1,03
NGB3	32,10	21,64	18,37	10,46	1,15
NGB4	35,62	22,83	18,61	12,79	0,82
NGB5	25,17	20,20	18,80	4,97	1,89
NGB6	25,79	13,44	11,88	12,35	0,39
NGB7	34,98	19,63	15,59	15,35	0,80
NGB8	25,92	20,11	18,51	5,81	0,35
NGB9	40,70	15,20	9,61	25,50	0,80
NGB10	48,80	22,30	14,52	26,50	0,78
NGB11	47,10	21,60	14,28	25,50	0,63
NGB12	49,60	20,90	12,91	28,70	0,71
NGB13	25,40	13,80	12,34	11,60	0,18
NGB14	46,20	22,20	15,13	24,00	0,66
NGB15	45,80	20,50	13,53	25,30	0,77
NGB16	35,60	14,30	10,09	21,30	0,54
NGB17	45,60	19,10	12,19	22,50	0,79
NGB18	39,80	16,40	11,05	23,40	0,71

LL: Limite de Liquidité; LP: Limite de Plasticité; Ip: Indice de plasticité; Ic: Indice de consistance.

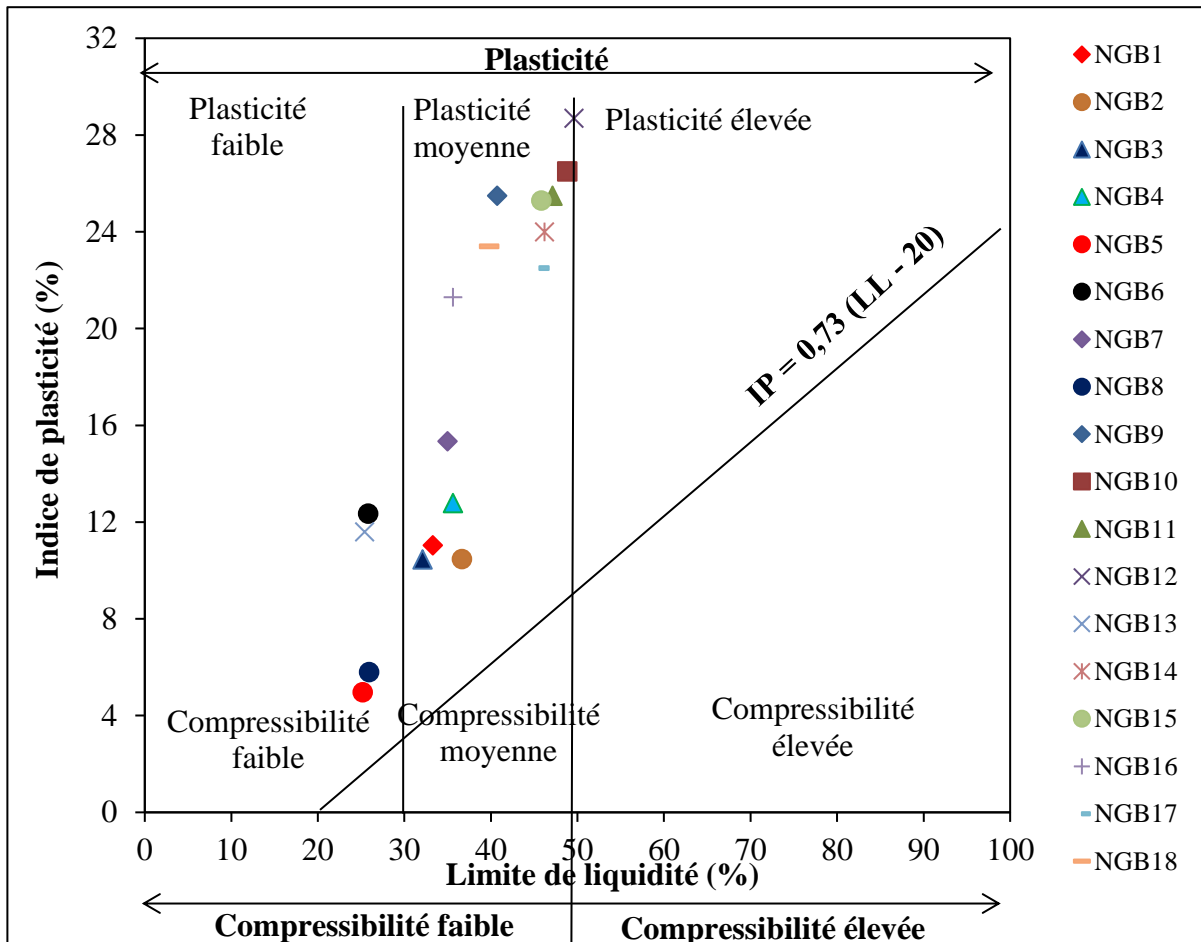


Figure 20: Position des matériaux de Ngat-carrière dans l'abaque de plasticité de Casagrande, (1947).

## I.2.4. Densimétrie

### I.2.4.1. Densité apparente

Les valeurs de la densité apparente des différents matériaux de Ngat-Carrière sont comprises entre 1,23 et 2,07 avec une moyenne de 1,69 (tableau 8).

### I.2.4.2. Densité réelle

La densité réelle a des valeurs qui oscillent de 2,4 à 2,73 avec une moyenne de 2,60, (tableau 8).

## I.2.5. Porosité (po)

Les valeurs de la porosité des matériaux argileux de ce site sont modérées. Elles sont comprises entre 20,29 et 51,13 % pour une moyenne de 35,89 (tableau 8).

## I.2.6. Potentiel d'hydrogène (pH)

La qualité de l'eau souterraine a un rôle dans les mouvements des différents éléments chimiques des matériaux. Pour essayer de comprendre les conditions de formation des argiles dans la zone d'étude, les valeurs de pH ont été déterminées. Les résultats sont consignés dans le [tableau 8](#).

Les valeurs du  $pH_{\text{eau}}$  de tous les échantillons sont acides. Elles sont comprises entre 4,55 et 5,85. Le  $pH_{\text{KCl}}$  est aussi acide pour tous ces échantillons. Il est supérieur à 3 mais n'atteint pas la valeur 5. La valeur la plus faible est de 3,6 et la élevée est 4,05. La variation des valeurs du pH des différents matériaux est inférieure à l'unité pour certains matériaux et sont comprises entre 0,65 et 2,05 ([tableau 8](#)).

Tableau 8: Densimétrie, porosité et pH des matériaux du site de Ngat-Carrière.

ECH	Densimétrie		Porosité	pH		
	dr	da		-	$pH_{\text{eau}}$	$pH_{\text{KCl}}$
NGB1	2,70	1,90	41,89	4,55	3,90	0,65
NGB2	2,56	1,63	36,39	5,00	3,90	1,10
NGB3	2,56	1,69	34,05	5,20	3,90	1,30
NGB4	2,59	1,80	30,38	5,85	3,80	2,05
NGB5	2,60	2,07	20,29	5,10	3,60	1,50
NGB6	2,59	1,79	30,97	4,75	4,00	0,75
NGB7	2,71	1,85	31,75	5,10	4,00	1,10
NGB8	2,56	1,62	36,75	5,10	4,00	1,10
NGB9	2,58	1,60	38,09	5,35	3,90	1,45
NGB10	2,54	1,82	28,28	5,15	3,70	1,45
NGB11	2,57	1,76	31,63	4,60	3,70	0,90
NGB12	2,70	2,03	24,91	5,05	4,00	1,05
NGB13	2,73	1,69	38,04	5,45	4,05	1,40
NGB14	2,4	1,43	40,41	4,90	4,05	0,85
NGB15	2,52	1,23	51,13	5,20	3,90	1,30
NGB16	2,68	1,84	31,3	5,45	3,95	1,50
NGB17	2,56	1,40	49,87	5,15	3,85	1,30
NGB18	2,53	1,27	49,87	5,55	4,00	1,55
Moy.	2,59	1,69	35,89	5,14	3,9	1,24

dr: densité réelle, da: densité apparente, pH: potentiel d'hydrogène,  $\Delta$ : variation

## I.2.7. Matière organique

La matière organique (MO) a été déterminée sur 12 échantillons ayant des teneurs élevées en argile. La MO brûle généralement pendant la cuisson. Elle contribue à l'augmentation de la porosité des produits céramiques et son effet est jugé négatif lorsqu'elle

est présente en fort pourcentage (Christidis, 2011). Les teneurs en matière organique des matériaux de Ngat-Carrière sont presque toutes inférieures à l'unité à l'exception d'un seul matériau (NGB11) qui a une valeur égale à 1,70 %. Ces valeurs sont comprises entre 0,58 et 1,70 %, (tableau 9).

### **I.2.8. Carbone organique**

La matière organique (MO) et le carbone organique (CO) sont liés par la relation  $MO = 1,72 \times CO$  (sous végétation secondarisée ou jachère) et  $MO = 2 \times CO$  (sous végétation naturelle). La végétation du site d'étude étant une forêt secondaire, c'est la première formule qui a été utilisée pour calculer le pourcentage en carbone organique.

Le carbone organique a toutes ses valeurs inférieures à l'unité. Elles oscillent de 0,34 à 0,99 % pour une moyenne de 0,48 % (tableau 9).

### **I.2.9. Capacité d'échange cationique**

La capacité d'échange cationique (CEC) des matériaux argileux de Ngat-Carrière a des valeurs qui vont de 14,75 (NGB11) à 16,05 (NGB4) avec une moyenne de 15,19 meq/100 g de sol (tableau 9).

## **I.3. Caractérisation minéralogique**

Deux types d'analyses ont été effectuées pour la caractérisation minéralogique des matériaux argileux de Ngat-Carrière à savoir: les diffractogrammes de rayons X et la microscopie infra-rouge.

### **I.3.1. Diffractogrammes des rayons X**

La signature minéralogique des échantillons argileux est composée du quartz, de la kaolinite, de l'anatase, et de la goethite (figure 21).

Tableau 9: Valeurs de MO, CO et CEC des échantillons de matériaux argileux de Ngat-Carrière.

ECH	MO	CO	CEC
NGB1	0,58	0,34	15,25
NGB2	0,71	0,41	15,75
NGB3	0,62	0,36	14,80
NGB4	0,77	0,45	16,05
NGB5	0,76	0,44	15,45
NGB6	0,88	0,51	15,55
NGB7	0,63	0,37	15,25
NGB8	0,73	0,42	14,95
NGB9	0,69	0,40	14,70
NGB10	0,88	0,51	15,10
NGB11	1,70	0,99	14,75
NGB12	0,77	0,45	14,78
NGB13	0,81	0,47	14,70
NGB14	0,99	0,58	15,58
NGB15	0,81	0,47	14,9
NGB16	0,87	0,51	14,85
NGB17	0,89	0,52	16,03
NGB18	0,93	0,54	14,78
Moy.	15,02	0,49	15,18

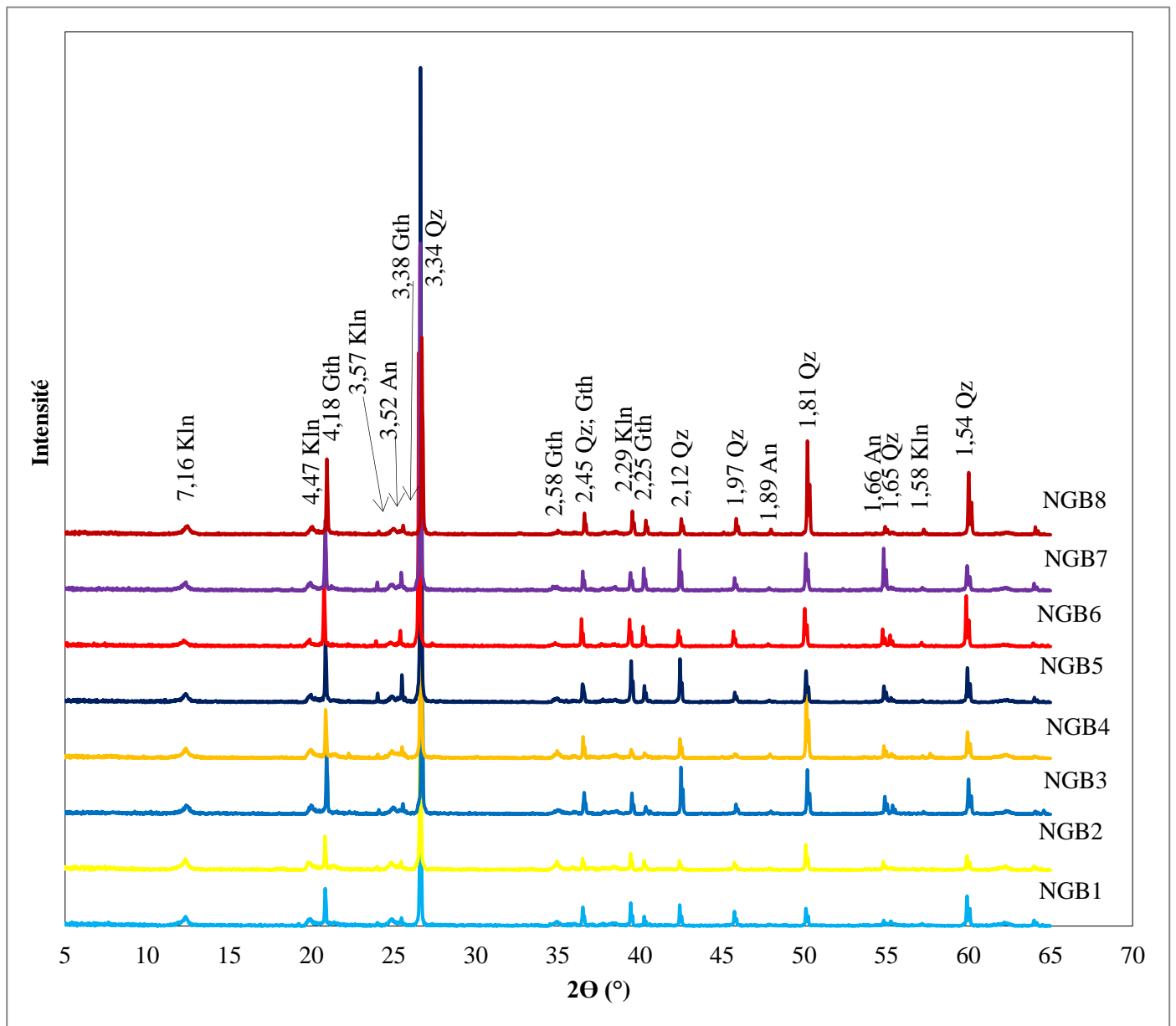
MO: matière organique, CO: carbone organique, CEC: capacité d'échange cationique

### I.3.2. Microscopie infra-rouge

La spectrométrie IR est une technique complémentaire à la DRX. Elle est un outil précieux connu pour sa sensibilité à détecter les minéraux très hydratés et à forte instabilité thermique. Le tableau 10 ressort les différentes bandes d'absorption des radicaux des minéraux présents dans les argiles étudiées.

La spectrométrie IR des matériaux argileux étudiés (Figure 22) montrent que le spectre typique de la kaolinite est exprimé, avec des larges bandes de vibration autour de 3689 et 3618  $\text{cm}^{-1}$ . Ces bandes caractérisent la kaolinite dans tous les échantillons avec des épaulements au tour de 3700  $\text{cm}^{-1}$  et 3628  $\text{cm}^{-1}$  (Figure 22 a). Les vibrations d'élongation de liaison Si-O s'observent à 1006  $\text{cm}^{-1}$ , celles de liaison Si-O-Al à 900  $\text{cm}^{-1}$  et des vibrations symétriques des liaisons Si-O au tour de 450  $\text{cm}^{-1}$ . Des larges bandes d'absorption de faible intensité centrées autour de 1600  $\text{cm}^{-1}$  sur tous les matériaux analysés sont attribuées à des

molécules d'eau ou éventuellement aux autres radicaux constitutifs des aluminosilicates amorphes.



Kln: Kaolinite; Qz: Quartz; An: Anatase; Gth: Geothite

Figure 21: Diffractogrammes des rayons X des matériaux argileux de Ngat-Carrière.

Tableau 10: Bandes caractéristiques des spectres infrarouges

Radicaux	Nombre d'onde en $\text{cm}^{-1}$	Minéraux
OH	3600 - 3700	Kaolinite
	3200 (bandes larges)	Goethite
SiO <sub>4</sub>	900 - 1200	Kaolinite /Quartz
	400 - 700	
	750 - 800	Quartz

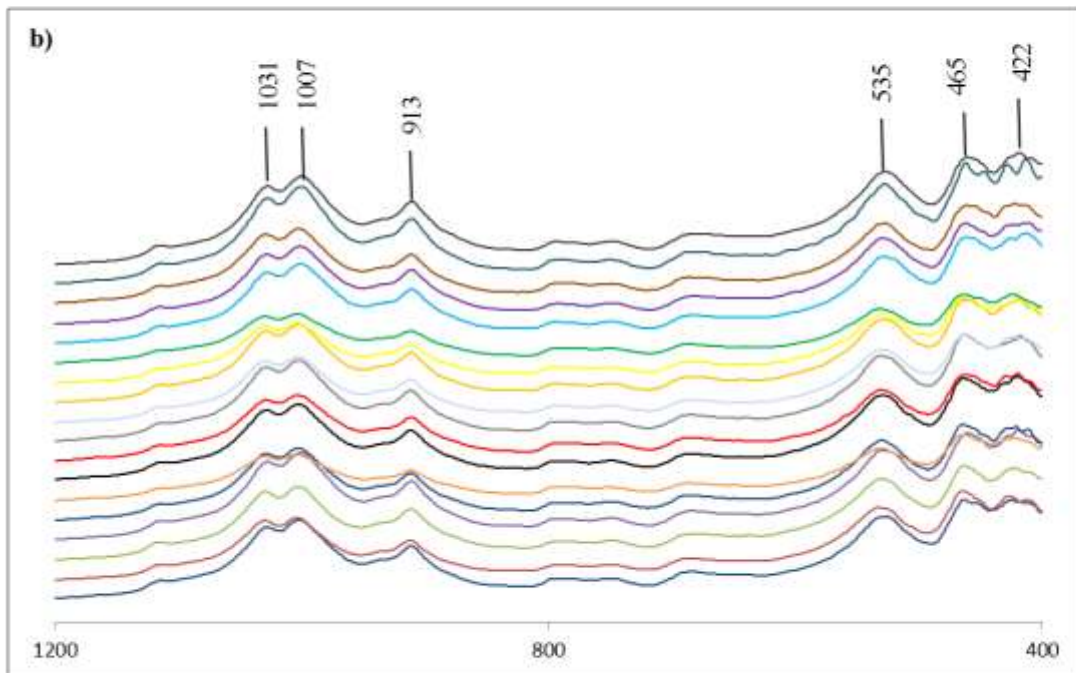
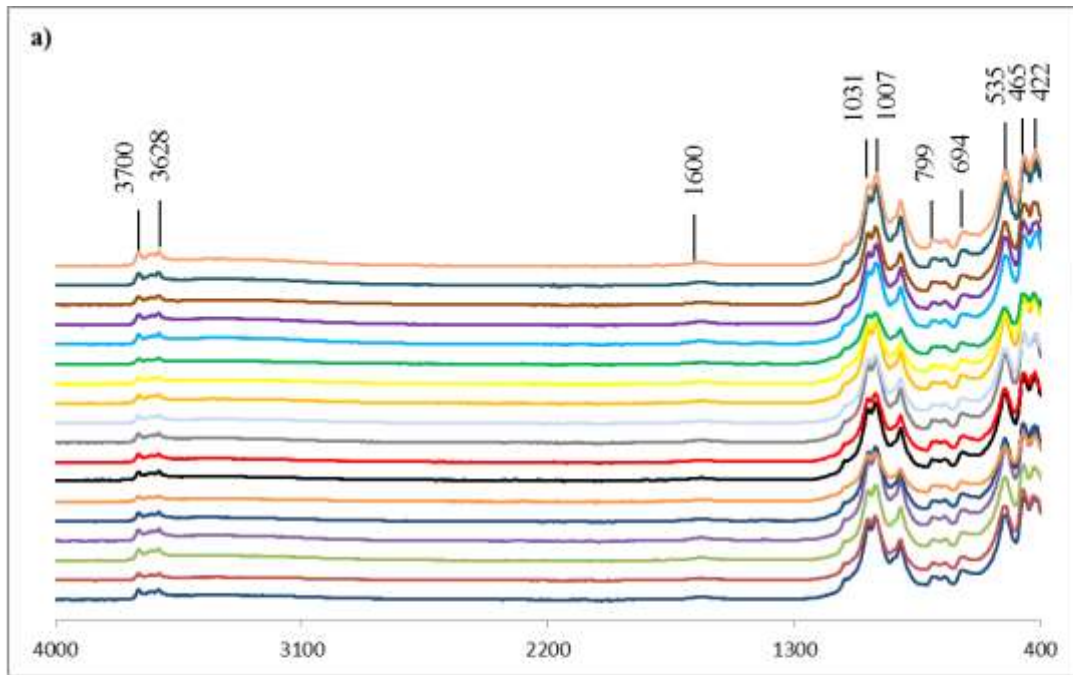
Dans le domaine des basses fréquences (Figure 22 b), entre 1200 et 700  $\text{cm}^{-1}$ , les vibrations d'élongation symétriques Si-O sont observées. Les bandes à 993, 998 et 1000  $\text{cm}^{-1}$  sont propres à la kaolinite et au quartz. Dans la liaison Al-O, les vibrations se manifestent par une large bande centrée sur 915  $\text{cm}^{-1}$  comportant sur son flanc de hautes fréquences, un épaulement vers 937  $\text{cm}^{-1}$  (Brindley et al., 1986). Les bandes à 791, 787 et 749  $\text{cm}^{-1}$  observées dans tous les échantillons analysés correspondent à la vibration Al-O des aluminosilicates.

#### I.4. Géochimie des matériaux argileux de Ngat-Carrière

##### I.4.1. Distribution des éléments majeurs

Les analyses géochimiques ont été effectuées sur huit échantillons ayant des teneurs élevées en argile et prélevés sur ce site. La distribution des éléments majeurs est présentée dans le tableau 11. A l'examen des pourcentages de ces éléments chimiques, nous pouvons noter que les teneurs en silice (SiO<sub>2</sub>) sont élevées et oscillent entre 67,55 et 80,73 %, pour une moyenne 74,21 %. Les teneurs en alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) sont faible à modérées dans l'ensemble, elles vont de 9,09 à 15,38 %. La moyenne est de 12,39 %. Les teneurs en sesquioxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) sont relativement faibles et varient de 1,82 à 4,65 %. Les teneurs en alcalins et alcalino-terreux (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O + CaO + MgO) oscillent entre 0,69 et 1,2 % et sont très faibles. Les teneurs en rutile ou titane (TiO<sub>2</sub>) sont relativement faibles dans toutes les argiles et vont de 1,26 à 1,44 %. On note dans tous les matériaux la présence en trace d'oxyde de sodium (Na<sub>2</sub>O) et ses valeurs sont presque toutes les mêmes. La présence Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> est quasi nulle ou en traces (< 0,1 %) dans tous les matériaux. Il en est de même du phosphore (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) et de l'oxyde de manganèse (MnO).

Les teneurs en oxydes ferromagnésiens ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ ) sont faibles dans les différents matériaux et sont comprises entre 2,07 et 5,03 %. Les valeurs de la perte au feu (P.F) de ces matériaux sont modérées et vont de 5,47 à 9,12 %. Les rapports  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  varie entrent 4,39 et 8,88 %. Les valeurs de l'indice d'altération chimique (CIA) sont élevées et varient de 93,96 % à 95,53 % pour une moyenne de 86,34 % (tableau 11). L'indice de variabilité chimique (ICV) a des valeurs qui sont comprises entre 0,35 et 0,49 % (tableau 11). La figure 23 illustre la composition géochimique des éléments majeurs du site de Ngat-Carrière et révèle que la silice est l'élément chimique le plus abondant dans tous les échantillons analysés.



— NGB1 — NGB2 — NGB3 — NGB4 — NGB5 — NGB6 — NGB7 — NGB8 — NGB9  
 — NGB10 — NGB11 — NGB12 — NGB13 — NGB14 — NGB15 — NGB16 — NGB17 — NGB18

Figure 22: Spectres d'absorption infrarouge des matériaux étudiés: a) 400-4000  $\text{cm}^{-1}$ ; b) 400-1200  $\text{cm}^{-1}$ .

Tableau 11: Composition en éléments majeurs (%) des matériaux argileux de Ngat-Carrière.

	ld	NGB1	NGB2	NGB3	NGB4	NGB5	NGB6	NGB7	NGB8	Moy. (n=8)
SiO <sub>2</sub>	0,04	71,68	67,55	75,01	67,57	76,69	80,73	73,93	80,48	74,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	13,13	15,38	12,33	15,28	11,19	9,09	12,17	10,55	12,39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	3,77	4,6	2,11	4,65	2,21	2,33	3,28	1,82	3,10
MgO	0,01	0,31	0,36	0,30	0,38	0,28	0,28	0,32	0,25	0,31
MnO	0,002	0,04	0,05	0,03	0,11	0,03	0,04	0,05	0,03	0,05
K <sub>2</sub> O	0,01	0,57	0,68	0,5	0,69	0,45	0,43	0,54	0,41	0,53
CaO	0,006	0,06	0,03	0,01	0,10	0,02	0,02	0,02	< ld	0,03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,002	0,06	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05
TiO <sub>2</sub>	0,01	1,43	1,44	1,34	1,41	1,32	1,3	1,33	1,26	1,35
Na <sub>2</sub> O	0,02	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,002	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
PF	-	7,84	8,81	6,44	9,12	6,18	5,47	6,99	5,84	7,09
Total	-	98,94	99,00	98,15	99,41	98,45	99,80	98,72	100,72	99,15
SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	5,46	4,39	6,08	4,42	6,85	8,88	6,07	7,63	6,22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /K <sub>2</sub> O	-	6,61	6,76	4,22	6,74	4,91	5,42	6,07	4,44	5,80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Na <sub>2</sub> O	-	328,25	384,50	411,00	509,33	373,00	181,80	405,67	351,67	354,00
CIA	-	94,61	94,73	95,30	94,76	95,13	93,96	94,78	95,53	94,85
ICV	-	0,47	0,46	0,35	0,48	0,39	0,49	0,45	0,36	0,43
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	84,81	82,93	87,34	82,85	87,88	89,82	86,1	91,03	86,6
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O+CaO+MgO	-	0,98	1,11	0,84	1,20	0,78	0,78	0,91	0,69	0,91
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	5,46	4,39	6,08	4,42	6,85	8,88	6,07	7,63	6,22
K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>	-	9,18	10,68	9,20	10,84	8,48	6,99	9,15	8,37	9,15

PF: Perte au Feu; CIA: Indice d'Altération Chimique; ICV: Indice de Variabilité Chimique

ICV = (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O+CaO+MgO+TiO<sub>2</sub>)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (d'après Cox et al., 1995);

CIA = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO\*+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) × 100 (d'après Nesbitt et Young, 1984).

#### I.4.2. Distribution des éléments traces

Les éléments traces sont regroupés en trois groupes que sont les éléments traces associés aux ferromagnésiens; les éléments à grande valence ionique (HFSE: High Field Strength Element) et les éléments à grand rayon ionique (LILE: Large Ion Lithophile Element).

Les éléments traces associés aux ferromagnésiens (Cr, V, Co, Ni, Cu, Sc et Zn) ont des teneurs faibles à modérées. Les valeurs du chrome sont faibles dans tous les matériaux. Elles

sont comprises entre 46 et 68 ppm (tableau 12). Le vanadium est l'élément ferromagnésien avec des teneurs les plus élevées allant de 63,5 à 109,3 ppm.

Les teneurs du cobalt sont les plus faibles et comprises entre 2,75 et 5 ppm (tableau 12). Les valeurs du Zinc se concentrent entre 29,90 et 49,10 ppm. Le Cuivre, le Nickel et le Scandium ont toutes leurs valeurs inférieures à 40 ppm.

Dans le groupe des éléments à grande valence ionique (Zr, Th, Nb, U, Mo, Hf, W et Ta), Zr est l'élément trace le plus concentré. Ses teneurs varient de 227 à 295 ppm (tableau 12). Les teneurs en Thorium oscillent de 8,055 to 12,903 ppm. Les teneurs en Niobium vont de 20,595 à 27,242 ppm. L'Uranium, le Molibdème, le Tungstène, et le Tatala ont des valeurs faibles inférieures à 3 ppm. Les teneurs en Hf, sont supérieures à 5 ppm dans tous les matériaux.

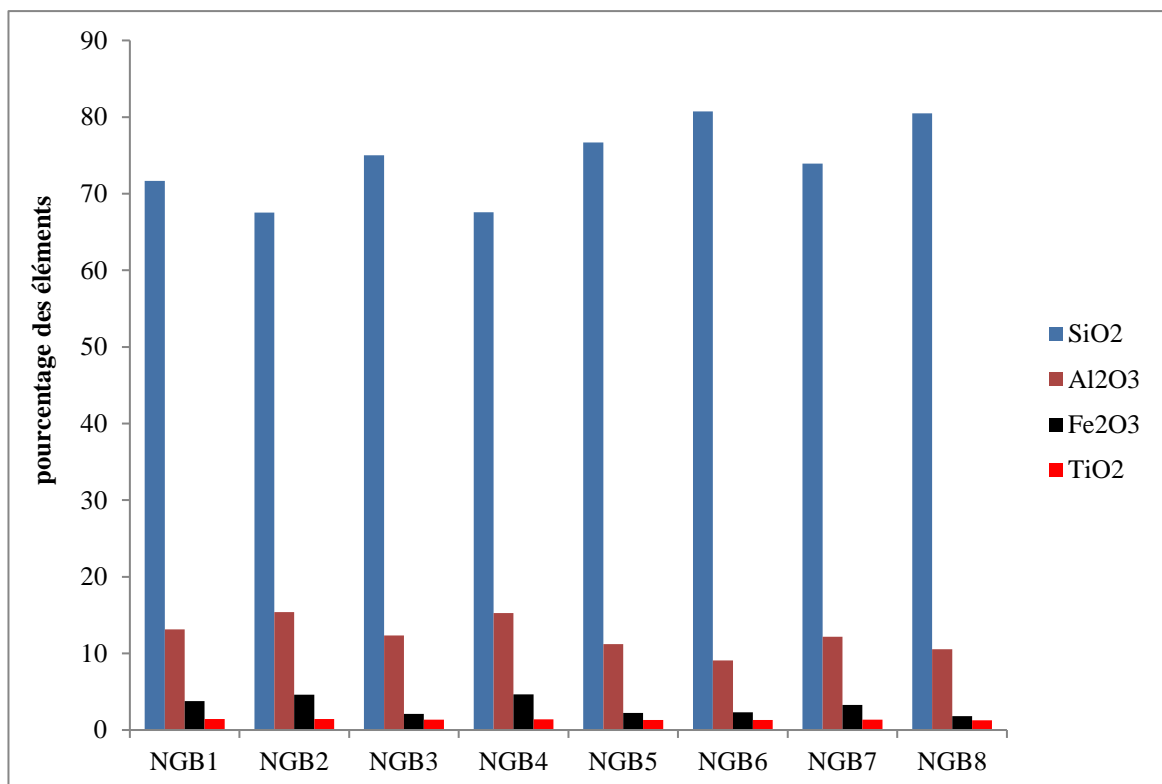


Figure 23: Composition en éléments majeurs dans les matériaux argileux de Ngat-Carrière.

Pour les éléments à grands rayons ioniques (Ba, Rb, Li, Sr, Pb et Cs), Ba est l'élément le plus abondant avec des valeurs comprises entre 94,7 to 151,5 ppm (tableau 12). Les teneurs en Lithium varient de 10,5 à 18,8 ppm (tableau 12). Rb a des valeurs inférieures à 85 ppm. Les valeurs du Césium sont inférieures à 6 ppm. Les valeurs du Sr se concentrent entre 12,90

et 23,20 ppm. Le comportement du Pb est pratiquement le même à celui du Sr. La valeur moyenne du Pb est de 17,62 ppm.

Le gallium a ses valeurs qui vont de 12,29 et 21,42 ppm. Les valeurs de l'Yttrium sont toutes supérieures à 5 % mais demeurent faibles. Les éléments tels que le Beryllium, Cd, Sb, In, Sn, et Tl ont des valeurs inférieures à 4 ppm ([tableau 12](#)). Les rapports Th/U et Th/Co montrent que ces échantillons sont plus riches en Thorium qu'en Uranium et Cobalt ([tableau 12](#)).

### **I.4.3. Distribution des terres rares**

Les terres rares ou lanthanides constituent un groupe de quinze éléments. Elles sont toutes naturelles à l'exception du prométhium ( $Z=61$ ).

Les éléments terres rares sont subdivisés en 2 groupes: les terres rares légères (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) et les terres rares lourdes (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu).

La répartition des éléments terres rares dans les échantillons de matériaux argileux est résumée dans [le tableau 13](#). Ces valeurs sont caractérisées par des teneurs modérées en cérium et lanthane. Les teneurs en cérium sont très variables et oscillent entre 24,25 et 40,29 ppm. Les teneurs en lanthane varient entre 13,5 et 23,8 ppm. Ces terres rares les plus représentées sont secondées par le Néodyme qui a des concentrations qui titrent entre 9,49 et 16,07 ppm ([tableau 13](#)). Les teneurs en praséodyme et samarium sont faibles (inférieure à 5 %). Les concentrations du praséodyme vont de 2,73 à 4,09 ppm et celles en samarium varient de 1,71 à 2,74 ppm. L'euporium est la seule terre rare légère à avoir des concentrations très faibles (0,36 - 0,55 ppm).

Les concentrations en terres rares lourdes sont faibles. Le gadolinium (1,76 - 2,39 ppm), le dysprosium (2,78 - 3,50 ppm), l'erbium (2,18 - 2,61 ppm) et l'ytterbium (2,11 - 2,59 ppm) ont des teneurs les plus élevées. Les teneurs en terbium (0,35 - 0,45 ppm), holmium (0,66 - 0,80 ppm), terbium (0,33 - 0,39 ppm) et lutétium (0,29 - 0,36 ppm) demeurent très faibles, elles sont inférieures à 1 ppm ([tableau 13](#)).

La somme des terres rares dans les matériaux de Ngat-carrière est inférieure à 100 ppm dans tous les matériaux en dehors d'un seul qui a une somme égale à 104,37 ppm ([tableau 13](#)).

Tableau 12: Composition chimique (en ppm) en éléments traces des matériaux argileux de Ngat-Carrière.

	ld	NGB1	NGB2	NGB3	NGB4	NGB5	NGB6	NGB7	NGB8	Moy.
Co	0,09	4,15	5,11	3,11	7,15	3,07	2,93	4,30	2,76	4,07
Cr	2,9	64,00	64,00	55,00	68,00	53,00	46,00	54,00	54,00	57,25
Cu	0,4	21,10	23,90	15,80	28,00	16,10	14,50	20,20	14,20	19,23
Ni	0,6	28,10	31,30	25,70	35,70	23,70	18,70	24,90	18,60	25,84
Zn	2	44,20	44,00	37,40	49,10	35,00	29,90	36,20	33,50	38,66
Sc	0,17	10,90	11,10	8,60	11,80	8,20	6,60	9,40	7,90	9,31
V	0,4	104,10	105,80	77,80	109,30	79,60	63,50	82,70	68,70	86,44
Ba	1,3	123,90	147,90	108,70	151,50	110,60	94,70	118,70	95,40	118,93
Sr	1,3	18,80	19,60	16,30	23,20	16,70	16,10	17,30	12,90	17,61
Li	0,24	13,90	16,00	18,80	17,40	16,00	10,50	13,80	11,10	14,69
Pb	0,29	19,06	20,13	16,20	19,84	16,86	15,17	17,72	15,98	17,62
Rb	0,15	68,23	68,48	57,33	83,46	52,48	47,31	61,05	46,22	60,57
Cs	0,006	5,11	5,53	4,43	5,82	3,85	3,51	4,59	3,70	4,57
Zr	4	267,00	263,00	229,00	295,00	227,00	253,00	253,00	255,00	255,25
Nb	0,05	25,55	26,28	22,04	27,24	21,49	20,59	23,41	22,00	23,58
Ga	0,04	19,34	21,12	15,71	21,41	15,26	12,29	17,00	15,09	17,15
U	0,01	2,22	2,42	1,93	2,57	2,09	1,99	2,26	1,99	2,18
Mo	0,08	1,74	1,98	1,10	1,91	1,29	1,07	1,49	1,19	1,47
W	0,023	1,60	1,79	1,41	1,86	1,44	1,29	1,56	1,42	1,55
Ta	0,015	1,74	1,85	1,54	1,86	1,57	1,59	1,72	1,66	1,69
Y	0,09	23,17	19,74	20,17	20,03	19,27	22,20	21,61	19,74	20,74
Hf	0,09	6,18	7,10	5,78	7,72	5,84	6,67	6,87	6,91	6,63
Be	0,024	0,68	0,78	0,55	0,80	0,54	0,43	0,61	0,48	0,61
Cd	0,018	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03
Sb	0,025	0,52	0,54	0,45	0,55	0,46	0,45	0,49	0,48	0,49
In	0,0017	0,07	0,08	0,06	0,08	0,06	0,05	0,06	0,05	0,06
Sn	0,17	3,16	3,43	2,76	3,47	2,74	2,37	2,94	2,75	2,95
Tl	0,004	0,42	0,54	0,38	0,55	0,37	0,35	0,45	0,35	0,43
Bi	0,05	0,33	0,38	0,29	0,38	0,29	0,28	0,32	0,32	0,32
Cs	0,006	5,11	5,53	4,43	5,82	3,85	3,51	4,59	3,70	4,57
Th	0,027	10,59	12,90	8,96	12,72	9,43	8,06	10,73	8,32	10,21
Th/U	-	4,77	5,33	4,64	4,95	4,52	4,05	4,74	4,16	4,65
Th/Co	-	2,55	2,53	2,88	1,78	3,07	2,75	2,49	3,02	2,63
Zr/Sc	-	24,50	23,69	26,63	25,00	27,68	38,33	26,91	32,28	28,13

Elle oscille entre et 64,11 (NGB8) et 104,37 (NGB7) ppm. Tous ces échantillons présentent un enrichissement en LREE (52,61 - 91,26 ppm) par rapport aux HREE (10,55 - 13,11 ppm). Parmi les LREE, seul l'élément Eu a des concentrations inférieures à l'unité. Par contre, pour les HREE les éléments (Tb, Ho, Tm, et Lu) ont aussi des concentrations inférieures à 1. Les valeurs du rapport entre la somme des concentrations des LREE et celle des HREE (LREE/ HREE) sont faibles et variables; elles oscillent de 4,57 à 6,96 ppm.

La normalisation des terres rares s'est faite par rapport aux valeurs de la chondrite d'après Pourmand et al. (2012). Cette normalisation par rapport aux valeurs de la chondrite montre que les terres rares sont légèrement fractionnées (figure 24). Il apparaît que les valeurs de l'indice de fractionnement des terres rares  $(La/Yb)_N$  sont comprises entre 3,89 et 6,30. Les spectres laissent apparaître un enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes. Par contre tous ces échantillons ont des anomalies négatives en Eu (tableau 13).

Tableau 13: Teneurs en rares terres (ppm) des matériaux argileux de Ngat

-	ld	NGB1	NGB2	NGB3	NGB4	NGB5	NGB6	NGB7	NGB8	Moy (n=8)
La	0,09	18,30	20,60	18,20	20,10	14,90	18,70	23,80	13,50	18,51
Ce	0,17	33,48	40,29	32,17	39,53	25,91	33,20	43,36	24,25	34,02
Pr	0,019	3,49	4,09	3,46	3,96	2,79	3,74	4,75	2,73	3,63
Nd	0,11	11,72	14,16	11,97	13,74	9,49	12,64	16,07	9,89	12,46
Sm	0,05	2,06	2,49	2,09	2,49	1,71	2,19	2,74	1,84	2,20
Eu	0,008	0,43	0,50	0,42	0,51	0,36	0,45	0,55	0,39	0,45
Gd	0,04	2,01	2,25	1,98	2,16	1,73	2,02	2,39	1,89	2,05
Tb	0,009	0,39	0,41	0,37	0,41	0,35	0,39	0,45	0,37	0,39
Dy	0,04	3,06	3,16	2,82	3,03	2,78	3,18	3,50	3,01	3,07
Ho	0,006	0,73	0,72	0,67	0,71	0,66	0,78	0,80	0,71	0,72
Er	0,04	2,39	2,39	2,18	2,37	2,22	2,56	2,61	2,43	2,39
Yb	0,008	2,35	2,37	2,11	2,41	2,15	2,53	2,59	2,38	2,36
Tm	0,005	0,36	0,37	0,33	0,36	0,33	0,38	0,39	0,37	0,36
Lu	0,005	0,33	0,34	0,29	0,34	0,29	0,36	0,36	0,34	0,33
REE	-	81,10	94,14	79,06	92,12	65,67	83,12	104,36	64,10	82,96
LREE	-	69,48	82,13	68,31	80,33	55,16	70,92	91,27	52,60	71,28
HREE	-	11,62	12,01	10,75	11,79	10,51	12,20	13,09	11,50	11,68
a	-	5,98	6,84	6,35	6,82	5,24	5,81	6,97	4,57	6,07
$(La/Yb)_N$	-	5,34	5,96	5,92	5,72	4,75	5,07	6,30	3,89	5,37
Ce/Ce*	-	1,02	1,07	0,99	1,08	0,98	0,96	0,97	0,97	1,01
Eu/Eu*	-	0,63	0,64	0,65	0,66	0,64	0,65	0,64	0,63	0,64

a:  $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ ; Elts: éléments;

l.d: limites de détection

$$Ce/Ce^* = (Ce_{\text{échantillon}}/Ce_{\text{chondrite}}) / (La_{\text{échantillon}}/La_{\text{chondrite}})^{1/2} * (Pr_{\text{échantillon}}/Pr_{\text{chondrite}})^{1/2}$$

$$Eu/Eu^* = (Eu_{\text{échantillon}}/Eu_{\text{chondrite}}) / (Sm_{\text{échantillon}}/Sm_{\text{chondrite}})^{1/2} * (Gd_{\text{échantillon}}/Gd_{\text{chondrite}})^{1/2}$$

$$(La/Yb)_N = (La_{\text{échantillon}}/La_{\text{chondrite}}) / (Yb_{\text{échantillon}}/Yb_{\text{chondrite}}).$$

## II. PETROLOGIE DES MATERIAUX DE NGAT-PLANTATION

### II.1. Description macroscopique

Cette description a porté sur six matériaux prélevés sur ce site. La description est faite sur la base de la couleur, la texture, et l'épaisseur.

Ces matériaux ont des couleurs qui vont du jaune rougeâtre (5YR5/6 et 5YR5/8). Ces argiles ont des textures argilo-sableuse, argilo-limono-sableuse, argilo-limoneuse et argileuse. Ils ont été prélevés à l'aide de fosses et à des profondeurs différentes comprises entre 10 et 160 cm.

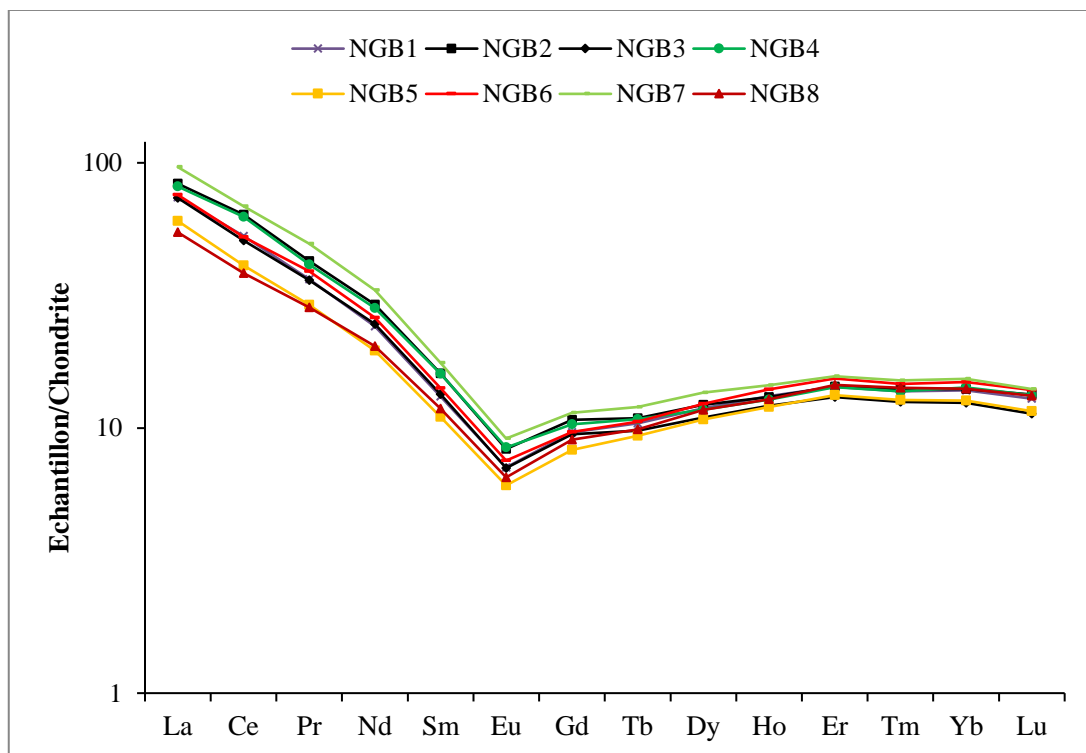


Figure 24: Spectres des terres rares normalisés par rapport à la chondrite (*Pourmand et al., 2012*).

### II.2. Caractérisation physico-chimique

Elle est axée sur l'humidité résiduelle, l'analyse granulométrique, et la détermination des limites d'Atterberg des différents échantillons de ce site.

### II.2.1. Humidité résiduelle

Les valeurs de l'humidité résiduelle en pourcentage pondéré varient de 19,34 % à 37,58 % pour une moyenne de 25,61 % (tableau 14). La représentation graphique des valeurs de l'humidité résiduelles des matériaux de Ngat-Plantation est donnée par la figure 25.

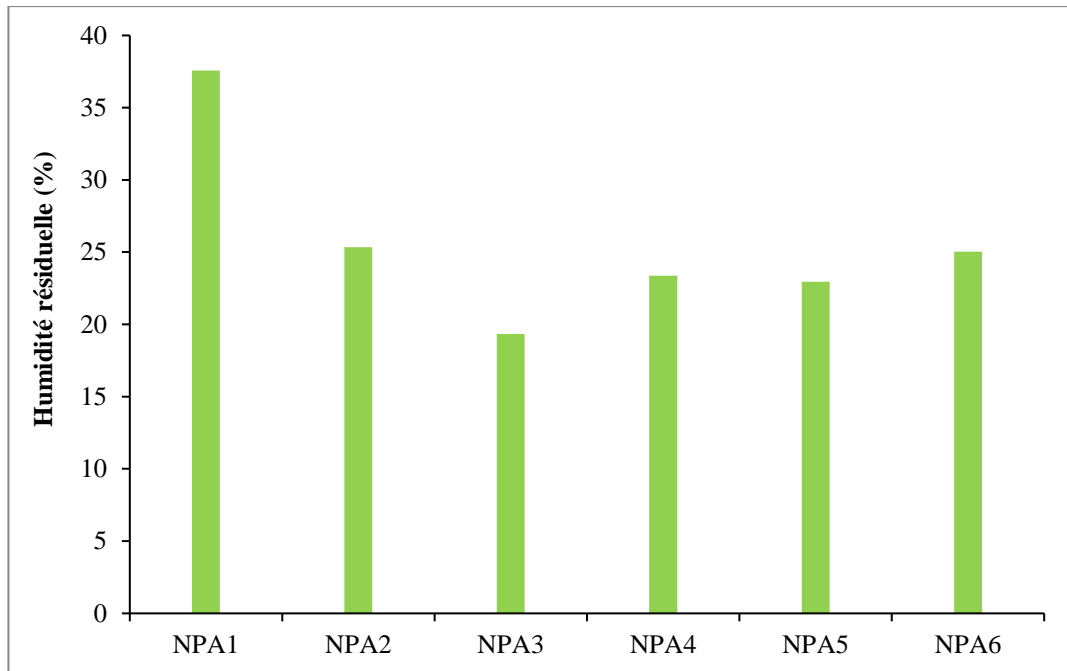


Figure 25: Répartition graphique des valeurs de l'humidité résiduelle des matériaux de Ngat-Plantation.

### II.2.2. Granularité

La répartition granulométrique de différents matériaux argileux de ce site montre que ces derniers sont constitués majoritairement d'argiles (tableau 14; figure 26). Ces valeurs sont concentrées entre 51,10 et 61,15 %. Les proportions de limons oscillent entre 7,27 et 20,64 %. Quant à la proportion de sables, ses valeurs titrent entre 28,26 et 33,65 % (tableau 14). Les courbes granulométriques des différentes proportions des argiles de ce site montrent que les spectres ont la même signature et sont tous superposées. Par contre la courbe du matériau qui a la plus faible proportion en argile et en sable et plus grande en limons a une signature différente des autres courbes mais reste superposée aux autres courbes (figure 27). Le positionnement de ces matériaux dans le diagramme textural de Picard (1971) montre que toutes ces argiles ont une texture argilo-sableuse (figure 28).

Tableau 14: Composition granulométrique et humidité résiduelle des matériaux de Ngat-plantation (en %).

	Humidité résiduelle (%)	Granularité (%)			
		Argiles	Limons	Sables	Total
NPA1	37,58	51,10	20,64	28,26	100,00
NPA2	25,35	61,15	7,27	31,56	99,98
NPA3	19,34	60,41	9,40	30,2	100,01
NPA4	23,38	55,14	11,21	33,65	100,00
NPA5	22,95	59,62	11,34	29,04	100,00
NPA6	25,04	58,74	9,96	31,29	99,99

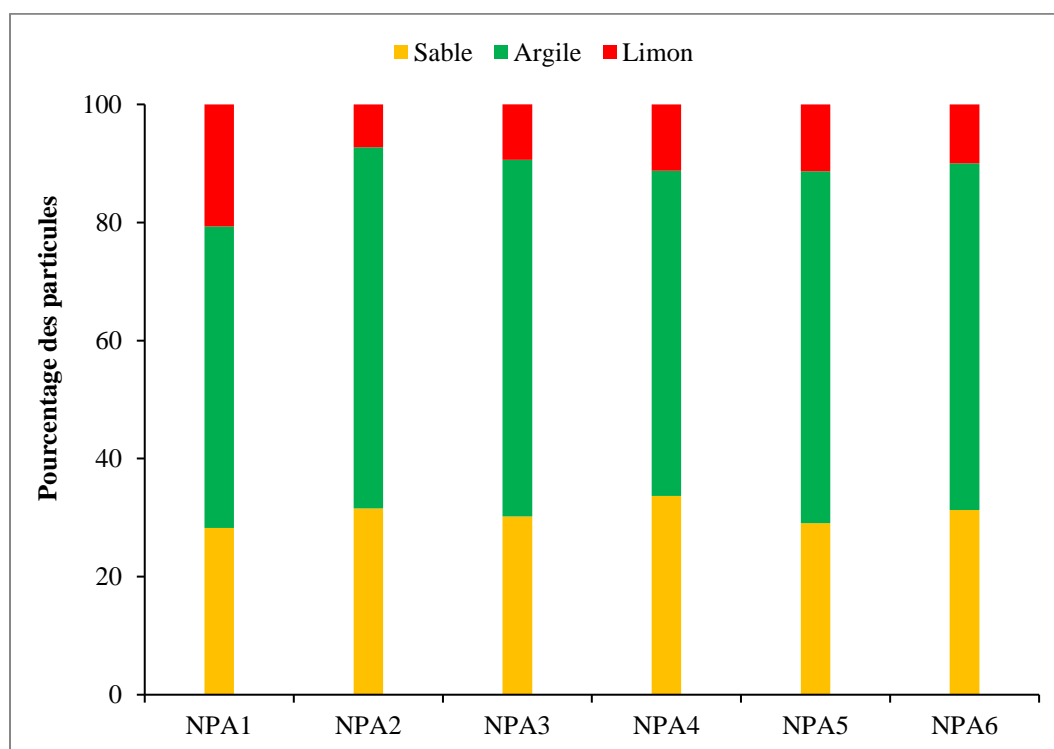


Figure 26: Répartition granulométrique des matériaux argileux de Ngat-Plantation.

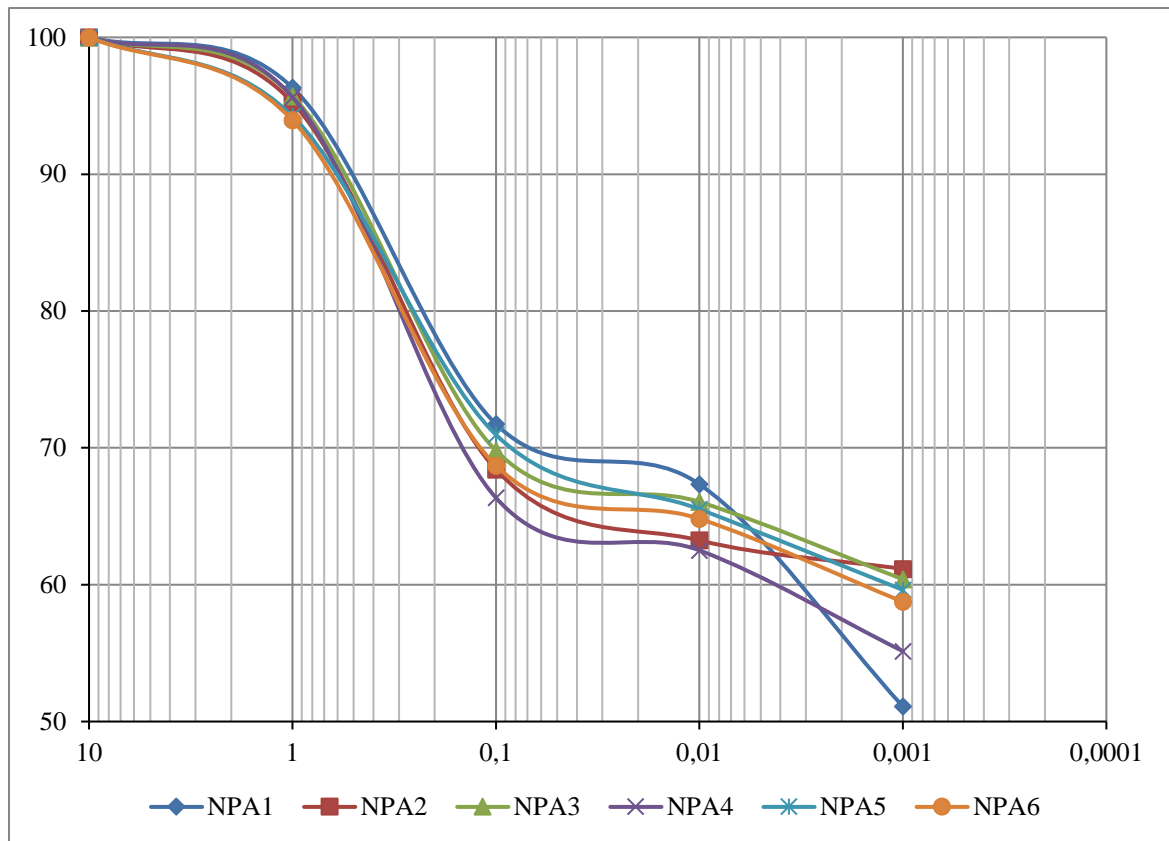


Figure 27: Courbes granulométriques des matériaux argileux de Ngat-Plantation.

### II.2.3. Limites d'Atterberg

Les valeurs des limites d'Atterberg des matériaux de Ngat-Plantation sont élevées. Ces valeurs nous montrent que la limite de liquidité est comprise entre 81,6 et 42,06 %. La limite de plasticité quant à elle a des valeurs qui vont de 17,7 à 48,9 %. Les valeurs de l'indice de plasticité, oscillent de 19 à 32,8 %. L'indice de consistance a des valeurs supérieures à l'unité pour la majorité des matériaux, elles titrent de 0,2 à 1,89 (tableau 15).

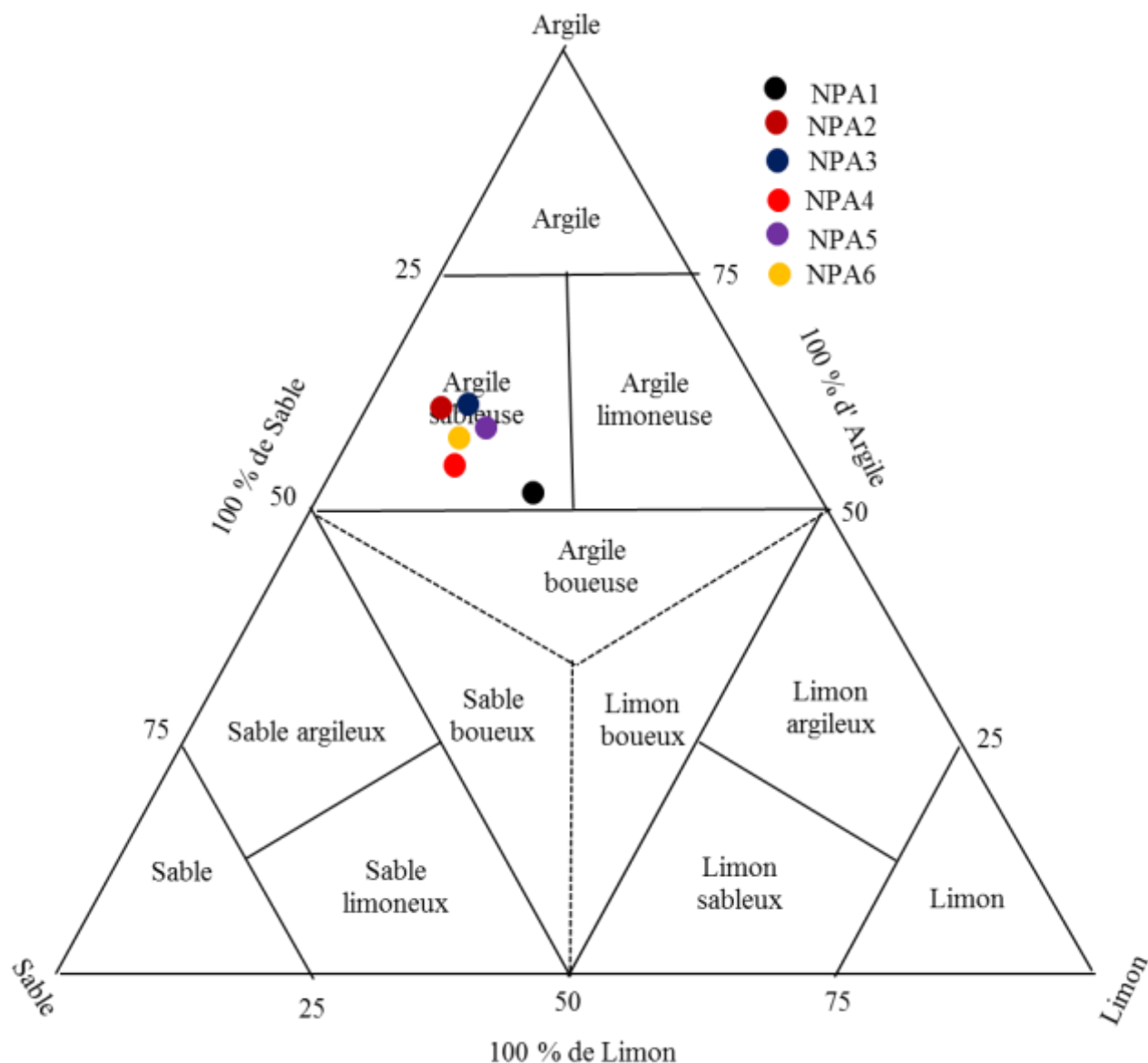


Figure 28: Diagramme textural de Picard (1971) montrant le positionnement des matériaux de Ngat-Plantation.

Tableau 15: Limites de consistance et Indice de plasticité des matériaux de Ngat-Plantation.

	LL	LP	IP	IC
NPA1	81,60	48,90	32,80	1,50
NPA2	58,80	27,80	30,90	1,24
NPA3	45,30	26,30	19,00	1,37
NPA4	53,00	32,80	20,10	1,41
NPA5	42,60	17,70	24,90	0,20
NPA6	45,60	21,50	24,10	1,89

LL: limite de liquidité; LP: limite de plasticité; IP: indice de plasticité; IC: indice de consistance.

Le positionnement de ces valeurs dans le diagramme de plasticité de Casagrande, (1948), montre que les matériaux de ce site ont une plasticité et une compressibilité moyenne (car leur limite de liquidité est comprise entre 30 et 50 %) à élevée (leur limite de liquidité est supérieure à 50 %), (figure 29).

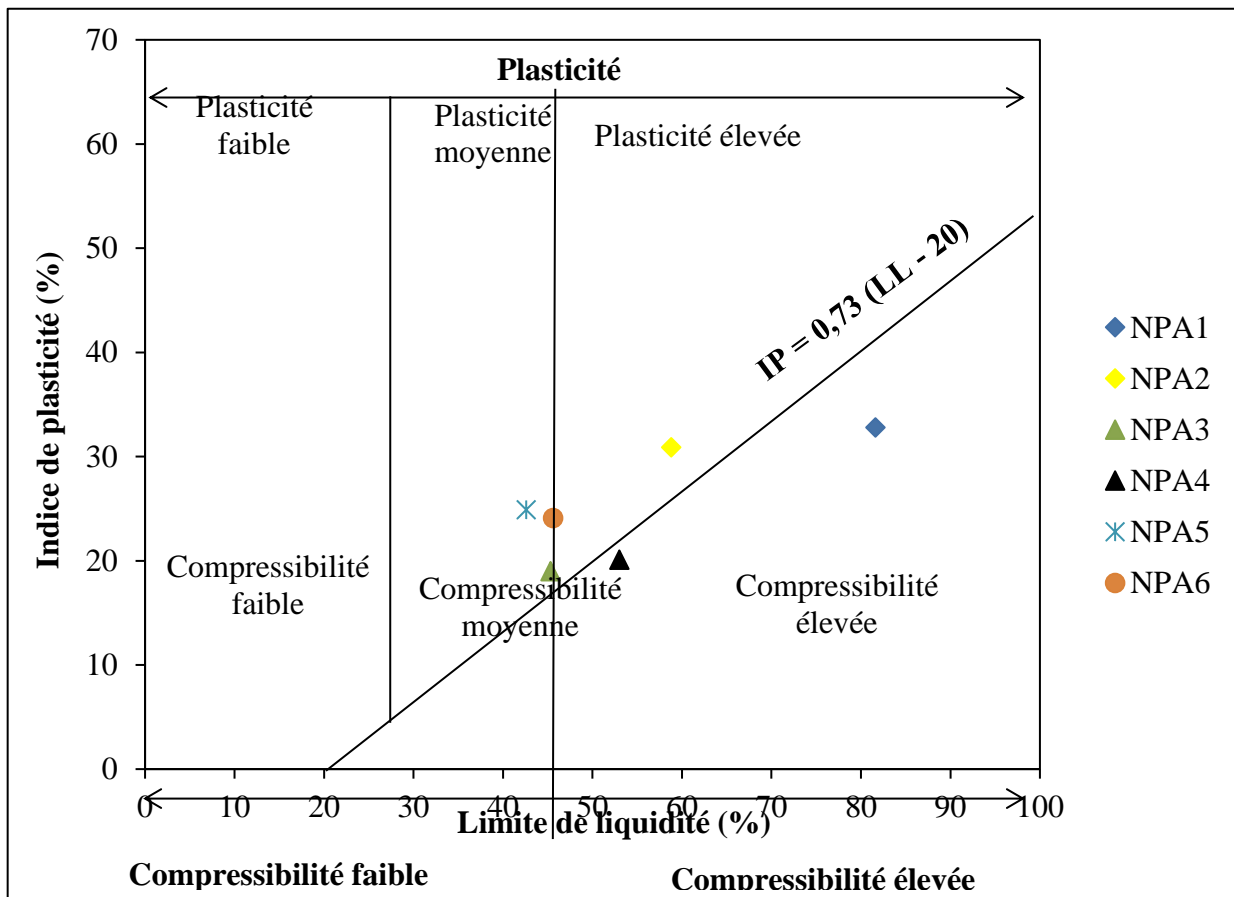


Figure 29: Positionnement des matériaux argileux de Ngat-plantation dans le diagramme de Casagrande (1948).

## II.2.4. Densimétrie

### II.2.4.1. Densité réelle ( $d_r$ )

La densité réelle des différents matériaux de Ngat-plantation a des valeurs comprises entre 2,45 et 2,58 % (tableau 16).

### II.2.4.2. Densité apparente ( $d_a$ )

Les valeurs de la  $d_a$  des argiles de Ngat-plantation varient de 1,17 à 2,69 % pour pour une moyenne de 1,75 % (tableau 16).

### II.2.5. Porosité (Po)

La porosité a des valeurs modérées à moyennes pour tous les matériaux. Elles oscillent de 33,51 à 53,81 % (tableau 16).

### II.2.6. Potentiel d'hydrogène (pH)

Les valeurs du  $pH_{\text{eau}}$  des argiles de Ngat-plantation sont acides et évoluent globalement entre 4,85 et 5,30 pour une moyenne de 5,11 (tableau 16). Le  $pH_{\text{KCl}}$  quant à lui est aussi acide et oscille de 3,70 à 4,05 Avec une moyenne de 3,93 (tableau 16). La variation du pH tourne au tour de l'unité. Ses valeurs vont 0,95 à 1,60 (tableau 16).

Tableau 16: Densimétrie, porosité, pH des matériaux argileux de Ngat-Plantation.

	Densimétrie		Porosité (%)	Potentiel d'hydrogène		
	dr	da		$pH_{\text{eau}}$	$pH_{\text{KCl}}$	$\Delta pH$
NPA1	2,45	1,17	52,15	4,85	3,90	0,95
NPA2	2,76	1,31	52,5	5,10	3,95	1,15
NPA3	2,60	1,51	41,93	5,15	4,00	1,15
NPA4	2,73	1,44	47,32	5,3	3,70	1,60
NPA5	2,60	1,73	33,51	5,05	4,05	1,00
NPA6	2,58	1,19	53,81	5,2	4,00	1,20

dr: densité réelle; da: densité apparente; pH: potentiel d'hydrogène;  $\Delta$ : variation

### II.2.7. Matière organique (MO)

Les valeurs en MO des matériaux de Ngat-Plantation sont toutes supérieures à l'unité et sont comprises entre 1,02 et 1,48 % (tableau 17). Ces valeurs sont inférieures à 4 %.

### II.2.8. Teneur en carbone organique (CO)

Le CO des matériaux argileux de Ngat-Plantation à des valeurs inférieures à 1 et comprises entre 0,59 et 0,86 % (tableau 17).

### II.2.9. Capacité d'échange canonique (CEC)

La CEC des argiles de Ngat-Plantation a des valeurs qui se concentrent entre 14,85 et 16,02 pour une moyenne de 15,20 meq/100 g de sol (tableau 17).

Tableau 17: MO, CO et CEC des matériaux de Ngat-Plantation.

	MO	CO	CEC (meq/100 g)
NPA1	1,48	0,86	16,02
NPA2	1,02	0,59	14,85
NPA3	1,18	0,69	14,70
NPA4	1,06	0,62	14,85
NPA5	1,20	0,70	15,85
NPA6	1,08	0,63	14,95

MO: matière organique; CO: carbone organique; CEC: capacité d'échange cationique

## II.3. Minéralogie des matériaux argileux de Ngat-plantation

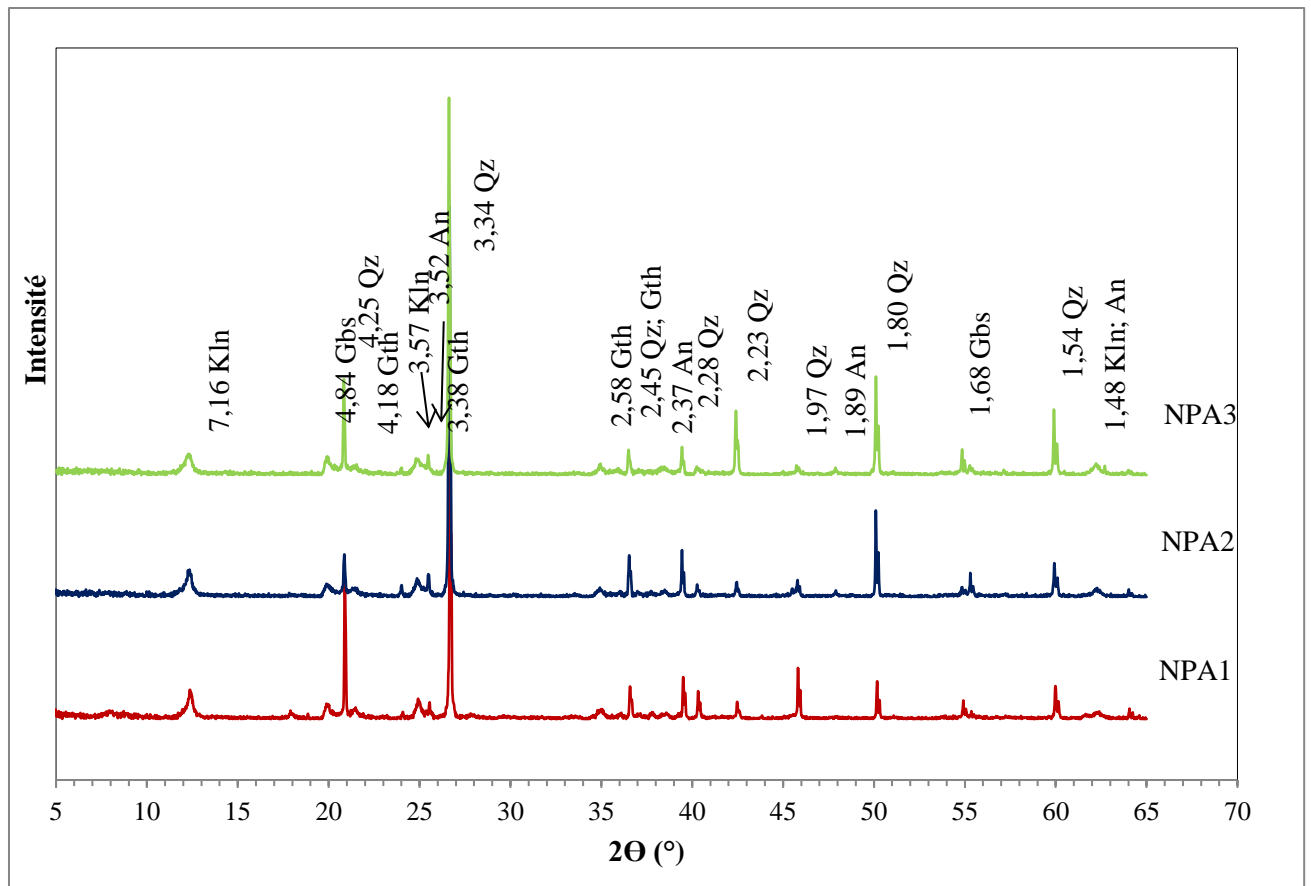
### II.3.1. Diffractogrammes de rayons x

Le cortège minéralogique des matériaux latéritiques est composé des minéraux tels: le quartz, la kaolinite, la gibbsite, la goethite et l'anatase (figure 30).

### II.3.2. Spectrométrie Infrarouge

La spectrométrie infra rouge des matériaux argileux de Ngat-Plantation montre que le spectre typique de la kaolinite s'exprime, avec de larges bandes vibrationnelles autour de 3699 et 3656  $\text{cm}^{-1}$  (Figure 31 a). Ces bandes correspondent aux bandes d'étirement OH, généralement observées dans l'argile à base de kaolinite. Des vibrations d'élongation de la liaison Si-O sont observées à 1006  $\text{cm}^{-1}$ , des vibrations d'élongation de la liaison Si-O-Al à 900  $\text{cm}^{-1}$  et des vibrations de la liaison Si-O symétrique autour de 450  $\text{cm}^{-1}$ .

Dans la gamme des basses fréquences comprises entre 1200 et 400  $\text{cm}^{-1}$  (Figure 31 b), des vibrations d'élongation symétriques Si-O sont observées. Les bandes observées respectivement à 993, 998 et 1000  $\text{cm}^{-1}$  des échantillons, ainsi que leur épaulement à 907  $\text{cm}^{-1}$  sont spécifiques à la kaolinite et au quartz. Les bandes à 791, 787 et 749  $\text{cm}^{-1}$  observées dans tous les matériaux analysés correspondent à la vibration Al-O des aluminosilicates.



Kln: Kaolinite; Qz: Quartz; An: Anatase; Gth: Goethite; Gbs: Gibbsite.

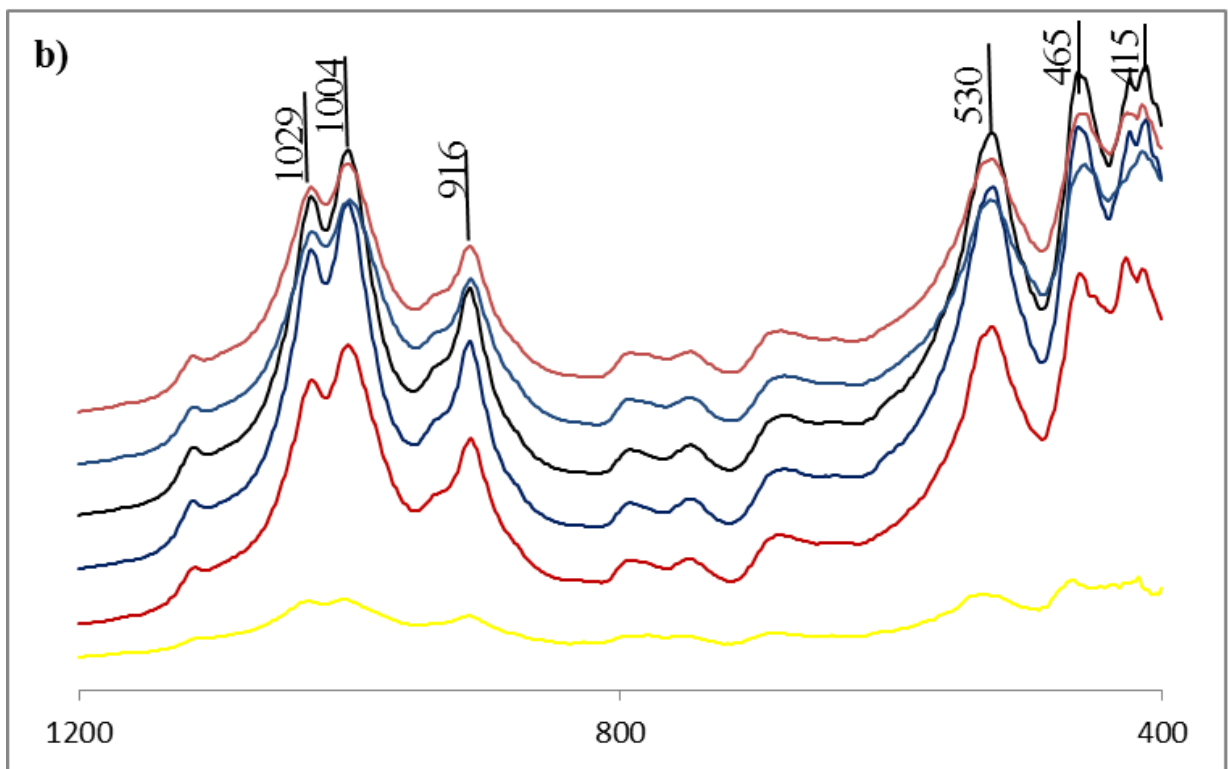
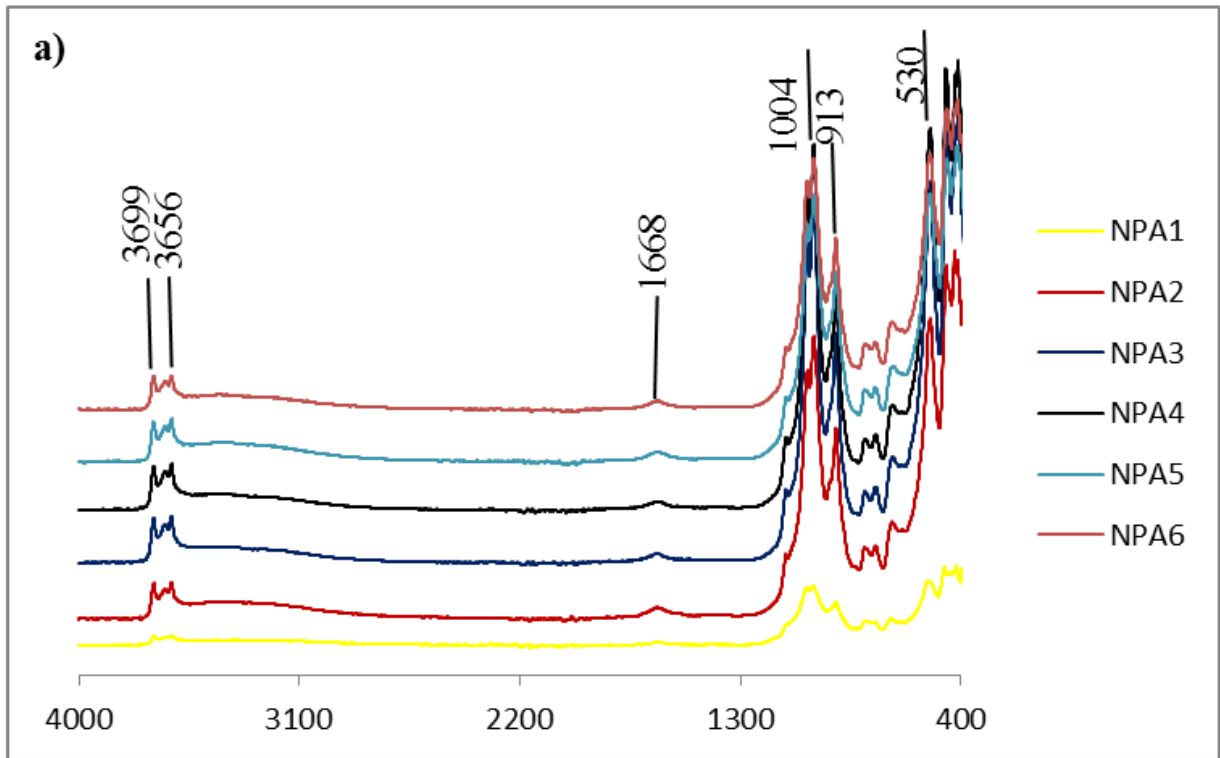
Figure 30: Diffractogrammes des rayons X des matériaux argileux de Ngat-Plantation.

### II.3.3. Comportement thermique des argiles de Ngat-Plantation

Au cours de l'analyse thermogravimétrique (ATG), un certain nombre de transformations susceptibles d'affecter, pendant le traitement thermique, les minéraux détectés par diffractométrie des rayons X s'accompagnent des départs de H<sub>2</sub>O, de CO<sub>2</sub> et de la matière organique (Pialy, 2009).

Les analyses thermiques des échantillons de Ngat-Plantation montrent quatre phases endothermiques de perte de masse et une phase exothermique. Ces différentes phases sont observées sur la figure 32:

- la première phase de perte de masse se produit vers 48°C (NPA4) et 58°C (NPA3);
- la deuxième phase se retrouve vers 127°C et n'existe que sur l'échantillon NPA1;



— NPA1 — NPA2 — NPA3 — NPA4 — NPA5 — NPA6

Figure 31 : Spectre des infra rouges des matériaux de Ngat-plantation; a) bandes d'absorption entre 400 et 4000  $\text{cm}^{-1}$ , b) bandes d'absorption entre 400 et 1200  $\text{cm}^{-1}$ .

- la troisième phase se produit entre 480°C (NPA3) et 489°C (NPA2);
- la quatrième phase se retrouve à 573°C pour tous les matériaux.

La seule phase exothermique se produit vers 313°C (NPA1) et 322°C (NPA2).

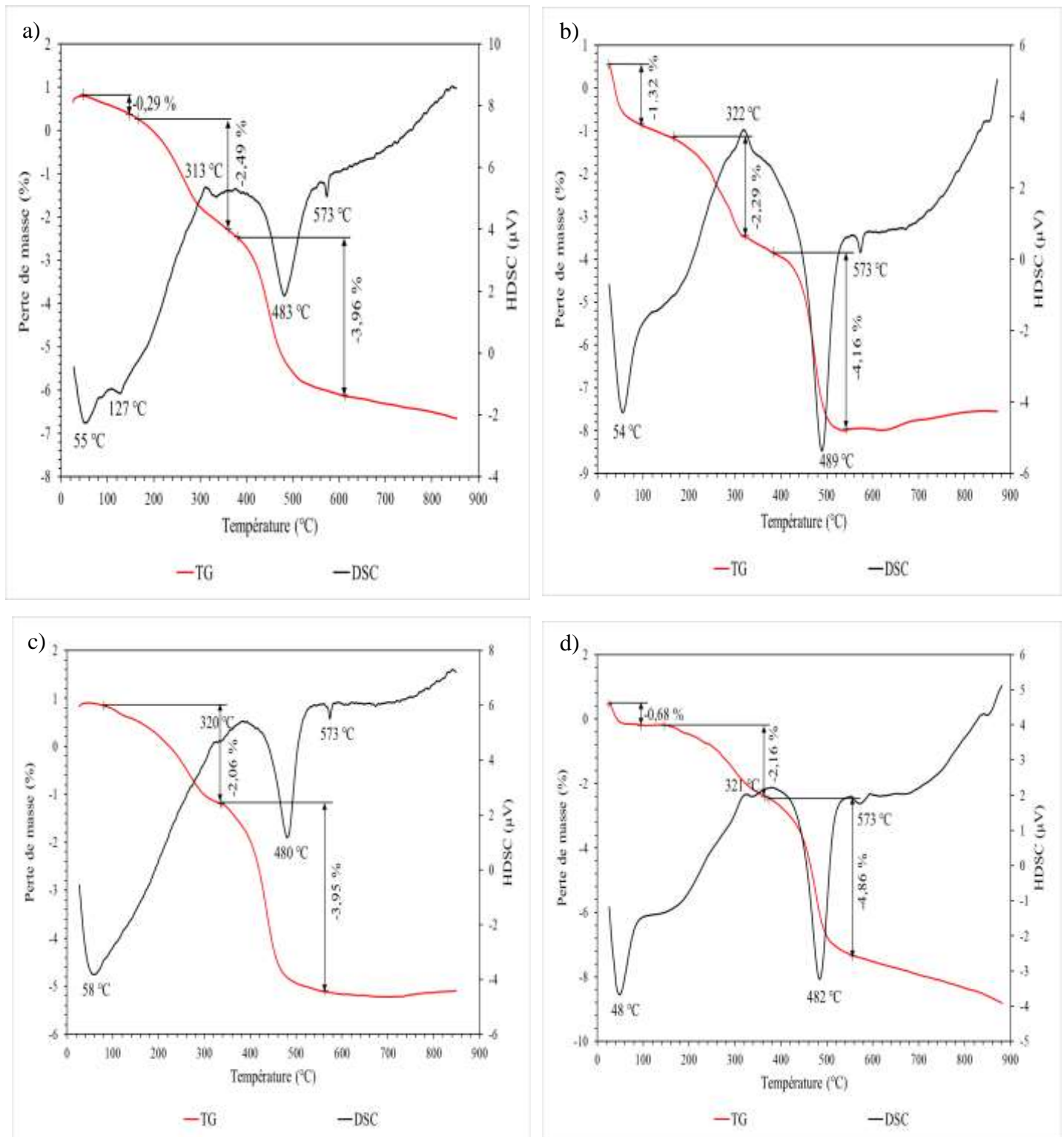


Figure 32: Courbes ATD/ATG des matériaux de Ngat-Plantation: a): NPA1; b): NPA2; c): NPA3; d): NPA4

## II.4. GEOCHIMIE DES MATERIAUX ARGILEUX DE NGAT-PLANTATION

### II.4.1. Distribution des éléments majeurs

Cette analyse est faite sur quatre matériaux prélevés sur ce site. Les teneurs en éléments majeurs sont présentées dans le [tableau 18](#). On note que tous ces 4 matériaux sont constitués par ordre d'importance, de la silice dont le pourcentage varie de 62,34 à 64,27 %, de l'aluminium avec pour concentrations comprises entre 15,64 et 19,13 % et du fer avec pour valeurs titrant entre 5,20 et 6,26 %. La somme des alcalins et alcalino-terreux ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}$ ) demeure très faible dans tous les matériaux. Elles sont comprises entre 0,42 et 1,67 %.  $\text{NiO}_2$  est quasi nulle ou en trace ( $< 1\%$ ) dans toutes les argiles, et ses valeurs sont presque les mêmes. Il en est de même du phosphore ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), de l'oxyde de manganèse ( $\text{MnO}$ ) et du Chrome ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). On note aussi dans tous les matériaux l'absence ou la présence en trace de l'oxyde de sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ ). Le rapport massique  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  est compris entre 3,26 et 4,11%, il indique que ces matériaux contiennent plus de constituants riches en  $\text{SiO}_2$  qu'en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Les teneurs en sesquioxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) sont relativement faibles et se concentrent entre 5,20 et 6,26 %. Les teneurs en rutile ou titane ( $\text{TiO}_2$ ) sont relativement modestes (1,29 à 1,56 %). Les valeurs de la perte au feu sont presque égales et faibles c'est à dire inférieures à 15 %. Elles sont comprises entre 10,19 et 10,78 %.

Les valeurs de l'indice d'altération chimique de ces matériaux latéritiques restent élevées et sont comprises entre 92,05 % et 97,50 %. Par contre les valeurs de l'indice de variabilité chimique sont faibles. Toutes ses valeurs sont inférieures à 1. Elles sont comprises entre 0,40 et 0,59 ([Tableau 18](#)).

L'histogramme de distribution des teneurs en éléments majeurs dans les matériaux de Ngat-Plantation est représenté à [la figure 33](#). Ces histogrammes sont tous superposables. Cependant, elles confirment que les teneurs en  $\text{SiO}_2$  sont plus élevées dans ces matériaux.

Les valeurs de l'indice d'altération chimique des matériaux de Ngat-Plantation restent élevées et comprises entre 92,05 et 97,50 %. Par contre, les valeurs de l'indice de variabilité chimique sont faibles. Toutes ses valeurs sont comprises entre 0,40 et 0,59 ([tableau 18](#)).

Tableau 18: Teneurs en éléments majeurs (en %) des matériaux de Ngat-Plantation.

	Id	NPA1	NPA2	NPA3	NPA4	Moy.(n=4)
SiO <sub>2</sub>	0,04	64,27	62,81	64,08	62,34	63,38
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	15,64	17,29	17,48	19,13	17,39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	6,26	5,99	5,2	5,46	5,73
MgO	0,01	0,45	0,3	0,24	0,22	0,30
MnO	0,002	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
K <sub>2</sub> O	0,01	1,17	0,59	0,39	0,39	0,64
CaO	0,006	0,01	0,03	0,03	0,01	0,02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,002	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
TiO <sub>2</sub>	0,01	1,29	1,41	1,45	1,56	1,43
Na <sub>2</sub> O	0,02	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
NiO	-	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
PF	-	10,52	10,78	10,19	10,26	10,44
Total	-	99,77	99,34	99,23	99,53	99,47
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	4,11	3,63	3,67	3,26	3,67
Alc. + alc ter.	-	1,67	0,62	0,42	0,42	0,78
CIA	-	92,05	95,91	97,11	97,5	95,64
ICV	-	0,59	0,48	0,42	0,4	0,47

PF: Perte au Feu; CIA: Indice d'Altération Chimique; ICV: Indice de Variabilité Chimique

ICV =  $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3$  (d'après Cox et al., 1995);

CIA =  $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \times 100$  (d'après Nesbitt et Young, 1984).

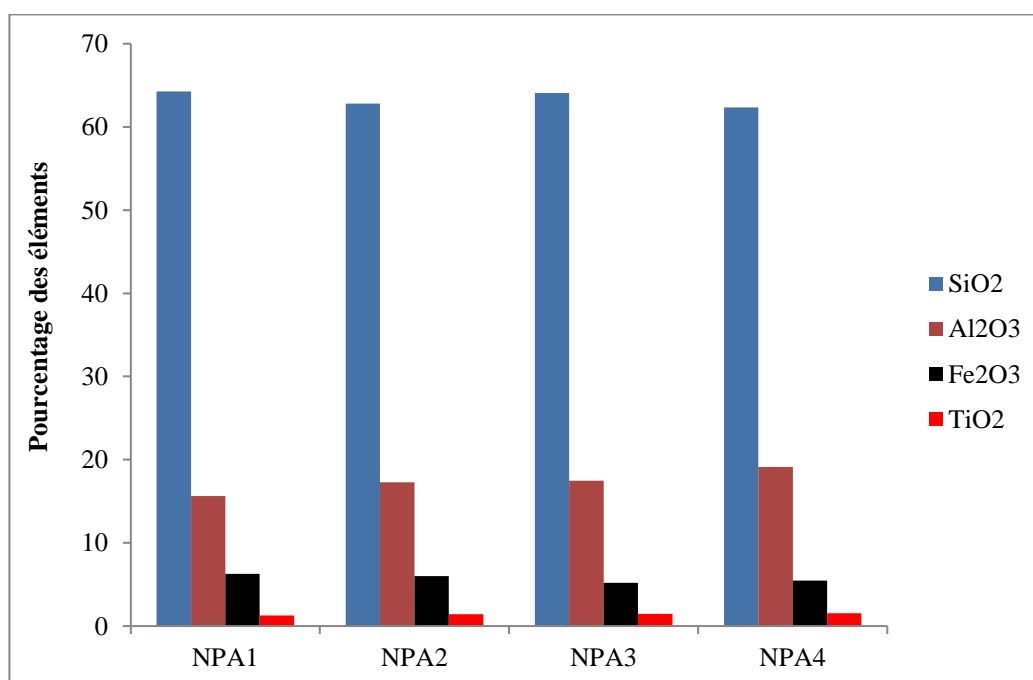


Figure 33: Composition en éléments majeurs (%) des matériaux argileux de Ngat-Plantation.

Les diagrammes binaires établis entre les éléments majeurs (figure 34) des deux sites de prélèvement de Ngat-Bane montrent qu'il existe une corrélation négative entre  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{MgO}$ ;  $\text{K}_2\text{O}$ ;  $\text{CaO}$  et  $\text{TiO}_2$  (fig 34 a-f). Les corrélations négatives du  $\text{SiO}_2$  avec ces éléments sont dues à la forte proportion de quartz. La corrélation négative entre  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{SiO}_2$ , en particulier, met en exergue la prédominance du quartz dans les matériaux (Zaid et Gahtani, 2015). Ces corrélations négatives montrent que l'accumulation de la silice n'est pas concomitante à celle des autres éléments chimiques. Elles ressortent également la prédominance du quartz dans ces matériaux de Ngat.

#### II.4.2. Distribution des éléments traces

Les concentrations en éléments traces dans les différents matériaux de Ngat-Plantation sont consignées dans le tableau 19.

Dans les éléments ferromagnétiques, le Vanadium a des valeurs les plus élevées. Elles vont 108 à 128,8 ppm. Les éléments tels que le zinc (60,99 à 78,32 ppm) et le chrome (72 à 80 ppm) sont des ferromagnésiens à teneurs modérées. Le cobalt (17,70 à 23,03 ppm), le nickel (26,27 à 41,54 ppm), le strontium (17,90 à 21,20 ppm), le niobium (34,07 à 50,06 ppm) ont des teneurs faibles

Le zircon est le HFSE ayant des proportions les plus élevées. Elles oscillent de 247 à 309 ppm. Cet élément est suivi du niobium (23,81 à 33,50 ppm). Les autres éléments (Th, U, Mo, Hf, et Ta) ont des proportions faibles.

Les éléments à grand rayons ionique (Ba, Rb, Li, Sr, Pb et Cs), sont représentés par le Baryum qui a des teneurs élevées dans les deux premiers matériaux (104,4 et 186) et modérées dans les deux derniers (73,40 et 75,80 ppm). Les teneurs modérées sont observées pour le Rubidium. Elles se concentrent entre 51,88 et 78,82 ppm. Li, Sr, Pb, Cs, ont des teneurs faibles dans tous les matériaux.

Les autres éléments traces comme l'uranium; le béryllium; le césium; le molybdène peuvent être considérés comme éléments à très faibles teneurs car leur concentration étant inférieure à 1 ppm. Le gallium (22,6 à 27,05 ppm), qui a une teneur égale à 104,79 ppm, l'yttrium (22,79 à 22,98 ppm), le thorium (13,47 à 15,17 ppm).

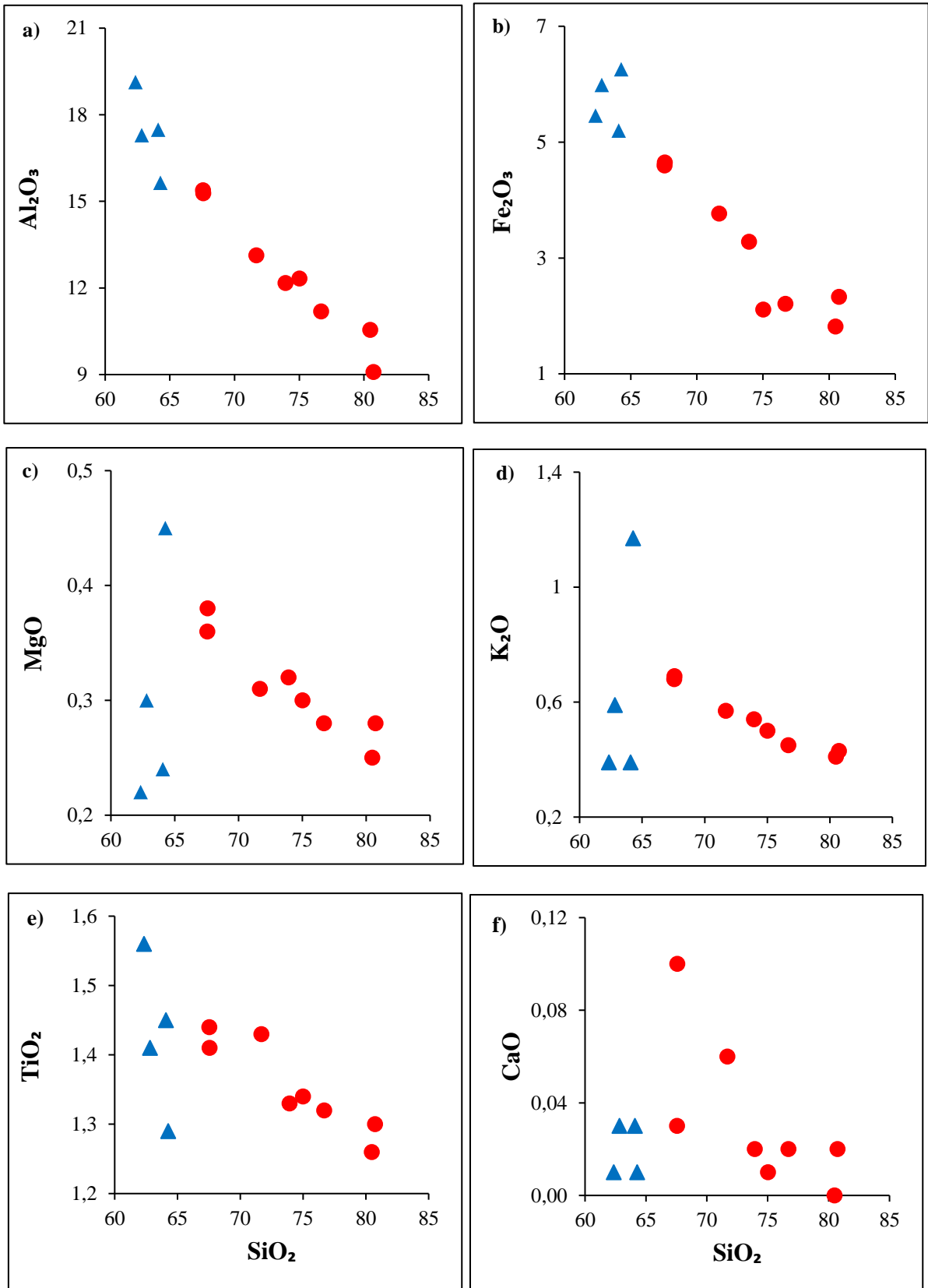


Figure 34: Diagrammes de Harker de certains éléments majeurs.  
● Ngat-Cariere ▲ Ngat-Plantation

Le rapport U/Th a des valeurs comprises entre 0,19 et 0,23 ppm. Il y a donc prédominance de teneurs en Thorium sur les teneurs en Uranium. Le Vanadium par contre domine sur le Chrome. Cette dominance est traduite par le ratio  $1 < V/Cr < 2$  dans tous les échantillons. Il en est de même pour le Nickel et le Cobalt dont le ratio Ni/Co est compris entre 1,14 et 2,04.

Tableau 19: Teneurs en éléments traces (en ppm) des matériaux de Ngat-Plantation.

	ld	NPA1	NPA2	NPA3	NPA4	Moy=4
Co	0,09	4,80	4,76	5,00	4,83	4,85
Cr	2,9	80,00	76,00	72,00	76,00	76,00
Cu	0,4	22,40	22,90	24,90	24,50	23,68
Ni	0,6	27,50	31,90	35,20	35,10	32,43
Zn	2	56,60	58,80	61,70	55,60	58,18
Sc	0,17	12,60	11,90	13,20	12,00	12,43
V	0,4	128,80	120,60	110,10	108,00	116,88
Ba	1,3	186,00	104,40	73,40	75,80	109,90
Sr	1,3	16,60	20,30	19,10	22,10	19,53
Li	0,24	13,10	12,80	11,30	10,00	11,80
Pb	0,29	17,02	15,32	16,49	15,55	16,10
Rb	0,15	78,82	69,45	51,88	53,13	63,32
Cs	0,006	5,68	6,25	6,03	6,08	6,01
Zr	4	247,00	259,00	270,00	309,00	271,25
Nb	0,05	23,81	30,21	31,89	33,50	29,85
Ga	0,04	22,87	25,70	25,70	25,86	25,03
U	0,01	2,74	2,45	2,61	2,53	2,58
Mo	0,08	2,02	2,07	2,07	2,00	2,04
W	0,023	2,08	2,00	2,05	2,08	2,05
Ta	0,015	1,75	2,01	2,18	2,28	2,06
Y	0,09	16,63	17,58	19,67	22,09	18,99
Hf	0,09	6,72	6,57	7,01	7,43	6,93
Be	0,024	1,01	0,77	0,63	0,60	0,75
Cd	0,018	0,04	0,05	0,05	0,03	0,04
Sb	0,025	0,86	0,67	0,62	0,52	0,67
In	0,0017	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08
Sn	0,17	3,53	3,84	3,93	4,01	3,83
Tl	0,004	0,62	0,48	0,47	0,44	0,50
Bi	0,05	0,42	0,38	0,39	0,40	0,40
Cs	0,006	5,68	6,25	6,03	6,08	6,01
Th	0,027	13,34	14,34	15,12	14,61	14,35
Th/U	-	4,86	5,85	5,80	5,77	5,57
Th/Co	-	2,78	3,01	3,02	3,02	2,96
Zr/Sc	-	19,60	21,76	20,45	25,75	21,89

Les diagrammes de Harker entre le SiO<sub>2</sub> et certains traces montrent que SiO<sub>2</sub> a une corrélation négative avec Zr, Th, Sr, Ga et Ba (figures 35 a-e), une corrélation positive avec Cr (figure 35 f) et avec les éléments Y et Li il forme les nuages de points (figures 35 g et h).

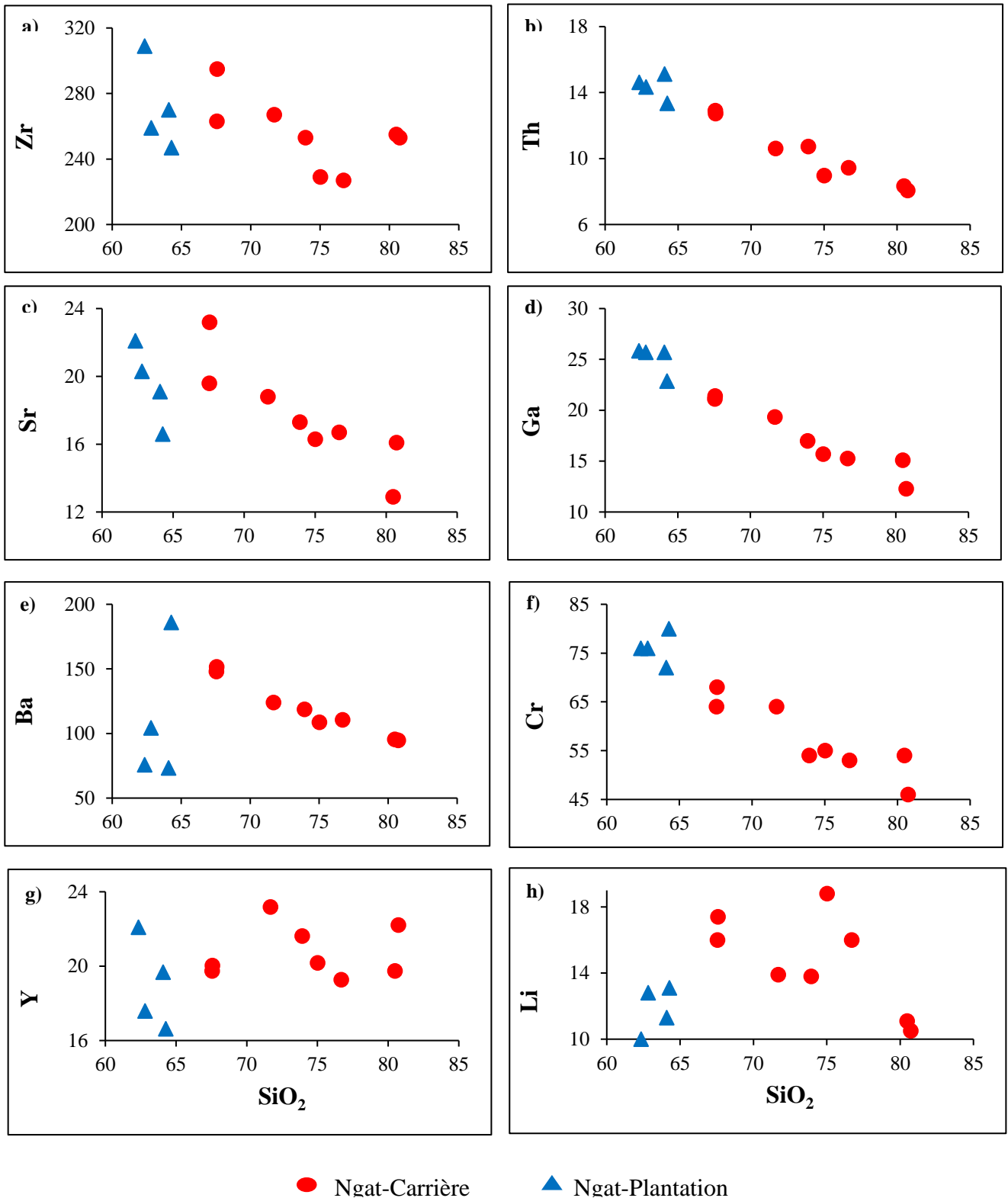


Figure 35: Diagrammes de Harker entre le SiO<sub>2</sub> et certains éléments traces.

Les rapports Th/U et Th/Co montrent que ces matériaux sont plus riches en thorium qu'en uranium et en cobalt. Le zirconium, l'élément le plus abondant des éléments traces, observe une corrélation positive avec Th, Nb, Hf, Y, Mo et U (figures 36 a-f).

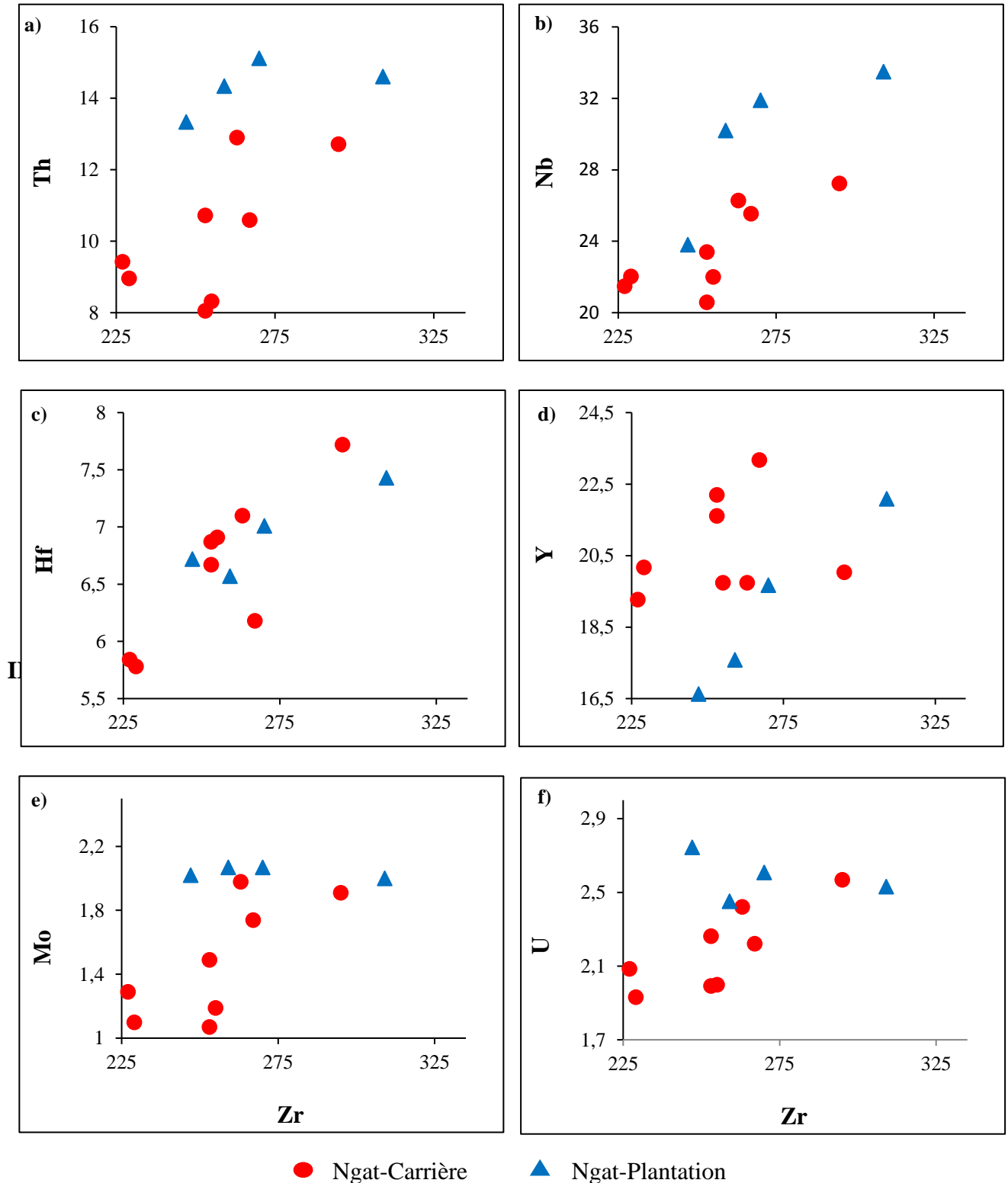


Figure 36: Diagrammes binaires entre le Zr et certains éléments traces.

### II.4.3. Distribution des éléments terres rares

Les matériaux de Ngat-Plantation sont caractérisés par de fortes teneurs en cérium, lanthane et néodyme. Les teneurs en cérium oscillent entre 18,22 et 32,32 ppm, celles en lanthane varient de 10,6 à 15,4 ppm et de 7,07 à 10,26 ppm celles en néodyme ([tableau 20](#)).

Ces terres rares les plus représentées sont secondées par le praséodyme (2,041-2,873), le dysprosium (2,613-2,948), l'erbium (2,021-2,422), l'ytterbium (2,019-2,424), le samarium (1,425-1,859) et le gadolinium (1,597-1,883). Les teneurs les plus faibles sont enregistrées pour l'euporium, l'holmium, le terbium, le thulium et le lutétium. Il ressort que pour tous ces échantillons, la somme des terres rares varie de 49,704 à 74,312 ppm. La somme des terres rares légères (39,697-63,132) est plus élevée que celle des terres rares lourdes (9,852-11,18). Ces valeurs présentent un enrichissement en LREE par rapport aux HREE (LREE/HREE varie de 3,967-5,647). Les rapports Ce/Ce\* et Eu/Eu\* varient respectivement entre 0,69 à 1,19 et 0,68 à 0,82 ([tableau 20](#)).

Les matériaux argileux de Ngat-Plantation sont normalisés par rapport aux valeurs de la Chondrite d'après [Pourmand et al. \(2012\)](#). Cette normalisation montre un léger fractionnement des terres rares. L'indice de fractionnement des terres rares  $(La/Yb)_N$  a des valeurs comprises entre 3,43 et 4,61 ([figure 37](#)). Les spectres laissent apparaître un enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes. Par contre tous ces matériaux ont des anomalies négatives en Eu ([tableau 20](#)).

### III. Analyse minéralogique sémi-quantitative

L'analyse minéralogique semi-quantitative des argiles de Ngat-Carrière montre que le quartz a le pourcentage plus élevé ([Tableau 21](#)). Ces valeurs sont comprises entre 58,5 à 75,38 %. La kaolinite a des pourcentages allant de 23 à 38,90 %. Le pourcentage de la goethite varie de 2,37 à 5,17 L'anatase est le minéral qui a le plus petit pourcentage. Toutes ces valeurs sont inférieures à 2 % et sont comprises 1,26 et 1,44 % ([figure 38](#)).

Dans les matériaux de Ngat-plantation, les diagrammes XRD ([figure 30](#)) montrent que les pics de diffraction de la gibbsite (4,84 Å et 1,68 Å) sont d'intensités relativement faibles et à partir de là, la gibbsite est supposée être présente en traces permettant à tout l'aluminium d'être associé à la teneur en kaolinite ([Tableau 21](#)).

Tableau 20: Composition chimique des éléments terres rares dans les matériaux de Ngat-Plantation.

Elts	Ld	NPA1	NPA2	NPA3	NPA4	Moy. (n=4)
La	0,09	10,60	13,30	15,40	14,50	13,45
Ce	0,17	18,22	22,04	32,32	23,27	23,96
Pr	0,019	2,04	2,35	2,87	2,52	2,45
Nd	0,11	7,07	8,12	10,26	8,29	8,44
Sm	0,05	1,43	1,54	1,86	1,48	1,58
Eu	0,008	0,34	0,35	0,42	0,35	0,37
Gd	0,04	1,67	1,65	1,88	1,59	1,70
Tb	0,009	0,34	0,33	0,38	0,35	0,35
Dy	0,04	2,63	2,61	2,95	2,81	2,75
Ho	0,006	0,61	0,62	0,71	0,73	0,67
Er	0,04	2,02	2,02	2,29	2,42	2,19
Yb	0,008	2,12	2,02	2,29	2,42	2,21
Tm	0,005	0,31	0,31	0,35	0,36	0,33
Lu	0,005	0,29	0,29	0,33	0,35	0,32
ΣREE	-	49,69	57,55	74,31	61,44	60,75
ΣLREE	-	39,70	47,70	63,13	50,41	50,24
ΣHREE	-	9,99	9,85	11,18	11,03	10,51
a	-	3,97	4,84	5,65	4,57	4,76
(La/Yb) <sub>N</sub>	-	3,43	4,52	4,61	4,11	4,18
Ce/Ce*	-	1,17	1,15	1,19	1,19	1,18
Eu/Eu*	-	0,67	0,65	0,68	0,68	0,67

a: ΣLREE/ΣHREE; Elts: éléments.

L.d. limites de détection

$$Ce/Ce^* = (Ce_{\text{échantillon}}/Ce_{\text{chondrite}}) / (La_{\text{échantillon}}/La_{\text{chondrite}})^{1/2} * (Pr_{\text{échantillon}}/Pr_{\text{chondrite}})^{1/2}$$

$$Eu/Eu^* = (Eu_{\text{échantillon}}/Eu_{\text{chondrite}}) / (Sm_{\text{échantillon}}/Sm_{\text{chondrite}})^{1/2} * (Gd_{\text{échantillon}}/Gd_{\text{chondrite}})^{1/2}$$

$$(La/Yb)_N = (La_{\text{échantillon}}/La_{\text{chondrite}}) / (Yb_{\text{échantillon}}/Yb_{\text{chondrite}}).$$

Pour les matériaux de Ngat-Plantation, le quartz à un pourcentage qui oscille entre 52,06 et 55,06 %. La kaolinite a ses valeurs comprises entre 39,56 et 44,21 %. Les valeurs de la goéthite oscillent de 5,79 à 6,96 %. Quant à l'anatase, ses valeurs vont de 1,29 % à 1,45 %.

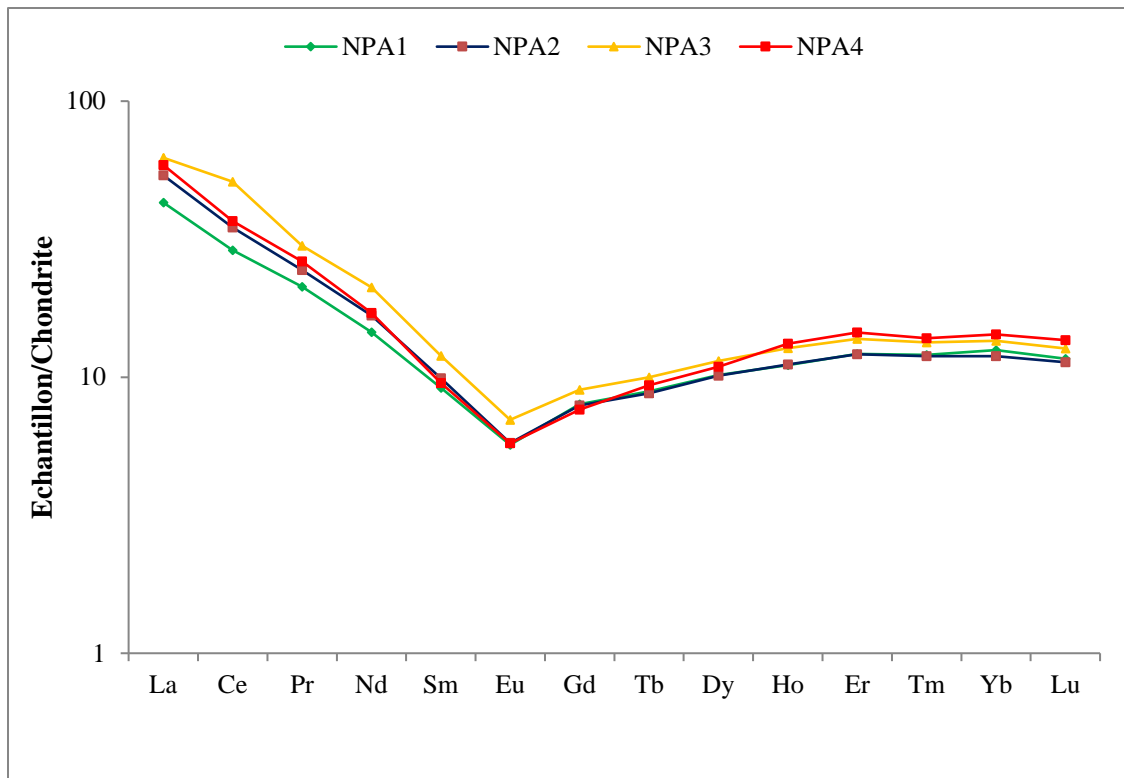


Figure 37: Spectres des terres rares normalisés par rapport à la chondrite (Pourmand et al., 2012).

Tableau 21: Composition minéralogique sémi-quantitative (%).

		Quartz	Kaolinite	Anatase	Goethite	Gibbsite	Total
	NGB1	62	32	1	4	0	100
	NGB2	56	37	1	5	0	100
	NGB3	66	30	1	2	0	100
	NGB4	56	37	1	5	0	100
	NGB5	69	28	1	2	0	100
	NGB6	72	22	1	5	0	100
	NGB7	65	30	1	4	0	100
	NGB8	71	26	1	2	0	100
	NPA1	54	38	1	7	tr	100
	NPA2	51	42	1	6	tr	100
	NPA3	51	42	1	6	tr	100

tr: trace

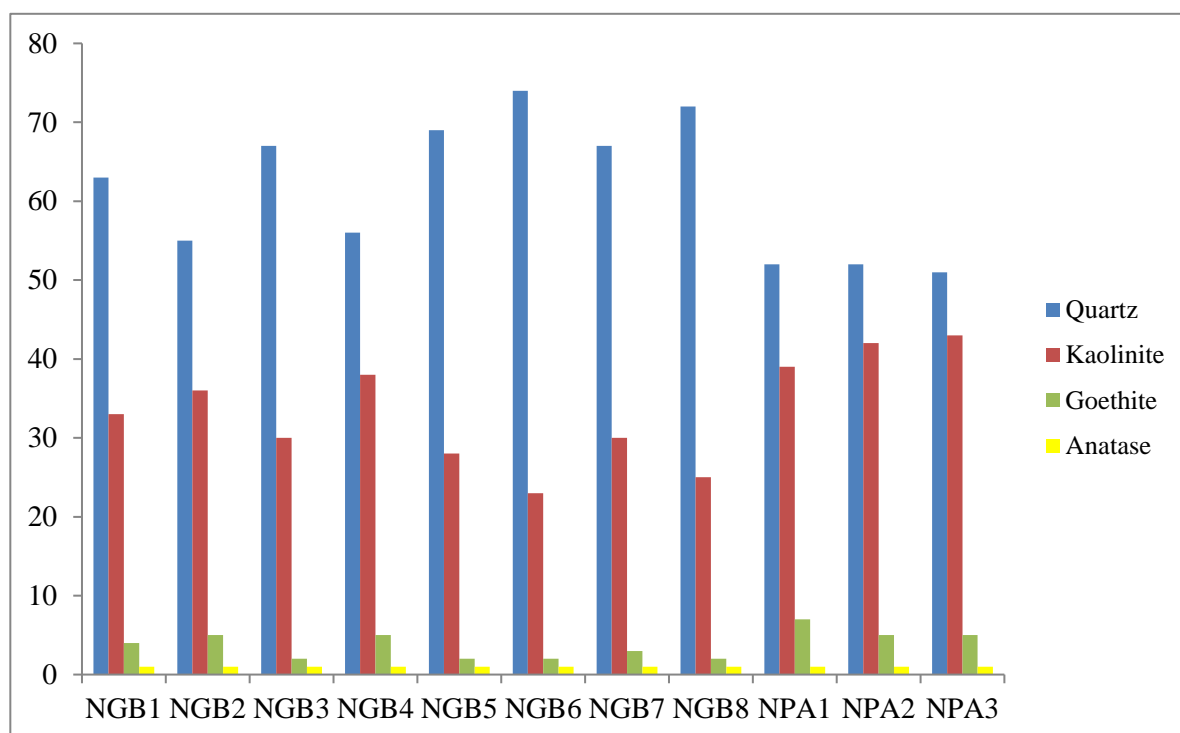


Figure 38: Histogrammes de variation de la composition sémi-quantitative des matériaux de Ngat.

## Conclusion

Les matériaux argileux de Ngat ont une épaisseur allant de 30 à 70 cm pour ceux de Ngat-Carrière et de 25 à 160 cm pour ceux de Ngat-Plantation. Ces échantillons sont plus riches en argile. Le  $pH_{\text{eau}}$  est compris entre 4,55 et 5,85 tandis que le  $pH_{\text{kcl}}$  varie de 3,6 à 4. Plotés dans l'abaque de plasticité de Casagrande, ces échantillons sont des limons minéraux à faible compressibilité, des argiles minérales de plasticité moyenne, des argiles organiques et des limons minéraux à haute compressibilité. L'indice de plasticité est compris entre 4,97 et 32,8 %. La composition minéralogique est dominée par le quartz et la kaolinite. Les résultats de la géochimie montrent une prédominance au niveau des majeurs de  $\text{SiO}_2$  suivie de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et du  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , les autres éléments ayant des valeurs faibles. Les valeurs du CIA sont élevées et celles de l'ICV faibles. Les éléments traces sont dominés par Zr; Ba et V. La normalisation par rapport à la chondrite présente des faibles anomalies négatives pour certains matériaux de Ngat-Carrière et positives en Ce, par contre les anomalies en Eu sont négatives dans tous les matériaux.

---

# CHAPITRE V. PROPRIETES CERAMIQUES DES MATERIAUX ARGILEUX DE NGAT

---

## Introduction

Le présent chapitre a pour objectif, d'une part, d'étudier les propriétés physico-mécaniques des briques produites à base des argiles et d'autre part, de formuler des spécimens de briques stabilisées à la cendre de bois d'Ilongba.

## I. PROPRIETES CERAMIQUES DES MATERIAUX DE NGAT-CARRIERE

La détermination des caractéristiques technologiques (coloration, porosité, retrait linéaire absorption d'eau, masse volumique...) a été réalisée à partir des éprouvettes expérimentales confectionnées avec des pâtes des matériaux argileux. Ces éprouvettes ont subi une cuisson à des paliers de températures de 800, 900, 1000 et 1100°C ([Figure 39](#)).

### I.1. Retrait linéaire

Les différentes valeurs de retrait linéaire des éprouvettes de matériaux argileux de Ngat-Carrière sont résumées dans [le tableau 22](#). On constate dans l'ensemble que ces valeurs augmentent avec l'élévation de la température de cuisson ([figure 39 a](#)). Pour ces éprouvettes, les valeurs du retrait linéaire sont nulles pour certains matériaux à la température 800°C, elles oscillent de 0 à 0,48 %. Aux températures 900 et 1000°C, ces valeurs vont de 0,12 à 0,72 %. A 1100°C, les valeurs du retrait linéaire se concentrent entre 0,35 et 3,14 %.

### I.2. Perte de masse

Les valeurs de la perte de masse sur les éprouvettes des différents matériaux sont consignées dans [le tableau 22](#). L'illustration faite par [la figure 39 b](#) indique que ces valeurs ont le même comportement que les valeurs du retrait linéaire. Les valeurs de la perte de masse se concentrent entre 4,68 et 7,29 % à 800°C. Entre 900 et 1100 °C, ces valeurs titrent entre 4,76 et 7,48 %. A 1100°C, elles vont de 5,55 à 12,66 %.

Tableau 22: RL et PM des éprouvettes de Ngat-Carrière.

T(°C)	RL (%)				PM (%)			
	800	900	1000	1100	800	900	1000	1100
NGB1	0,10	0,12	0,35	1,67	5,56	6,42	7,00	12,66
NGB2	0,24	0,24	0,42	3,14	6,77	7,01	7,40	7,86
NGB3	0,12	0,12	0,24	0,49	5,08	5,16	5,20	5,55
NGB4	0,48	0,72	1,43	2,99	7,29	7,47	7,48	8,78
NGB5	0,12	0,12	0,23	0,35	4,72	5,54	5,58	8,12
NGB6	0,10	0,20	0,24	0,35	4,68	4,76	4,77	4,98
NGB7	0,20	0,20	0,59	0,83	5,59	6,31	6,31	7,70
NGB8	0,00	0,12	0,24	0,36	4,85	5,03	5,56	6,99

RL: retrait linéaire; PM: perte de masse

### I.3. Absorption d'eau

Le pourcentage du taux d'absorption d'eau est une propriété très importante en céramique car il représente le mouvement capillaire de l'eau. Il permet d'avoir une idée sur le taux de grésification du tesson (Melo et al., 2003; Reeves et al., 2006). Les valeurs du taux d'absorption d'eau des briquettes expérimentales des échantillons de Ngat-Carrière sont résumées dans le tableau 23 et illustrées par la figure 39 c. On observe que, le taux d'absorption d'eau dans l'ensemble décroît avec l'élévation de la température de cuisson.

Pour ces éprouvettes, les valeurs du taux d'absorption d'eau sont modérées et comprises entre 18,56 et 25,64 % pour la température 800°C; 18,34 et 22,99 % à 900°C; 17,94 et 21,98 %. A 1000°C et à 1100°C, toutes ces valeurs sont inférieures à 20 % pour tous les matériaux et vont de 17,05 à 19,45.

### I.4. Porosité

En ce qui concerne la porosité des produits cuits, elle évolue avec la même tendance que les valeurs du taux d'absorption d'eau pour la majorité des éprouvettes. Les valeurs de la porosité sont regroupées dans le tableau 23 et les illustrations y afférentes sont présentées à la figure 39 d.

Les éprouvettes issues des matériaux de Ngat-Carrière ont des valeurs de porosité supérieures à 5 % pour toutes les températures de cuisson. Ces valeurs vont de 7,70 à 10,35 % à 800°C; 7,45 à 8,30 % à 900°C; 7,14 à 8,29 % à 1000°C et de 6,24 à 7,20 % à 1100°C.

Tableau 23: AE et PO des éprouvettes des matériaux de Ngat-Carrière.

T(°C)	AE (%)				PO (%)			
	800	900	1000	1100	800	900	1000	1100
NGB1	21,81	21,46	21,17	17,70	8,48	8,29	8,28	6,97
NGB2	23,04	22,99	21,98	19,45	8,00	7,71	7,25	7,20
NGB3	18,98	18,43	17,95	17,54	7,70	7,45	7,20	7,08
NGB4	23,42	22,61	18,05	17,05	8,62	8,26	6,62	6,24
NGB5	25,64	19,28	17,94	17,17	10,35	8,16	7,14	6,83
NGB6	18,82	18,48	18,19	17,68	7,87	7,33	7,16	7,14
NGB7	21,81	21,10	21,04	17,36	8,69	8,30	8,29	6,44
NGB8	18,56	18,34	18,26	17,71	7,98	7,52	7,37	7,12

AE: absorption d'eau; PO: porosité

### I.5. Résistance à la flexion

Les résultats de la résistance à la flexion sont regroupés dans le tableau 24 et illustrés par la figure 39 e. Dans l'ensemble, la résistance à flexion (Mpa) des différentes formulations céramiques obtenues sur les échantillons de Ngat-Carrière augmentent avec l'évolution de la température de cuisson. Pour ces briquettes, la résistance à la flexion est faible à modérée à toutes les températures de cuisson et montre des valeurs comprises entre 1,25 et 3,75 MPa à 800°C, 2,20 à 5,05 MPa à 900°C, 2,25 à 7,85 MPa à 1000°C. A 1100°C, ces valeurs vont de 3,10 à 9,55 MPa.

### I.6. Densité apparente

En fonction de la température, les valeurs de la densité apparente (g/m<sup>3</sup>) sont stables pour certaines éprouvettes, Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 24 et illustrés par la figure 39 f.

Les valeurs de la densité apparente des éprouvettes de Ngat-Carrière sont toutes inférieures à 2 g/ m<sup>3</sup> et comprises entre 1,23 à 1,31 g/ m<sup>3</sup> à 800°C; 1,25 à 1,36 g/ m<sup>3</sup> à 900 et 1000°C et enfin entre 1,36 et 1,41 g/ m<sup>3</sup> à 1100°C.

### I.7. Coloration des produits cuits

La couleur est un des paramètres dont la variation est directement perceptible à la cuisson. Globalement, les éprouvettes de Ngat-Carrière à l'état cru ont une couleur marron pour tous les matériaux avec quelques variétés comme le jaune marron, et le gris marron (tableau 25). Après cuisson, cette couleur tend vers le rouge jaunâtre (5YR6/6 ; 5YR7/6 ;

5YR7/8; 5YR6/8) pour certaines éprouvettes et à toutes les températures et vers le jaune rouge (5YR5/8; 5YR4/8) pour d'autres. Seules les éprouvettes des matériaux NGB2 et NGB4 deviennent rouge (10YR5/8) à la température de cuisson 1100°C (figure 40).

Tableau 24: RF et DA des éprouvettes en fonction de la température de cuisson.

T(°C)	RF (MPa)				DA (g/m <sup>3</sup> )			
	800	900	1000	1100	800	900	1000	1100
NGB1	3,65	4,95	5,05	5,25	1,28	1,28	1,29	1,39
NGB2	3,75	5,00	7,85	9,55	1,27	1,28	1,31	1,40
NGB3	2,80	3,50	3,50	5,50	1,31	1,36	1,36	1,41
NGB4	3,40	4,15	5,25	7,80	1,23	1,25	1,25	1,38
NGB5	1,25	2,20	2,25	3,10	1,25	1,31	1,34	1,36
NGB6	2,45	2,55	2,55	3,40	1,30	1,32	1,32	1,39
NGB7	2,60	3,55	3,75	5,45	1,31	1,32	1,32	1,36
NGB8	1,80	3,45	4,15	4,45	1,27	1,33	1,35	1,39

RF: résistance à la flexion; DA: densité apparente

### I.8. Sonorité et cohésion

La sonorité traduit généralement la maturité de cuisson des céramiques. Le tableau 25 présente les états de cohésion et la qualité sonore des éprouvettes obtenues après cuisson. Les éprouvettes cuites des argiles de Ngat-Carrière ont toute une sonorité légèrement métallique et leur cohésion est faible pour toutes les éprouvettes à 800°C et moyenne à toutes les autres températures.

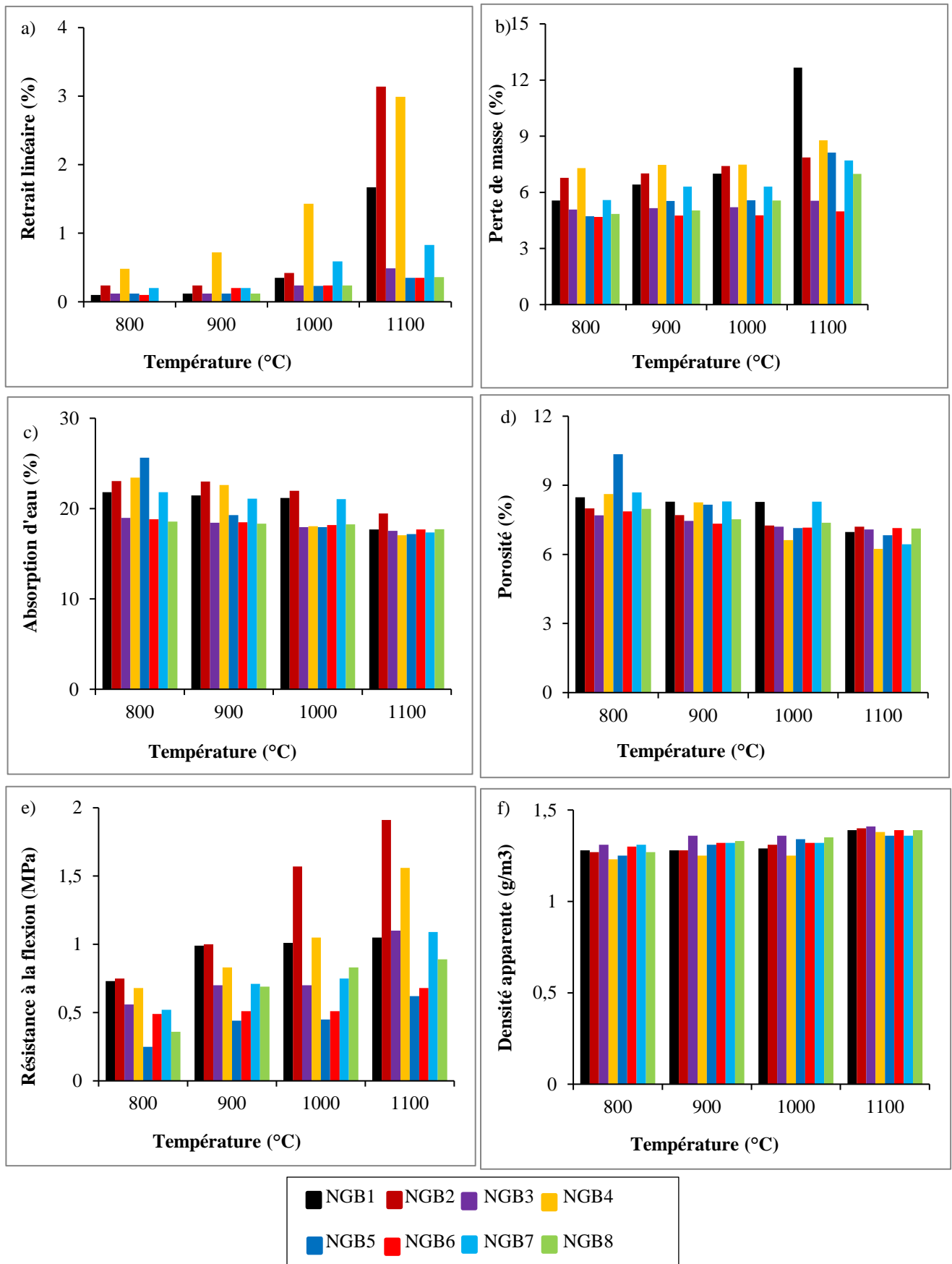


Figure 39: Histogrammes de variation des propriétés céramiques des éprouvettes de Ngat-Carrière.

Tableau 25: Couleur, cohésion et son des éprouvettes des matériaux de Ngat-Carrière.

Ech	Paramètres	800°C	900°C	1000°C	1100°C
NGB1	Couleur	5YR6/6 Rouge jaune	5YR6/6 Rouge jaune	5YR7/6 Rouge jaune	5YR5/8 Jaune rouge
	Son	L. M	L. M	L. M	L. M
	Cohésion	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne
NGB2	Couleur	5YR5/8 Jaune rouge	5YR7/8 Rouge jaune	5YR7/8 Rouge jaune	10YR5/8 Rouge
	Son	L. M	L. M	L. M	L. M
	Cohésion	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne
NGB3	Couleur	5YR6/6 Rouge jaune	5YR6/6 Rouge jaune	5YR6/6 Rouge jaune	5YR6/6 Rouge jaune
	Son	L. M	L. M	L. M	L. M
	Cohésion	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
NGB4	Couleur	5YR5/8 Jaune rouge	5YR4/8 Jaune rouge	5YR4/8 Jaune rouge	10YR5/8 Rouge
	Son	L. M	L. M	L. M	L. M
	Cohésion	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
NGB5	Couleur	5YR6/6 Rouge jaune	5YR6/6 Rouge jaune	5YR6/6 Rouge jaune	5YR6/6 Rouge jaune
	Son	L. M	L. M	L. M	L. M
	Cohésion	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
NGB6	Couleur	5YR6/8 Rouge jaune	5YR6/6 Rouge jaune	5YR6/6 Rouge jaune	5YR6/8 Rouge jaune
	Son	L. M	L. M	L. M	L. M
	Cohésion	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne
NGB7	Couleur	5YR6/8 Rouge jaune	5YR6/8 Rouge jaune	5YR6/8 Rouge jaune	5YR7/8 Rouge jaune
	Son	L. M	L. M	L. M	L. M
	Cohésion	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne
NGB8	Couleur	5YR6/6 Rouge jaune	5YR6/6 Rouge jaune	5YR6/6 Rouge jaune	5YR6/6 Rouge jaune
	Son	L. M	L. M	L. M	L. M
	Cohésion	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne

L. M: légèrement métallique, Ech: échantillons

## II. EPROUVETTES DES MATERIAUX ARGILEUX DE NGAT-PLANTATION

Sept paramètres ont été déterminés à savoir: le retrait linéaire, la perte de masse, l'absorption d'eau, la résistance à la flexion (Figure 41), la couleur, le son et la cohésion.



Figure 40: Photographies des éprouvettes des matériaux de Ngat-Carrière.

## II.1. Retrait linéaire

Les valeurs du retrait linéaires des éprouvettes issues des argiles de Ngat-Plantation sont toutes supérieures à celles de Ngat-Carrière. Elles sont consignées dans le [tableau 26](#) et illustrées par [la figure 41 a](#).

Le retrait linéaire a des valeurs qui vont de 1,19 à 2,80 % à 800°C; 1,40 à 3,34 % à 900°C; 2,10 à 4,05 % à 1000°C. Ces valeurs sont toutes supérieures à 5 % à la température 1100°C et titrent entre 6,70 et 7,30 %.

## II.2. Perte de masse

Les grandeurs de la perte de masse des éprouvettes de Ngat-Plantation sont reportées dans le [tableau 26](#) et représentées dans [la figure 41 b](#).

Pour la température 800°C, ces grandeurs vont de 6,97 à 7,29 %, elles oscillent de 7,50 à 8 % à 900°C. A 1000 et 1100°C, les valeurs de la perte de masse évoluent respectivement de 7,70 à 8,40 et de 8,30 à 9,10 %.

*Tableau 26: RL et PM des éprouvettes des matériaux de Ngat-Plantation.*

T(°C)	RL (%)				PM (%)			
	800	900	1000	1100	800	900	1000	1100
NPA1	1,19	1,40	2,10	7,30	6,97	7,50	7,70	8,30
NPA2	2,05	2,20	2,50	7,10	7,01	7,80	8,20	8,80
NPA3	2,12	2,50	2,70	6,70	7,08	7,90	8,40	8,90
NPA4	2,80	3,34	4,05	7,30	7,29	8,00	8,40	9,10

RL: retrait linéaire; PM: perte de masse

## II.3. Absorption d'eau

Les valeurs du taux d'absorption d'eau des éprouvettes des échantillons de Ngat-Plantation sont groupées dans le [tableau 27](#) et illustrées par [la figure 41 c](#). Ces valeurs diminuent avec l'augmentation de la température. Elles oscillent entre 20,45 et 22,23 % à 800°C; 20,70 à 21,9 % à 900°C; 20,10 à 21,40 % à 1000°C et de 11 à 11,90 % à 1100°C.

## II.4. Résistance à la flexion

Les valeurs de la résistance à la flexion des éprouvettes des matériaux argileux de Ngat-Plantation sont toutes supérieures à 5 MPa. Elles sont comprises entre 7,20 et 7,57 MPa à 800°C et de 7,61 et 8,08 MPa 900°C ([tableau 27](#)). Pour les températures allant entre 1000 et

1100°C, les grandeurs de la résistance à la flexion sont observées entre 8,13 et 10,33 MPa ( $T^{\circ} = 1000^{\circ}\text{C}$ ) et entre 8,79 et 12,17 MPa pour la dernière température de cuisson ([figure 41 d](#)).

Tableau 27: AE et RF des éprouvettes des échantillons de Ngat Plantation

T(°C)	AE (%)				RF (MPa)			
	800	900	1000	1100	800	900	1000	1100
NPA1	21,87	21,10	20,10	11,90	7,57	8,08	10,33	12,17
NPA2	21,55	20,70	20,50	11,00	7,44	7,96	9,18	9,25
NPA3	20,45	20,70	20,30	11,80	7,20	7,61	8,13	8,79
NPA4	22,23	21,90	21,40	11,60	7,48	7,95	8,20	8,91

AE: absorption d'eau; RF: résistance à la flexion

## II.5. Couleur

La couleur des éprouvettes de ce site varie très peu en fonction de la température de cuisson. Elle passe du rouge jaunâtre (10YR6/6) pour toutes les éprouvettes aux premières températures de cuisson (800 et 900°C) au rouge brun (5YR5/3) à la température 1100°C pour toutes les éprouvettes ([tableau 28](#)).

## II.6. Son et Cohésion

Le son de ces éprouvettes est légèrement métallique pour tous les matériaux avec une cohésion moyenne à toutes les températures ([tableau 28](#)).

## III. MINÉRALOGIE DES EPROUVETTES APRES CUISSON

L'identification des phases minéralogiques par DRX après cuisson des matériaux argileux de Ngat s'est faite sur des poudres provenant de quatre briquettes expérimentales donc deux échantillons du site Ngat-carrière (NGB2 et NGB4) et deux de Ngat-plantation (NPA2 et NPA3) cuites à 900, 1000 et 1100°C.

Les diffractogrammes des différentes phases minéralogiques sont évoquées par [la figure 42](#). Dans l'ensemble et suivant les températures de cuisson utilisées, on observe la présence dominante du quartz. Les phases identifiées sont: le quartz; l'anatase; l'hématite (à partir de 800°C); et la mullite (à 1100°C). Le quartz et l'anatase représentent les reliques de l'argile de départ. Les éprouvettes issues des matériaux argileux de Ngat-Carrière ([figure 42 a-b](#)) ont des pics moins prononcés des phases néoformées par rapport à celles de Ngat-Plantation ([figure 42 c-d](#)).

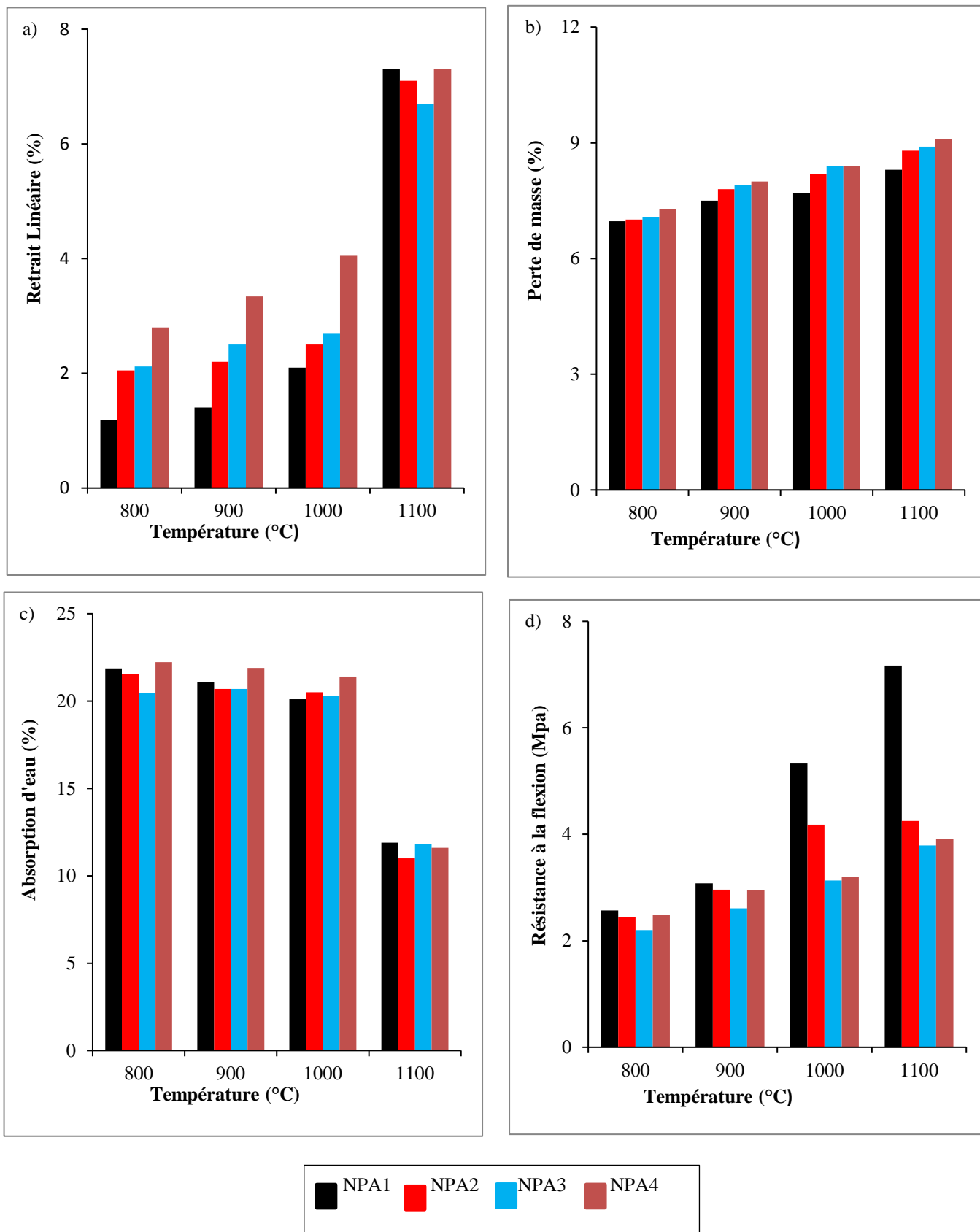


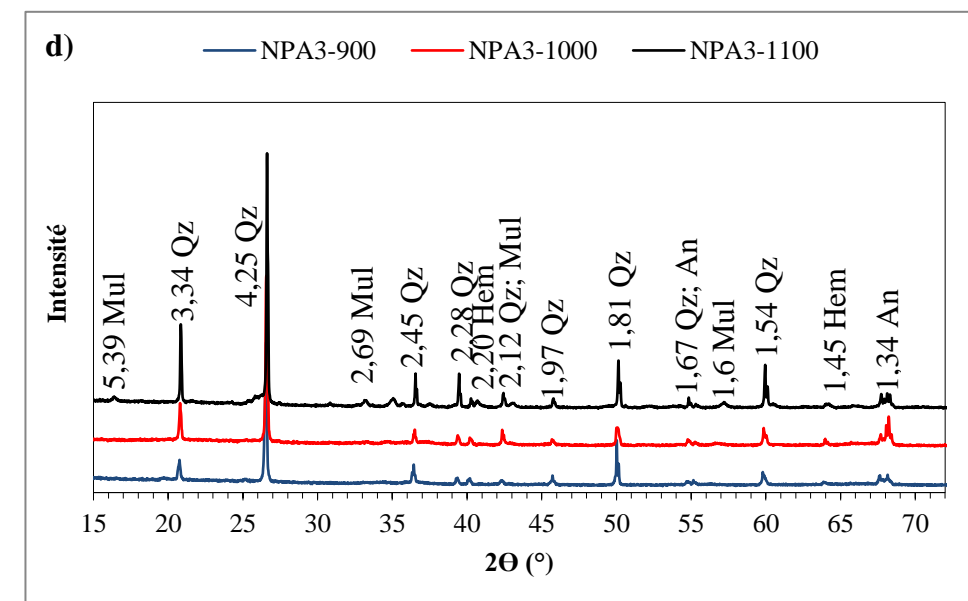
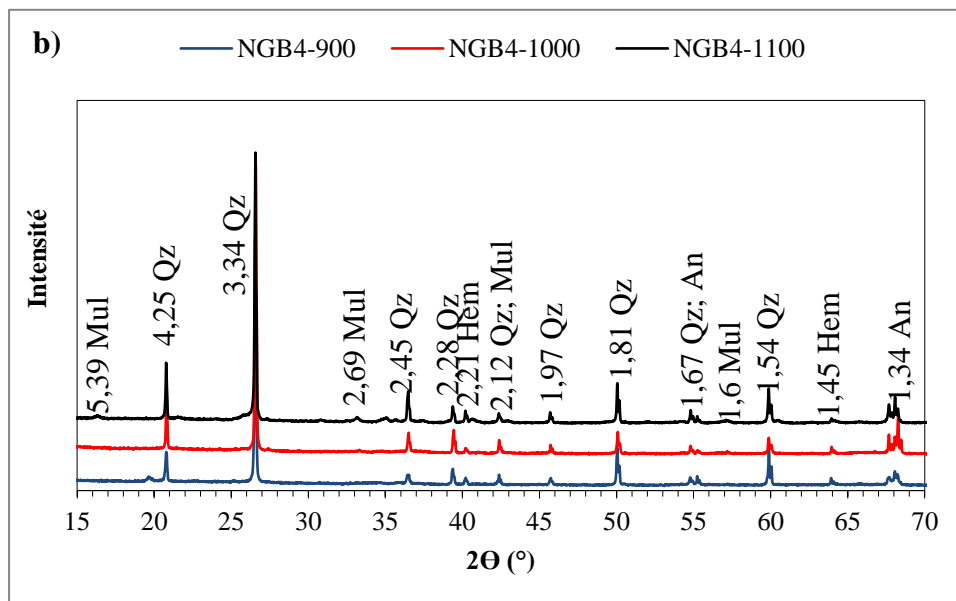
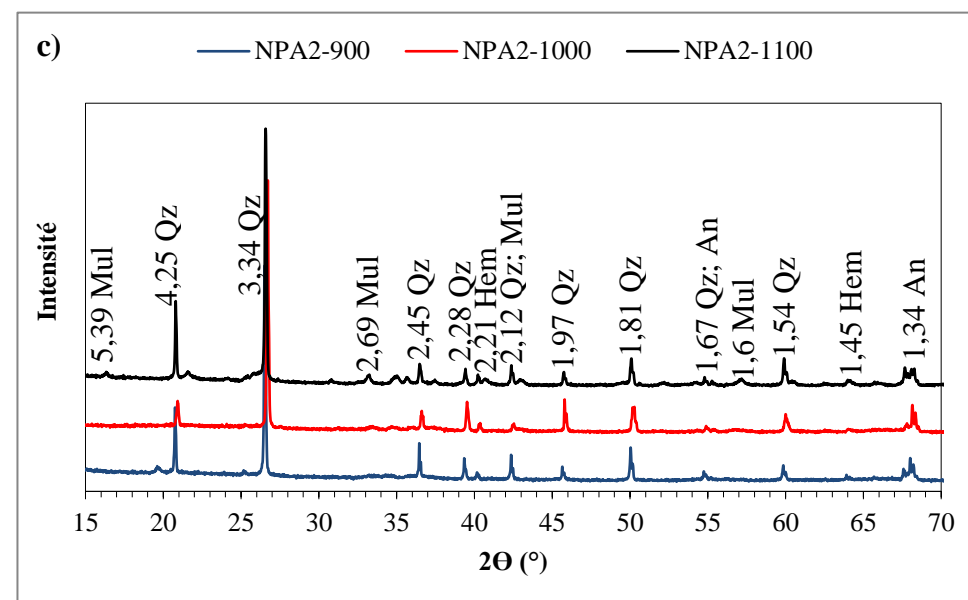
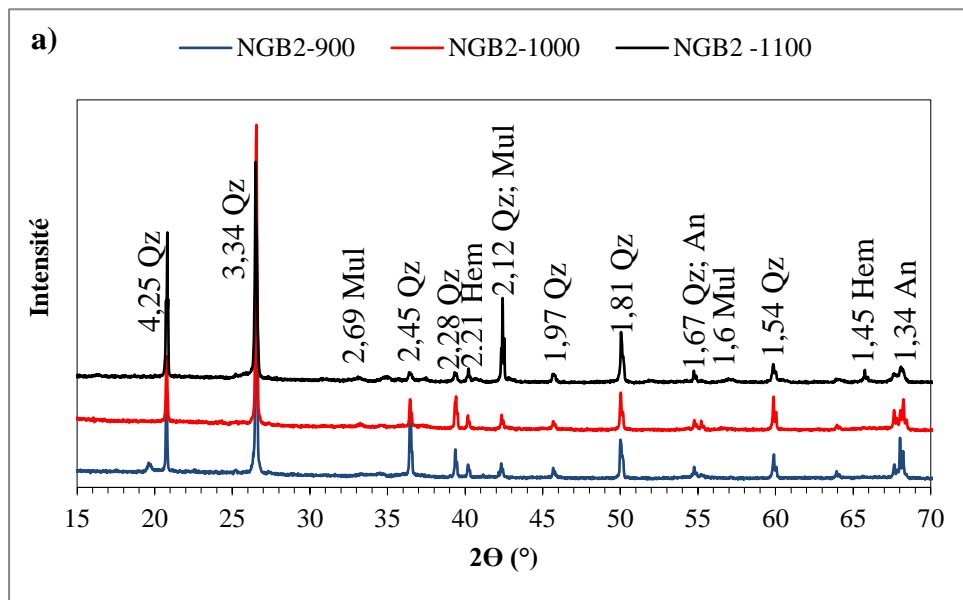
Figure 41: Histogrammes de variation des propriétés céramiques des éprouvettes de Ngat-Plantation.

Tableau 28: Couleur, son et cohésion des éprouvettes de Ngat-plantation

ECH	Paramètres	800°C	900°C	1000°C	1100°C
NPA1	Couleur	10YR6/6 rouge jaunâtre	10YR6/6 rouge jaunâtre	10YR6/6 rouge	5YR5/3 Brun rouge
	Son	L. M	L. M	L. M	L. M
	Cohésion	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
NPA2	Couleur	10YR6/6 rouge jaunâtre	10YR6/6 rouge jaunâtre	10YR6/6 rouge	5YR5/3 Brun rouge
	Son	L. M	L. M	L. M	L. M
	Cohésion	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
NPA3	Couleur	10YR6/6 rouge jaunâtre	10YR6/6 rouge jaunâtre	10YR6/6 rouge	5YR5/3 Brun rouge
	Son	L. M	L. M	L. M	L. M
	Cohésion	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
NPA4	Couleur	10YR6/6 rouge jaunâtre	10YR6/6 rouge jaunâtre	10YR6/6 rouge	5YR5/3 Brun rouge
	Son	L. M	L. M	L. M	L. M
	Cohésion	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne

#### IV. EFFET DE LA CENDRE SUR LES EPPROUVETTES DE NGAT

La cendre de *Pycnanthus angolensis* plus connue sous le nom de Ilomba utilisée dans le cadre de cette étude a fait l'objet d'une description macroscopique, d'une caractérisation minéralogique et géochimique. Cette essence a été coupée et transformé en cendre dans la localité de Ngoumou, région du Centre.



Qz: Quartz; An: Anatase; Hem: Hématite; Mul: Mullite

Figure 42: Minéralogie des spécimens cuits : a) NGB2 ; b) NGB4 ; c) NPA2 ; d) NPA3.

## **IV.1. Pétrologie de la cendre**

### **IV.1.1. Description macroscopique de la cendre**

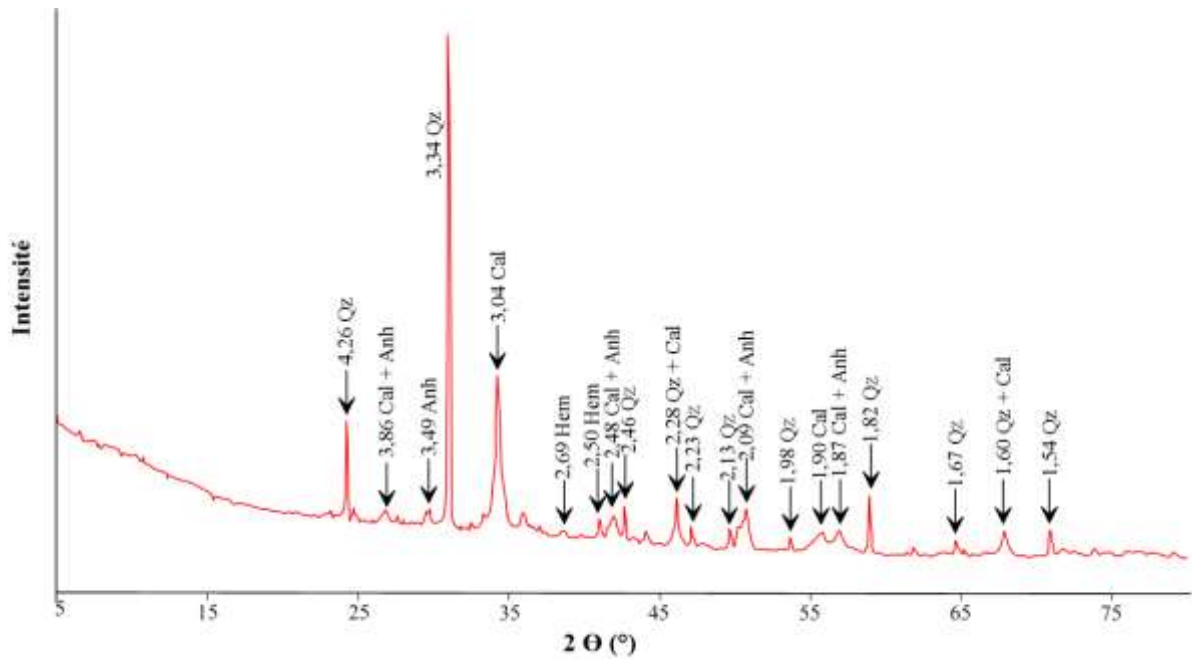
La cendre utilisée comme adjuvant pour stabiliser les matériaux argileux de Ngat est de couleur grise, fin avec des petits morceaux de charbon de couleur noir (figure 43).



*Figure 43: Photographie de la cendre.*

### **IV.1.2. Composition minéralogique et géochimique de la cendre**

Le cortège minéralogique de la cendre est constitué essentiellement de quartz, de la calcite, de l'anhydrite et de l'hématite (figure 44).



Qz: quartz; Anh: anhydrite; Cal: calcite; Hem: hématite

Figure 44: Diffractogramme des rayons X de la cendre de *Pycnanthus angolensis*.

### V.1.3. Géochimie de la cendre

#### V.1.3.1.  l ments majeurs

L'analyse chimique des éléments majeurs montre que la cendre de Ilomba est constitu e principalement de la silice (27,33 % de SiO<sub>2</sub>), de l'aluminium (17,39 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), du calcium (16,83 % de CaO). Des proportions modérées en potassium (5,7 % de K<sub>2</sub>O) et de fer (5,62 % de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) sont rencontr es. Le magnésium (2,88 % de MgO) a des concentrations faibles alors que le titane, le manganèse, le sodium, et le phosphore ont des proportions très faibles, inférieures à 1 %. La valeur de la perte au feu est  lev e (19,34 %), (tableau 29). La variation des éléments majeurs confirme les concentrations élevées en silice et de la perte au feu (figure 45).

Tableau 29: Composition chimique des éléments majeurs de la cendre.

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	PF	T
cendre	27,33	17,39	5,62	2,88	0,20	5,70	0,10	16,83	0,76	0,85	19,34	97,00

T: total

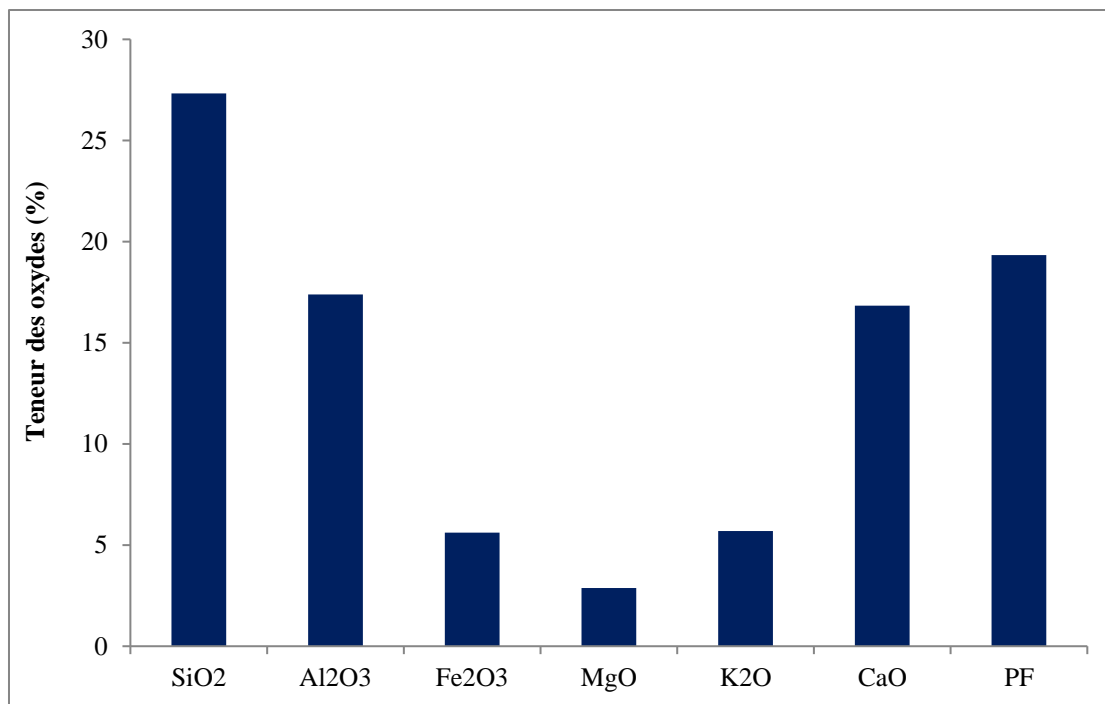


Figure 45: Variation de la composition chimique de la cendre.

#### IV.1.3.2. Eléments traces

Les éléments traces de la cendre sont représentés par des concentrations élevées en Sr (782,4 ppm), Zr (220 ppm), Ba (208,9 ppm), Rb (180,24 ppm), V (141,9 ppm) et en Cu (102,2 ppm). Les concentrations modérées sont observées en Zn (95,5 ppm), Cr (89 ppm), Ni (30,8 ppm), Ga (22,69 ppm), Nb (15,98 ppm), Sc (11,5 ppm), Pb (11,27 ppm) et Th (10,46 ppm). Les éléments tels que Mo (8,72 ppm), Y(7,71 ppm), Hf (5,25 ppm), Li (4,7 ppm), Co (3,35 ppm), Sn (1,91 ppm), U (1,549 ppm) et Cs (1,534 ppm) ont des teneurs faibles et les éléments tels que Ta (0,951 ppm), W (0,86 ppm), Be (0,63 ppm), Tl (0,321 ppm), Sb (0,19 ppm) et In (0,08 ppm) ont des teneurs très faibles, inférieures à l'unité (tableau 30).

#### IV.1.3.3. Eléments Terres rares

Les concentrations sont élevées en cérium (36,79 ppm), lanthane (18,8 ppm) et niobium (13,63 ppm). Les valeurs faibles sont obtenues en praséodyme (3,78 ppm), samarium (2,55 ppm), gadolinium (1,91 ppm) et dysprosium (1,50 ppm).

Tableau 30: Composition en éléments traces de la cendre

-	L.d	Cendre
Ba	1,3	208,9
Be	0,024	0,63
Cd	0,018	0,03
Co	0,09	3,35
Cr	2,9	89,00
Cs	0,006	1,53
Cu	0,4	102,20
Ga	0,04	22,69
Hf	0,09	5,25
In	0,0017	0,08
Li	0,24	4,70
Mo	0,08	8,72
Nb	0,05	15,98
Ni	0,6	30,80
Pb	0,29	11,27
Rb	0,15	180,24
sb	0,025	0,19
Sc	0,17	11,50
Sn	0,17	1,91
Sr	1,3	782,40
Ta	0,015	0,95
Th	0,027	10,46
TI	0,004	0,32
U	0,01	1,55
V	0,4	141,9
W	0,023	0,86
Y	0,09	7,71
Zn	2	95,70
Zr	4	220,00

Les éléments tels que le terbium, l'euporium, l'holmium, l'erbium, le thulium, l'ytterbium et le lutétium ont des concentrations très faibles, inférieures à 1 ppm. La somme des terres rares est de 81,866 ppm. La somme des terres rares légères (76,1 ppm) est supérieure à la somme des terres rares lourdes (5,77 ppm). Le rapport terres rares légères sur terres rares lourdes est de 13,19 (tableau 31).

Tableau 31: Composition en éléments terres rares de la cendre

-	L.d	Cendre
La	0,09	18,8
Ce	0,17	36,79
Pr	0,019	3,78
Nd	0,11	13,63
Sm	0,05	2,55
Eu	0,008	0,55
Gd	0,04	1,91
Tb	0,009	0,27
Dy	0,04	1,50
Ho	0,006	0,27
Er	0,04	0,76
Tm	0,005	0,11
Yb	0,008	0,84
Lu	0,005	0,12
ΣREE	-	81,87
LREE	-	76,1
HREE	-	5,77

## V. COMPOSITION GRANULOMETRIQUE DES MELANGES

Après observation des différents résultats obtenus sur les éprouvettes des matériaux de la localité de Ngat, l'échantillon NPA4 ayant de bonnes proportions granulométriques (argile : 55,14 % ; sable : 33,65 % et limon : 11,21 %) et caractéristiques technologiques ( $2,80 < RL$  (%)  $< 7,30$ ;  $7,29 < MP$  (%)  $< 9,10$  ;  $22,23 > AE$  (%)  $> 11,60$  et  $7,48 < RF$  (MPa)  $< 8,91$  a été sélectionné pour la stabilisation à la cendre de Ilomba.

La granularité des mélanges sur le matériau NPA4 à la cendre à différents pourcentages montrent que les proportions varient en fonction du pourcentage de la cendre.

Pour le mélange à 5 % de la cendre, les proportions granulométriques sont pour l'argile 52,38 %, le sable 31,97 % et le limon 10,65 %. Le mélange à 10 % de cendre est composé de la proportion d'argile qui représente 49,63 %, la proportion de sable 30,28 % et enfin la proportion limoneuse avec 10,09 %. A 15 % du mélange à la cendre, les proportions granulométriques sont composées de 46,87 % d'argile, 28,60 % de limons et 9,56 % de sable. Le mélange à 20 % de cendre est représenté par 44,11, 26,92 et 8,97 % respectivement pour les proportions d'argile, de sable et de limon (tableau 32). Les différentes proportions granulométriques diminuent avec l'élévation du pourcentage de la cendre (Figure 46)

Tableau 32: Pourcentages granulométriques des mélanges

NPA4	-	Cendre	Argiles	Limons	Sables	Total
	95-05	5,00	52,38	10,65	31,97	100,00
	90-10	10,00	49,63	10,09	30,28	100,00
	85-15	15,00	46,87	9,56	28,60	100,00
	80-20	20,00	44,11	8,97	26,92	100,00

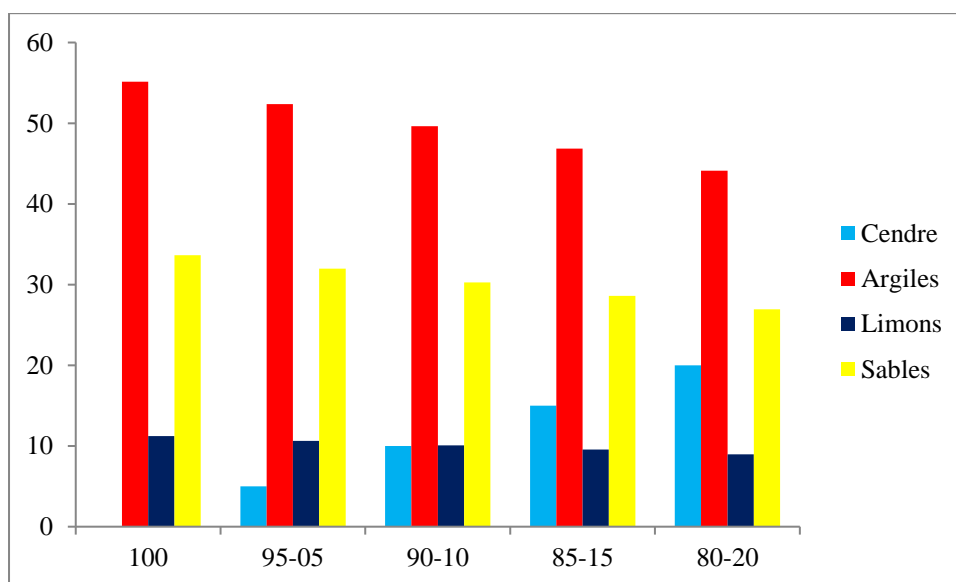


Figure 46. Composition granulométrique des mélanges.

## VI. PROPRIETES CERAMIQUES DES MELANGES

A l'issue des différents mélanges, des éprouvettes ont été confectionnées et ont été cuites à plusieurs paliers de températures (350, 600, 800, 900, 1000 et 1100°C). Après cela certains paramètres ont été déterminés.

### VI.1. Retrait linéaire

Les valeurs du retrait linéaire des éprouvettes issues du matériau NPA4, évoluent positivement dans le sens de l'augmentation de la température (figure 47 a). Ces valeurs sont comprises entre 1,98 % pour la formulation NPA4 80-20 à 350°C et 10,83 % pour la formulation NPA4 90-10 à 1100°C (tableau 33). Seule la formulation NPA4 90-10 a toutes ses valeurs supérieures à 5 % et à toutes les températures de cuisson.

## VI.2. Densité apparente

Les valeurs de la densité apparente sont représentées dans le [tableau 33](#) et illustrées par la [figure 47 b](#). Les valeurs de la densité apparente oscillent de 1,53 g/ m<sup>3</sup> à la formulation 80-20 à 1,70 g/ m<sup>3</sup> à la formulation 90-10. Ces valeurs sont égales pour les formulations 80-20 aux températures 350 et 600°C (1,56 g/ m<sup>3</sup>), 85-15 aux températures 350 et 600°C (1,59 g/ m<sup>3</sup>) et 1000 et 1100°C (1,66 g/ m<sup>3</sup>). A la formulation 90-10, cette valeur est la même aux températures 600 et 800°C (1,65 g/ m<sup>3</sup>).

## VI.3. Perte de masse

Les valeurs de la perte de masse pour les différents mélanges de l'échantillon NPA4, ont des valeurs qui oscillent entre 2,06 % pour la formulation 80-20 et à la température 350°C ([tableau 33](#)) et 11,54 % à la formulation 90-10 à 1100°C. Ces valeurs sont représentées par la [figure 47 c](#).

## VI.4. Absorption d'eau

Les valeurs du taux d'absorption d'eau des mélanges oscillent entre 14,77 % pour le mélange à 5 % de cendre et à 1100°C et 22,95 à 10 % à 350°C ([tableau 33](#)). Ces valeurs décroissent avec l'élévation de la température ([figure 47 d](#)).

## VI.5. Résistance à la flexion

Les valeurs de la résistance à la flexion de l'échantillon NPA4 mélangé à la cendre sont comprises entre 6,30 Mpa (NPA4 80-20) à 350°C et 7,44 Mpa (NPA4 90-10) à 1100°C. Ces valeurs sont inférieures aux valeurs du matériau cru ([tableau 33](#)). Ces valeurs augmentent avec l'élévation de la température ([figure 47 e](#)).

## VI.6. Couleur, cohésion et résonance

Les couleurs des différentes éprouvettes issus de l'échantillon NPA4 après stabilisation à la cendre sont regroupés dans le [tableau 34](#).

Dans l'ensemble, la couleur des éprouvettes des différents mélanges a évolué du rouge avec ses différentes variétés dans les températures basses (350 et 600°C) au brun ou brun vif (1100°C) en passant par le gris rose pour toutes les éprouvettes. Tout ceci à toutes les formulations quel que soit les paliers de températures ([figure 48](#)).

Tableau 33: RL; DA; PM; AE et RF des éprouvettes issues des mélange entre le matériau NPA4 et la cendre de Ilomba

Paramètres	T°C	350	600	800	900	1000	1100
RL	100	2,06	2,55	2,80	3,34	4,05	7,30
	95-05	4,71	7,30	7,46	7,66	8,96	9,47
	90-10	5,70	7,58	8,05	8,18	10,17	10,83
	85-15	2,40	2,90	3,66	5,21	6,44	7,70
	80-20	1,98	2,05	2,15	2,47	3,12	5,30
DA	100	1,55	1,57	1,58	1,58	1,63	1,66
	95-05	1,60	1,61	1,63	1,65	1,67	1,68
	90-10	1,64	1,65	1,65	1,67	1,68	1,70
	85-15	1,59	1,62	1,62	1,65	1,66	1,66
	80-20	1,53	1,56	1,56	1,58	1,60	1,63
PM	100	2,89	7,05	7,29	8,00	8,40	9,10
	95-05	3,29	8,65	9,29	9,40	9,67	9,96
	90-10	3,33	9,06	10,89	11,20	11,39	11,54
	85-15	3,03	8,82	9,09	9,99	10,39	10,68
	80-20	2,06	6,65	6,21	6,83	6,98	8,08
AE	100	22,51	22,45	22,23	21,40	21,40	11,60
	95-05	22,56	21,85	19,01	18,11	17,53	14,77
	90-10	22,95	22,17	20,16	18,94	18,30	15,01
	85-15	22,10	22,01	21,22	20,86	19,33	16,75
	80-20	21,79	21,74	21,44	21,37	20,48	18,93
RF	100	6,96	7,04	7,48	7,95	8,20	8,91
	95-05	6,78	6,83	7,25	7,36	7,39	7,41
	90-10	6,80	6,83	7,30	7,38	7,42	7,44
	85-15	6,70	6,75	6,98	7,19	7,33	7,37
	80-20	6,30	6,72	6,75	6,79	6,80	6,82

RL: retrait linéaire; DA: densité apparente; PM: perte de masse; AE: absorption d'eau; RF: résistance à la flexion

La cohésion est moyenne à toutes les températures et à différents mélanges, elle reste bonne pour les différents mélanges à la température 1100°C à l'exception de la dernière formulation qui a une cohésion faible à cette température.

Quant à la sonorité, elle demeure légèrement métallique à métallique pour toutes les formulations et pour toute température de cuisson.

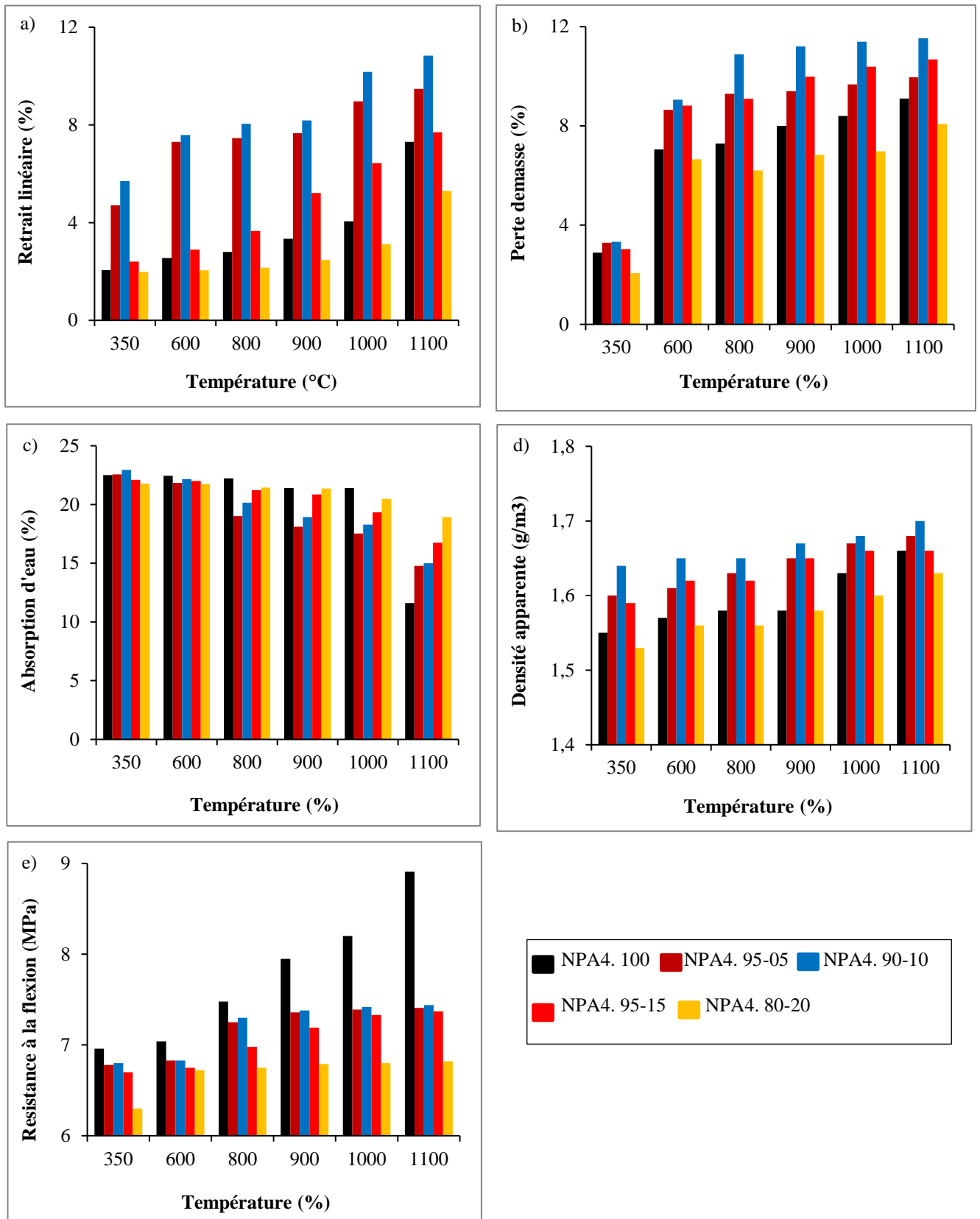


Figure 47: Histogrammes de variation des propriétés céramiques des mélanges à la cendre de Ilomba.

Tableau 34: Couleur, cohésion et résonance des mélanges de l'échantillon NPA4.

	Paramètres	Cru	350	600	800	900	1000	1100
NPA4	Couleur	10YR6/4 Brun jaunâtre	/	/	2,5YR6/8 Rouge clair	2,5YR6/8 Rouge clair	2,5YR6/8 Rouge clair	2,5YR6/8 Rouge clair
		Cohésion	/	/	/	Moyenne	Moyenne	Moyenne
	Résonance	/	/	/	L. M	L. M	L. M	L. M
NPA4 95-05	Couleur	10YR6/4 Brun jaunâtre	2.5YR5/3 Marron rougeâtre	10YR 6/6 Rouge claire	2,5YR6/8 Rouge clair	2,5YR7/6 Rouge clair	2,5YR7/6 Rouge clair	2,5YR6/6 Rouge clair
	Cohésion	-	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Bonne
	Résonance	-	L.M	L.M	L. M	L. M	M	M
NPA4 90-10	Couleur	10YR5/4 Brun jaunâtre	2.5YR5/4 Marron rougeâtre	2.5YR6/6 Rouge claire	2,5YR6/8 Rouge clair	2,5YR6/8 Rouge clair	2,5YR6/6 Rouge clair	2,5YR5/6 Rouge
	Cohésion				Moyenne	Moyenne	Moyenne	Bonne
	Résonance				L. M	L. M	M	M
NPA4 85-15	Couleur	10YR6/3 Brun pale	2.5YR5/3 Marron rougeâtre	2.5YR6/6 Rouge claire	2,5YR6/8 Rouge clair	2,5YR7/6 Rouge clair	2,5YR7/4 Brun Rougeâtre	2,5YR6/4 Brun rougeâtre
	Cohésion				Moyenne	Moyenne	Moyenne	Bonne
	Résonance				L. M	L. M	L. M	L. M
NPA4 80-20	Couleur	10YR5/3 Brun	5YR5/3 Marron rougeâtre	5YR6/6 Jaune rougeâtre	2,5YR7/6 Rouge clair	2,5YR6/8 Rouge clair	2,5YR7/4 Brun rougeâtre	2,5YR6/4 Brun rougeâtre
	Cohésion	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Faible
	Résonance	L.M	L.M	L.M	L. M	L. M	L. M	L. M

L. M: légèrement métallique

## VII. MINERALOGIE ET GEOCHIMIE DES MELANGES A 10 % DE LA CENDRE APRES CUISSON

Après stabilisation à la cendre, la formulation 90-10 a été sélectionné sur la base de la granulométrie et des propriétés céramiques. C'est la raison pour laquelle ces différentes éprouvettes ont été analysées sur les plans minéralogique et géochimique. Ces éprouvettes ont été cuites à 6 paliers de température et pour cela la codification des ces éprouvettes a été modifiées (tableau 35).

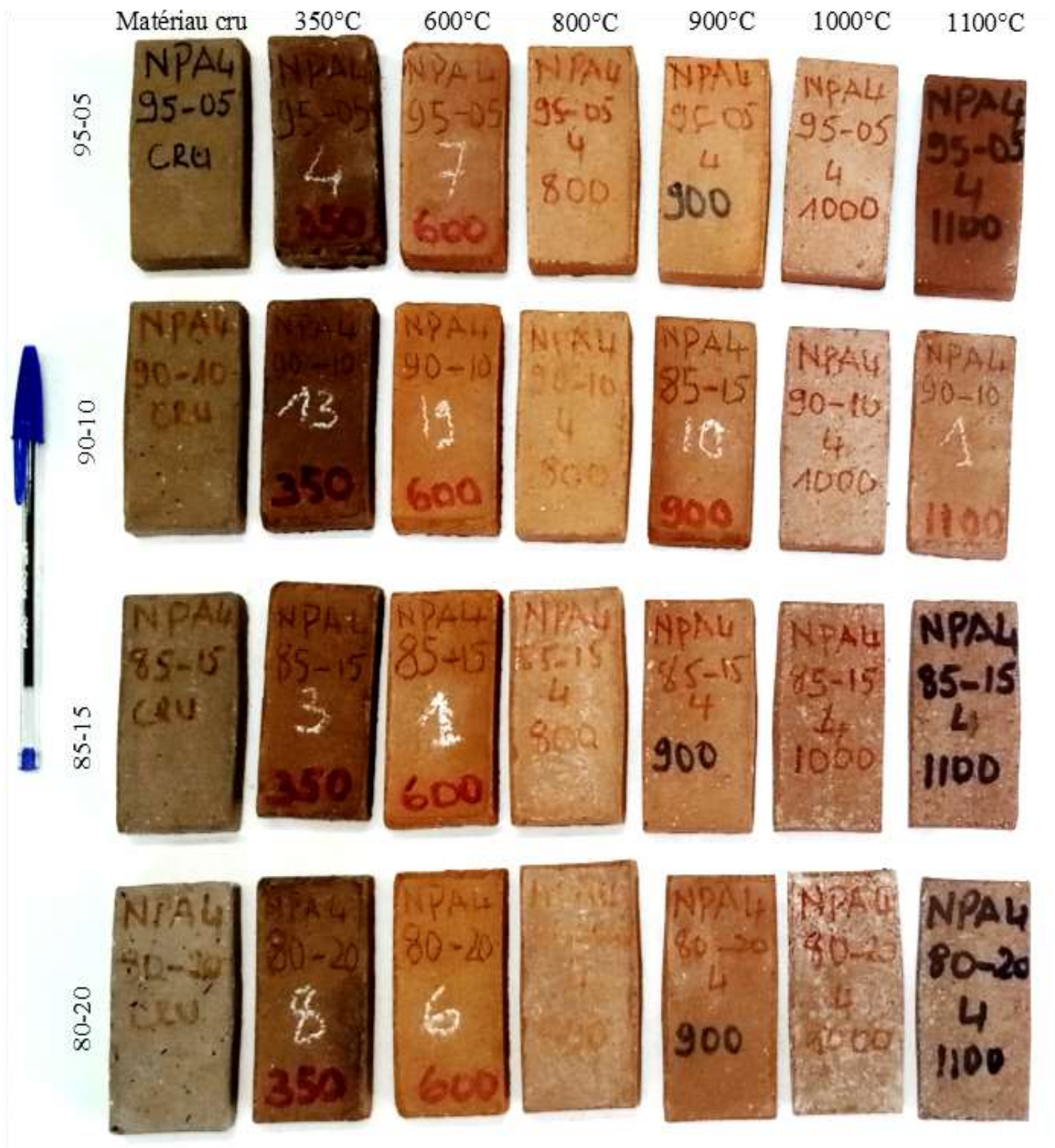


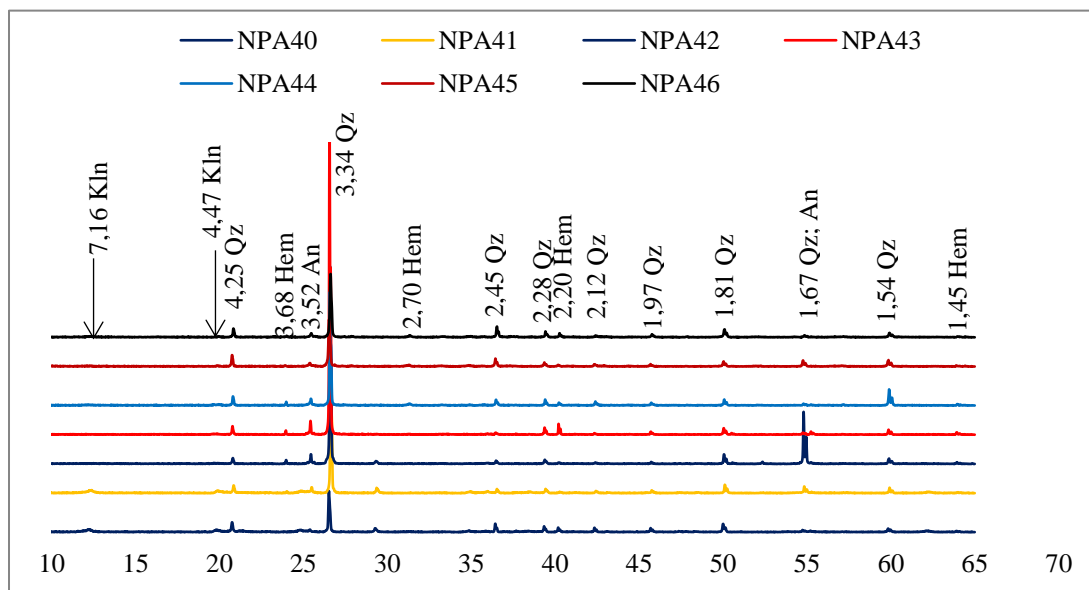
Figure 48: photographie des éprouvettes issus du mélange entre le matériau NPA4 et la cendre.

Tableau 35: Codification des éprouvettes après mélange avec 10 % de cendre et cuisson

Anciennes codifications	NPA4 90-10 Cru	NPA4 90-10, 350 °C	NPA4 90-10, 600 °C	NPA4 90-10, 800 °C	NPA4 90-10, 900 °C	NPA4 90-10, 1000 °C	NPA4 90-10, 1100 °C
Nouvelles codifications	NPA40	NPA41	NPA42	NPA43	NPA44	NPA45	NPA46

## VII.1 Minéralogie

Le cortège minéralogique des éprouvettes issus du mélange entre l'échantillon NPA4 (90 %) et la cendre (10 %) est composé des minéraux tels que: le quartz, la kaolinite qui disparaît à partir de 800°C, l'anatase et l'hématite (figure 49).



Qz: Quartz; An: Anatase; Kln: Kaolinite

Figure 49 : Diffractogrammes des Rayon X du matériau NPA4 mélangé à 10 % de la cendre.

## VII.2. Géochimie

Les teneurs en SiO<sub>2</sub> sont élevées et varient de 61,31 à 68,38 %. Les teneurs en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont modérées et oscillent de 16,68 à 19,05 %. Les valeurs du Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont faibles, elles sont comprises entre 4,93 et 5,58 % (tableau 36) les valeurs en alcalins et alcalino-terreux sont très faibles. Elles sont inférieures à l'unité à l'exception du K<sub>2</sub>O qui a des teneurs largement supérieures à l'unité, ses valeurs oscillent entre 1,10 et 1,35 % et du CaO donc les valeurs vont de 2,25 à 2,69 %

Les mélanges cuits à différents paliers de température sont riches en TiO<sub>2</sub> (1,48 à 1,70 %), et très pauvres en MgO, MnO et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, leurs teneurs sont largement en dessous de l'unité. Les éléments tels que le Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Na<sub>2</sub>O ont des valeurs presque nulles à tous les mélanges et à tous les paliers de température. Les teneurs en LOI sont faibles à modérées, elles oscillent entre 1,04 et 11,25 %. Le rapport SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> varie entre 3,51 et 3,73. Le calcul du CIA montre que les valeurs de mélange de l'échantillon NPA4 avec la cendre à 10 % sont presque les mêmes et oscillent entre 92,10 et 92,93 % (tableau 36).

Tableau 36: Eléments majeurs (%) des éprouvettes stabilisées avec 10 % de la cendre

	NPA40	NPA41	NPA42	NPA43	NPA44	NPA45	NPA46
SiO <sub>2</sub>	61,31	62,78	65,83	65,4	66,79	68,38	68,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,68	16,95	17,94	18,47	19,05	18,45	18,72
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,93	5,02	5,27	5,4	5,58	5,23	5,53
MgO	0,58	0,63	0,65	0,63	0,65	0,64	0,68
MnO	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
K <sub>2</sub> O	1,22	1,1	1,19	1,31	1,35	1,34	1,27
CaO	2,25	2,51	2,58	2,51	2,54	2,5	2,69
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,15	0,17	0,18	0,16	0,17	0,17	0,19
TiO <sub>2</sub>	1,48	1,53	1,62	1,65	1,69	1,67	1,7
Na <sub>2</sub> O	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
NiO	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0,01
PF	11,25	9,22	4,26	3,63	2,2	1,14	1,04
Total	99,96	100	99,64	99,26	100,14	99,64	100,11
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,68	3,7	3,67	3,54	3,51	3,71	3,64
CIA	92,16	92,93	92,82	92,41	92,43	92,1	92,55
ICV	0,63	0,64	0,63	0,62	0,62	0,62	0,64

## Conclusion

Il était question dans ce chapitre de mettre en exergue les propriétés céramiques des argiles de la localité de Ngat. Il ressort que les éprouvettes issues des argiles de Ngat-Bane ont des valeurs du retrait linéaire faibles et atteignent difficilement 5 % pour la majorité des échantillons et aux températures inférieures à 1100°C. Le taux d'absorption d'eau à des valeurs qui comprise entre 11 % et 23 %. Quant à la résistance à la flexion, ses valeurs sont modérées et inférieures à 15 Mpa. Mélangées à la cendre de Ilomba, la granulométrie nous montre une diminution du taux d'argile en faveur du taux des limons. Les valeurs du retrait linéaire, de la perte de masse, du taux d'absorption d'eau et de la résistance à la flexion augmente après le 10 % d'ajout de la cendre de Ilomba.

---

# CHAPITRE VI. INTERPRETATION ET DISCUSSION

---

## Introduction

Le présent chapitre de ce mémoire porte sur l'interprétation et la discussion des résultats. En premier lieu, seront analysés les traits morphologiques, minéralogiques et géochimiques des matériaux argileux étudiés. Le deuxième point porte sur l'évaluation de ces matériaux dans le domaine de la céramique. La troisième section de ce chapitre montrera les effets de la cendre sur les produits céramiques de ces matériaux argileux.

## I. PETROLOGIE DES MATERIAUX ARGILEUX DE NGAT

### I.1. Traits morphologiques

La variation des couleurs (du jaune au gris, en passant par le jaune rougeâtre) dans les matériaux crus résulte de celle des teneurs en oxydes métalliques (Berton et Le Berre, 1983), spécialement  $Fe_2O_3$  et  $TiO_2$ .

### I.2. Caractères physico-chimiques

La teneur en eau dans certains matériaux (NGB1, NGB2, NGB4, NGB10, NGB11, NGB12, NGB14, NGB15, NGB17, NPA1, NPA2 et NPA6) est supérieure à 25 %, et confirme l'hydromorphie temporaire prolongée et la haute teneur en argile (45,77-61,15 %) de ces matériaux qui leur confèrent un caractère asphyxiant. La teneur en eau inférieure à 16 % (NGB5) indique une structure particulière avec des éléments sableux de taille variable sans liaison correspondant à un matériau filtrant.

L'analyse granulométrique confirme le caractère argileux des matériaux étudiés avec des taux d'argile compris entre 25 et 61 %. Cette prédominance des particules fines est une caractéristique de certains matériaux récoltés dans le plateau sud-Camerounais (Diko et al., 2011; Ngon Ngon et al., 2012; Logmo et al., 2013; Ndjigui et al., 2021; Kankao et al., 2022).

Les teneurs en matière organique dans les matériaux de Ngat sont très variables. Elles sont inférieures à 1 % à Ngat-Carrière et supérieures à l'unité à Ngat-Plantation. D'après Duchaufour (1977), les matériaux argileux seraient considérés comme riches en matière organique lorsque le pourcentage est supérieur à 2 %. Une interprétation de la qualité du sol en fonction de leur taux de matières organiques a été définie par le Laboratoire Agricole de

Normandie (Nzeukou Nzeugang, 2014): pour les teneurs en MO < 4 %, on a les matériaux à teneur modérée en matières organiques; pour les teneurs entre 4 et 8 %, on a les matériaux pourvus en matières organiques; pour les teneurs en MO > 8 %, on a des matériaux à teneur élevée en matières organiques. Les teneurs en matières organiques (< 4 %) des matériaux étudiés ont permis de les classer dans le groupe des argiles à teneur modérée en matières organiques. Leur effet n'est pas négatif dans les procédés céramiques. Le diagramme de McManus (1988) (figure 50) met en exergue la porosité et la perméabilité. Cette figure démontre que tous les matériaux de Ngat tombent dans le domaine de la faible porosité et de la faible perméabilité.

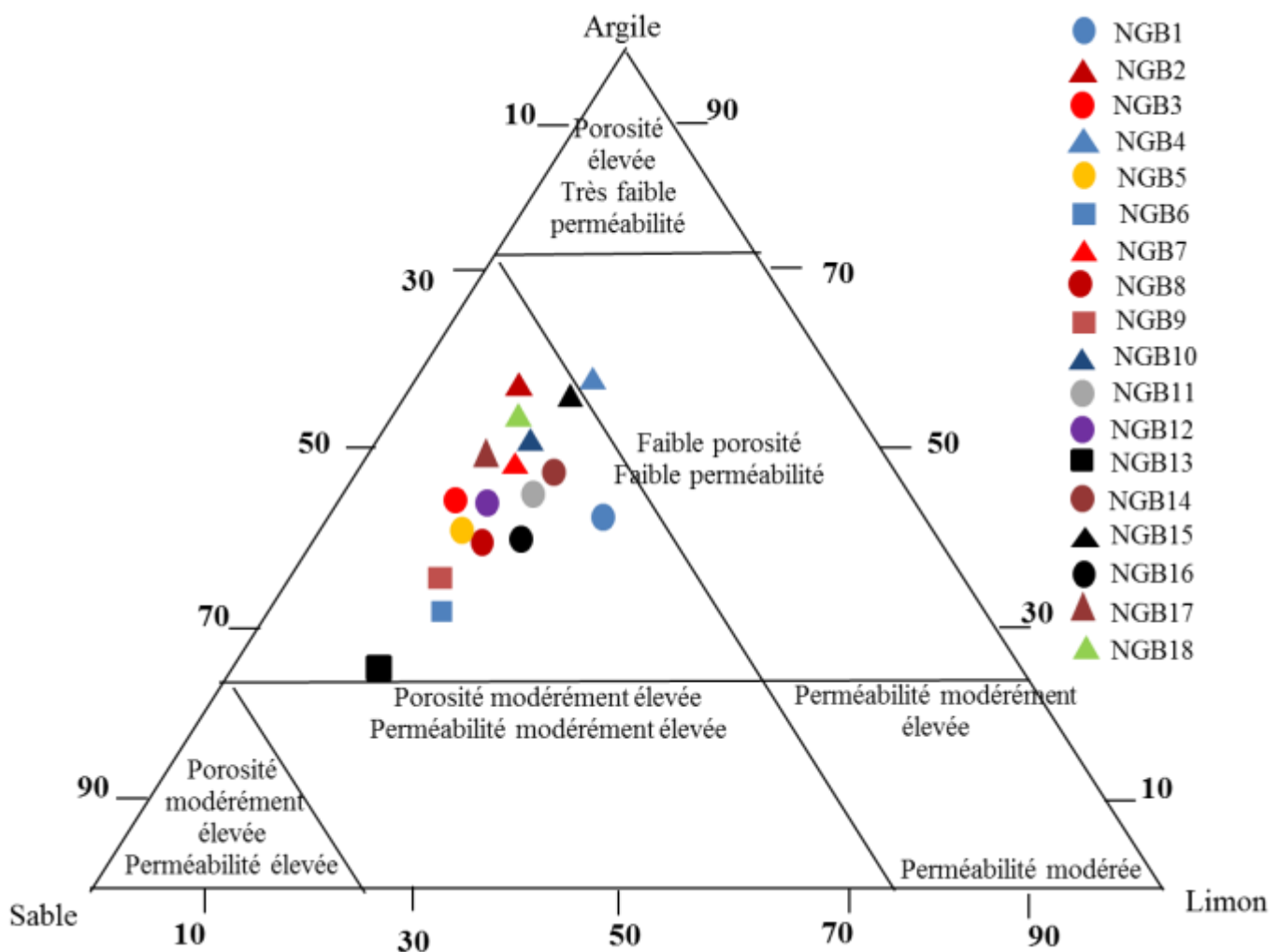


Figure 50: Position des matériaux de Ngat-Carière dans le diagramme triangulaire de porosité et perméabilité (McManus, 1988).

Les valeurs de pH se situent entre 4,55 et 5,85, ce qui indique la nature acide des roches mères et l'intervention du phénomène de lixiviation (Afeez Adefemi, 2012).

La capacité d'échange cationique (CEC) est comprise entre 14,7 et 16,05 méq/100g et augmente avec le taux de la fraction argileuse. Ces valeurs sont très éloignées de celles rencontrées dans la localité de Dimako (Doum et al., 2020). Ces faibles valeurs de CEC peuvent s'expliquer par le fait que les analyses ont été effectuées sur la fraction totale (Temga, 2015).

### I.3. Caractères minéralogiques et géochimiques

L'analyse par infrarouge démontre que les pics observés correspondent aux liaisons qui permettent d'identifier un minéral. Les pics de numéro d'onde autour de  $1100\text{ cm}^{-1}$  sont attribués à la vibration d'étirement Si-O (Pinias et al., 2007). Ces liaisons sont assimilées à l'action de la silice amorphe (Madejova, 2003). L'apparition d'un pic autour de  $1600\text{ cm}^{-1}$  renvoie à des aluminosilicates amorphes (Nzeukou Nzeugang, 2014). La formation de la kaolinite pourrait être due à la précipitation supergène de la silice et de l'alumine (Ndjigui, 2008). Les teneurs élevées en quartz pourraient être attribuées à la résistance de ce minéral à l'altération ou à la libération de la silice par les silicates primaires. Les matériaux de Ngat tout comme ceux de d'Akok-Maka (Ntouala, 2014) et de Mbalmayo et Bengbis (Onana, 2010) sont à prédominance siliceuse. La teneur élevée en  $\text{SiO}_2$  est en relation avec la forte proportion en quartz, ceci s'observe également dans les dépôts siliceux de certaines terrasses alluviales (Bhuiyan et al., 2011). La forte teneur en  $\text{SiO}_2$  ainsi que la forte teneur en  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  confirment la texture argilo-sableuse des matériaux (Gillot, 1986 ; Bah et al., 2005). Les teneurs en silice, relativement élevées (62 à 81 % de  $\text{SiO}_2$ ), se rapprochent des argiles sédimentaires plastiques favorables pour les produits céramiques telles que les "ball clays" (Fabbri et Fiori, 1985; Manning, 1995; Reeves et al., 2006). La variation de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  permet la distinction de ces matériaux par leurs couleurs. Ces teneurs en fer ( $> 4\%$ ) classent ces argiles comme les "plastic red clays" pour céramiques rouges (Wilson, 1998). Les valeurs importantes de la perte au feu (5,47 à 10,78 %) permettent de montrer l'influence des minéraux argileux dans ces matériaux. La distribution des éléments majeurs met en évidence l'abondance de  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Le rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  élevé confirme que la teneur élevée en silice pourrait être due à la présence de la silice libre due probablement à un apport détritique assez important (Abdelhak et al., 2007) en plus de la présence de la kaolinite (Vieira et al., 2008). Le rapport  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  élevé confirme la prédominance de la kaolinite. Cette prédominance peut aussi être marquée par les valeurs élevées de la somme  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (moyenne  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 = 83,68\%$ ). Doum et al. (2020) démontrent que la présence de la kaolinite suggère l'altération intense des roches mères, tandis que celle du quartz résulte de

l'altération des minéraux silicatés primaires. L'oxyde d'aluminium relativement élevé et beaucoup plus dans les échantillons de Ngat-Plantation témoigne de la présence de la kaolinite. L'abondance de la kaolinite est favorisée par le processus de monosialitisation qui domine généralement les zones à pluviométrie abondante. La kaolinite est le composant argileux le plus courant rencontré dans les argiles du plateau sud Camerounais (Nakao et al., 2017). Les teneurs en  $\text{TiO}_2$  reflètent le comportement des minéraux contenant du Ti. Les teneurs en  $\text{TiO}_2$  allant jusqu'à 1 % indiquent la présence du rutil ou de l'anatase. Les rapports  $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  ont des valeurs faibles. Ces faibles valeurs pourraient être liées à l'épuisement du potassium en raison de son rayon ionique alors que  $\text{Al}_2\text{O}_3$  s'accumule sous forme de kaolinite. Un autre aspect par rapport à la composition chimique de ces argiles est la faible quantité en  $\text{K}_2\text{O}$  qui est considérée comme le principal agent des matériaux argileux (Abajo, 2000). Ces faibles teneurs en  $\text{K}_2\text{O}$  sont dues à l'absence des micas (Silva et al., 2016). Les travaux de Absar et Sreenivas (2015) ont montrés que l'aluminium et le titane sont immobiles pendant l'altération, le transport et la diagenèse.  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , et  $\text{P}_2\text{O}_5$  apparaissent à l'état de traces dans tous les matériaux. Le même fait a été observé par Gong et al. (2011) à Yunnan en Chine. Les valeurs élevées en CIA et faible en ICV révèlent une forte intensité de la roche mère. Ces valeurs du CIA indiquent une forte altération de la roche mère telle qu'observée dans les zones tropicales (Liu et al., 2016). Dans le cadre de cette étude, les valeurs de l'ICV sont inférieures à 0,85 ( $0,35 \leq \text{ICV} \leq 0,59$ ). Ce qui démontre que les sédiments qui ont conduit à la formation des matériaux argileux de Ngat sont matures et proviendraient d'une source altérée intense car ayant un CIA élevé ( $92,05 \leq \text{CIA} (\%) \leq 97,11$ ), (figure 51). Les valeurs de la perte au feu variant de 6 à 24 % pourraient être associées à la présence de minéraux argileux, d'hydroxydes et de matière organique (Milheiro et al., 2005; Baccour et al., 2009). La perte au feu élevée est attribuable à la présence des volatils comprenant les minéraux argileux et la matière organique (Ndjigui et al., 2013). Le diagramme LOI/IOL montre que la kaolinitisation est le principal processus de formation de matériaux de Ngat (Figure 52). Selon la classification de Schellmann (1986), les matériaux argileux de Ngat sont en dehors du champ de latéritisation (figure 53). Cette classification de Schellmann confirme la faible proportion de minéraux secondaires dans l'ensemble des matériaux prélevés. Les corrélations négatives entre  $\text{SiO}_2$  et les autres éléments majeurs montrent que l'accumulation de la silice ne serait pas concomitante à celle des autres éléments chimiques. Ces corrélations négatives seraient dû à l'abondance du quartz (Tonje et al., 2014).

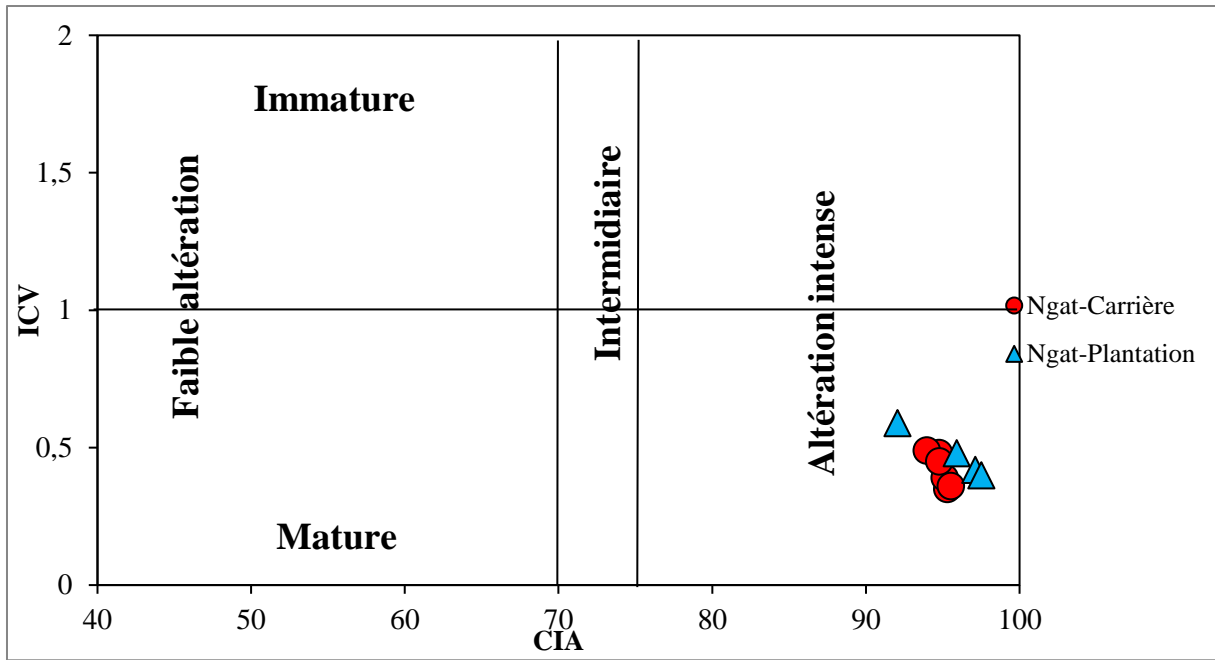


Figure 51 : Covariation comparée ICV-CIA dans les matériaux argileux de Ngat.

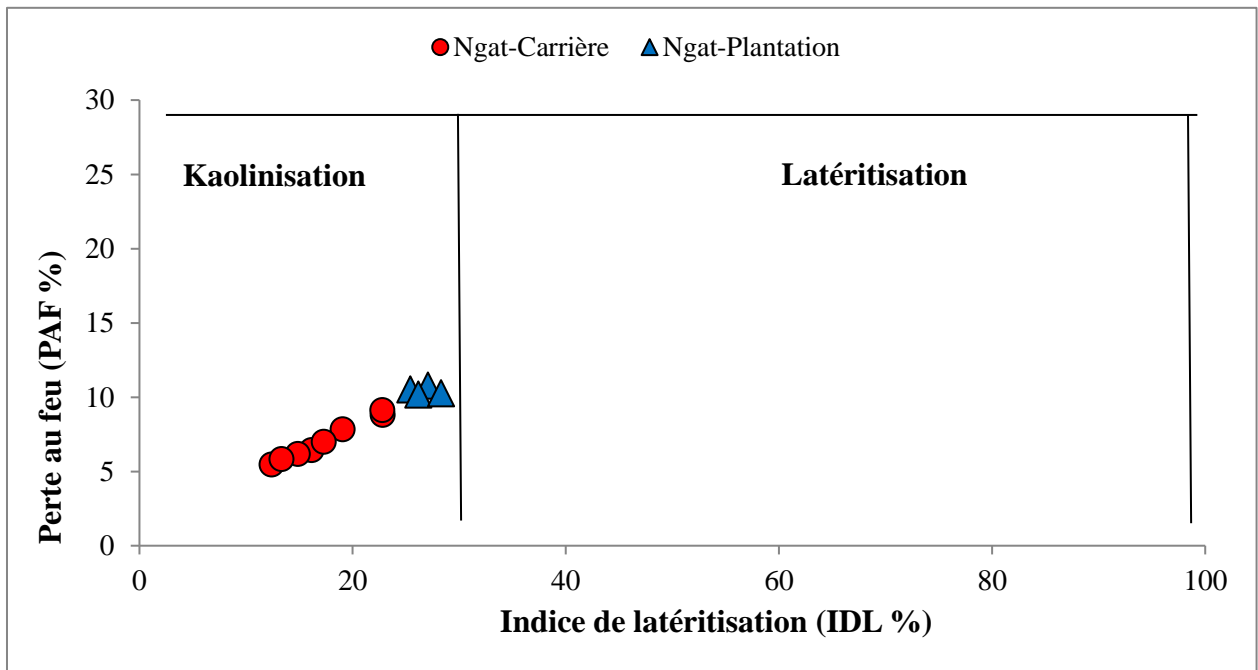


Figure 52: Covariation de PAF et IDL montrant le processus de formation des matériaux de Ngat.

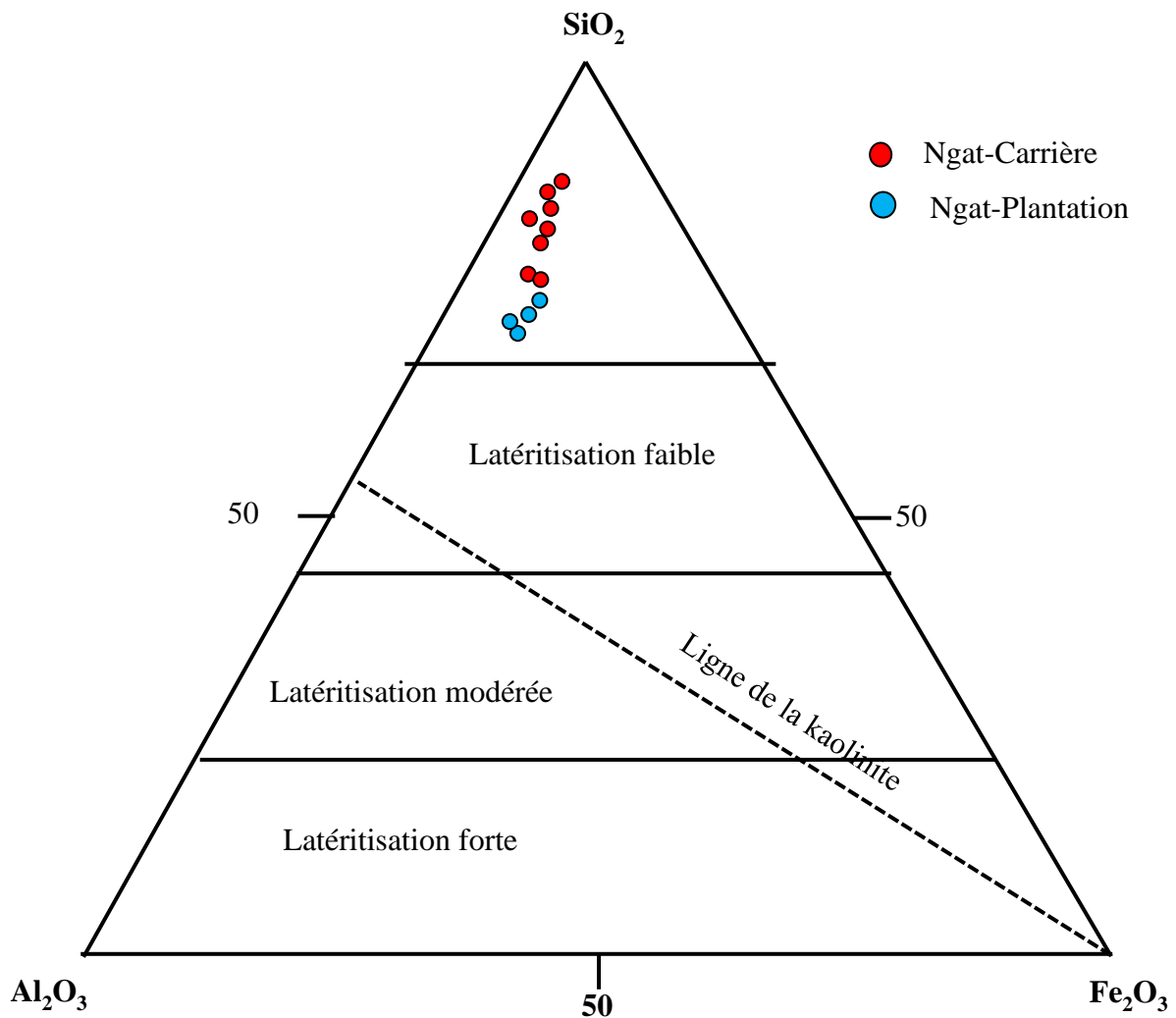


Figure 53: Diagramme ternaire  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$  pour les matériaux de Ngat (Schellmann, 1986).

Les éléments traces sont en faibles proportions dans tous les matériaux. Le zirconium est l'élément le plus représenté. Les propriétés chimiques et physiques du cobalt sont très proches de celles du nickel. Le cobalt accompagne donc très souvent le nickel dans de nombreux métaux mais y est moins abondant que ce dernier (Mosser, 1980). Le vanadium est considéré comme étant associé à la matière organique, et hébergé dans les matériaux argileux par les minéraux silicatés détritiques (Stow et Atkin, 1987). Les oxydes sous la forme de fluide qui réagissent avec la silice et l'alumine stimulent les formations en phase liquide qui facilitent la densification (Doum et al., 2020).

Les valeurs élevées en Cr dans les argiles de Ngat-Plantation par rapport à ceux de Ngat-Carrière montrent que ces échantillons contiennent des minéraux d'oxyhydroxyde de fer tels que la goethite qui pourraient à leur tour contenir des éléments traces associés aux ferromagnésiens, probablement liés aux caractéristiques redoximorphes (Tardy, 1993). Les

rapports Zr/Sc faibles dans les échantillons de Ngat-Plantation par rapport à ceux de Ngat-Carrière révèlent que Sc est plus riches dans les argiles du premier site par rapport à celles du site 2.

Les teneurs en LREE sont plus élevées que celles en HREE pour tous les matériaux. Les travaux de [Wood \(1990\)](#) et [Elderfield et al. \(1990\)](#) démontrent que l'abondance en LREE par rapport aux HREE serait due à la plus forte mobilité des HREE qui forment des ligands organiques et des minéraux, de complexes plus stables en solution que les LREE. Ce fait serait aussi dû à l'absorption préférentielle des LREE par les sols ([Gong et al., 2011](#)). La corrélation négative observée entre SiO<sub>2</sub> et Zr serait liée à une altération intense et à la formation de la kaolinite ([Nyeck et al., 2019](#)). Les valeurs faibles des éléments traces et terres rares sont probablement dû au fait que les matériaux argileux de Ngat proviennent de la surface du manteau d'altération dans un milieu humide ([Sababa et al., 2022](#)). Les spectres des terres rares sont superposables, ce qui montrerait que les matériaux ont une origine commune et les conditions de milieu sont semblables. Nous observons aussi de faibles anomalies positives en Ce qui rappelleraient que nous sommes dans les conditions oxydantes

## **II. PROPRIETES CERAMIQUE DES MATERIAUX DE NGAT**

L'aptitude d'une argile dans la fabrication des produits céramiques est déterminée par les propriétés physiques, minéralogiques et géochimiques du matériau à utiliser. Ces facteurs devront déterminer le comportement de l'argile lors du façonnage, du séchage et de la cuisson, avec une influence directe sur le produit façonné.

### **II.1. Propriétés physiques et évaluation céramique des argiles latéritiques de Ngat**

La distribution granulométrique et l'indice de plasticité des matériaux argileux sont des facteurs très importants pour déterminer l'adéquation à divers applications et une attention particulière doit être accordée à la fraction fine (< 2 µm) pour la céramique ([Dondi et al., 1998](#); [Abdelmalek et al., 2017](#)).

En technologie céramique, les argiles employées doivent répondre aux exigences granulométriques, chimiques et/ou minéralogiques afin d'obtenir des produits de bonne qualité ([Sigg, 1991](#)). La granularité du matériau influence la structure et le comportement de

ce dernier en construction (El Ouahabi, 2013). Plus la fraction fine est importante, plus le matériau est plastique.

La granulométrie étalée est favorable au bon compactage des produits finaux (Reeves et al., 2006). Les différentes textures rencontrées dans ces matériaux argileux démontrent une proportion importante de la fraction argileuse, qui peut agir comme liant et affecter significativement la résistance mécanique (Meimaroglou et Mouzakis, 2019). La forte teneur en sable et le manque de minéraux argileux pourraient être les principaux facteurs de la faible plasticité dans certains matériaux (Nzeukou Nzeugang et al., 2021). Cette grande quantité de sable dans ces matériaux influence directement la quantité de la phase amorphe après cuisson (Kamseu et al., 2007). Cette grande quantité de quartz reste après cuisson à moins de 1200°C et induit une résistance élevée en tant que charge (Ntouala et al., 2023). La distribution granulométrique montre une fraction sableuse considérable, ce qui est cohérent avec les données DRX et chimiques, qui indiquent une forte proportion de quartz. Une fraction argileuse allant jusqu'à 62 % sur le site de Ngat-Plantation peut entraîner des difficultés dans la fabrication des produits céramiques. Ces matériaux peuvent nécessiter des amendements en sables ou en limons, pour avoir une granulométrie adaptée à la production des matériaux de construction (Onana et al., 2019; Ntouala et al., 2023). D'autre part, le concassage et le tamisage peuvent être utilisés pour réduire la teneur en particules grossières dans les échantillons riches en sable, ce qui peut donner lieu à de meilleurs produits céramiques (Mahmoudi et al., 2008; Bennour et al., 2015). le diagramme de Winkler in Reeves et al., 2006 (figure 54) révèle que les matériaux de Ngat peuvent être utilisés dans les domaines des tuiles pour toits et briques pour maçonnerie, des briques perforées verticalement, des briques de décoration et certains matériaux n'appartiennent à aucun domaine donc sont hors champ dans ce diagramme.

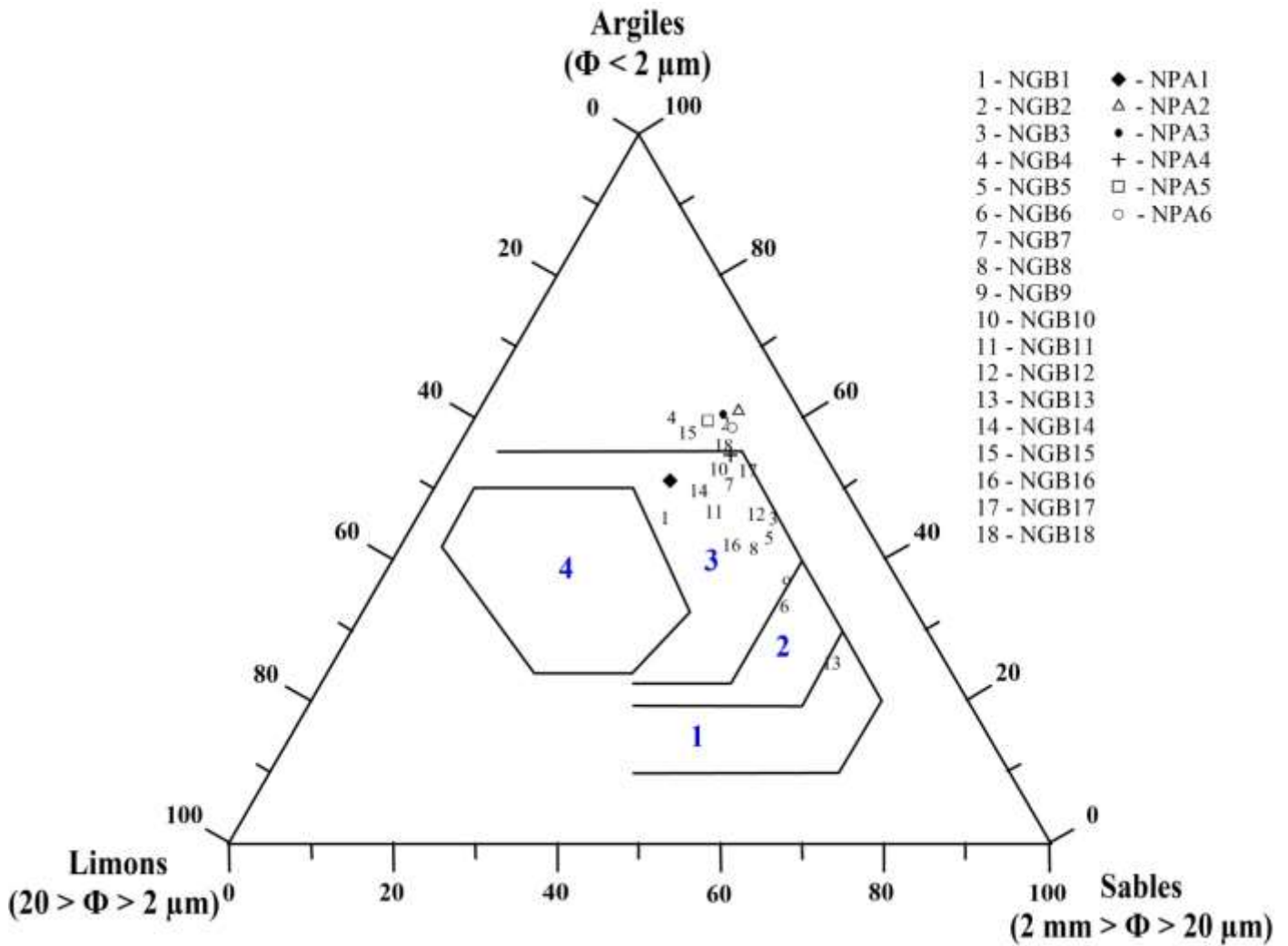


Figure 54: Position des matériaux de Ngat dans le diagramme de Winkler *in Reeves et al., 2006*, (1: Briques de décoration; 2: briques verticalement perforées; 3: tuiles et briques de construction; 4: briques creuses).

La projection des matériaux argileux de la localité de Ngat dans le diagramme de McNally (1998), montre que la majorité (22 échantillons) des matériaux tombe dans le domaine des matériaux non applicables. Deux matériaux sortent du lot et se retrouvent dans les domaines des briques pleines et des briques perforées (Figure 55).

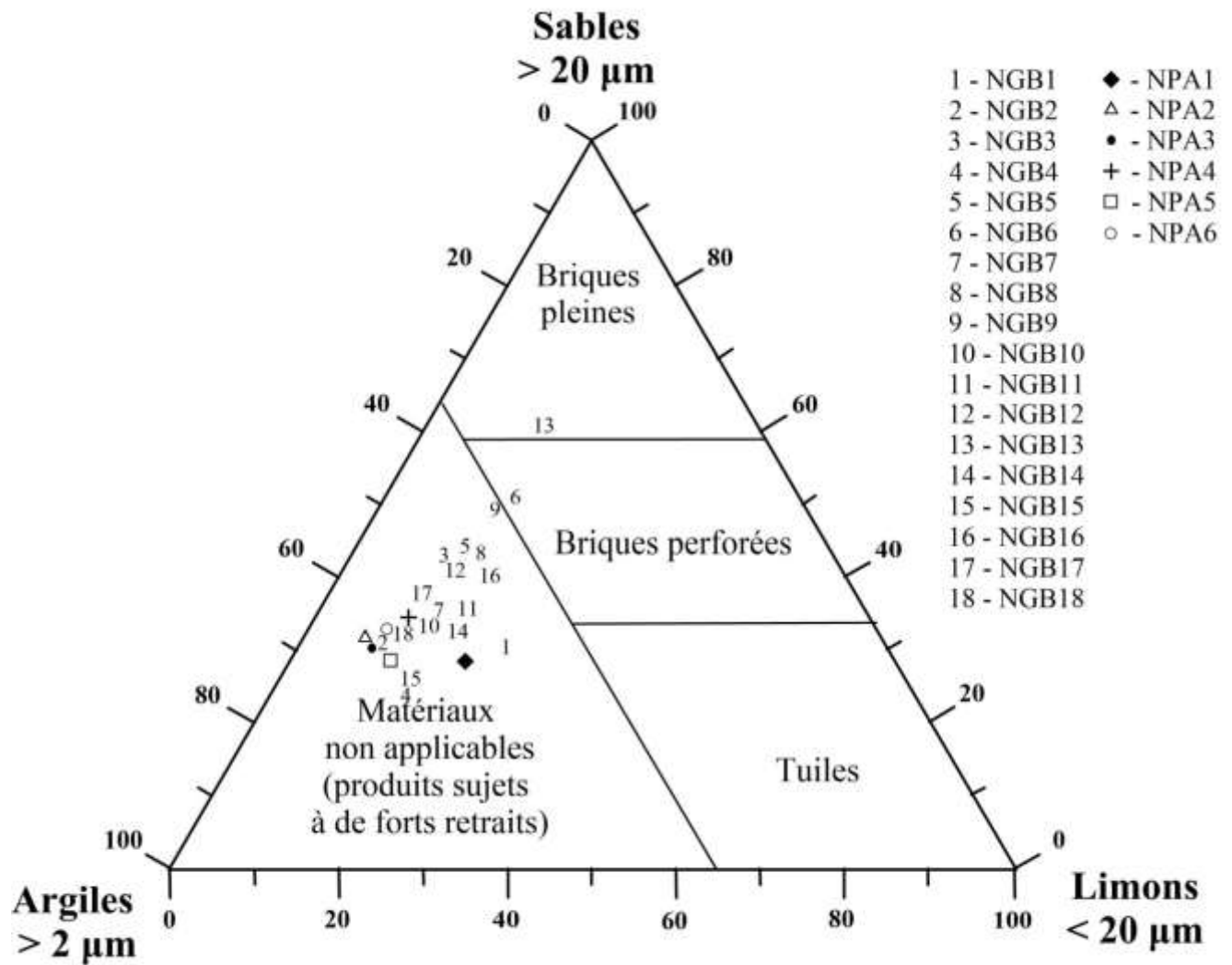


Figure 55: Projection des matériaux de Ngat dans le diagramme de McNally, (1998).

La plasticité des matériaux est influencée par le pourcentage élevé en particules fines (argile et limon). Elle dépend à la fois de la taille des particules et de la composition minéralogique (McNally, 1998). De même, Abdullahi et al. (2012) ont montré que la plasticité des argiles est attribuée à leur dominance en kaolinite et à leur forte teneur en matières organiques. Les valeurs élevées de l'indice de plasticité sont en accord avec la granulométrie fine identifiée dans ces argiles. Pour des raisons pratiques, l'indice de plasticité des matières premières doit être supérieur à 10 % qui est le seuil en dessous duquel la matière première n'est pas adaptée à l'utilisation dans l'industrie céramique (Abajo, 2000). Les matériaux argileux ayant un indice de plasticité < 10 % peuvent provoquer des caractéristiques dimensionnelles inappropriées et même des fissures dans les produits

fabriqués pendant le processus d'extrusion et ne sont pas indiqués pour la production des matériaux de construction en raison de la variation possible de la quantité d'eau d'extrusion (Abajo 2000; Elimbi et al., 2011). Leur plasticité peut être améliorée en ajoutant des minéraux argileux à haute plasticité sous forme de smectite en très petite quantité (Nzeukou Nzeugang et al., 2021). Les matériaux argileux de Ngat avec des valeurs d'indice de plasticité supérieures à 10 % conviennent à l'industrie des briques et des tuiles. Les valeurs des limites de plasticité élevées de ces matériaux permettent un séchage plus difficile des produits de cuisson. Ces valeurs de LP élevées sont également importantes pour les applications car elles indiquent la teneur minimale en humidité nécessaire pour atteindre l'état plastique (Celik, 2010). Comme le montre le diagramme de Marsigli et Dondi, 1997 (figure 56), il apparaît que des matériaux analysés, un seul est situé à l'intérieur de la zone d'extrusion optimale, les autres dans les zones d'extrusion acceptable et optimale et d'extrusion acceptable. D'après ce même diagramme, ces matériaux peuvent servir à la fabrication des briques pour certains et pour la poterie pour d'autres.

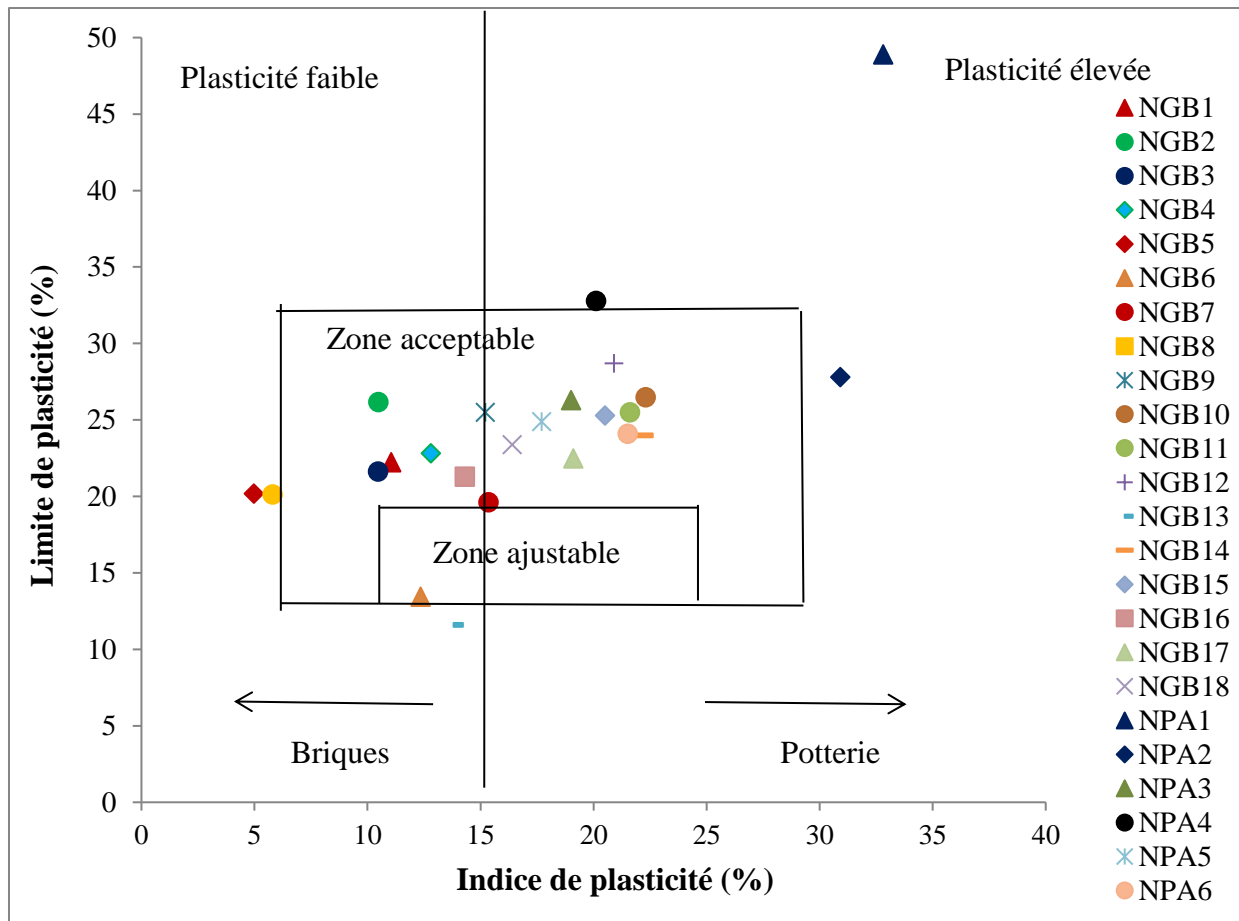


Figure 56: Position des matériaux argileux dans le diagramme de plasticité de Marsigli et Dondi (1997).

La matière organique contribue à l'augmentation de la porosité des produits céramiques et son effet est jugé négatif lorsqu'elle est présente en fort pourcentage (Christidis, 2011). Les matériaux argileux étudiés ont une faible teneur en matière organique et conviennent à la production de briques. D'après les auteurs tels que Touogan Toulak et al. (2015); Doum et al. (2020), les matériaux pauvres en matière organique sont géotechniquement qualifiés de matériaux inorganiques. Pour les briques de haute qualité, la teneur en matière organique doit être inférieure à 2 % (Mango Itulamy et al., 2019). Une grande quantité de matière organique agit comme un agent porogène induisant des structures poreuses (Arslan et al., 2021).

Les valeurs de la capacité d'échange cationique sont également faibles, probablement lié à la composition minéralogique des échantillons (Doum et al., 2020). Les faibles proportions de matière organique ( $MO < 2$ ) sont en accord avec les faibles valeurs de capacité

d'échange cationique (Meimaroglou et Mouzakis 2019) et sont bonnes pour la céramique. Les valeurs de la présente étude, sont indicatives de l'abondance de kaolinite comme le montrent les spectres infrarouges (Mbey et al., 2021), avec de la chlorite accessoire et une faible teneur en matière organique. La CEC fournit une corrélation plus forte avec la résistance à la compression et le retrait linéaire que la teneur en argile et l'indice de plasticité (Meimaroglou et Mouzakis 2019). Ces données sont inférieures de celles retrouvées dans les matériaux argileux de Douala (Kankao et al., 2022). Etude au cours de laquelle les valeurs de la matière organique et de la capacité d'échange cationique sont élevées. Ceci est dû à la nature kaolinitique et illitique des matériaux argileux de Douala étudiés par ces auteurs.

## II.2. Propriétés mineralogiques et évaluation ceramique des matériaux argileux de Ngat

De nombreuses études ont montré que la composition minéralogique d'un matériaux argileux joue un rôle important dans son choix pour des applications industrielles (Tsozué et al., 2017). Dans les matériaux de Ngat, la plus part des pics principaux correspondent au quartz ce qui suggère une teneur élevée en silice (Tsozué et al., 2017). L'abondance du quartz observée pourrait être attribuée à la résistance de ce minéral aux intempéries et simplement à la libération de la silice par les silicates d'origine (Nzeukou Nzeugang et al., 2013). La présence de la kaolinite dans ces matériaux suggère que la monosiallisation est un processus cristalochimique agissant dans la zone d'étude (Pédro, 1966; Tsozué et al., 2017). La combinaison de la kaolinite et du quartz dans un matériau lui confère une bonne capacité à façonner et sécher les produits céramiques en terre cuite (Kornman, 2005; Kagonbé et al., 2021). D'après ces mêmes auteurs, la quantité élevée de la kaolinite dans la matière première argileuse augmente la plasticité et la vitrification des produits céramiques. La présence de la goethite même en faible quantité peut refléter une origine détritique (Lajoie et Chagnon, 1973). Par ailleurs, la proportion importante de kaolinite ainsi que la présence du quartz montrent le caractère acide des roches du milieu environnant (Velde, 1993).

La minéralogie des éprouvettes cuites est cohérente avec celle des matières premières en raison de la conversion de certaines phases lors du traitement thermique. Par exemple, l'hématite se forme à partir de la conversion de la goethite à 250°C (Ruan et al., 2001, 2002 ; Gialanella et al., 2010). La disparition de la kaolinite est due à la conversion en métakaolinite à des températures > 600°C, ce qui conduit ultérieurement à la cristallisation et à la vitrification de la mullite (Lee et al., 2008 ; Wang et al., 2017).

L'analyse thermique différentielle (ATD) a relevé à basse température, des pics endothermiques et exothermiques caractéristiques des kaolinites faiblement cristallisées (Horvath, 1985 in Ngon Ngon, 2007). La perte de masse retrouvée entre 48-58°C correspond à la perte d'eau adsorbé (Hu et Yang, 2013; Mache et al., 2013; Ndjigui et al., 2015, 2021). La troisième et la quatrième phase sont attribuées à la perte d'eau provoquée par la déshydroxylation de la kaolinite (Nzeukou Nzeugang et al., 2013).

### II.3. Propriétés géochimiques et évaluation céramique des matériaux argileux de Ngat

La forte proportion en SiO<sub>2</sub> et les faibles proportions en oxydes fondants (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O + CaO + MgO < 2,5 %) peuvent provoquer un frittage insuffisant pendant le processus de cuisson (Alcântara et al., 2008; Onana et al., 2019). La proportion considérable de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contribue à améliorer la résistance mécanique des briques car elles peuvent être transformées en mullite lors du processus de vitrification (Ukwatta et Mohajerani, 2017). Le rapport SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> est inférieur à 4 et montre la prédominance silicique des matériaux étudiés et la proportion expressive du quartz (Lahcen et al., 2014). La faible teneur en oxydes alcalins dans tous les matériaux est une conséquence des argiles kaolinitiques qui ont naturellement une faible teneur en fondants (Monterio et Vieira, 2004) et de l'absence d'autres minéraux argileux comme l'illite, mais aussi des carbonates (Nzeukou Nzeugang et al., 2021). La faible proportion d'oxydes de flux peut entraîner une faible formation de la phase vitreuse lors de la cuisson (Ntoulala et al., 2016; Roudouane et al., 2020). Dans ce cas, les matériaux étudiés ne sont pas adaptés à la production de matériaux vitreux mais conviennent à la fabrication de briques et de tuiles. L'oxyde de fer outre son rôle de fluxant, explique la couleur des produits cuits (Kornmann, 2005) et plus précisément la couleur rougeâtre caractéristique (Bomeni et al., 2018). Des teneurs modérées en oxyde de fer (2-7 %) conviennent à la production de brique, de faibles teneurs (< 2 %) induisent la couleur blanche ou blanchâtre après cuisson et permet la fabrication de la porcelaine, de sanitaires et/ou arts de la table (Reeves et al., 2006). Cependant, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> n'est pas le seul oxyde responsable de la coloration des produits céramiques, car d'autres constituants tels que CaO, MgO, MnO et TiO<sub>2</sub> peuvent altérer de manière significative la couleur des terres cuites (Kreimeyer, 1987). CaO pourrait induire des nuances jaunâtres et rosées; MgO n'est pas chromophore; et MnO à forte teneur pourrait induire une couleur brune (Dondi et al., 2014). Le diagramme ternaire SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO+CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O de Fiori et al. (1989) (figure 57) révèle que la majorité de matériaux argileux de la zone d'étude est adaptée à la fabrication de tuiles et carreaux de

grès. Par contre, certains autres matériaux n'appartiennent à aucun domaine du dit diagramme. Ces teneurs en oxyde de fer couplées aux faibles teneurs en oxydes alcalins et alcalino-terreux conditionneront la fusibilité et donc l'aptitude à donner des produits suffisamment grésés pour présenter des caractéristiques (porosité, perméabilité et résistance mécanique) satisfaisantes.

Les traces de sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) et la faible teneur du potassium ( $\text{K}_2\text{O}$ ) suggère un lessivage en base élevé pendant le processus de mise en place des formations argileuses. Ces oxydes connus sous le nom d'alcali agissent comme des fondants de basse température en céramique ( $900^\circ\text{C}$ ), et leur présence favorise une diminution de la porosité des produits cuits à haute température (Kamseu et al., 2007; Baccour et al., 2008). Leurs teneurs relativement faibles ( $< 1,5\%$ ) sont souhaitables pour les produits blancs de haute qualité (Manning, 1995; Reeves et al., 2006).

#### **II. 4. Propriétés technologiques des produits céramiques**

Le son légèrement métallique des matériaux après cuisson est principalement dû à un mauvais frittage causé par une faible teneur en oxydes fondants et à une forte teneur en sable (Melo et al., 2001).

Les valeurs de retrait linéaire sont inférieures à 5 % pour les matériaux de Ngat-Carrière à toutes les températures. Ceux de Ngat-Plantation ont les valeurs du RL inférieures à 5 % pour les températures inférieures à  $1100^\circ\text{C}$ . Ces faibles valeurs du retrait linéaire dans ces matériaux sont dues à la seule présence de la kaolinite qui a une faible teneur en eau sous forme d'argile (Tardy, 1993; Andrade et al., 2011). De plus la teneur élevée en quartz et en fraction sableuse conduit à un faible RL car ce minéral passe de l'alpha à bêta autour de  $573^\circ\text{C}$  (El Ouahabi et al., 2018; Guzlena et al., 2019). D'après les travaux de Guzlena et al., 2019, le sable assure la formation de canaux gazeux, le laminage et le contrôle du retrait, ce qui contribue également à la réduction de l'apparition de fissures lors de la cuisson. Après cuisson à 800, 900 et  $1100^\circ\text{C}$ , les valeurs du RL restent inférieures à 5 %, ce qui est l'exigence minimale pour les matières céramiques traditionnelles (Millogo et al., 2011). Les faibles valeurs de RL sont cohérentes avec l'assemblage minéralogique des matières premières, qui sont pauvres en agents fondants, conduisant à une formation limitée d'une phase vitreuse (Enock et al., 2024). Par conséquent, la principale cause du retrait linéaire dans ces matériaux est la diffusion capillaire, qui libère des molécules d'eau hors de la structure pendant la cuisson. La déshydratation des minéraux oxyhydroxydes tels que la goéthite et les

minéraux argileux sont les principales sources de faibles valeurs du retrait linéaire (He et al., 2012).

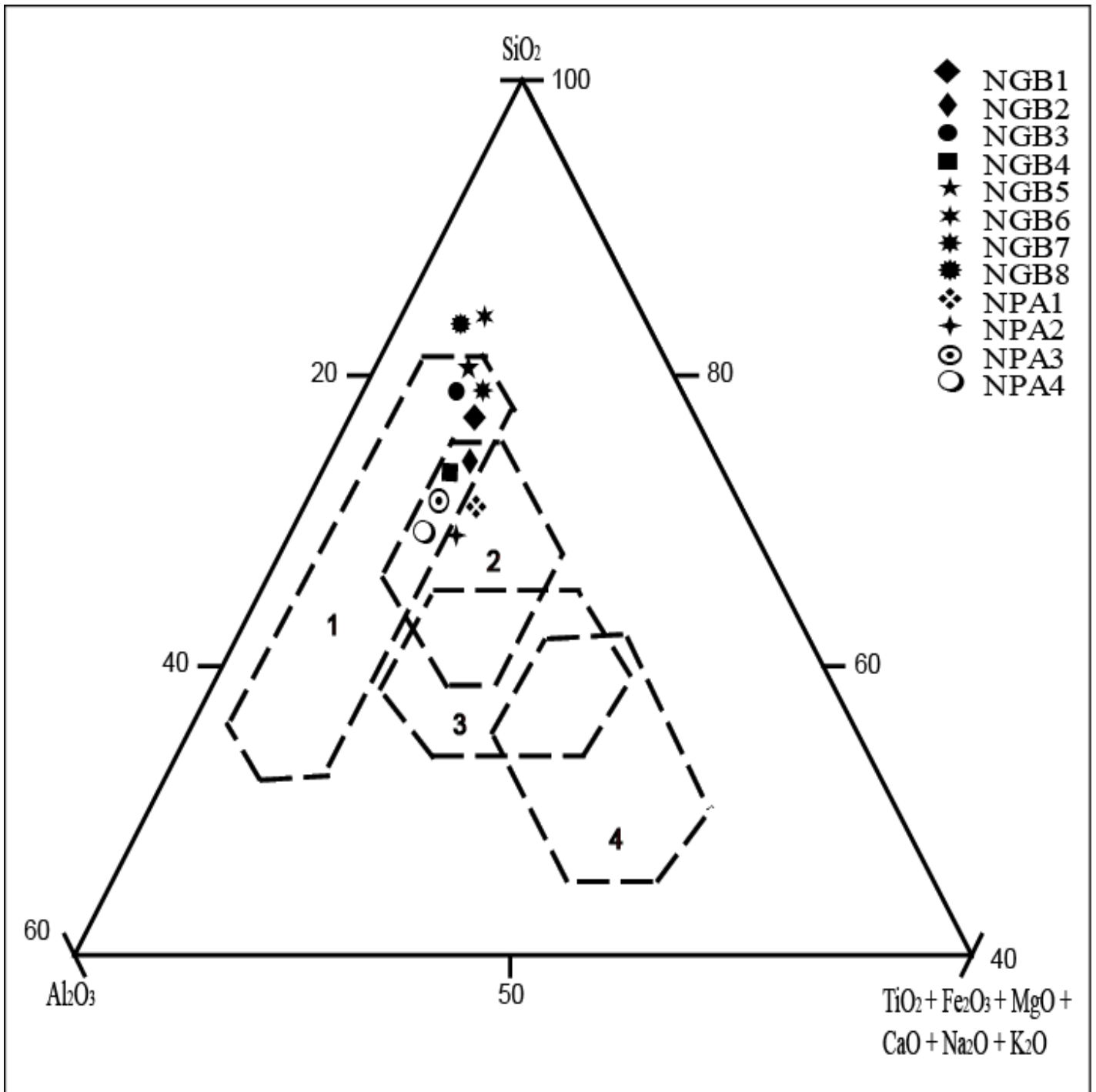


Figure 57: Position des matériaux argileux dans le diagramme ternaire  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  de Fiori et al. (1989), 1 et 2 : tuiles et carreaux; 3 et 4 : tuiles poreuses

En effet les minéraux argileux tels que la kaolinite contiennent moins d'eau entre leurs couches et donc peu de gonflement lorsqu'ils sont immergés dans l'eau, contrairement aux

argiles gonflantes de types smectite. Lors du séchage, les matériaux riches en kaolinite subissent un retrait faible (Tardy, 1993; Andrade et al., 2011).

La perte de masse évolue très faiblement et ceci peut être attribué à l'élimination des matières organiques par combustion de l'eau par deshydratation lors de la cuisson.

La diminution de l'absorption d'eau avec la température est associée à la formation d'une phase vitreuse qui pénètre dans les pores en les fermant et en isolant les pores voisins (Celik, 2010). Cette diminution est plus prononcée pour les éprouvettes cuites à 1100°C (Celik, 2010; Ngun et al., 2011). La Valeur la plus faible du taux d'absorption d'eau est observée dans l'échantillon NPA2. Cette faible valeur est liée à la teneur en argile la plus élevée de cet échantillon, dont la transformation en mullite lors de la cuisson a gênée l'évolution de l'absorption d'eau (Onana et al., 2019). Le comportement global de l'absorption d'eau est également dû à la faible teneur en matière organique, qui ne conduit pas à une porosité secondaire après la cuisson (Arslan et al., 2021). L'absorption d'eau est inférieure à 20 % pour la majorité des éprouvettes cuites à 1000 et 1100°C, ce qui indique que les argiles de Ngat peuvent être utilisées pour la fabrication des briques et les tuiles selon la classification brésilienne (Sousa et al., 2002; Ngun et al., 2011).

Les valeurs des résistances à la flexion ( $\sigma_f$ ) augmentent avec les températures de cuisson comme indiqué dans des études précédentes (Roudouane et al., 2020; Onana et al., 2019). Ces augmentations sont évidemment associées à une densification accrue pendant le frittage et aussi par la prédominance de la kaolinite dans les argiles brutes et leur comportement réfractaire entre 800 et 1050°C qui est associé à une mauvaise consolidation et un frittage dans les mécanismes à l'état solide et visqueux (Vieira et al., 2008). La cuisson favorise la vitrification et la formation de phases plus denses telles que la mullite (Buchner et al., 2021 ; Debnath et al., 2022). Cette augmentation est cohérente avec la conversion de la métakaolinite en mullite lors de l'augmentation de la température (Nzeukou Nzeugang et al., 2018), comme le montre les DRX des produits cuits. La densification apportée à la mullite associée au quartz et à l'hématite est responsable de l'augmentation de la résistance à la flexion et de la diminution de l'absorption d'eau (Onana et al., 2019). Ces faibles valeurs de la résistance à la flexion reflètent probablement un mauvais frittage associé à des températures de traitement relativement basses défavorables au frittage (Fadil-Djenabou et al., 2015). Selon la norme brésilienne (Souza et al., 2002), Les valeurs élevées de la résistance à la flexion des certains matériaux ( $\sigma > 2\text{Mpa}$ ) montrent que ceux-ci peuvent être utilisés pour la fabrication des briques structurelles. En revanche, les éprouvettes ont à 800°C les valeurs de la résistance

à la flexion inférieures à 2 Mpa, elles ne sont donc pas utilisables à la production des briques. Ces valeurs peuvent être améliorées grâce à une augmentation du temps de durcissement ou par ajout de flux pour la formation de la phase vitreuse (Roudouane et al., 2020). Pour l'utilisation de ces matériaux dans la construction, les températures de cuisson recommandées sont de 900 et 1000°C en raison du retrait linéaire élevé à 1100°C qui peut provoquer des déformations importantes des produits cuits. Selon Mbumbia et al. (2000), cette température peut être atteinte par les fours traditionnels au Cameroun.

### III. INFLUENCE DE L'EFFET DE LA CENDRE SUR LES PROPRIÉTÉS DES BRIQUES DE TERRE CUITES

La cendre de bois est composée de CaO qui est principalement due à la phase de la calcite à haute teneur. Elle est également constituée de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O et MgO. On suppose qu'à mesure que la température augmente, le carbonate dans l'argile se transforme en CaO et libère du CO<sub>2</sub>. Les teneurs en agents fondants à la fois dans le matériau argileux et dans la cendre pourraient abaisser la température de cuisson (Cultrone et Sebastian, 2009 ; Sukkae et al., 2018. Srisuwan et al., 2020).

A partir de 800°C la coloration des éprouvettes mélangées à la cendre de bois devient brun jaunâtre. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et CaO pourraient être dans ces matières premières, ce qui expliquerait cette couleur (Kpangni et al., 2008; Hajaji et al., 2010; Nzeukou Nzeugang, 2014). La couleur des éprouvettes devient plus foncée à l'ajout de 10 % de la cendre (Eliche et Leite, 2016). Le retrait linéaire diminue avec l'ajout de la cendre de bois. Cela pourrait être dû à la porosité résultant de la décomposition du carbonate en CO<sub>2</sub> et CaO lors de la cuisson, car la teneur organique des cendres est bien inférieure à celle des argiles (Fadil-Djenabou et al., 2023).

L'absorption d'eau est un facteur clé affectant la durabilité des briques. Une faible absorption d'eau implique une durabilité et une résistance élevée à l'environnement naturel. L'augmentation de la teneur en cendre dans les matériaux argileux entraîne une augmentation de l'absorption d'eau. La teneur en absorption d'eau est plus élevée dans les éprouvettes avec ajout de 10 % de cendre de bois par rapport au matériau naturelle et aussi aux autres formulations. Cette augmentation pourrait s'expliquer par le fait que l'ajout de la cendre affaiblit les propriétés plastiques (Lingling et al., 2005; Eliche et Leite. 2016).

Les valeurs de la résistance à la flexion sont améliorées suite au mélange avec la cendre. Ceci se justifie par le fait que cette cendre est riche en oxydes fondants (K<sub>2</sub>O, CaO,

Na<sub>2</sub>O). Ces oxydes provoquent une vitrification et une densification des briques ([Ndjigui et al., 2021](#); [Kessoum et al., 2023](#); [Ntouala et al., 2023](#)).



# CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

*«Faisons le bien sans nous laisser gagner par le découragement. Car si nous ne relâchons pas nos efforts, nous récolterons au bon moment», Galates 6: 9.*

---

Ce mémoire est un apport à une meilleure connaissance des matériaux argileux industriels du Cameroun. Le secteur étudié concerne la localité de Ngat dans le plateau sud camerounais. Les données présentées dans le cadre de ce travail sont à coup sûr limitées pour une briqueterie à grande échelle. Ces données découlent d'une évaluation estimative basée sur des moyens limités (travail de recherche universitaire, sondages à la faveur de la tarière manuelle, quelques mini-puits par endroits). Cependant, Ce travail présente un intérêt scientifique, industriel et contribue à la mise en valeur des matériaux locaux de la région concernée.

### **Propriétés physico-chimiques**

L'étude de la distribution de la taille des particules des matériaux argileux de Ngat donne trois fractions granulométriques à savoir l'argile, le limon, et le sable. La proportion de chacune de ces fractions est variable d'un échantillon à un autre. Les proportions en argiles sont plus élevées dans les deux sites. Les limons sont dominants dans le site de Ngat-Carrière. L'indice de plasticité révèle le caractère faiblement à moyennement plastique des matériaux étudiés. Les limites de liquidité très élevées de certains matériaux du site de Ngat-Plantation seraient néfastes dans la fabrication des produits de terre cuite car ils pourraient entraîner des déformations. Les valeurs du CEC, de la MO, demeurent faibles.

### **Propriétés minéralogique et géochimique**

Les analyses minéralogiques (DRX, ATD/ATG, IR) ont montré que les matériaux argileux de la localité de Ngat sont des argiles à dominance kaolinitique. D'autres minéraux comme le quartz, l'anatase, la goethite et la gibbsite sont également présents.

Sur le plan géochimique, ces matériaux ont des proportions importantes en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{TiO}_2$ . Ces oxydes sont probablement issus des roches métamorphiques constituant le socle de la région. Les rapports massiques  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  sont autour de 5 pour certains échantillons, suggérant la présence d'une quantité importante de silice libre due probablement à un apport détritique assez important dans ces matériaux. Pour certains échantillons, ce rapport autour de 3 indique leur appartenance au groupe des «ball clays» commerciales recherchés pour amender les terres argileuses non fusibles dans le domaine de la briqueterie voire utilisables pour la préparation de carreaux en grès qui sont des matériaux propices pour la céramique. L'absence ou trace de sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) et la faible teneur du potassium ( $\text{K}_2\text{O}$ ) suggère un lessivage en base élevé pendant le processus de mise en place

des formations argileuses. Cependant le taux de fer (> 4 %) classe ces matériaux argileux dans la gamme des "plastic red clays" pour divers céramiques rouges.

### **Aptitude des matériaux de Ngat pour la fabrication des produits de terre cuite**

Les matériaux argileux utilisés dans la fabrication des produits de terre cuite doivent répondre aux exigences granulométriques, chimiques et/ou minéralogiques. Les textures sablo-argileuses, les faibles teneurs en CEC, en MO et des valeurs de l'indice de plasticité supérieures à 10 % pour les matériaux étudiés les rendent aptes pour la céramique. Lors de la cuisson, la transformation de la métakaolinite en mullite augmente la résistance à la flexion et diminue l'absorption d'eau, même si la faible proportion d'oxydes fondants entraîne un frittage insuffisant. Les valeurs de la résistance à la flexion les plus élevées sont obtenues à 1100°C, mais le retrait linéaire supérieur à 5 % à cette température pour les matériaux de Ngat-Plantation peut provoquer une déformation des produits finaux.

Des cendres de bois de Ilomba ont été utilisées en mélange avec l'échantillon NPA4 du site de Ngat-Plantation pour la préparation des briques cuites, et les effets de la proportion des cendres dans les mélanges sur les propriétés physiques et mécaniques cuites ont été étudiés. L'incorporation de la cendre est limitée en raison de l'augmentation de l'absorption d'eau. En particulier, l'absorption d'eau et la résistance à la flexion des briques avec l'ajout de jusqu'à 10 % de cendre de Ilomba sont bonnes pour satisfaire aux normes de construction de briques de terre cuites.

A la fin de cette étude, les travaux effectués ont permis d'étudier, sur le plan morphologique, physico-chimique et technologique, les matériaux argileux de la localité de Ngat. Toutefois quelques axes mériteraient d'être développés dans les travaux futurs:

- une caractérisation des briques cuites à des températures supérieures à 1200°C pour apporter des informations technologiques complémentaires;
- évaluer la réserve de ces matériaux et voir si cela pourrait aboutir à une exploitation industrielle;
- explorer d'autres applications industrielles (cosmétique, pharmaceutique, traitement des eaux, boue de forage, charges minérales).

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

*«Fortifiez-vous et ayez du courage ! Ne craignez point et ne soyez point effrayés devant eux ; car l'Eternel, ton Dieu, marchera lui-même avec toi, il ne te délaissera point, il ne t'abandonnera point», Deuteronomie 31: 6.*

---

- Abajo, M.F., 2000. Manual Sobre Fabricación de Baldosas, Tejas y Ladrillos. Edition Beralmar Espanha, 360 p.
- Abdelhak, A., Abdallah, S., Redouane, M., Taoufik, R., Moussa, G., 2007. Caractéristiques structurales et mécaniques de céramiques à base d'argiles: influence de la source de feldspath. *Comptes Rendus de Chimie* 10, 502-510.
- Abdelmalek, B., Bouazi, R., Bouftouha, Y., Bouabsa, L., Fagel, N., 2017. Mineralogical characterization of neogene clay areas from the Jijel basin for ceramic purposes (NE Algeria-Africa). *Applied Clay Science*, 136, 176-183.
- Abdullahi, Y., Ali, E.A., Oyeyemi, S., 2012. A Study of the Physico-Chemistry and Mineralogy of Agbaja Clay for Its Industrial Application. *Chemical Journal* 3, 53-60.
- Absar, N., Sreenivas, B., 2015. Petrology and geochemistry of greywackes of the -1.6 Ga Middle Aravalli Supergroup, Northwest India: evidence for active margin processes. *International Geology Review* 57(2), 134-158.
- ADECOL., 1997. Rapport consolidé des diagnostics de la commune de Mbalmayo. 117 p.
- Afeez Adefemi, B., 2012. Regression analysis between properties of subgrade lateritic soil. *Leonardo Journal of Sciences* 21, 99-108.
- Agridoc., 2004. Fabrication de blocs stabilisés: Synthèse technique. Paris: Agridoc
- Akpokodje, E-G., 1985. The stabilization of some arid zone soils with cement and lime. *Quarterly Journal of Engineering Geology London* 18, 173-180.
- Allègre, J., 2012. Les silicates d'alumines (argiles) en thérapeutique, une pratique coutumière ancienne relayée dans la médecine moderne. Mémoire de thèse, faculté de médecine de Bobigny, Léonard de Vinci, Université de Paris XIII, 96 p. + Annexes.
- Alcântara, A., Beltrão, M., Oliveira, H., Gimenez, I., Barreto, L., 2008. Characterization of ceramic tiles prepared from two clays from Sergipe-Brazil. *Applied Clay Science* 39, 160-165.
- Alviset, L., 2005. Matériaux de terre cuite. Techniques de l'ingénieur, 25 p.
- Andrade, F.A., Al-Qureshi, H.A., Hotza, D., 2011. Measuring the plasticity of clays: a review. *Applied Clay Science* 51 (1-2), 1-7.

- Arslan, C., Gencil, O., Borazan, I., Sutcu, M., Erdogmus, E., 2021. Effect of waste-based micro cellulose fiber as pore maker on characteristics of fired clay bricks. *Construction of Building Materials* 300, 124298
- ASTM F 417., 1996. Standard Test Methods for Flexural Strength (Modulus of Rupture) of Electronic-Grade Ceramics. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 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 D7348., 2008. Standard Test Methods for Loss on Ignition (LOI) of Solid Combustion Residues. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Assako Assako, R.J., 1997. Éléments pour un système d'information géographique urbain. Rapport d'étude, 61 pages.
- Baccour, H., Medhioubb, M., Jamoussic, F., Mhiria, T., Daouda, A., 2008. Mineralogical evaluation and industrial applications of the Triassic clay deposits, Southern Tunisia. *Materials Characterization* 59, 1613-1622.
- Baccour, H., Medhioub, M., Jamoussi, F., Mhiri, T., 2009. Influence of firing temperature on the ceramic properties of Triassic clays from Tunisia. *Journal of Materials Processing Technology* 209, 2812-2817.
- Bagnouls, F., Gaussen, H., 1957. Les climats biologiques et leur classification. *Annale Géographique XXVI*, 355, 193-220.
- Bah, B., Engels, P., Collinet, G., 2005. Légende de la carte numérique des sols en Wallonie (Belgique) sous la direction scientifique de Bock, L, avec la collaboration de Bracke, C ; Verron, P, 55 p.
- Baïlon, J.P., Dorlot, J.M., 2000. Des minéraux. 3ème édition, Montréal: *Presses Internationales Polytechniques*, 736 p.
- Baize, D., 1988. Guide des analyses courantes en pédologie. Edition INRA Paris., 172 p.

- Bayiga, E.C., Bitom, D., Ndjigui, P-D., Bilong, P., 2011. Mineralogical and geochemical characterization of weathering products of amphibolites at SW Eséka (Northern border of the Nyong unit, SW Cameroon). *Journal of Geology and Mining Research* 3 (10), 281-293.
- Bekoa, E., 1994. Etude pétrologique et géochimique d'une couverture pédologique sur gneiss en zone forestière de l'Extrême Sud Cameroun: relation avec la dynamique du fer. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Yaoundé, 187 p.
- Bennour, A., Mahmoudi, S., Srasra, E., Hatira, N., Boussen, S., Ouaja, M., Zargouni, F., 2015. Identification and traditional ceramic application of clays from the Chouamekh region in south-eastern Tunisia. *Applied Clay Sciences* 118, 212-220.
- Bergaya, F., Theng, B.K.G., Lagaly, G., 2006. Developments in Clay Science 1, Handbook of Clay Science, Chapter 10, Elsevier.
- Berton, Y., Le Berre, P., 1983. Guide de prospection des matériaux de carrière. Manuels et Méthodes NRGM, N5, BRGM, Orléans Edition, France, 160 p.
- Bhuiyan, M.A.H., Rahman, M.J.J., Dampare, S.B., Suzuki, S., 2011. Provenance, tectonics and source weathering of modern fluvial sediments of the Brahmaputra-Jamuna River, Bangladesh: influence from geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration* 3 (3), 113-137.
- Bilong, P., 1988. Genèse et développement des sols ferrallitiques sur syénite alcaline potassique en milieu forestier du Centre-Sud Cameroun : comparaison avec les sols ferrallitiques développés sur roches basiques. Thèse Doctorat d'Etat, Université de Yaoundé, 367 p.
- Bitom, D., 1988. Organisation et évolution d'une couverture ferrugineuse en zone tropicale humide (Cameroun). Genèse et transformation d'ensembles ferrugineux indurés profonds. Thèse de doctorat Université de Poitiers, 164 p.
- Bomeni, I.Y., Njoya, A., Ngapgue, F., Wouatong, A.S.L., Yongue, F.R., Kamgang, K.V., Fagel, N., 2018. Ceramic with potential application of Ngwenfon alluvial clays (Noun, West Cameroon) in building construction: Mineralogy, physicochemical composition and thermal behavior. *Construction and Building Materials*, 182, 493-503.

- Bormann, P., 2004. *Ceramics and more than clay alone*. Cambridge International Science Publishing, 373 p.
- Bouassida, R., Boussetta, R., 2007. *Manuel de travaux pratiques de mécanique des sols*. Centre de publication universitaire, Tunis - Tunisie, 116 p.
- Bouaziz, R., Rollet, A. P., 1972. *L'analyse thermique: l'examen des processus chimiques*. Paris: Gauthier-Villars, tome 2, 227 p.
- Brindley, G.W., Chih-Chun, K., Harrisson, J.L., Lipsicas, M., Raythatha, R., 1986. Relations between structural disorder and other characteristics of kaolinites and dickites. *Clays and Clay Minerals* 34, 239-249.
- Buchner, T., Kiefer, T., Königsberger, M., Jäger, A., Füssl, J., 2021. Continuum micromechanics model for fired clay bricks: Upscaling of experimentally identified microstructural features to macroscopic elastic stiffness and thermal conductivity. *Materials and Design* 212, 110212
- BUCREP., 2005. *Répertoire actualisé des villes du Cameroun. Troisième recensement générale de la population et de l'habitat du Cameroun. Vol. IV-Tome 07*, 436 pages.
- Caillère, S., Henin, S., 1985. *Minéralogie des argiles*. Edition Masson et Cie; Chapitre 1, 15-26.
- Callaud, M.J., 2004. *Cours de mécanique des sols. Tome I: Propriétés des sols*. Groupe EIER-ETSHER, 137 p.
- Casagrande, A., 1948. Classification and identification of soils. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.* N° 113, 783-810.
- Celik, H., 2010. Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry. *Applied Clay Science* 50, 245-254.
- Ceratec., 1997. *Comportement des matières premières au cours du séchage et à la cuisson. Les défauts de cuisson. Formation professionnelle continue, Centre Technique des Tuiles et Briques, Touquet, Ploegsteert*.
- Charié, J.C., 2007. *ABC de l'argile*. Grancher, Paris, 240 p.
- Christidis, G.E., 2011. Industrial clays. European mineralogical Union, *Notes in mineralogy* 9(9), 341-414.

- Claudio de Oliveria., Adriano, M B., 2008. Determination of clay plasticity: Indentation method versus Pfefferkorn method. *Applied Clay Science* 40, 15-19.
- Costet, J., Sanglerat, G., 1981. Cours pratiques de mécanique des sols. Tome 1 : Plasticité et calcul des tassements. Edition Dunod, Paris, 339 p.
- Cox, R., Lowe, D.R., Cullers, R.L., 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochemical and Cosmochimical Acta* 59, 2919-2940.
- Cultrone, G., Sebastian, E., 2009. Fly ash addition in clayed materials to improve the quality of solid bricks. *Construction of building materials* 23(2), 1178-1184.
- Debnath, N.K., Pabbisetty, V.K., Sarkar, K., Singh, A., Majhi, M.R., Singh, V.K., 2022. Preparation and characterization of semi-silica insulation refractory by utilizing lignite fly ash waste materials. *Construction and Building Materials* 345, 128321.
- Delaune, M., Reiffsteck, M., Feller, C., 1991. L'analyse granulométrique de sols et sédiments à l'aide du microgranulomètre «Sedigraph 5000 ET». Comparaison avec la méthode « pipette Robinson». *Cahiers ORSTOM Pédologie* 26, N°2(2), 183-189.
- Delbecque, C., 2011. Histoire de la construction en terre, 205 p.
- Dextreit, R., 1997. L'argile qui guérit. Memento de médecine naturelle. Éditions vivre en harmonie. 20 pages.
- Djangang, C.N., Elimbi, A., Melo, V.C., Lecomte, G.L., Nkoumbou, C., Soro, J., Bonnet, J.P., Blanchart, P., Njopwouo, D., 2008. Sintering of clay-chamote ceramic composites for refractory bricks. *Ceramics International* 34, 1207-1213.
- Djoufac, W.E., Djomgoue, P., Azinwi Tamfuh, P., Bitom, L.D., Figueras, F., Njopwouo, D., 2010. Clays from the Bafang region (West Cameroun): properties and potential application as decolorizing agent of river water. *Applied Clay Science* 50, 322-329.
- Diko, M.L., Ekosse, G.E., Ayonghe, S.N., Ntasin, E.B., 2011. Physical characterization of clayey materials from tertiary volcanic cones in Limbé (Cameroon) for ceramic applications. *Applied Clay Science* 51, 380-384.
- Dondi, M., Raimondo, M., Zanelli, C., 2014. Clays and bodies for ceramic tiles: Reappraisal and technological classification *Applied Clay Sciences* 96, 91-109.

- Dondi, M., Fabbri, B., Guarini, G., 1998. Grain-size distribution of Italian raw materials for building clay products: a reappraisal of the Winkler diagram. *Clay Minerals* 33, 435-442.
- Doum, J.M., Fuh, C.G., Fadil-Djenabou, S., Onana, V.L., Ndjigui, P-D., Armstrong-Altrin, J.S. 2020. Characterization and potential application of gleysols and ferralsols for ceramic industry: a case study from Dimako (Eastern Cameroon). *Arabian Journal of Geosciences* 13, 1074.
- Duchaufour, P.H., 1977. Pédogenèse et classification des sols. Editions Masson, Paris-New York-Barcelone-Milan, 492 p.
- Ekosse, E.G.I., 2010. Kaolin deposits and occurrences in Africa: geology, mineralogy and utilization. *Applied Clay Science* 50, 212-236.
- Elderfield, H., Upstill-Goddard, R., Sholkovitz, E.R., 1990. The rare earth elements in rivers, estuaries and coastal seas and their significance to the composition of ocean waters. *Geochimical Cosmochimical Acta* 54, 971-991.
- Elfil, H., Srasra, E., Dogguy, M., 1995. Caractérisation physico-chimique de certaines argiles utilisées dans l'industrie Céramique. *Journal of Thermal Analysis* 44, 663-683.
- Eliche-Quesada, J., Leite-Costa., 2016. Use of bottom ash from olive pomace combustion in the production of eco-friendly fired clay bricks. *Waste Management* 48, 323-333.
- Elimbi, A., Njopwou, D., Pialy, P., Wandji, R., 2001. Propriétés des produits de caisson de deux argiles kaolinitiques de l'Ouest Cameroun. *Silicates Industriels* 9-10, 121-125.
- Elimbi, A., Tchakoute, H.K., Njopwou, D., 2011. Effects of calcination temperature of kaolinite clays on the properties of geopolymer cements. *Construction and Building Materials* 25, 2805-2812.
- El Ouahabi, M., 2013. Valorisation industrielle et artisanale des argiles du Maroc. Thèse de Doctorat à l'Université de Liège, 189 p.
- El Ouahabi, M., Daoudi, L., Fagel, N., 2018. Technological behavior of cretaceous and pliocene clays of northern Morocco used in fired brick manufacturing. *Journal of Materials Environmental Science* 9(4), 1140-1151.
- Enock Embom, C., Nyemb Bayamack, J.F., Ngo'o Ze, A., Mache, J.R., Mbey, J.A., Onana, V.L., 2024. Compressed earthen blocks using alluvial clays from Mbam:

performance comparison using statistical analysis of cement vs heat-stabilized blocks  
*Clay Minerals* 1-13

Essono, J.M., 2016. Yaoundé, une ville, une histoire, 1888-2004. Encyclopédie des mémoires d'Ongola Ewondo, la ville aux «Mille collines». Editions Asuzoa, 450 p.

Fabbri, B., Fiori, C., 1985. Clays and complementary raw materials for stone ware tiles. *Mineralogica Petrographica Acta* 29 A, 535-545.

Fadil-Djenabou, S., Ndjigui, P-D., Mbey, J.A., 2015. Mineralogical and physicochemical characterization of Ngaye alluvial clays (Northern Cameroon) and assessment of its suitability in ceramic production. *Journal of Asian Ceramic Societies* 3, 50-58.

Fadil-Djenabou, S., Ndjigui, P-D., Bukalo, N., Ekosse, G.I., 2023. Effect of the incorporation of Neem (*Azadirachta indica*) wood ash in Kodeck ceramic materials for the manufacture of fired bricks (Far-North Cameroon). *Heliyon* 9, e14335.

Fenili, E.P., Biz, F., Boa Hora, P.R.M., Madeira, R., Modesto, C.O., Bernardin, A.M., 2004. Determination of clay plasticity: indentation method vs. Pfefferkorn method. VIII World Congress on Ceramic Tile Quality. Official Chamber of Commerce. *Industry and Navigation, Castellón, Spain*, 47-53.

Fernandez-Caliani, J.C., Galan, E., Aparicio, P., Miras, A., Marquez, M.G., 2010. Origin and geochemical evolution of Nuevo Montecastelo kaolin deposit (Galicia, NW Spain). *Applied Clay Science* 43, 91-97.

Fialips, C.I., Petit, S., Decarreau, A., 2000. Hydrothermal formation of kaolinite from various metakaolins. *Clay Minerals* 35, 559-572.

Fiori, C., Fabbri, B., Donati, G., Venturi, I., 1989. Mineralogical composition of the clay bodies used in the Italian tile industry. *Applied Clay Sciences* 4, 461-473.

Fontaine, L., Anger, R., 2009. *Bâtir en terre: Du grain de sable à l'architecture*. Paris: Belin.

Galán-Marín, C., Petric, J., Rivera-Gómez, C., 2010. Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. *Construction and Building Materials* 24, 1462-1468.

Galos, K., 2011. Composition and ceramic properties to ball clays for porcelain stoneware tiles manufacture in Poland. *Applied Clay Science* 51, 74-85.

Galtier, L., Lécivain, L., Rocher, P., Vouillemet, M., 1992. Approvisionnement de la France en minéraux industriels. Paris: Ministère de l'Industrie, des Postes et

Télécommunication et du Commerce Extérieur, Convention N° 92.2.83.0001, 1-163 p.

Gate., 1994. Stabilizers and Mortars (for compressed earth blocks). Eschborn: German Appropriate Technology Exchange.

Gazel, J., Guiraudie, C., 1965. Carte géologique de reconnaissance du Cameroun à l'échelle du 1/500 000, feuille Abong-Mbang-Ouest avec notice explicative. Direction des Mines et de la Géologie, Yaoundé-Cameroun, 34 p.

Gialanella, S., Girardi, F., Ischia, G., Lonardelli, I., Mattarelli, M., Montagna, M., 2010. On the goethite to hematite phase transformation. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 102, 867-873.

Gillot, J.E., 1986. Some clay related problems in engineering geology in Nord America. *Clay minerals* 21, 261-278.

Gong, Q., Deng, J., Yang, L., Zhang, J., Wang, Q., Zhang, G., 2011. Behavior of major and trace element during weathering of sericite-quartz schist. *Journal of Asian Earth Sciences* 42, 1-13.

Guerraoui, F., Zamama M., Ibnoussina, M., 2008. Caractérisations minéralogique et géotechnique des argiles utilisées dans la céramique de SAFI (Maroc). *African Journal of Science and Technology (AJST), Science and Engineering series* 9(1), 1-11.

Guzlena, S., Sakale, G., Certoks, S., Grase, L., 2019. Sand size particle amount influence on the full brick quality and technical properties. *Construction and Building Materials* 220, 102-109.

Hajaji, W., Hachani, M., Moussi, B., Jeridi, K., Medhioub, M., López-Galindo, A., Rocha, F., Labrincha, J.A., F. Jamoussi, F., 2010. Mineralogy and plasticity in clay sediments from north-east Tunisia. *Journal of African Earth Sciences* 57, 41-46.

Happi Youta, J., 1998. Arbres contre graminées : la lente invasion de la savane sur la forêt au Centre-Cameroun. Thèse Doctorat, Université de Paris IV, 219 p.

Hart, J.R., Zhu, Y., Pirard, E., 2011. Particle size and shape characterization: current Technology and Practice. *European Mineralogical Union, Notes in Mineralogy* 9 (4), 77-127.

- Harvey, C.C., Murray, H.H., 1997. Industrial clays in the 21st century: A perspective of exploration, technology and utilization. *Applied Clay Science* 11, 285-310.
- He, H., Yue, Q., Su, Y., Gao, B., Gao, Y., Wang, J., Yu H., 2012. Preparation and mechanism of the sintered bricks produced from Yellow River silt and red mud. *Journal of Hazardous Materials* 203, 53-61.
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., 1991. Introduction à la géotechnique. Edition de l'école polytechnique de Montréal, Québec, 808 p.
- Holtzapffel, T., 1985. Les minéraux argileux, préparation, analyse diffractométrique et détermination. *Société Géologique Nord*, n°12, 135 p.
- Houben, H., Guillaud, H. 1989. Traité de construction en terre. Marseille:1<sup>ère</sup> édition Parenthèses.
- Houben, H., Guillaud, H., 2006. Traité de construction en terre. CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France, 355 p.
- Hu, P., Yang, H., 2013. Insight into the physicochemical aspects of kaolins with different morphologies. *Applied Clay Science* 74, 58-65.
- Jiménez, D.M.C., Guerrero, I.C., 2007. The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. *Construction and Building Materials* 21(2), 237-251.
- Jones, Jr.J.B., 1999. Soil Analysis Handbook of Reference Methods. *Soil plant analysis council*, Boca Raton, Florida, USA. 245 p.
- Jouenne, C.A., 1984. Traité des Céramiques et Matériaux. Edition Septima, Paris, 657 pages.
- Joussein, E., Petit, S., Decarreau, A., 2001. Une nouvelle méthode de dosage des minéraux argileux en mélange par spectroscopie IR. *Comptes Rendus Académiques des Sciences Paris, Sciences de la Terre et des planètes* 332, 83-89.
- Kagonbé, B.P., Tsozue, D., Nzeukou Nzeugang, A., Ngos III, S., 2021. Mineralogical, physico-chemical and ceramic properties of clay materials from Sekande and Gashiga (North, Cameroon) and their suitability in earthenware production. *Heliyon* 7, e07608.
- Kamgang, K.B.V., Ekodeck, G.E., Njilah, I.K., 2001. Evolution géochimique des formations latéritiques dans l'écosystème périforestier du Sud-Est Cameroun : le site de

- Kandara. *African Journal of Science and Technology Science and Engineering Series* 2(1), 19-32.
- Kamgang, K.B.V., Onana, V.L., Ndome Effoudou Priso, E., Parisot, J-C., Ekodeck, G.E., 2009. Behaviour of REE and mass balance calculations in a lateritic profile over chlorite schists in South Cameroon. *Chimie der Erde* 69, 61-73.
- Kamseu, E., Leonelli, C., Boccaccini, D.N., Veronesi, P., Miselli, P., Pellacani, M.G.U.C., 2007. Characterization of porcelain composition using two china clays from Cameroon. *Ceramic International* 33, 851-857.
- Kankao, O.O., Ngon Ngon, G.F., Tehna, N., Bayiga, E.C., Mbog, M.B., Mbaï, J.S., Etame, J., 2022. Physicochemical and Mineralogical Characterization of Clay Materials in the Douala Coastal Sedimentary Sub-basin (Cameroon, Central Africa). *Journal of Geosciences and Geomatics*, 10 (3), 126-138.
- Khattab, S.A.A., 2002. Etude multi-échelles d'un sol argileux plastique traité à la chaux. Thèse de Doctorat en génie civil, Université d'Orléans,
- Kerboul, G., Bossler, F., 1990. Façonnage des pâtes plastiques. ENSIC, Limoges, France.
- Kessoum Adamou, J.M., Ntoulala, R.F.D., Ndome Effoudou, E., Nanga Bineli, M.T., Ngo'o Ze, A., Hamadjida, G., Onana, V.L., 2023. Mineralogical, geochemical, and geotechnical features of lateritic soils from termite mounds in two contrasting savannah areas (central Cameroon) as raw materials for brick making. *Heliyon* 9, e17257.
- Konta, J., 1995. Clays and Man: Clay Raw Materials in the Service of Man. *Applied Clay Science* 10, 275-335.
- Kornmann M., 2005. Ingénieurs du Centre Technique des Tuiles et Briques, Matériaux de construction en terre cuite, fabrication et propriétés. Editions Septima, Paris, 33-34.
- Kpangni, E.B., Andji, Y.Y.J., Adouby, K., Oyetola, S., Kra, G., Yvon, J., 2008. Mineralogy of clay raw materials from Côte d'ivoire: Case of the deposit from Katiola. *Journal of Applied Sciences* 8 (5), 871-875.
- Kreimeyer, R., 1987. Some notes on the firing color of clay bricks. *Applied Clay Science* 2, 175-183.

- Laburthe-Tolra, P., 1981. Les seigneurs de la forêt. Essai sur le passé historique, l'organisation sociale et les normes éthiques des anciens Bété du Cameroun, Publications de la Sorbonne, Paris, 417 p.
- Lahcen, D., Elboudour, E.I.H., Saadi, L., Albizane, A., Bennazha, J., Waqif, M., El ouahabi, M., Fagel, N., 2014. Characteristics and ceramic properties of clayey materials from Amezmiz region (Western High Atlas, Morocco). *Applied Clay Science* 102, 139-147.
- Lajoie, J., Chagnon, A., 1973. Origin of red beds in a Cambrian flysch sequence, Canadian Appalachians, Quebec. *Sedimentology* 20, 91-103.
- Landry, B., Mercier, M., 1992. Notion de géologie. Modulo, Mont-Royal, édition n°3, 565 p.
- Lanson, B., Bouchet, A., 1995. Identification des minéraux argileux par diffraction des rayons X: apport du traitement numérique. *Bulletin du Centre de Recherche en Exploration et Protection Aquitaine* 19 (1), 91-118.
- Lee, V.G., Yeh, T.H., 2008. Sintering effects on the development of mechanical properties of fired clay ceramics. *Materials Science and Engineering* 485, 5-13.
- Lee, W.E., Souza, G.P., McConville, C.J., Tarvornpanich, T., Iqbal, Y., 2008. Mullite formation in clays and clay-derived vitreous ceramics. *Journal of the European Ceramic Society* 28, 465-471.
- Letouzey, R., 1985. Notice explicative de la carte phytogéographique du Cameroun à l'échelle de 1/50 0000. Fascicules 1, 2, 3, 4 et 5. Institut de la carte Internationale de la végétation. Université Paul Sabatier, Toulouse, 240 p.
- Liewig, N., Rautureau, M., Gomes, C., 2012. Les argiles et la santé Humaine: d'hier à aujourd'hui. *Etude et Gestion des Sols*, 19 (3 et 4), 267-277.
- Lin, D.F., Weng, C.H., 2001. Utilisation des cendres de boues d'épuration comme matériaux de briques. *Journal Environmental Engineering* 10 (922), 922-927.
- Lingling, X., Wei, G., Tao, W., Nanru, Y., 2005. Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio. *Construction and Building Materials* 19, 243-247.
- Liu, Z., Zhao, Y., Colin, C., Strattegger, K., Wiesner, M.G., Huh, C-A., Zhang, Y., Li, X., Sompongchaiyakul, P., You, C-F., Huang, C-Y., Liu, J.T., Siringan, F.P., Le, K.P., Sathiamrthy, E., Hantoro, W.S., Liu, J., Tuo, S., Zhao, S., Zhou, S., He, Z.W.Y.,

- Bunsomboonsakul, S., Li, Y., 2016. Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea. *Earth Science Review* 153, 238-273.
- Logmo, E.O., Ngon Ngon, G.F., Samba, W., Michel Bertrand Mbog, M.B., Etame, J., 2013. Geotechnical, Mineralogical and Chemical Characterization of the Missole II Clayey Materials of Douala Sub-Basin (Cameroon) for Construction Materials. *Open Journal of Civil Engineering* 3, 46-53.
- Mache, J.R., 2013. Minéralogie et propriétés physico-chimiques des smectites de Bana et Sabga (Cameroun). Utilisation dans la décoloration d'une huile végétale alimentaire. Thèse de Doctorat Ph/D, Université de Liège, 145 p.
- Mache, J.R., Signing, P., Njoya, A., Kunyukubundo, F., Mbey, J.A., Njopwouo, D., Fagel, N., 2013. Smectite clay from the Sabga deposit (Cameroon): mineralogical and physicochemical properties. *Clay Minerals* 48, 499-512.
- Mackenzie, R.C., 1957. The differential thermal investigation of clays. *Mineralogical Society*, London, 456 p
- Madejova, J., 2003. FTIR technique in clay mineral studies. *Vibrational Spectroscopy* 31 (1), 1-10.
- Maglione, G., Carn, M., 1975. Spectres infrarouges des minéraux salins et des silicates néoformés dans le bassin Tchadien. Cahier ORSTOM, série Géologique VII, (1), 3-9.
- Mahmoudi, S., Srasra, E., Zargouni, F., 2008. The use of Tunisian Barremian clay in the traditional ceramic industry: Optimization of ceramic properties. *Applied Clay Science* 42, 125-129.
- Mango Itulamy, L.A.M., 2019. Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée. Thèse de Doctorat, Université de Liège, 157 p.
- Mango Itulamy, L.A.M., Collin, F., Pilate, P., Courtejoie, F., Fagel, N., 2019. Evaluation of Belgian clays for manufacturing compressed earth blocks. *Geologica Belgica* 22, 3-4.
- Manning, D.A.C., 1995. Introduction to industrial mineral. *Chapman & Hall Edition*, London, 275 p.

- Marsigli, M., Dondi, M., 1997. Plasticita delle Argille Italiane per Laterizi e Previsione Del Loro Comportamento in Foggatura. *L'industria Laterizi* 46, 214-222 (in Italia).
- Mathieu, C., Pieltain, F., 2003. Analyse chimique des sols Méthodes choisies. Edition Lavoisier, Paris, 387 p.
- Mbey, J.A., Ngally Sabouang, C.J., Makon, T.B., Coulibaly, S.L., Kong, S., 2021. The thermal dihydroxylation of kaolinite using thermogravimetric analysis and controlled rate thermal analysis. *Journal of the Cameroon Academy of Sciences* 16(3), 225-245.
- Mbumbia, L., Mertens De Wilmars, A., Tirlocq, J., 2000. Performance characteristics of lateritic soil bricks fired at low temperatures: a case study of Cameroon. *Construction and Building Materials* 14, 121-131.
- Mc Manus, J., 1988. Grain size distribution and interpretation. Pages. 63-85 in: Techniques in Sedimentology (M. E. Tucker, editor). *Blackwell Scientific Publications*, Oxford.
- McNally, G.H., 1998. Soil and Rock Construction Materials. CRC Press, London, 291-310.
- Meimaroglou, N., Mouzakis, C., 2019. Cation Exchange Capacity (CEC), texture, consistency and organic matter in soil assessment for earth construction: The case of earth mortars. *Construction of Building Materials* 221, 27-39.
- Melo, C., Kamseu, E., Djangang, C., 2001. In Proceedings of the 1st Conference on the Valorization of Clay Materials in Cameroon and Launching of the Cameroon Clay Group, Ed. by Nkoumbou, C and Njopwouo, D., April 11-12, Yaoundé, Cameroon 57-69.
- Melo, C.U., Kamseu, E., Djangang, C., 2003. Effect of fluxes on the fired properties between 950-1100°C of some cameroonian clays. *Tile and Bricks International* 19, 57-69.
- Mering, J., Pedro, G., 1969. Discussion à propos des critères de classification des phyllosilicates 2/1. *Bulletin du Groupe français des argiles* 21, 30.
- Metang, V., Nomo, N.E., Ganno, S., Takodjou, W., Teme, E.M.A., Soh, T.A.C., Fossi, D.H., Nkamga, M.M.D., Tchameni, R., Nkoumbou, C., Nzenti, J.P., 2022. Anatexis of metadiorite from the Yaoundé area, Central African Orogenic Belt in Cameroon: implications of the genesis of in-source granodiorite leucosome. *Arabian Journal of Geosciences* 15, 359.

- Meukam, P., 2004. Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments. Thèse de doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle, en co-tutelle entre l'Université de Cergy-Pontoise et l'Université de Yaoundé I, 129 p. + annexes.
- Meunier, A., 2003. Argiles. Collection géosciences, 434 p.
- Milheiro, F.A.C., Freire, M.N., Silva, A.G.P., Holanda, J.N.F., 2005. Densification behavior of a red firing Brazilian kaolinitic clay, *Ceramics International* 31 (5), 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 route). Thèse Doctorat, Université de Ouagadougou, 144 p.
- Millogo, Y., Hajjaji, M., Morel, J.C., 2011. Physical properties, microstructure and mineralogy of termite mound material considered as construction materials. *Applied Clay Science* 52, 160-164.
- Milot., 1964. Géologie des argiles: altération, sédimentologie, géochimie. Masson et Cie édition, Paris, 499 p.
- Moevus, M., Fontaine, L., Anger, R., 2012. Caractéristiques mécaniques, thermiques et hygrométriques du matériau terre crue: bilan de la littérature. In CRATerre-EAG (Ed.), *Projet: Béton d'Argile Environnemental (B.A.E)*. Grenoble: Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement.
- Monterio, S.N., Vieira, C.M.F., 2004. Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from Campos dos Goytacazes, Brazil. *Applied Clay Science* 27, 229-234.
- Moore, D., Reynolds, J.R.C., 1997. X-Ray Diffraction and the identification and analysis of clay minerals. 2<sup>nd</sup> edition Oxford University Press, Oxford.
- Mosser, C., 1980. Etude géochimique de quelques éléments traces dans les argiles des altérations et des sédiments. Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 229 p.
- Murray, H.H., 2000. Traditional and new application for kaolin, smectite and palygorskite. A general overview. *Applied Clay Science* 7, 207-221.

- Murray, H.H., 2007. Applied clay mineralogy: occurrences, processing and application of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite and common clays. *Developments in Clay Science* 2, 179 p.
- Mveng, E., 1981. Histoire du Cameroun, tome 2, Yaoundé, CEPER, 51 p.
- Mvondo, H., Den Brok, S.W.J., Mvondo Ondo, J. 2003. Evidence for symmetric extension and exhumation of the Yaounde Nappe (Pan-African Fold Belt, Cameroon). *Journal of African Earth Sciences* 36, 215-231.
- Nakao, A., Sugihara, S., Maejima, Y., Tsukada, H., Funakawa, S., 2017. Ferralsols in the Cameroon plateaus, with a focus on the mineralogical control on their cation exchange capacities. *Geoderma* 285, 206-216.
- Ndjigui, P-D., Bilong, P., Nyeck, B., Eno Belinga, S.M., Vicat, J.P., Gerard, M., 1998. Les produits d'altération du gneiss à biotite et amphibole dans la plaine côtière de Douala. *Annales de la Faculté des Sciences., Série Sciences Natureles et Vie*, 34, 191-216.
- Ndjigui, P-D., 2008. Altération supergène des serpentinites et distribution des Eléments du Groupe du Platine dans les profils latéritiques du complexe ultrabasique de Lomié (Sud-Est Cameroun). Thèse de Doctorat/PhD, Université de Yaoundé I, 255 p. + Annexes.
- Ndjigui, P-D., Badinane Bisseke, M.F.B., Nyeck, B., Nandjip, H.P.K., Bilong, P., 2013. Mineralogical and geochemical features of the coarse saprolite developed on orthogneiss in the SW of Yaounde, South Cameroon. *Journal of Africa Earth Science* 79, 125-142.
- Ndjigui, P-D., Ebah Abeng, S.A., Ekomane, E., Nzeukou Nzeugang, A., Ngo Mandeng, F.S., Lindjeck, M.M., 2015. Mineralogy and geochemistry of pseudogley soils and recent alluvial clastic sediments in the Ngog-Lituba region, Southern Cameroon: An implication to their genesis. *Journal of African Earth Sciences* 108, 1-14.
- Ndjigui, P-D., Mbey, J.A., Fadil-Djenabou, S., Onana, V.L., Bayiga, E.C., Enock Embom, C., Ekosse, G-I., 2021. Characteristics of kaolinitic raw materials from the Lokoundje river (Kribi, Cameroon) for ceramic applications. *Applied Sciences* 11, 6118.
- Nédelec, A., Macaudière, J., Nzenti, J.P., Barbey, P. 1986. Evolution structurale et métamorphique des schistes de Mbalmayo (Cameroun). Implications pour la

structure de la zone mobile pan-africaine d'Afrique centrale au contact du craton du Congo. *Compte Rendu Academie Science Paris* 303, 75-80.

Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochemical et Cosmochimical Acta* 48, 1523-1534.

Ngon Ngon, G.F., 2007. Etude morphologique, minéralogique, géochimique et cristallographique des argiles latéritiques et des argiles hydromorphes de la région de Yaoundé en zone tropical humide. Essais industriels et évaluation de leurs potentialités comme matériaux de construction. Thèse de Doctorat/Ph.D, Université de Yaoundé I, 185 p.

Ngon Ngon, G.F., Yongue-Fouateu, R., Bitom, D.L., Bilong, P., 2009. A geological study of clayey laterite and clayey hydromorphic material of the region of Yaoundé (Cameroon): a prerequisite for local material promotion. *Journal of Africa Earth Science* 55, 69-78.

Ngon Ngon, G.F., Etame, J., Ntamak-Nida, M.J., Mbog, M.B., Mpondo, A.M.M., Gerard, M., Yongue-F.R., Bilong, P., 2012. Geological study of sedimentary clayey materials of the Bomkoul area in the Douala region (Douala sub-basin, Cameroon) for the ceramic industry. *Comptes Rendus Geoscience* 344, 366-376.

Ngun, B.K., Mohamad, H., Sulaiman, S.K., Okada, K., Ahmad, Z.A., 2011. Some ceramic properties of clays from central Cambodia. *Applied Clay Science* 53, 33-41.

Njopwouo, D., 1984. Minéralogie et physico-chimie des argiles de Bamkoul et de Balengou (Cameroun). Utilisation dans la polymérisation du styrène et dans le renforcement du caoutchouc naturel. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Yaoundé, 300 p.

Njoya, A., Nkoumbou, C., Grosbois, C., Njopwouo, D., Njoya, D., Courtin, A.N., Yvon, J., Martin, F., 2006. Genesis of Mayouom kaolin deposit (Western Cameroon). *Applied Clay Science* 32(1-2), 125-140.

Njoya, D., Elimbi, A., Nkoumbou, C., Njoya, A., Njopwouo, D., Lecomte, G., Yvon, J., 2007. Contribution à l'étude physico-chimique et minéralogique de quelques échantillons d'Argiles de Mayouom (Cameroun). *Annales de Chimie Science des Matériaux* 32(1), 55-68.

- Ntouala, R.F.D., 2014. Produit d'altération des schistes et argiles alluviales de la série d'Ayos à Akok-Maka (Est-Cameroun): minéralogie, géochimie et valorisation agropédologique et géochimique. Thèse de Doctorat/PhD à l'Université de Yaoundé I, 210 p. + annexes.
- Ntouala, R.F.D., Onana, V.L., Kamgang, K.V., Ekodeck, G.E., 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.
- Ntouala, R.F.D., Ndome-Priso, E., Nanga Bineli, M.T., Mutlen, J.A., Ngo'o Ze A., Onana, V.L., Ekodeck, G.E., 2023. Mineralogy, geochemistry, and geotechnical characterization of lateritic and alluvial clay deposits from Batouri, East Cameroon. *Arabian Journal of Geosciences* 16, 355.
- Nyeck, B., Ngimbous, R.V., Ndjigui, P-D., 2019. Petrology of saprolite developed on gneisses in the Matomb region, south Cameroon. *Journal of Africa Earth Sciences* 150, 107-122.
- Nzenti, J.P., Barbey, P., Macaudière, J., Soba, D. 1988. Origin and evolution of late Precambrian high-grade Yaounde gneisses (Cameroon). *Precambrian Research* 38, 91-109.
- Nzenti, J.P., 1998. Neoproterozoic alkaline meta-igneous rocks from the African North Equatoria Fold Belt (Yaoundé, Cameroon): biotites and magnetite rich pyroxenite. *Journal of African Earth Sciences* 26 (1), 37-47.
- Nzenti, J.P., Kapajika, B., Woirner, G., Lubala, T.R., 2006. Synkinematic emplacement of granitoids in the Pan-African shear zone in Central Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 45 (1), 74-86.
- Nzeukou Nzeugang, A., Medjo Eko, R., Fagel, N., Kamgang Kabeyene Beyala, V. Njoya, A., Balo Madi, A., Mache, J.R., Melo Chinje, U., 2013. Characterization of clay deposits of Nanga-Eboko (central Cameroon): suitability for the production of building materials. *Clay Minerals* 48, 655-662.
- Nzeukou Nzeugang, A., Traina, K., Medjo Eko, R., Kamseu, E., Njoya, A., Melo Chinje, U., Kamgang Kabeyene Beyala, V., Cloots, R., Fagel, N., 2014. Mineralogical and

Physical Changes during Sintering of Plastic Red Clays from Sanaga Swampy Valley, Cameroon. *Interceram* 04 (05), 186-192.

Nzeukou Nzeugang, A., 2014. Minéralogie, géochimie et propriétés céramiques des argiles alluviales de la Sanaga entre Nanga-Eboko et Ebebda (région du Centre-Cameroun). Thèse de Doctorat/Ph.D, Université de Yaoundé 1, 156 p. + annexes.

Nzeukou Nzeugang, A., El Ouahabi, M., Aziwo<sup>1</sup>, B., Mache, J.R., Mouton, M.H.S., Fagel, N. 2018. Characterization of kaolin from Mankon, NW Cameroon. *Clay Minerals* 53, 1-29.

Nzeukou Nzeugang, A., Tsozué, D., Kagonbé Pagna, B., Balo Madi, A., Fankam Deumeni, A., Ngos III, S., Nkoumbou, C., Fagel, N., 2021. Clayey soils from Boulgou (North Cameroon): geotechnical, mineralogical, chemical characteristics and properties of their fired products. *Applied Sciences* 3, 551-564.

Olivry, J.P., 1986. Fleuves et rivières du Cameroun. Collection Monographies hydrologiques ORSTOM 9, Paris, 733 p.

Onana, V.L., 2010. L'altération supergène des chloritoschistes de la série Mbalmayo-bengbis (sud Cameroun) et ses implications géotechniques. Thèse Doctorat /Ph.D, Université Yaoundé I, 242 pages.

Onana, V.L, Ntuala, R.F.D., Mbey, J.A., Ngo'o Ze, A., Kabeyene, V.K., Ekodeck, G.E., 2019. Mineralogy and preliminary assessment of the potential uses of alluvial clays from Batouri (Eastern-Cameroon). *Cerâmica* 65, 407-415.

Pédro, G., 1966. Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles (cycle alumino-silicique). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Série D 262, 1828-1831.

Perromet., 2004. Réactivité des matériaux argileux dans un contexte de corrosion métallique : application au stockage des déchets radioactifs en site argileux. Thèse doctorat, Institut National de Lorraine, 283 p.

Petit, S., Robert, J-L., Decreau, A., Besson, G., Grauby, O. and Martin, F., 1995. Apport des méthodes spectroscopiques à la caractérisation des phyllosilicates 2: 1. *Bulletin des Centres de Recherche en Exploration-Production*, Elf Aquitaine 19(1), 119-147.

- Pialy, P., 2009. Etude de quelques matériaux argileux du site de Lembo (Cameroun): minéralogie, comportement au frittage et analyse des propriétés d'élasticité. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 123 p.
- Picard, D.M., 1971. Classification of fine-grained sedimentary rocks. *Journal of Sedimentary petrology* 41 (1), 179-195.
- Pignat, B., 2005. Terre crue, techniques de construction et de restauration. *Edition Eyrolles, Collection Au pied du Mur*, 346 p.
- Pinias, D., Giannopoulou, I., Perraki, T., 2007. Effet of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers: colloids and surfaces A. *Physicochemical and Engineering Aspects* 301 (1-3), 246-254.
- Pourmand, A., Dauphas, N., Ireland, T.J., 2012. A novel extraction chromatography and MC-ICP-MS technique for rapid analysis of REE, Sc and Y: Revising CI-chondrite and Post-Archean Australian Shale (PAAS) abundances. *Chemical Geology* 291, 38-54.
- Qiao, X.C., Tyrer, M., Poon C.S., Cheeseman, C.R., 2008. Nouveaux matériaux cimentaires produits à partir de mâchefer d'incinérateur, *Resour. Conserv. Recycl* 52 (3), 496-510.
- Randrianaivosoa, A. N., 2014. Essai de fabrication de brique en terre compressée stabilisée avec des liants: ciment et cendre volante. Mémoire de fin d'Etudes en vue d'obtention du Diplôme d'Ingénieur Matériaux. Université d'Antananarivo, 119 p.
- Reeves, G.M., Sims, I., Cripps, C., 2006. Clay materials used in construction. Geological Society, London, *Engineering Geology Special Publication* 21, 513 p.
- Rigassi, V., 1995. Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production, CRATERRE-EAG, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Allemagne, 104 p.
- Roudouane, T.H., Mbey, J.A., Bayiga, E.C., Ndjigui, P-D., 2020. Characterization and application test of kaolinite clays from Aboudeia (Southeastern Chad) in fired bricks making. *Scientific African* 7, e00294.
- Rouiller, J., 1993. Techniques de laboratoire dans l'analyse des sols. Centre de Pédologie Biologique du CNRS, In *Note technique CPB-CNRS*. Vandoeuvre, Nancy, 43 p.

- Ruan, H.D., Frost, R.L., Kloprogge, J.T., 2001. The behavior of hydroxyl units of synthetic goethite and its dehydroxylated product hematite. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 57, 2575-2586.
- Ruan, H.D., Frost, R.L., Kloprogge, J.T., Duong, L., 2002. Infrared spectroscopy of goethite dehydroxylation: III. FT-IR microscopy of in situ study of the thermal transformation of goethite to hematite. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 58, 967-981.
- Sababa, E., Mbesse, C.O., Wandji Mouko, C.N., Ekoa Bessa, A.Z., Ndjigui, P-D., 2022. Geochemistry of stream sediments from Eséka area (SW Cameroon): implications for surface process assessment and precious metals (Au, Pd, and Pt) exploration. *Journal of Sedimentary Environments* 7, 43-66.
- Sandberg, J., Karlsson, C., Fdhia, R., 2001. Une période de mesure de 7 ans étudiant la corrélation de la corrosion, des dépôts et du combustible dans une biomasse chauffée en circulation chaudière à lit fluidisé. *Applied Energie* 88 (1) 99-110.
- Santoir, C., 1995. Atlas régional du sud Cameroun. Volume Oro-hydrographie, ORSTOM édition pages 4-5.
- Santoir, C., Bopda, A., 1995. Atlas régional du Sud-Cameroun. IRD-ORSTOM, Yaoundé. 54 p.
- Savazzini-Reis, A., Possamai, D.S.V., Oliveira, D.N.J., Teixeira, P.G., 2017. Characterization and evaluation of ceramic properties with spherical and prismatic samples of clay used in red ceramics. *Materials Research* 20, 543-548.
- Schellmann, W., 1986. A new definition of laterite. *Geological Survey of India Memoir* 120, 1-7.
- Ségalen, P., 1962. Notice de la carte pédologique au 1/100000 de Maroua, n°126, Ircam, 67 p.
- Semiz, B., 2017. Characteristics of clay-rich raw materials for ceramic applications in Denizli region (Western anatolia). *Applied Clay Science* 137, 83-93.
- Sigg, J., 1991. Les produits de terre cuites, SEPTIMA, Paris, 423 p.
- Sighomnou, D., 2004. Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun: perspectives d'évolution des ressources en eau. Thèse de Doctorat d'Etat, Sciences Naturelles, Université de Yaoundé I, 290 p.

- Silva, M.V.M.G., Pinto, M.M.S.C., Carvalho, P.C.S., 2016. Major, trace and REE geochemistry of recent sediments from lower Catumbela River (Angola). *Journal of Africa Earth Sciences* 115, 203-217.
- Smykatz-Kloss, W., 1974. Differential thermal analysis. New York : Springer-Verlag, 185 p.
- Souza, G.P., Sanchez, R., De Holanda, R.J.N., 2002. Characteristics and physical-mechanical properties of fired kaolinitic materials. *Cerâmica* 48 (306), 102-107.
- Stow, D.A.V., Atkin, B.P., 1987. Sediment facies and geochemistry of Upper Jurassic mudrocks in central North Sea area. In Conference on petroleum geology of North West Europe 3, 797-808.
- Srisuwan, C., Saengthong, S., Thaomola, S., Chindraprasirt, P., Phonphuak, N., 2020. Preparation and properties of fired clay bricks with added wood ash. *Journal of metals minerals* 30, 84
- Suchel, J.B., Tsalefac, M., 1995. Atlas régional du Sud Cameroun. Volume Climatologie, ORSTOM édition, pages 8-9.
- Sukkae, R., Suebthawikul, S., Cherdhirunkom, B., 2018. Utilization of coal fly ash as a raw material for refractory production, *journal of metals minerals* 28, 116-123.
- Symons, W-G., 1999 Properties of Australian soils stabilised with cementitious binders. Structural Materials and Assemblies Group, University of South Australia, The Levels, South Australia.
- Taallah, B., 2014. Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres. Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, République Algérienne Démocratique et Populaire, 178 p. + Annexes.
- Tardy, Y., 1993. Pétrologie des Latérites et des Sols Tropicaux. Ed. Masson, Paris, 459 pages.
- Temga, J.P., 2015. Etude pétrologique et mécanique des vertisols de la vallée du Logone dans la zone sahélo-soudanienne: essais de valorisation en vue de la production des briques de terre. Doctorat Ph/D, Université de Ngaoundéré, 215 p. + annexes.
- Thorez, J., 2003. L'argile, minéral pluriel. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*. 72 (1), 19-70.

- Tonje, J.C., Ndjigui, P.D., Nyeck, B., Bilong, P., 2014. Geochemical features of the Matomb alluvial rutile from the Neoproterozoic Pan-African belt. Southern Cameroon. *Chemie der Erde Geochemistry* 74, 557-570.
- Toteu, S.F., Yongue Fouateu, R., Penaye, J., Tchakounte, J., Seme Mouangue, A.C., Randall Van Schmus, W., Deloule, E., Stendhal, H., 2006. U–Pb dating of plutonic rocks involved in the nappe tectonic in southern Cameroon: consequence for the Pan-African orogenic evolution of the central African fold belt. *Journal of African Earth Sciences* 44, 479-493.
- Touogam Touolak, B., Tchangnwa Nya, F., Ngale, H.E., Yanne, E., Ndjaka, J.M., 2015. Compressed bricks made of Makabaye and Pitoaré clay: Implementation and production. *Advances in Materials Physics and Chemistry* 5, 191-204.
- Truche, C., 2010. Caractérisation et quantification des minéraux argileux dans les sols expansifs par spectroscopie infrarouge aux échelles du laboratoire et du terrain. Thèse de Doctorat à l'Université de Toulouse 3 Paul Sabatier. 187 p. + annexes.
- Tsozué, D., Nzeukou Nzeugang, A., Mache, J.R., Loweh, S., Fagel, N., 2017. Mineralogical, physico-chemical and technological characterization of clays from Maroua (Far-North, Cameroon) for use in ceramic bricks production. *Journal of Building Engineering* 11, 17-24.
- Ukwatta, A., Mohajerani, A., 2017. Characterisation of fired-clay bricks incorporating biosolids and the effect of heating rate on properties of bricks. *Construction Building Materials* 142, 11-22.
- United Nations., 1992. Earth Construction Technology. United Nations Centre For Human Settlements, Nairobi, Kenya, 200 p.
- Velde, B., 1993. Introduction to Clay Minerals-Chemistry, Origins, Uses and Environmental significance. *Applied Clay Science* 8, 79-80.
- Velde, B., 1995. Composition and mineralogy of clays minerals. *Origin and mineralogy of clays*. Springer, Verlag, Berlin Heidelberg, 34 p.
- Véné, J., Beauchamp, J., 2005. Pédologie, les argiles. Université de Picardie. 4 p.
- Vieira, C.M.F., Sanchez, R., Monteiro, S.N., 2008. Characteristics of clays and properties of building ceramics in the Rio de Janeiro, Brazil. *Construction and Building Materials* 22, 781-787.

- Villiers, J.F., Santor, C., 1995. Atlas régional du sud Cameroun. Volume Végétation, ORSTOM édition, pp 10-11.
- Voinovitch, I.A., Debbras-Guenon, J., Louvrier J., 1971. Analyse minéralogique des sols argileux. Edition Eyrolles 61, boulevard St Germain Paris VI, 79 p.
- Wacer., 2018. Variation des cendres de bois dans les céramiques élaborées par voie liquide, Ademe, rapport, 12 p.
- Wang, G., Wang, H., Zhang, N., 2017. In situ high temperature X-ray diffraction study of illite. *Applied Clay Science* 146, 254-263.
- Wetshondo Osomba, D., 2012. Caractérisation et valorisation des matériaux argileux de la province de Kinshasa (RD Congo). Thèse de Doctorat à l'Université de Liège, 336 p. + Annexes.
- Wilson, I.R., 1998. The constitution, evaluation and ceramic properties of ball clays. *Cerâmica* 44, 88-117.
- Wood, S.A., 1990. The aqueous geochemistry of the rare earth elements and yttrium. Review of available low-temperature data for inorganic complexes and the inorganic REE speciation of natural waters. *Chemical Geology* 82, 159-186.
- Yvon, J., Lietard, O., Cases, J.M., Delon, J-F., 1982. Mineralogie des argiles kaoliniques des Charentes. *Bulletins Minéralogiques* 105, 431-437.
- Zaid, S.M., Gahtani, F.A., 2015. Provenance, diagenesis, tectonic setting and geochemistry of Hawkesbury sandstone (Middle Triassic), southern Sydney Basin, Australia. *Turkish Journal of Earth Sciences* 24, 72-98.



## ANNEXES

*«Fortifiez-vous et ayez du courage ! Ne craignez point et ne soyez point effrayés devant eux ; car l'Éternel, ton Dieu, marchera lui-même avec toi, il ne te délaissera point, il ne t'abandonnera point», Deuteronomie 31: 6.*

---



# Mineralogical, geochemical, and physicochemical features of the Mbalmayo lateritic clays (Southern Cameroon) for potential use as raw materials in the making of fired bricks

Elise Colette Ngo Mapuna<sup>1</sup> · Beyanu Anehumbu Aye<sup>2</sup> · Roger Firmin Donald Ntouala<sup>3</sup> · Paul-Désiré Ndjigui<sup>1</sup> · Paul Bilong<sup>1</sup>

Received: 27 May 2023 / Accepted: 10 November 2023  
© Saudi Society for Geosciences and Springer Nature Switzerland AG 2023

## Abstract

This study focuses on the characterization of lateritic clays collected in the Mbalmayo area for their potential use in the production of fired bricks. They were subjected to physicochemical and mechanical tests. The mineralogy of sample powders was determined by X-ray diffraction and Fourier transforms infrared, while chemical composition was carried out by X-ray fluorescence for major elements and by mass spectrometry for trace elements. The spread-out grain size leads to good compaction of the final products. The mineralogical composition is dominated by quartz and kaolinite, with minor amounts of goethite, anatase, and gibbsite. Geochemical results show a predominance of SiO<sub>2</sub> (62.34–80.73 wt%), followed by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (9.09–19.13 wt%) and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1.82–6.26 wt%). During firing, there is insufficient sintering due to the low fluxing oxide proportion, while the transformation of kaolinite into mullite increases the mechanical strength. The linear shrinkage values increase with firing temperature and are low and below 5% at temperatures less than 1000 °C. The water absorption rate varies between 11 and 23%. The values of flexural strength are moderate and lower than 15 MPa. These overall features make the Mbalmayo lateritic clay suitable for fired brick production as raw materials at the temperatures are 900 and 1000 °C.

**Keywords** Mineralogy · Geochemical features · Lateritic clays · Mbalmayo · Southern Cameroon · Fired bricks

## Introduction

Clay can be defined as a particle size term referring to particles smaller than 2 μm, while on the other hand, it can be used as a mineral term referring to a small group of minerals that are primarily hydrous aluminum silicates, named clay minerals (Meimaroglou and Mouzakis 2019). These clay materials

are subjected to the influence of many physicochemical agents and can occur as residual weathered products, hydrothermally altered products, and sedimentary deposits in basins or catchment areas (e.g., Murray 2007; Ntouala et al. 2016). This wide range of origins is responsible for the abundance of these raw materials, which have an amazing variety of properties that largely depend on their mineral structure and composition (Murray 2007; Celik 2010). The main studied characteristics of clays are their mineralogy, geochemical composition, physicochemical features, and technological properties. The several physicochemical and mineralogical properties of clay materials give them a wide spectrum of applications in the fields of industry (Murray 2007). Among them, clay and clay materials are the main raw materials in the manufacture of ceramic products for construction such as bricks and tiles, owing to their many specific properties before and after firing (e.g., Lee and Yeh 2008; Mahmoudi et al. 2008; Semiz 2017; Tsozué et al. 2017). Residual clay occupies about 67% in Cameroon (Tardy 1993) and can contribute to the sustainable development of housing for developing populations. Despite it, in most potteries, the characterization of clays is

---

Responsible Editor: Domenico M. Doronzo

✉ Paul-Désiré Ndjigui  
Indjigui@yahoo.fr

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

<sup>2</sup> Department of Mining and Mineral Engineering, National Higher Polytechnic Institute (NAHPI), The University of Bamenda, P.O. Box 39, Bambili, Cameroon

<sup>3</sup> Department of Mining and Geological Engineering, Advanced School of Mines Processing and Energy Resources, University of Bertoua, P.O. Box 416, Bertoua, Cameroon

done empirically and can result in tiles and blocks without standards (Savazzini-Reis et al. 2017). This is since, even when derived from the same parent rock, local factors such as microclimate can influence the properties of clay materials (Kessoum Adamou et al. 2023). It is therefore essential to build up a scientific database on local clay materials likely to stimulate production or industrial processing and thus increase their use in construction. This study aims to assess the suitability of Mbalmayo clays in relation to their petrological features for their use as raw materials in construction.

## Geological and geographical setting

Mbalmayo is located between 03°26'40" and 03°36'20" North and between 11°23'30" and 11°40'00" East, in the Nyong and So'o division (Fig. 1d). The Yaoundé group is essentially made up of migmatites and mica schists in the northern part (Yaoundé series) and schists in its southern part (Mbalmayo-Bengbis series), in the border of the group of Ntem (Fig. 1c). It derives from high-pressure metamorphism on volcano-sedimentary material and belongs to the Pan-African (500 to 600 Ma). Its extension to the national territory covers an area greater than 70,000 km<sup>2</sup> (Nedelec et al. 1986; Nzenti et al. 1988; Mvondo et al. 2007). The mineral parageneses of the Mbalmayo-Bengbis series are essentially chloritoschists and mica schist with quartzitic levels (Kamgang Kabeyene Beyala et al. 2009; Onana et al. 2016). According to Kamgang Kabeyene Beyala et al. (2009), this zone is constituted by a varied set of deformed metamorphic rocks of the Precambrian era, represented by chlorite schists more or less rich in calcite and pockets of quartzite. Soils are either red or yellow ferrallitic and located on the interfluves or hydromorphic and located in well-drained lowlands. These soils are generally covered with forest vegetation, composed of species such as *Macaranga barteri*, *Albizia glaberrima*, *Myrianthus arboreus*, *Petersianthus macrocarpus*, *Pterocarpus soyauxii*, *Alostonia boonei*, and *Cleistopholis patens*.

## Materials and methods

### Sampling

Twelve lateritic clay samples were collected from two sites in the Mbalmayo locality. They were sampled in the upper clayey set resulting from the weathering of Mbamayo series chlorite-schist. Eight samples (NGB1 to NGB8) were taken from the Ngat-quarry site, representing the site 1, and four samples (NPA1 to NPA4) from the Ngat-farm site, representing the site 2 (Fig. 1d). These samples were collected with a hand auger for the first site and with a shovel (shallow wells) for the second site. The color of samples was determined using the Munsell Soil Color Charts. The overall color was the main

guide for choosing the two sampling sites. Approximately 25 kg was collected for each sample to determine their physical, mineralogical, and geochemical features. Samples from site 1 were collected from the Mbamboa stream bed and near the sand quarry. NGB3 materials, with a thickness between 70 and 140 cm, have a sandy-silty texture and a gray color (10YR5/1). It is scattered with red (10R4/6) and yellow spots. The NGB5 material has a sandy-silty texture and a gray color (10YR6/1). It contains brownish-yellow patches (10YR6/8) whose thickness varies from 40 to 87 cm. The NGB8 material's texture is clayey-sandy with a light olive brown color (2.5Y5/3) and its thickness ranges from 30 to 100 cm. The other samples from the same site are brown (NGB1, NGB2, NGB6, NGB7). The texture is sandy (NGB4), sandy-silty (NGB1), silty-clayey (NGB2, NGB7), sandy-clayey (NGB6), and silty-sandy (NGB7). The depth of sampling is between 37 and 57 cm (Table 1). These materials are strewn with rootlets. The second-site clayey materials have an overall dark brown color, with a thickness varying between 25 and 160 cm.

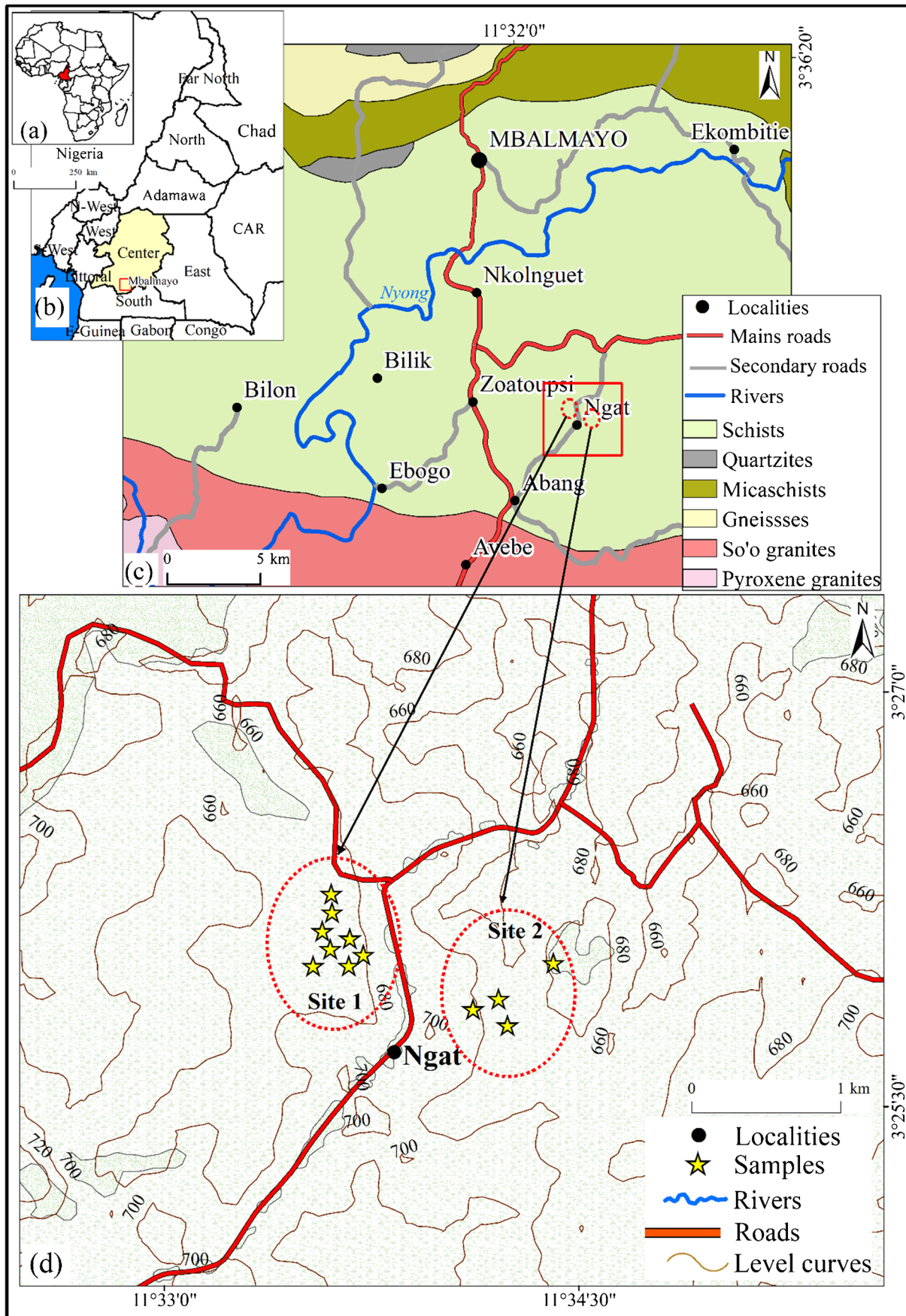
### Physicochemical analyses

Lateritic clay samples were air-dried prior to analysis. Physicochemical analyses were carried out in the Department of Earth Sciences (University of Yaoundé I, Cameroon) and at the Local Materials Promotion Authority (Yaoundé, Cameroon). These analyses included grain size distribution, Atterberg limits, cationic exchange capacity, and organic matter. Particle size analysis was based on the Robinson-Koln pipetting method for clay and silt size fractions (Singh 2009). Sands were separated by sieving after oven drying. Soil samples were air-dried and crushed to collect proportions less than 2 mm in size. Twenty grams of each sample was cold-treated with bleach and water to remove organic matter. Sodium hexametaphosphate was added to deflocculate the solution. An aliquot of each sample was separated into four fractions: clays (< 2 μm); silts (50–2 μm); fine sands (200–50 μm); and coarse sands (2000–200 μm). The plastic behavior of Mbalmayo clays was determined using Atterberg limits. The limits of liquidity (LL) and plasticity (LP) were measured using the Casagrande apparatus according to the method described by Andrade et al. (2011). The index of plasticity was determined by the arithmetic difference between LL and PL according to the formula:

$$PI (\%) = LL - PL \quad (1)$$

The cation exchange capacity (CEC) of the soil is an innovative tool in soil assessment for earth building (Meimaroglou and Mouzakis 2019). CEC was measured with ammonium acetate at pH 7 in three phases: saturation of the absorbing

**Fig. 1** **a** Location of Cameroon relative to African continent. **b** Map of Cameroon locating the study area. **c** Geological map of Nyong and So'o division showing the study area. **d** Topographic map of Mbalmayo showing sampling location



**Table 1** Physico-chemical characteristics of the Mbalmayo lateritic clays

Samples	Thickness (cm)	Atterberg limit (%)			CEC (meq/100g)	PSD (%)			Texture	OM		Color (Munsell code)
		LL	PL	IP		Sand	Silt	Clay		OM	Org. C	
Site 1	37	33.29	22.25	11.04	15.25	29.54	24.7	45.77	Clayey mud	0.58	0.34	Brown (7.5YR 4/4)
	49	36.65	26.18	10.47	15.75	30.68	10.05	59.26	Sandy clay	0.71	0.41	Brown (10YR 4/3)
	70	32.1	21.64	10.46	14.8	42.81	11.33	45.86	Clay mud	0.62	0.36	Gray (10YR 5/1)
	60	35.62	22.83	12.79	16.05	23.61	16.26	60.14	Sandy clay	0.77	0.45	Brown (7.5YR 4/4)
	47	25.17	20.20	4.97	15.45	43.97	13.1	42.93	Sandy mud	0.76	0.44	Gray (10YR 6/1)
	57	25.79	13.44	12.35	15.55	50.73	15.81	33.45	Sandy mud	0.88	0.51	Brown (7.5YR 5/2)
	55	34.98	19.63	15.35	15.25	35.16	14.26	50.58	Sandy clay	0.63	0.37	Brown (7.5YR 5/4)
	70	25.92	20.11	5.81	14.95	42.89	15.49	41.61	Sandy mud	0.73	0.42	Light olive brown (2.5Y 5/3)
Site 2	70	81.6	48.9	32.8	16.02	28.26	20.64	51.51	Sandy clay	1.48	0.86	Dark brown (10YR 3/3)
	40	58.8	27.8	30.9	14.85	31.56	7.27	61.15	Sandy clay	1.02	0.59	Dark brown (7.5YR 3/4)
	25	45.3	26.3	19	14.7	30.20	9.4	60.41	Sandy clay	1.18	0.69	Dark brown (7.5YR 3/4)
	160	53	32.8	20.1	14.85	33.65	11.21	55.14	Sandy clay	1.06	0.62	Dark brown (7.5YR 3/3)

LL, liquid limit; PL, plasticity limit; IP, plasticity index; CEC, cation exchange capacity; PSD, particle size distribution; OM, organic matter; Org. C, organic carbon

complex by the  $\text{NH}_4^+$  ion, extraction of the exchangeable cations, and washing of the soil with alcohol in order to eliminate the saturating  $\text{NH}_4^+$  solution filling the pores. It is determined by spectrometry. Effective CEC is determined by the sum of the exchangeable cations determined at pH 7 and the exchangeable aluminum of the soil. Organic matter contributes to the increase in porosity of ceramic products, and its effect is considered negative when present in high percentages (Christidis 2011). Organic matter was obtained by multiplying the organic carbon content by the factor 1.72.

### Mineralogical and geochemical analyses

Samples were pulverized with an agate mortar and pestle for mineralogy and geochemistry. Mineral determination was performed by X-ray diffraction (XRD) at the laboratory of Institute of Earth Sciences of the University of Lausanne (Switzerland) using the PAN Analytical X'PERT PRO diffractometer equipped with Cu-K $\alpha$  radiation at 40 kV and 45 mA. Fourier transforms infrared (FTIR) analysis using the BURKER OPTIK ALPHA spectrometer was carried out at the University of Yaoundé I. The infrared spectra were recorded in the wavelength range of 4000 to 400  $\text{cm}^{-1}$ . Geochemical analyses were done by XRF for major elements at the laboratory of the Institute of Earth Sciences of the University of Lausanne and by ICP-MS for trace and rare earth elements at the Geoscience Laboratories in Sudbury (Canada). Major element concentrations were determined using the X-ray fluorescence spectrometer. Geochemical indices (CIA and ICV) were calculated to better understand and quantify weathering processes (Nesbitt and Young 1984; Cox et al. 1995).

### Ceramic tests

For the determination of technological properties, four test bricks with parallelepiped shapes (160 mm \* 40 mm \* 40 mm) were produced using a laboratory hydraulic press of 10 tons. For each brick, clay powder with a grain size lower than 2 mm was mechanically pressed at 15 MPa after mixing with 16% water on a dry basis to achieve good workability. The bricks obtained were air dried for 7 days and in the oven at 105 °C for 24 h to prevent cracking during the firing process. Firing was made in an oven up to max T of 1250 °C by step temperatures of 5 °C for minute. The bricks were fired at several temperature steps per sample at respective temperatures of 800, 900, 1000, and 1100 °C for a period of 2 h. Linear shrinkage is determined according to the ASTM C531-2,000 method and expressed in percentage. Water absorption is expressed as a percentage and is obtained by immersing the mass-baked product (Ms) after steaming at 105 °C in water for 24 h (ASTM C20-2,000). The flexural strength is evaluated at the laboratory of Inorganic Chemistry at the University of Yaoundé I according to ASTM C67/C67M-2,018.

## Results

### Grain size distribution

The particle size distribution of the analyzed samples shows a wide range. For site 1, clay fractions range from 33.45 (NGB6) to 60.14% (NGB4), while sand proportions vary between 23.61 (NGB4) and 50.73% (NGB6), and silt from 10.05 (NGB2) to 24.70 (NGB1). These three granulometric fractions range respectively between 51.1 (NPA1) and 61.15% (NPA2), 28.26 (NPA1) and 33.65% (NPA4), and 7.27 (NPA1) and 20.63% (NPA2) for site 2 (Table 1). These values give for different samples sandy mud textures for sample NGB6; clayey mud (NGB1, NGB3, NGB5, and NGB8); and sandy clay (NGB2, NGB4, NGB7, NPA1, NPA2, NPA3, and NPA4) according to Picard (1971) (Fig. 2a).

### Atterberg limits

The liquid limit (LL), plasticity limit (PL), and plasticity index (IP) are presented in Table 1. For site 1, LL ranges from 25.17 (NGB5) to 36.65 (NGB2) and IP between 4.97 (NGB5) and 15.35 (NGB7). These two parameters range, respectively, from 45.3 (NPA3) to 81.6 (NPA1) and from 19 (NPA3) to 32.8 (NPA1) for site 2. Projected in the plasticity diagram (Fig. 2b), the Mbalmayo clay samples plot in the

domains of low compressibility mineral silts (NGB5; NGB6; and NGB8) and medium plasticity mineral clays (NGB1, NGB2, NGB3, NGB4, and NGB7) for site 1 clays. For second site clays, the required domains are the mineral clays of medium plasticity (NPA3) and the organic clays and mineral silts of high compressibility (NPA1, NPA2, and NPA3).

### Cation exchange capacity

The cation exchange capacity is presented in Table 1. These values were low for all samples and in a very similar range, from 14.8 (NGB3) to 16.05 (NGB4) meq/100 g for the samples of site 1 and from 14.7 (NPA3) to 16.02 (NPA1) meq/100 g for the samples of site 2.

### Organic matter

Organic matter values in the samples from site 1 are less than 1%. These values vary between 0.58% (NGB1) and 0.88% (NGB6). In site 2, organic matter values are greater than 1% and range from 1.02% for NPA2 to 1.48% for NPA1 (Table 1). The organic carbon in the samples collected at Mbalmayo has all of its values below 1%. The samples from the second site have higher organic carbon values than the first site samples (Table 1). These values range from 0.34% (NGB1) to 0.51% (NGB6) for the site

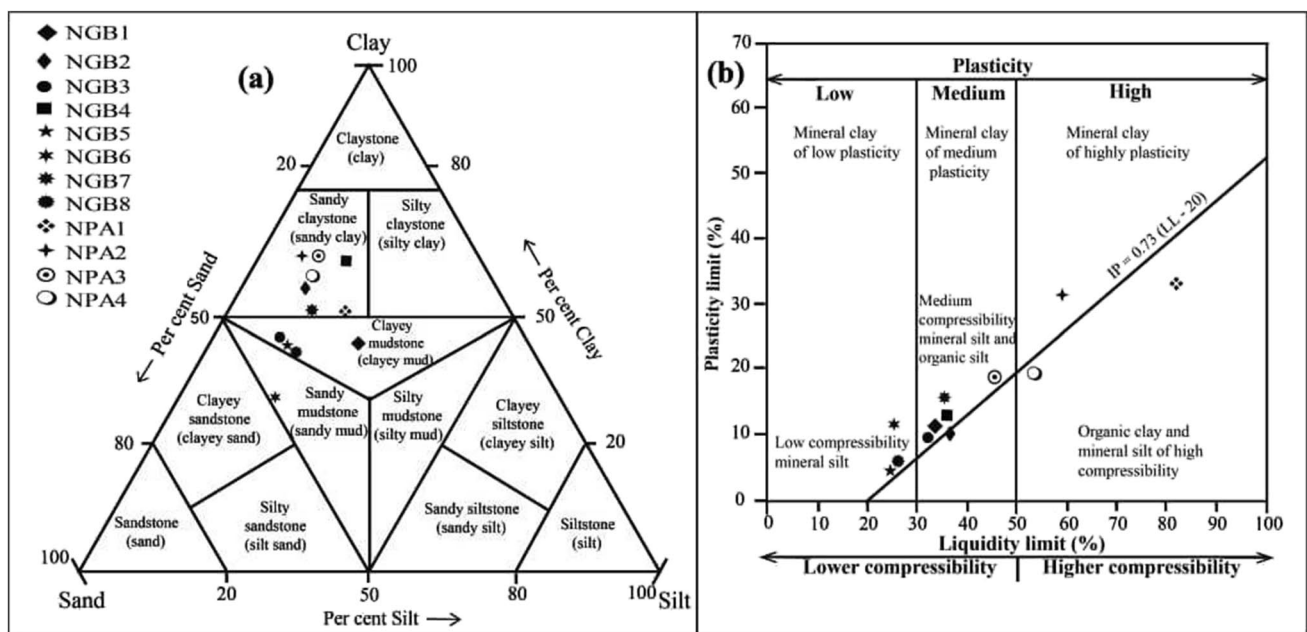


Fig. 2 a Classification of studied clay materials according to Picard (1971). b Position of Mbalmayo lateritic clays in the Casagrande plasticity chart

1 samples. For site 2 samples, the organic carbon values range from 0.59% for NPA2 to 0.89% for NPA1 (Table 1).

## Mineralogy

The mineralogical assemblage of the lateritic clays from the Mbalmayo area reveals the presence of kaolinite, quartz, goethite, and anatase from site 1 (Fig. 3a). In site 2, this XRD patterns also reveal the presence of gibbsite (Fig. 3b). The FTIR spectrometry of the studied clay materials is the same in all samples. They show that the typical spectrum of kaolinite is expressed, with broad vibrational bands around 3699, 3685, and 3656  $\text{cm}^{-1}$  (Fig. 4a, c). These bands correspond to O-H stretching bands, usually observed in kaolinite-based clay. Si-O bond elongation vibrations are observed at 1006  $\text{cm}^{-1}$ , Si-O-Al bond elongation vibrations at 900  $\text{cm}^{-1}$ , and symmetrical Si-O bond vibrations around 450  $\text{cm}^{-1}$ .

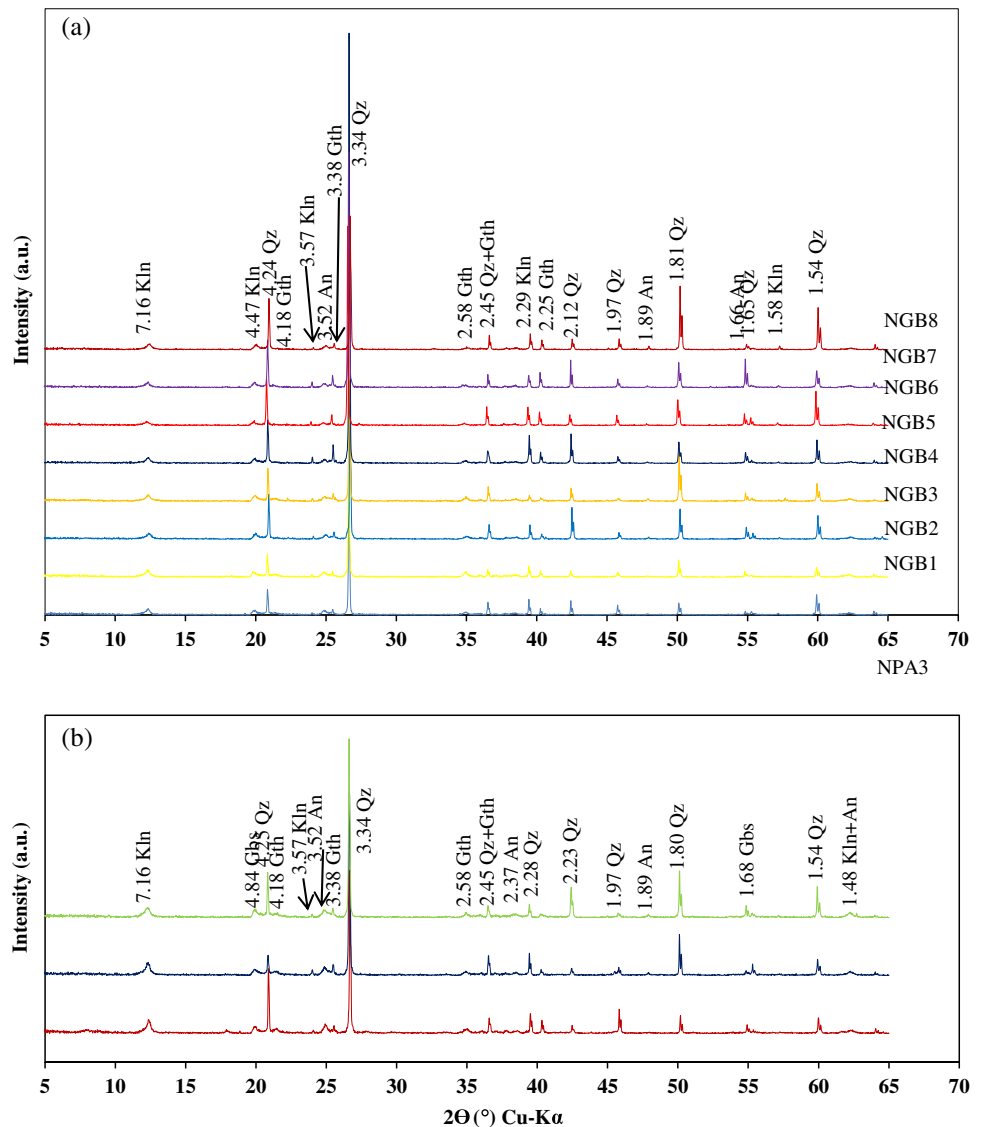
In the low frequency range between 1200 and 400  $\text{cm}^{-1}$  (Fig. 4b, d), Si-O symmetric elongation vibrations are observed. The bands observed at 993, 998, and 1000  $\text{cm}^{-1}$  respectively, of the samples, as well as their shoulder at 907  $\text{cm}^{-1}$  are specific to kaolinite and quartz. The bands at 791, 787, and 749  $\text{cm}^{-1}$  observed in all the analyzed samples correspond to the Al-O vibration of aluminosilicates.

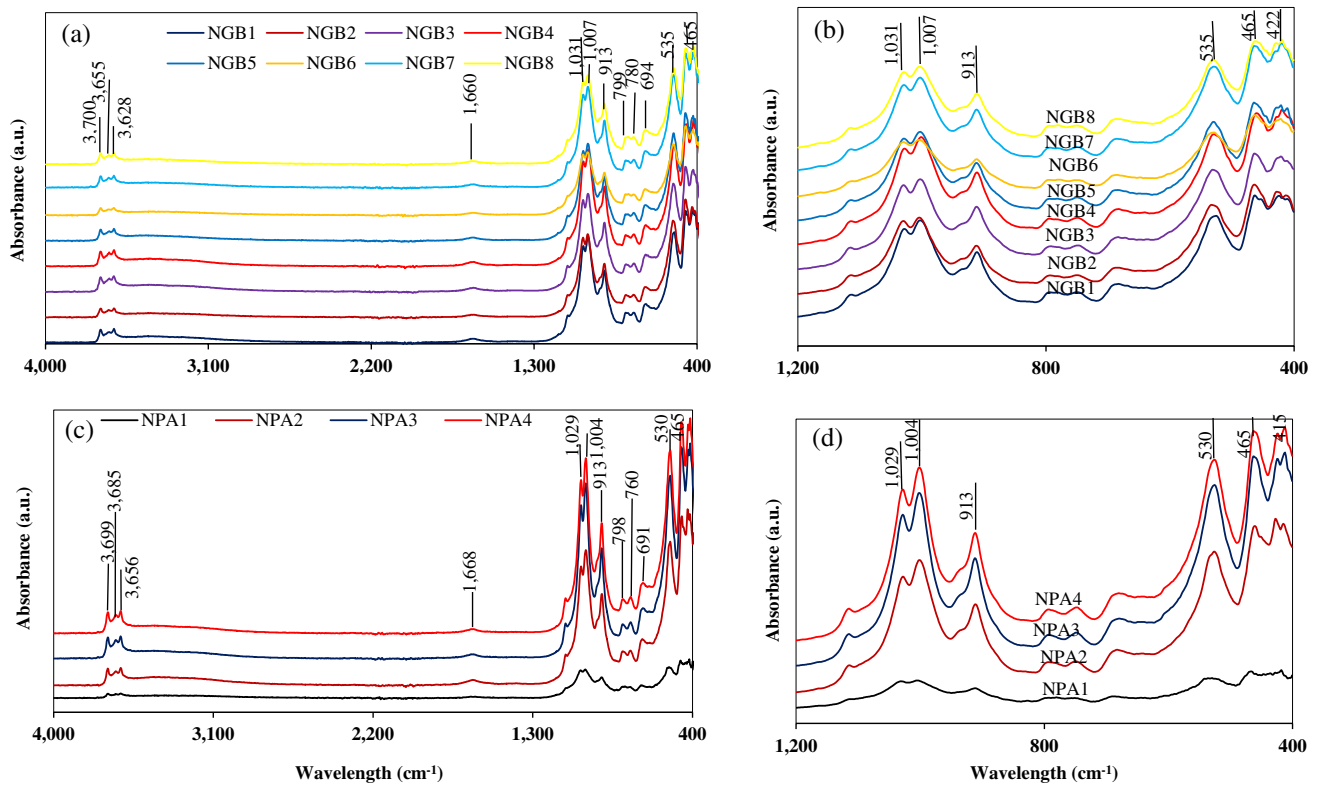
## Geochemistry

### Major elements

The major element contents in the Mbalmayo lateritic clay samples (Table 2) reflect the mineralogical composition.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  are the main oxides in these samples. Their values range between 67.55 and 80.73 wt%, 9.09 and 15.38 wt%, and 1.82 and 4.65 wt% for site 1 samples, and between

**Fig. 3** XRD patterns of the lateritic clays from Mbalmayo: **a** site 1 and **b** site 2. Qz, quartz; Kln, kaolinite; Gth, goethite; An, anatase; Gbs, gibbsite





**Fig. 4** FTIR spectra of Mbalmayo lateritic clays. Between 400 and 4000  $\text{cm}^{-1}$  **a–c** and between 400 and 1200  $\text{cm}^{-1}$  **b–d**

62.34 and 64.27 wt%, 15.64 and 19.13 wt%, and 5.20 and 6.26 wt% for site 2, respectively. A high  $\text{SiO}_2$  content reflects the high proportion of quartz in the sands. Rutile or titanium ( $\text{TiO}_2$ ) contents are relatively high in all samples and range from 1.26 to 1.44 wt% in site 1 clays and from 1.29 to 1.56 wt% in site 2 clays. The phosphorus and manganese oxide contents are very low (Table 2). Loss on ignition (LOI) contents of site 1 ranged from 5.47 to 9.12 wt% and those of site 2 ranged from 10.19 to 10.78 wt%. The sum of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  is above 79 wt% (Table 2). The  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  values are less than 10 (Table 2). The ratio of  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  distinguishes between quartz-rich and clay-rich materials.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  contents reflect the clay mineral proportion and  $\text{SiO}_2$  that of quartz. High  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  values confirm the high proportion of silicates in these samples. This ratio reveals the relative abundance of Si in these materials compared to Al. The ratio of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  has an average value of 9.15 for site 1 and 12.18 for site 2 (Table 2).  $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  has all its values less than 1. This is equally observed in the sum of the fluxes ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{MgO} + \text{CaO}$ ), with the exception of samples NGB2 and NPA1, which have values equal to 1.11 and 1.61 wt%, respectively.

The calculation of the CIA (chemical index of alteration) shows that the Mbalmayo samples have high values. They range from 93.96 to 95.53% for site 1 clays and from 92.05 to 97.5% for site 2 clays (Table 2). CIA values of about 50% indicate no weathering; values between 60 and 80% suggest

moderate weathering; and values above 80% indicate high intensity of chemical weathering (Nesbitt and Young 1984). These values confirm that the Mbalmayo clay samples have undergone a high intensity of chemical alteration. The ICV (index of compositional variability) has almost all its values lower than 0.50 and varies from 0.35 to 0.49 for the clays of site 1 and from 0.40 to 0.59 for those of the second site. These values refer to the intense alteration of the feldspars (Fedo et al. 1997). Binary diagrams established between major elements (Fig. 5) show negative correlations between  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ , and  $\text{TiO}_2$  (Fig. 5a–f). These negative correlations reveal that the accumulation of silica is not concomitant with that of the other chemical elements. They also show the predominance of quartz in these Mbalmayo lateritic clays.

**Trace elements**

The distribution of trace elements is shown in Table 3. Trace elements are grouped as ferromagnesian elements (Cr, V, Ni, Cu, Co, and Sc), large-ion lithophile elements (LILE: Ba, Rb, Li, Sr, Pb, and Cs), and high field strength elements (HSFE: Zr, Th, Nb, U, Mo, W, and Ta). Ferromagnesian trace element contents are higher in site 2 samples than in site 1. Chromium contents are low in all samples from site 1 (46 to 68 ppm), though higher than

**Table 2** Major element distribution (in %) and element ratios in the Mbalmayo lateritic clays

	d.l	Site 1								Site 2			
		NGB1	NGB2	NGB3	NGB4	NGB5	NGB6	NGB7	NGB8	NPA1	NPA2	NPA3	NPA4
SiO <sub>2</sub>	0.04	71.68	67.55	75.01	67.57	76.69	80.73	73.93	80.48	64.27	62.81	64.08	62.34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	13.13	15.38	12.33	15.28	11.19	9.09	12.17	10.55	15.64	17.29	17.48	19.13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	3.77	4.60	2.11	4.65	2.21	2.33	3.28	1.82	6.26	5.99	5.20	5.46
MgO	0.01	0.31	0.36	0.30	0.38	0.28	0.28	0.32	0.25	0.45	0.30	0.24	0.22
MnO	0.002	0.04	0.05	0.03	0.11	0.03	0.04	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04
K <sub>2</sub> O	0.01	0.57	0.68	0.50	0.69	0.45	0.43	0.54	0.41	1.17	0.59	0.39	0.39
CaO	0.006	0.06	0.03	0.01	0.10	0.02	0.02	0.02	< dl	0.01	0.03	0.03	0.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.002	0.06	0.05	0.04	0.06	0.04	0.05	0.05	0.04	0.08	0.08	0.08	0.08
TiO <sub>2</sub>	0.01	1.43	1.44	1.34	1.41	1.32	1.30	1.33	1.26	1.29	1.41	1.45	1.56
Na <sub>2</sub> O	0.02	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.05	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.002	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
LOI	-	7.84	8.81	6.44	9.12	6.18	5.47	6.99	5.84	10.52	10.78	10.19	10.26
Total	-	98.94	99.00	98.15	99.41	98.45	99.80	98.72	100.72	99.77	99.34	99.23	99.53
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	5.46	4.39	6.08	4.42	6.85	8.88	6.07	7.63	4.11	3.63	3.67	3.26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /K <sub>2</sub> O	-	6.61	6.76	4.22	6.74	4.91	5.42	6.07	4.44	5.35	10.15	13.33	14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Na <sub>2</sub> O	-	328	385	411	509	373	182	406	352	391	576	583	638
CIA	-	94.61	94.73	95.30	94.76	95.13	93.96	94.78	95.53	92.05	95.91	97.11	97.5
ICV	-	0.47	0.46	0.35	0.48	0.39	0.49	0.45	0.36	0.59	0.48	0.42	0.4
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	84.81	82.93	87.34	82.85	87.88	89.82	86.10	91.03	79.91	80.1	81.56	81.47
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O+CaO+MgO	-	0.98	1.11	0.84	1.20	0.78	0.78	0.91	0.69	1.67	0.95	0.69	0.65
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	5.46	4.39	6.08	4.42	6.85	8.88	6.07	7.63	4.11	3.63	3.67	3.26
K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.07	0.03	0.02	0.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>	-	9.18	10.68	9.20	10.84	8.48	6.99	9.15	8.37	12.12	12.26	12.06	12.26

d.l, detection limits

CIA (%) =  $100[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})]$  (Nesbitt and Young 1984)

ICV =  $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2)/\text{Al}_2\text{O}_3$  (Cox et al. 1995)

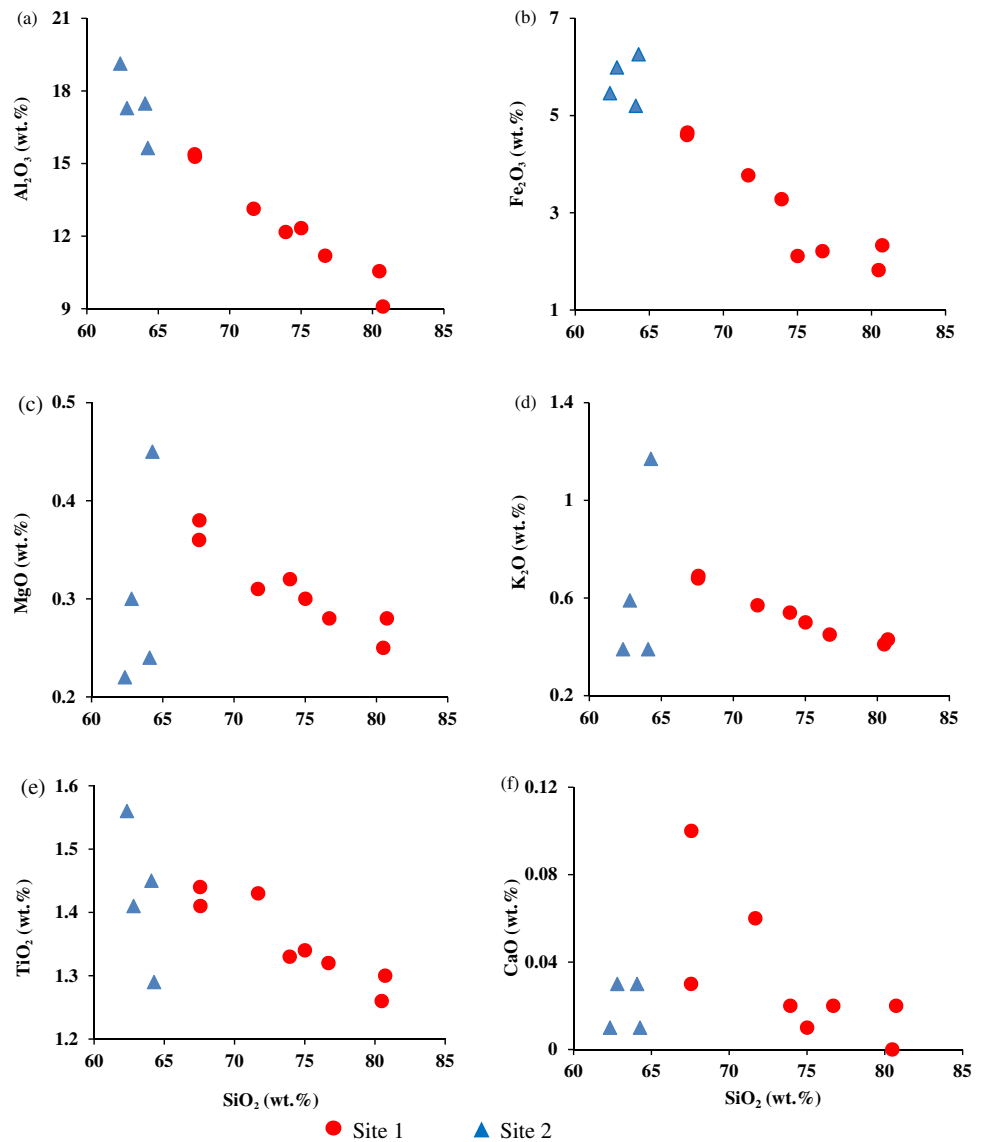
those of site 2 (Table 3). Vanadium occurs as a ferromagnesian element with the highest contents, ranging from 63.50 to 109.3 ppm in samples from site 1 and 108 to 128.8 ppm in samples from site 2 (Table 3). Cobalt contents are very low, ranging from 2.75 to 5 ppm. Copper, nickel, and scandium contents are below 40 ppm. Gallium is a post-transition metal; its contents vary from 12.29 to 21.42 ppm in samples from site 1 and 22.87 to 25.86 ppm in samples from site 2 (Table 3). In the second group of trace elements, Ba is the most abundant element in site 2 samples, ranging from 73.4 to 186 ppm and from 94.7 to 151.5 ppm in site 1. Lithium contents vary from 10 to 13 ppm in site 2 and from 10.5 to 18.8 ppm in site 1. The behavior of Pb is practically similar to that of strontium. The average Pb contents are 17.62 ppm in site 1 and 16.1 ppm in site 2. Rb contents are below 85 ppm. Cesium contents are below 6 ppm except in 3 samples from the second site (NPA2, NPA3, and NPA4). In the HSFE group, Zr is the most concentrated trace element; its concentration ranges from 227 to 295 ppm (site 1) and from 247 to 309 ppm (site 2). The thorium contents vary from 8.05

to 15.19 ppm. Uranium, Mo, W, and Ta contents are low, below 3 ppm. Y and Hf contents are also up to 5 ppm in all samples. Be, Cd, Sb, In, Sn, and Tl contents are below 4 ppm (Table 3). The Th/U and Th/Co ratios show that these samples are richer in thorium than in uranium and cobalt.

### Rare earth elements

Mbalmayo lateritic clays are depleted in rare earth elements, with concentrations less than 100 ppm in both sites (Table 4). Only the NGB7 sample has a sum of 104.37 ppm. These samples are marked by an abundance of light rare earth elements (LREE) compared to heavy rare earth elements (HREE). The values are characterized by moderate cerium and lanthanum contents. Cerium contents fluctuate between 24.25 and 40.29 ppm in samples at site 1 and between 18.22 and 32.32 ppm for site 2 samples. Lanthanum values vary between 13.5 and 23.8 ppm for the first site and between 10.6 and 15.4 ppm for the second. These most represented rare earth elements are assisted by neodymium, which has contents greater than or equal to 5 ppm.

**Fig. 5** Binary diagrams silica vs. selected major elements



Praseodymium, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, and Lu contents are low to very low (less than 5 ppm). Among LREE, only Eu has concentrations below 1 ppm. On the other hand, for the HREE, the elements (Tb, Ho, Tm, and Lu) also have concentrations similar to Eu (less than 1).

Chondrite-normalized spectra clearly show that REE has very high concentrations compared to those of the chondrite. The spectra show enrichment in LREE compared to HREE. We observe a slight positive anomaly (NGB1, NGB2, and NGB4) and a negative anomaly (NGB3, NGB5, NGB6, NGB7, and NGB8) in Ce and also a negative anomaly in Eu in all the samples for site 1 (Fig. 6a). In site 2 samples, a slight positive cerium anomaly and a negative Eu anomaly are observed (Fig. 6b).

### Semi-quantification of the minerals using geochemical data

The mineralogical analysis from XRD was coupled to the chemical composition to carry out a semi-quantification of the mineral assemblage using Eq. (2) (Yvon et al. 1982; Moore and Reynolds Jr 1997):

$$T(x) = \sum_1^n Mi \times Pi(x) \tag{2}$$

where  $T(x)$  is the percentage of oxide of the chemical element “ $x$ ”;  $Mi$  is the percentage of mineral “ $i$ ” in sample containing chemical element “ $x$ ”; and  $Pi(x)$  is the proportion of element “ $x$ ” in mineral “ $i$ ” (calculated from the ideal mineral formula).

**Table 3** Trace element distribution and element ratios in the Mbalmayo lateritic clays

dl	Site 1									Site 2			
	NGB1	NGB2	NGB3	NGB4	NGB5	NGB6	NGB7	NGB8	NPA1	NPA2	NPA3	NPA4	
Co	0.09	4.15	5.11	3.11	7.15	3.07	2.93	4.30	2.76	4.80	4.76	5.00	4.83
Cr	2.9	64	64	55	68	53	46	54	54	80	76	72	76
Cu	0.4	21.1	23.9	15.8	28	16.1	14.5	20.2	14.2	22.4	22.9	24.9	24.5
Ni	0.6	28.1	31.3	25.7	35.7	23.7	18.7	24.9	18.6	27.5	31.9	35.2	35.1
Zn	2	44	44	37	49	35	30	36	34	57	59	62	56
Sc	0.17	10.9	11.1	8.6	11.8	8.2	6.6	9.4	7.9	12.6	11.9	13.2	12
V	0.4	104	106	78	109	80	64	83	69	129	121	110	108
Ba	1.3	123.9	147.9	108.7	151.5	110.6	94.7	118.7	95.4	186	104.4	73.4	75.8
Sr	1.3	18.8	19.6	16.3	23.2	16.7	16.1	17.3	12.9	16.6	20.3	19.1	22.1
Li	0.24	13.9	16	18.8	17.4	16	10.5	13.8	11.1	13.1	12.8	11.3	10
Pb	0.29	19.06	20.13	16.2	19.84	16.86	15.17	17.72	15.98	17.02	15.32	16.49	15.55
Rb	0.15	68.23	68.48	57.33	83.46	52.48	47.31	61.05	46.22	78.82	69.45	51.88	53.13
Cs	0.006	5.11	5.53	4.43	5.82	3.85	3.51	4.59	3.7	5.68	6.25	6.03	6.08
Zr	4.00	267	263	229	295	227	253	253	255	247	259	270	309
Nb	0.05	25.55	26.28	22.04	27.24	21.49	20.59	23.41	22	23.81	30.21	31.89	33.5
Ga	0.04	19.34	21.12	15.71	21.41	15.26	12.29	17	15.09	22.87	25.70	25.7	25.86
U	0.01	2.22	2.42	1.93	2.57	2.1	1.99	2.26	1.99	2.74	2.45	2.61	2.53
Mo	0.08	1.74	1.98	1.1	1.91	1.29	1.07	1.49	1.19	2.02	2.07	2.07	2
W	0.023	1.6	1.79	1.41	1.86	1.44	1.29	1.56	1.42	2.08	2.00	2.05	2.08
Ta	0.015	1.74	1.85	1.54	1.86	1.57	1.59	1.72	1.66	1.75	2.01	2.18	2.28
Y	0.09	23.17	19.74	20.17	20	19.27	22.2	21.61	19.74	16.63	17.58	19.67	22.09
Hf	0.09	6.18	7.1	5.78	7.72	5.84	6.67	6.87	6.91	6.72	6.57	7.01	7.43
Be	0.024	0.68	0.78	0.55	0.8	0.54	0.43	0.61	0.48	1	0.77	0.63	0.6
Cd	0.018	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.03
Sb	0.025	0.52	0.54	0.45	0.55	0.46	0.45	0.49	0.48	0.86	0.67	0.62	0.52
In	0.0017	0.07	0.08	0.06	0.08	0.06	0.05	0.06	0.05	0.1	0.08	0.08	0.08
Sn	0.17	3.16	3.43	2.76	3.47	2.74	2.37	2.94	2.75	3.53	3.84	3.93	4.01
Tl	0.004	0.42	0.54	0.38	0.55	0.37	0.35	0.45	0.35	0.62	0.48	0.47	0.44
Bi	0.05	0.33	0.38	0.29	0.38	0.29	0.28	0.32	0.32	0.42	0.38	0.39	0.4
Cs	0.006	5.11	5.53	4.43	5.82	3.85	3.51	4.59	3.7	5.68	6.25	6.03	6.08
Th	0.027	10.59	12.9	8.96	12.72	9.43	8.06	10.73	8.32	13.34	14.34	15.12	14.61
Th/U	-	4.77	5.33	4.64	4.95	4.52	4.05	4.74	4.16	4.86	5.85	5.80	5.77
Th/Co	-	2.6	2.5	3	2	3.	3	2.5	3	3	3	3	3
Zr/Sc	-	24.50	23.69	26.63	25	27.68	38.33	26.91	32.28	19.6	21.76	20.45	25.75

For the calculation, we assume the following:  $\text{TiO}_2$  is associated with anatase as pure titanium oxide;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  is associated with goethite; and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  was attributed to kaolinite.

The obtained results for mineral quantification are listed in Table 5. In the site 2 samples, XRD patterns (Fig. 3b) show that gibbsite diffraction peaks (4.84 Å and 1.68 Å) are of relatively low intensities and from this, gibbsite was assumed to be present in the trace, which allows all the aluminum to be associated with the kaolinite content. It is observed that the total quantification is exceeding 100%, this is probably associated with an excess estimate for kaolinite, which may be associated with the presence of a trace aluminum carrier such as gibbsite or other trace 2:1 clays, as

indicated by the MgO content from the chemical analysis (Table 2). However, this quantification is in good agreement with the XRD patterns, which show high quartz content with the predominant clay mineral being kaolinite.

### Mineralogical, physical, and mechanical properties of the fired specimens

The fired bricks from the two Mbalmayo sites are made of quartz, mullite, hematite, and anatase (Fig. 7a–d). The color of the fired specimens changes with increasing temperature (Fig. 8). After firing, this color tends towards yellowish-red, red yellow, or red for the specimens of site 1 (Fig. 8). For the

**Table 4** Rare earth element distribution (in ppm) and element ratios of the Mbalmayo lateritic clays

	d.l.	Site 1								Site 2			
		NGB1	NGB2	NGB3	NGB4	NGB5	NGB6	NGB7	NGB8	NPA1	NPA2	NPA3	NPA4
La	0.09	18.30	20.60	18.20	20.10	14.90	18.70	23.80	13.50	10.60	13.30	15.40	14.50
Ce	0.17	33.48	40.29	32.17	39.53	25.91	33.20	43.36	24.25	18.22	22.04	32.32	23.27
Pr	0.019	3.49	4.09	3.46	3.96	2.79	3.74	4.75	2.73	2.04	2.35	2.87	2.52
Nd	0.11	11.72	14.16	11.97	13.74	9.49	12.64	16.07	9.89	7.07	8.12	10.26	8.29
Sm	0.05	2.06	2.49	2.09	2.49	1.71	2.19	2.74	1.84	1.43	1.54	1.86	1.48
Eu	0.008	0.43	0.50	0.42	0.51	0.36	0.45	0.55	0.39	0.34	0.35	0.42	0.35
Gd	0.04	2.01	2.25	1.98	2.16	1.73	2.02	2.39	1.89	1.67	1.65	1.88	1.59
Tb	0.009	0.39	0.41	0.37	0.41	0.35	0.39	0.45	0.37	0.34	0.33	0.38	0.35
Dy	0.04	3.06	3.16	2.82	3.03	2.78	3.18	3.50	3.01	2.63	2.61	2.95	2.81
Ho	0.006	0.73	0.72	0.67	0.71	0.66	0.78	0.80	0.71	0.61	0.62	0.71	0.73
Er	0.04	2.39	2.39	2.18	2.37	2.22	2.56	2.61	2.43	2.02	2.02	2.29	2.42
Yb	0.008	2.35	2.37	2.11	2.41	2.15	2.53	2.59	2.38	2.12	2.02	2.29	2.42
Tm	0.005	0.36	0.37	0.33	0.36	0.33	0.38	0.39	0.37	0.31	0.31	0.35	0.36
Lu	0.005	0.33	0.34	0.29	0.34	0.29	0.36	0.36	0.34	0.29	0.29	0.33	0.35
REE	-	81.10	94.14	79.06	92.12	65.67	83.12	104.36	64.10	49.69	57.55	74.31	61.44
LREE	-	69.48	82.13	68.31	80.33	55.16	70.92	91.27	52.60	39.70	47.70	63.13	50.41
HREE	-	11.62	12.01	10.75	11.79	10.51	12.20	13.09	11.50	9.99	9.85	11.18	11.03
LREE/HREE	-	5.98	6.84	6.35	6.81	5.25	5.81	6.97	4.57	3.97	4.84	5.65	4.57
Ce/Ce*	-	1.02	1.07	0.99	1.08	0.98	0.96	0.93	0.97	1.17	1.15	1.19	1.19
Eu/Eu*	-	0.63	0.64	0.65	0.66	0.64	0.65	0.64	0.63	0.67	0.65	0.68	0.68
(La/Yb) <sub>N</sub>	-	0.82	0.92	0.91	0.88	0.73	0.78	0.97	0.60	0.53	0.70	0.71	0.63

d.l., detection limits

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

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

$$(La/Yb)_N = (La_{sample}/La_{chondrite}) / (Yb_{sample}/Yb_{chondrite})$$

specimens of site 2, the color changes from yellowish-brown at 800 and 1000 °C to reddish-brown at 1100 °C (Table 6). The sound is slightly metallic for all samples and at all temperature levels.

The ceramic properties of the specimens from the Mbalmayo samples are grouped in Table 6. The linear shrinkage values increase with temperature. In site 1, the linear shrinkage values are between 0.00 (NGB8 at 800 °C) and 3.14% (NGB2 at 1100 °C). The linear shrinkage values of second-site specimens are higher than those from site 1 (Fig. 9a), varying between 1.19% (NPA1 at 800 °C) 7.30% (NPA1, NPA4 at 1100 °C).

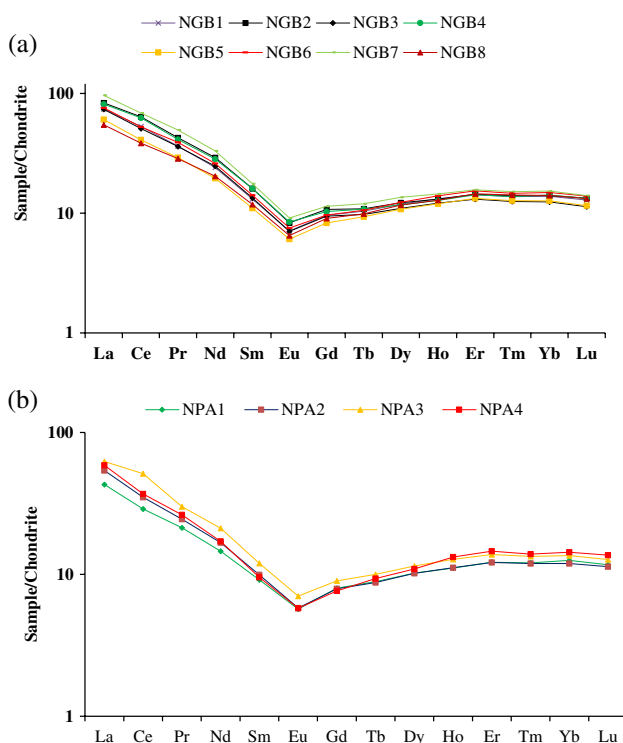
Mass loss values range from 4.68% (NGB6 at 800 °C) to 12.66% (NGB1 at 1100 °C) for site 1 (Fig. 9b). For site 2 samples, the mass loss values range from 6.97% (NPA1 at 800 °C) to 9.10% (NPA4 at 1100 °C).

The water absorption rate of the specimens from site 1 is moderate and ranges from 17.05% (NGB4 at 1100 °C) to 25.64% (NGB5 at 800 °C). The water absorption rate of the specimens from site 2 oscillates between 11.00% (NPA2 at 1100 °C) and 22.23% (NPA4 at 800 °C). These values decrease with increasing temperature (Fig. 9c).

For the briquettes of the site 1, the flexural strength values range from 1.25 MPa (NGB5 at 800 °C) to 9.55 MPa (NGB2 at 1100 °C). The values of this parameters range from 7.20 MPa (NPA3 at 800 °C) to 12.17 MPa (NPA1 at 1100 °C) for site 2. The flexural strength values have the same behavior as the linear shrinkage and mass loss values (Fig. 9d).

## Discussion

The suitability of clay in the manufacture of ceramic products is determined by the physical properties, mineralogy, and geochemistry of the material to be used. These factors will determine the behavior of the clay during shaping, drying, and firing, with a direct influence on the shaped product. The particle size distribution and index of plasticity of clay materials are very important factors in determining their suitability for various applications, and special attention should be paid to the fine fraction (< 2 μm) for ceramics (Dondi et al. 1998; Abdelmalek et al. 2017). The spread-out grain size is favorable to the good compaction of the final products (Reeves et al. 2006). The different



**Fig. 6** REE chondrite normalized patterns of lateritic clays: **a** site 1 and **b** site 2, data normalization from Pourmand et al. (2012)

textures encountered in these samples demonstrate the predominance of clay proportions, which may act like binder and significantly affect mechanical strength (Meimaroglou and Mouzakis 2019). The presence of quartz could be the main reason for the low plasticity in the samples (Nzeukou Nzeugang et al. 2021). This high amount of quartz remains after firing fewer than 1200 °C and induces high strength as filler (Ntouala et al. 2023). The particle size distribution shows a considerable sandy fraction, which is consistent with the XRD and chemical data, which indicate a high proportion of quartz. A clay fraction of up to 62% in site 2 can cause difficulties in the manufacture of ceramic products. They may require the addition of

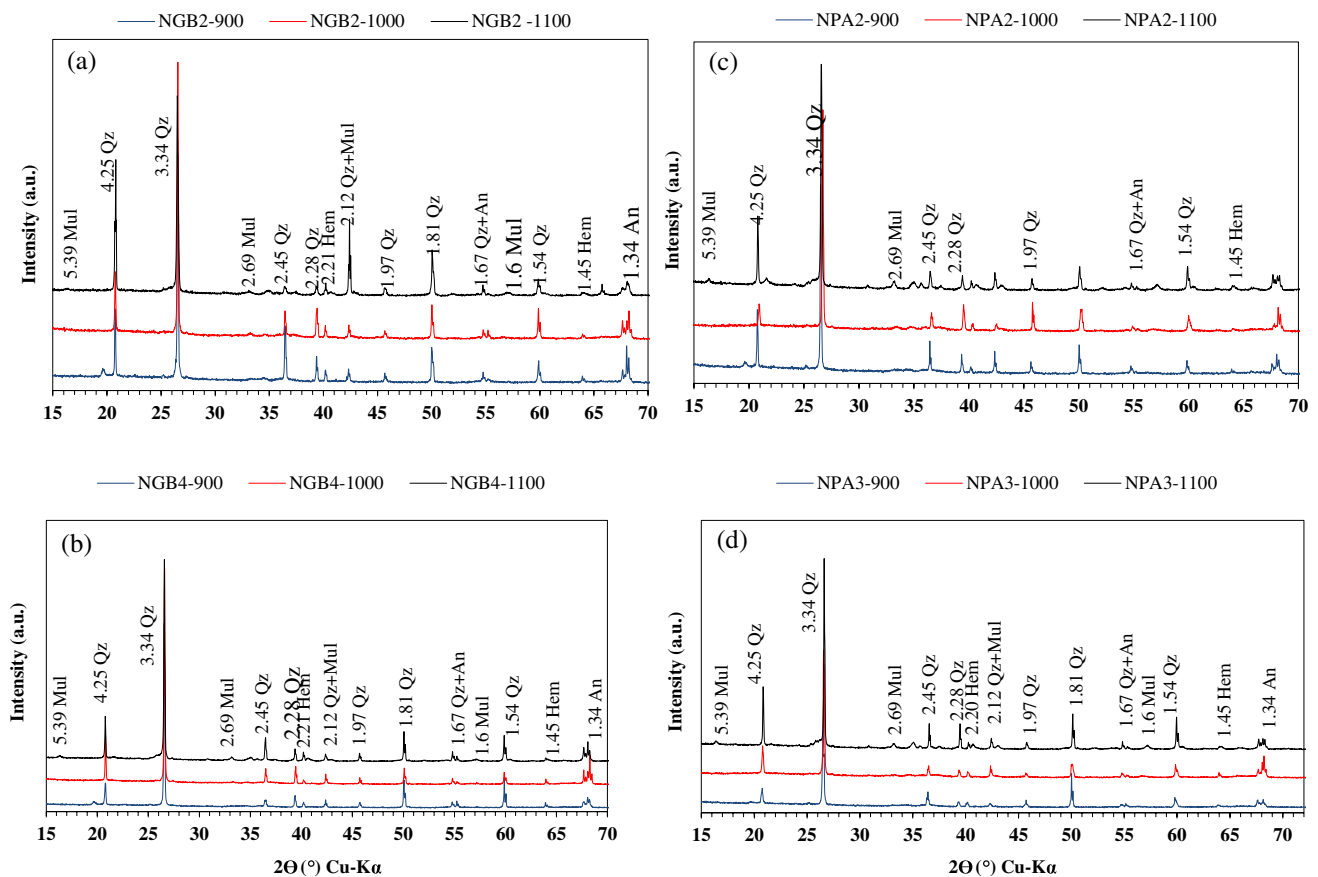
small amounts of sand or silt, which could allow them to have a grain size suitable for producing building materials (Onana et al. 2019). On the other hand, crushing and sieving can be used to reduce the coarse particle content in rich sand samples from site 1 (NGB3, NGB5, NGB6, and NGB8), which can result in better ceramic products (Mahmoudi et al. 2008; Bennour et al. 2015). The Winkler (1954) diagram (Fig. 10a) shows that these samples can be used in the fields of roofing tiles and masonry bricks (NGB1, NGB3, NGB5, NGB7, NGB8, NPA1, and NPA4) and vertically perforated bricks (NGB6). Samples NGB2, NGB4, NPA2, and NPA3 do not belong to any field and are therefore out of scope in this diagram. The addition of small amounts of sand and silt could allow these samples to have a grain size suitable for producing building materials (Ntouala et al. 2023).

The plasticity of a clay sample depends on both particle size and mineralogical compositions (McNally 1998). Similarly, Abdullahi et al. (2012) showed that the plasticity of clays is attributed to their kaolinite dominance and high organic content. The high values of the plasticity index are in agreement with the fine grain size identified in these clays. For practical reasons, the plasticity index of raw materials should be higher than 10% (Abajo 2000). Clay materials with a plasticity index < 10% can cause inappropriate dimensional characteristics and even cracks in the manufactured products during the extrusion process and are not indicated for the production of building materials due to the possible variation in the amount of extrusion water (Abajo 2000; Elimbi et al. 2011). Their plasticity can be improved by adding high-plastic clay minerals as smectite in very small amounts (Nzeukou Nzeugang et al. 2021). The Mbalmayo samples with plasticity index values above 10%, except for NGB5 and NGB8, are suitable for brick and tile industry. The high PL values of these samples allow for more difficult drying of the firing products. These high PL values are also important for applications because they indicate the minimum moisture content needed to reach the plastic state (Celik 2010). Plotted in the extrusion prognostic diagram of Marsigli and Dondi 1997 (Fig. 10b), it is apparent that

**Table 5** Semi-quantitative mineralogical data of the Mbalmayo lateritic clays

	Site 1								Site 2			
	NGB1	NGB2	NGB3	NGB4	NGB5	NGB6	NGB7	NGB8	NPA1	NPA2	NPA3	NPA4
Quartz	63	55	67	56	69	74	67	72	52	52	51	n.a
Kaolinite	33	36	30	38	28	23	30	25	39	42	43	n.a
Gibbsite	-	-	-	-	-	-	-	-	tr	tr	tr	n.a
Goethite	4	5	2	5	2	2	3	2	7	5	5	n.a
Anatase	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	n.a
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	-

n.a, not analyzed; tr, trace



**Fig. 7** XRD of the fired products: site 1 **a–b** and site 2 **c–d**. Qz, quartz; An, anatase; Hem, hematite; Mul, mullite

among the analyzed samples, only NGB6 is located within the optimal extrusion zone. The samples NGB1, NGB2, NGB3, NGB4, and NGB7 belong to the acceptable zone, while NGB5, NGB8, NPA1, NPA2, and NPA4 are located outside the acceptable and optimal extrusion zones.

Studied samples have low organic matter content and are suitable for brick production. For high-quality bricks, the organic matter content should be lower than 2% (Mango Itulama et al. 2019). Cation exchange capacity values are also low, probably related to the mineralogical composition of the samples (Doum et al. 2020). The low organic matter proportions (OM < 2%) are in agreement with the low cation exchange capacity values (Meimaroglou and Mouzakis 2019) and are good for ceramic. The values of the present study are indicative of the abundance of kaolinite as shown by the infrared spectra (Mbey et al. 2021), with accessory chlorite and low matter content. CEC provides a stronger correlation with compressive strength and linear shrinkage than clay content and plasticity index (Meimaroglou and Mouzakis 2019). These data are lower than those found in the Douala clay materials by Kankao et al. (2022).

The high proportion of SiO<sub>2</sub> contents and the low proportion of fluxing oxides (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O + CaO + MgO < 2.5)

may cause insufficient sintering during the firing process (Alcántara et al. 2008; Onana et al. 2019). The considerable proportion of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contributes to improving the mechanical resistance of bricks as it can be transformed into mullite during the vitrification process (Ukwatta and Mohajerani 2017). The SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio is higher than 4, showing the silicic predominance of the studied materials and the expressive proportion of quartz (Lahcen et al. 2014). The low content of alkali oxides in all samples is a consequence of kaolinitic clays that naturally have a low content of fluxes (Monterio and Vieira 2004) and the absence of other clay minerals, such as illite, but also carbonates (Nzeukou Nzeugang et al. 2021). The low proportion of flux oxides may result in low vitreous phase formation during firing (Ntouala et al. 2016; Roudouane et al. 2020). In this case, the studied samples are not suitable to produce glassy materials but are suitable for bricks and tiles. The iron oxide, apart from its role as a fluxing agent, explains the color of the fired products (Kornmann 2005) and, more specifically, the characteristic reddish color (Bomeni et al. 2018). Moderate iron oxide contents (2–7%) are suitable for brick production; low contents (< 2%) induce the white or whitish color after firing and allow the manufacture of porcelain, sanitary, and/or tableware (Reeves et al.



Fig. 8 Visual aspects of fired products of site 1

the color of fired earthenware (Kreimeyer 1987). CaO could induce yellowish and pinkish shades; MgO is not a chromophore ion; and MnO in high content could induce a brown color (Dondi et al. 2014). The Mbalmayo clays are suitable for the manufacture of stoneware tiles (Fig. 10c).

The slightly metallic sound of the specimens after firing is mainly due to poor sintering caused by low melting oxide content and high sand content (Melo et al. 2001). The linear shrinkage values are lower than 5% for site 1 samples at all the studied temperatures and at temperatures below 1100 °C for site 2. These low LS values are due to the only presence of kaolinite that has a low content of water as clay minerals (Tardy 1993; Andrade et al. 2011). In addition, the high content of quartz and sandy fraction lead to a low LS as this mineral changes from alpha to beta around 573 °C (El Ouahabi et al. 2016; Guzlena et al. 2019). According to Guzlena et al. (2019), the sand ensures the formation of gaseous channels, lamination, and shrinkage control, which also contributes to the reduction of crack appearance during the firing. After firing at 800, 900, and 1000 °C, the LS values remain lower than 5%, which is the minimum requirement for traditional ceramic raw materials (Millogo et al. 2011). The LS values are higher than 5% at 1100 °C for site 2 samples. The decrease in water uptake with temperature is associated with the formation of a glassy phase that penetrates the pores, closing them and isolating neighboring pores (Celik 2010). This decrease is more pronounced for specimens fired at 1100 °C (Celik 2010; Ngun et al. 2011). The lowest value of water absorption rate is observed in the NPA2 specimen. This low value is related to the highest

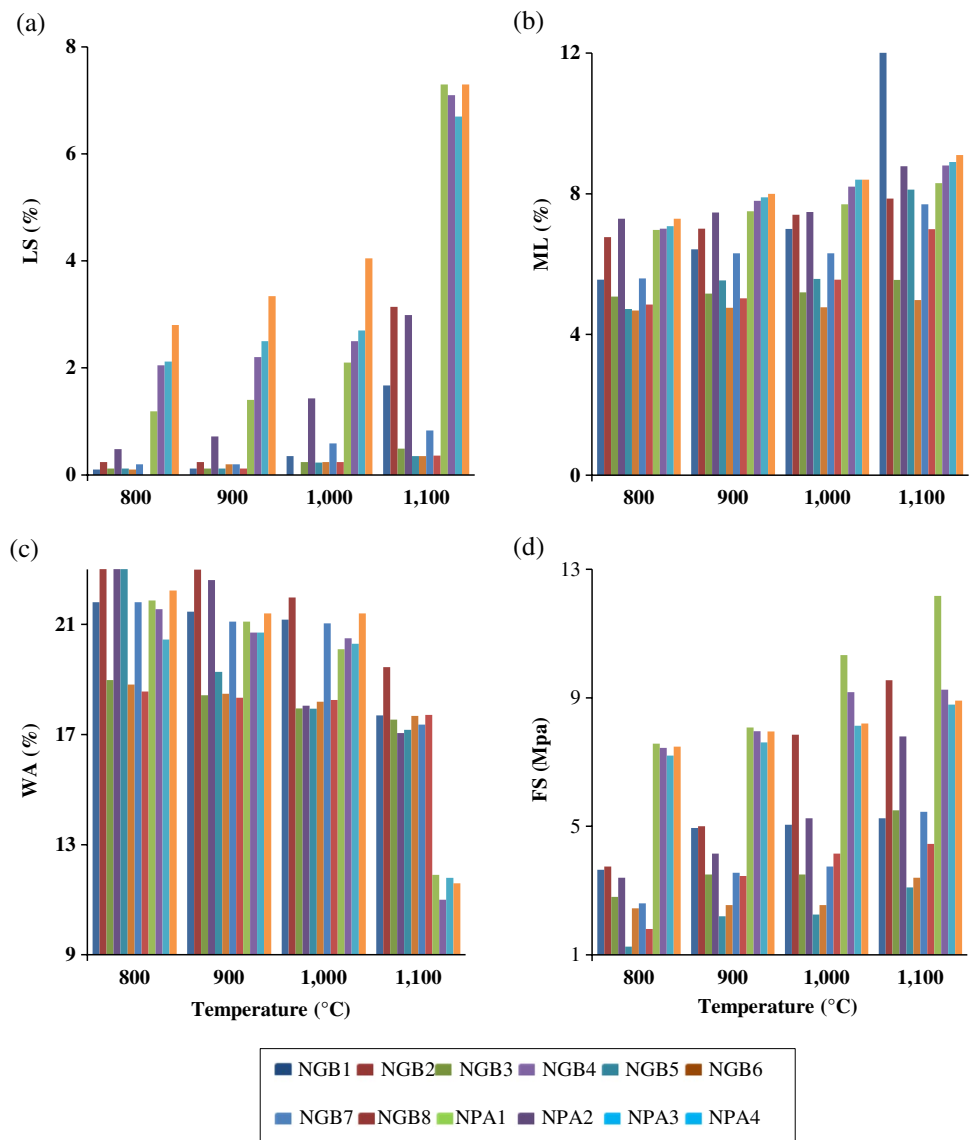
2006). However, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is not the only oxide responsible for the coloring of ceramic products, as other constituents such as CaO, MgO, MnO, and TiO<sub>2</sub> can significantly alter

Table 6 Technological characteristics of fired bricks from the Mbalmayo lateritic clays

		Site 1								Site 2			
		NGB1	NGB2	NGB3	NGB4	NGB5	NGB6	NGB7	NGB8	NPA1	NPA2	NPA3	NPA4
LS (%)	800	0.10	0.24	0.12	0.48	0.12	0.10	0.20	0.00	1.19	2.05	2.12	2.80
	900	0.12	0.24	0.12	0.72	0.12	0.20	0.20	0.12	1.40	2.20	2.50	3.34
	1000	0.35	0.42	0.24	1.43	0.23	0.24	0.59	0.24	2.10	2.50	2.70	4.05
	1100	1.67	3.14	0.49	2.99	0.35	0.35	0.83	0.36	7.30	7.10	6.70	7.30
ML (%)	800	5.56	6.77	5.08	7.29	4.72	4.68	5.59	4.85	6.97	7.01	7.08	7.29
	900	6.42	7.01	5.16	7.47	5.54	4.76	6.31	5.03	7.50	7.80	7.90	8.00
	1000	7.00	7.40	5.20	7.48	5.58	4.77	6.31	5.56	7.70	8.20	8.40	8.40
	1100	12.66	7.86	5.55	8.78	8.12	4.98	7.70	6.99	8.30	8.80	8.90	9.10
WA (%)	800	21.81	23.04	18.98	23.45	25.64	18.82	21.81	18.56	21.87	21.55	20.45	22.23
	900	21.46	22.99	18.43	22.61	19.28	18.48	21.10	18.34	21.10	20.70	20.70	21.40
	1000	21.17	21.98	17.95	18.05	17.94	18.19	21.04	18.26	20.10	20.50	20.30	21.40
	1100	17.70	19.45	17.54	17.05	17.17	17.68	17.36	17.71	11.90	11.00	11.80	11.60
FS (MPa)	800	3.65	3.75	2.80	3.40	1.25	2.45	2.60	1.80	7.57	7.44	7.20	7.48
	900	4.95	5.00	3.50	4.15	2.20	2.55	3.55	3.45	8.08	7.96	7.61	7.95
	1000	5.05	7.85	3.50	5.25	2.25	2.55	3.75	4.15	10.33	9.18	8.13	8.20
	1100	5.25	9.55	5.50	7.80	3.10	3.40	5.45	4.45	12.17	9.25	8.79	8.91

LS, linear shrinkage; ML, mass loss; WA, water absorption; FS, flexural strength

**Fig. 9** Physicomechanical parameters of fired clay bricks: **a** linear shrinkage; **b** mass loss upon firing; **c** water absorption; **d** flexural strength

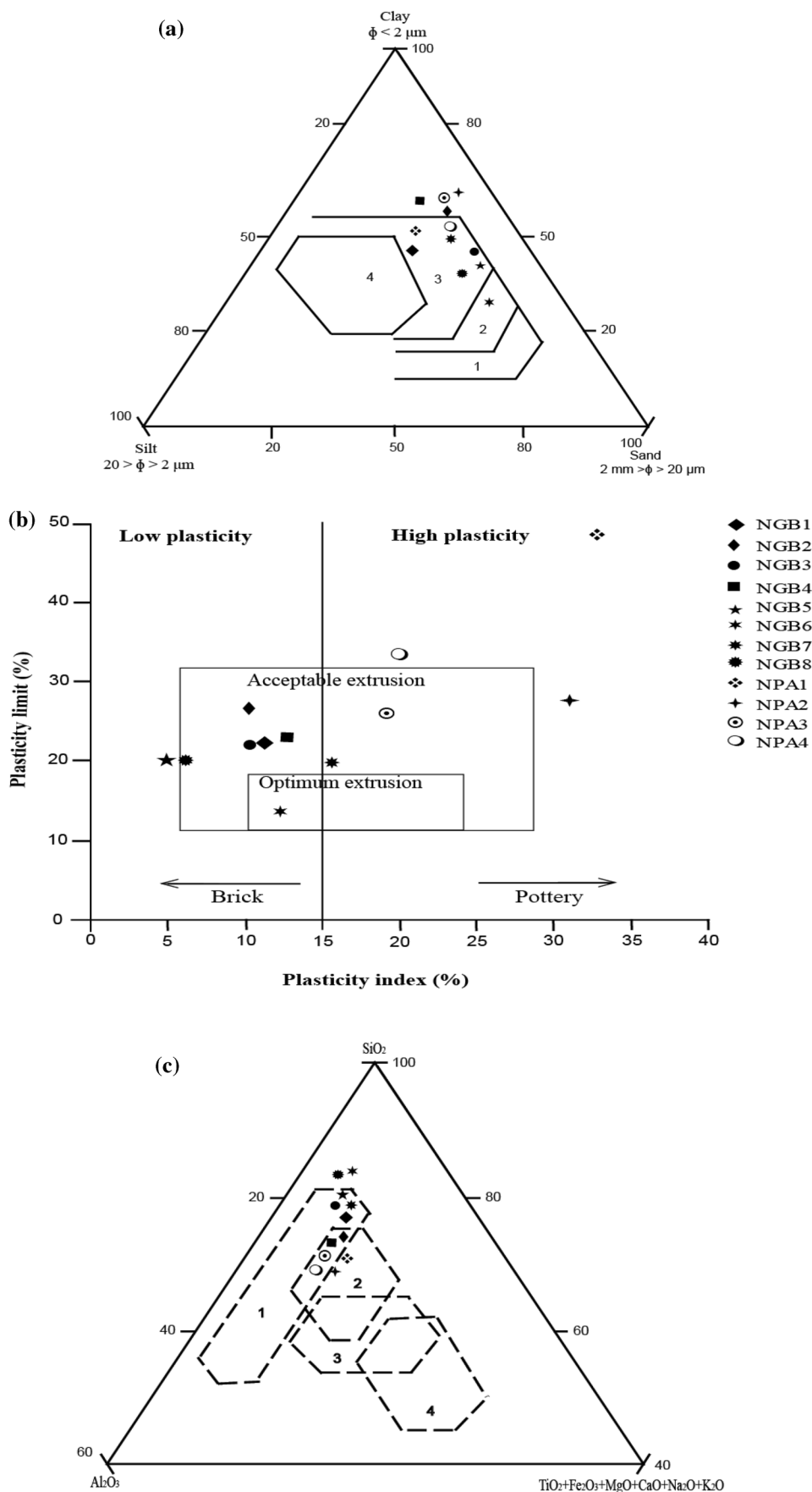


clay content in this sample, whose transformation to mullite during firing hindered the evolution of water absorption (Onana et al. 2019). The overall behavior of water absorption is also due to the low organic matter content, which does not lead to secondary porosity after firing (Arslan et al. 2021). The water absorption is less than 20% for the majority of the specimens fired at 1000 and 1100 °C, indicating that Mbalmayo clays can be used for brick and tile manufacturing according to the Brazilian classification (Souza et al. 2002; Ngun et al. 2011). The fact that the values of flexural strength increase with temperature is explained by the predominance of kaolinite in the raw clays and their refractory behavior between 800 and 1050 °C, which is associated with poor consolidation and sintering in solid and viscous state mechanisms (Vieira et al. 2008). The increase was coherent with the conversion of metakaolinite into mullite upon temperature increase (Nzeukou Nzeugang et al. 2018), as

shown by the XRD of the fired products (Fig. 7a–d). The densification brought by mullite associated with quartz and hematite is responsible for the increase in flexural strength and decrease in water absorption (Onana et al. 2019). These low bending strength values probably reflect poor sintering associated with relatively low processing temperatures unfavorable for sintering (Fadil-Djenabou et al. 2015).

According to the Brazilian standard (Souza et al. 2002), the high values of flexural strength of some specimens ( $\sigma > 2$  MPa) show that these raw materials can be used for the manufacture of structural bricks. On the other hand, the specimens from samples NGB5 and NGB8 have at 800 °C values of flexural strength lower than 2 MPa, so they are not usable for the production of bricks. These values may be improved through an increase in the curing time or by adding fluxes for vitreous phase formation (Roudouane et al. 2020). For the use of these materials in construction,

**Fig. 10** **a** Winkler diagram, (1) common bricks; (2) vertically perforated bricks; (3) roofing tiles and masonry bricks; and (4) hollow products. **b** Extrusion prognostic diagram (Marsigli and Dondi 1997). **c** Fields of suitable chemical compositions for manufacturing various ceramic products: 1 and 2: floor tile stoneware; 3 and 4: porous roofing tile diagram (Fiori et al. 1989)



the recommended firing temperatures are 900 and 1000 °C because of the high linear shrinkage at 1100 °C that may cause significant distortions in fired products. According to Mbumbia et al. (2000), this temperature can be reached by traditional furnaces.

## Conclusion

Mineralogical, geochemical, and physicochemical characterization of the Mbalmayo lateritic clays in Southern Cameroon was carried out to evaluate their suitability as fired building products.

These materials are made up of quartz, kaolinite, goethite, anatase, and gibbsite.

The sandy clay texture, low organic matter and CEC, and plasticity index values above 10% for the studied materials make them suitable to produce roofing tiles and masonry bricks.

Firing temperature significantly affects the overall characteristics of Mbalmayo clay-based bricks. During firing, the conversion of metakaolinite into mullite increases the flexural strength and decreases the water absorption, even if the low proportion of fluxing oxides causes insufficient sintering. The higher flexural strength values are obtained at 1100 °C, but the linear shrinkage higher than 5% at this temperature for site 2 samples may cause deformation of the final products. The optimum firing temperature for the production of clay bricks using lateritic clay from the Mbalmayo locality is 1000 °C, even though some amendments in clay or sand/silt content are sometimes required.

**Acknowledgements** This paper is a partial part of the first author's Ph.D. Thesis at the University of Yaoundé I (Cameroon). The authors express their gratitude to Thierry Adatte (Lausanne, Switzerland) for XRD and XRF analyses; to the Local Materials Promotion Authority (Cameroon) for mechanical tests; and to Pr. Onana Vincent Laurent for its assistance during the field works. The authors thank the Editor-in-Chief (Abdullah M. Al-Amri) and three anonymous reviews for their constructive comments that substantially improved the final version.

## Declarations

**Conflict of interest** The authors declare no competing interests.

## References

- Abajo MF (2000) Manual sobre fabricacio'n de baldosas. Tejas y Ladrillos Edition Beralmar S. A, Barcelona
- Abdelmalek B, Bouazi R, Bouftouha Y, Bouabsa L, Fagel N (2017) Mineralogical characterization of Neogene clay areas from the

- Jijel basin for ceramic purposes (NE Algeria-Africa). *Appl Clay Sci* 136:176–183. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.11.025>
- Abdullahi Y, Ali EA, Oyeyemi S (2012) A study of the physico-chemistry and mineralogy of Agbaja clay for its industrial application. *Chemsearch J* 3(2):53–60
- Alcântara A, Beltrão M, Oliveira H, Gimenez I, Barreto L (2008) Characterization of ceramic tiles prepared from two clays from Sergipe-Brazil. *Appl Clay Sci* 39:160–165. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.05.004>
- Andrade FA, Al-Qureshi HA, Hotza D (2011) Measuring the plasticity of clays: a review. *Appl Clay Sci* 51(1-2):1–7. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.10.028>
- Arslan C, Gencil O, Borazan I, Sutcu M, Erdogmus E (2021) Effect of waste-based micro cellulose fiber as pore maker on characteristics of fired clay bricks. *Constr Build Mater* 300:124298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124298>
- Bennour A, Mahmoudi S, Srasra E, Hatira N, Boussen S, Ouaja M, Zargouni F (2015) Identification and traditional ceramic application of clays from the Chouamekh region in south-eastern Tunisia. *Appl Clay Sci* 118:212–220. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.09.018>
- Bomeni IY, Njoya A, Ngaggue F, Wouatong ASL, Yongue Fouateu R, Kamgang Kabeyene V, Fagel N (2018) Ceramic with potential application of Ngwenfon alluvial clays (noun, west Cameroon) in building construction: mineralogy, physicochemical composition and thermal behavior. *Constr Build Mater* 182:493–503. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.135>
- Celik H (2010) Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry. *Appl Clay Sci* 50:245–254. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.08.005>
- Christidis GE (2011) Industrial clays. *Eur Mineralog Union, Notes in Mineral* 9(9):341–414
- Cox R, Lowe DR, Cullers RL (1995) The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochem Cosmochim Acta* 59(14):2919–2940. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00185-9)
- Dondi M, Fabbri B, Guarini G (1998) Grain-size distribution of Italian raw materials for building clay products: a reappraisal of the Winkler diagram. *Clay Miner* 33:435–442. <https://doi.org/10.1180/000985598545732>
- Dondi M, Raimondo M, Zanelli C (2014) Clays and bodies for ceramic tiles: reappraisal and technological classification. *Appl Clay Sci* 96:91–109. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.01.013>
- Doum MJ, Fuh CG, Fadil-Djenabou S, Onana VL, Ndjigui P-D, Armstrong-Altrin JS (2020) Characterization and potential application of gleysols and ferralsols for ceramic industry: a case study from Dimako (Eastern Cameroon). *Arab J Geosci* 13:1074
- El Ouahabi M, Daoudi L, Fagel N (2016) Technological behavior of cretaceous and pliocene clays of northern Morocco used in fired brick manufacturing. *J Mater Environ Sci* 9(4):1140–1151. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.02.019>
- Elimbi A, Tchakoute HK, Njopwouo D (2011) Effects of calcination temperature of kaolinite clays on the properties of geopolymer cements. *Constr Build Mater* 25:2805–2812. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.055>
- Fadil-Djenabou S, Ndjigui P-D, Mbey JA (2015) Mineralogical and physicochemical characterization of Ngaye alluvial clays (Northern Cameroon) and assessment of its suitability in ceramic production. *J Asian Ceram Soc* 3:50–58. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2014.10.008>
- Fedo CM, Young GM, Nesbitt HW, Hanchar JM (1997) Potassic and sodic metasomatism in the Southern Province of the Canadian Shield: evidence from the Paleoproterozoic Serpent Formation

- Huronian Supergroup, Canada. *Precambrian Res* 84:17–36. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(96\)00058-7](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(96)00058-7)
- Fiori C, Fabbri B, Donati G, Venturi I (1989) Mineralogical composition of the clay bodies used in the Italian tile industry. *Appl Clay Sci* 4:461–473. [https://doi.org/10.1016/0169-1317\(89\)90023-9](https://doi.org/10.1016/0169-1317(89)90023-9)
- Guzlena S, Sakale G, Certoks S, Grase L (2019) Sand size particle amount influence on the full brick quality and technical properties. *Constr Build Mater* 220:102–109. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.170>
- Kamgang Kabeyene Beyala V, 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* 69:61–73. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2008.08.003>
- Kankao OO, Ngon Ngon GF, Tehna N, Bayiga EC, Mbog MB, Mbaï J.S, Etame J (2022) Physicochemical and mineralogical characterization of clay materials in the Douala Coastal Sedimentary Sub-basin (Cameroon, Central Africa). *J Geosci Geomat* 10(3):126–138. <https://doi.org/10.12691/jgg-10-3-2>
- Kessoum Adamou J-M, Ntoulala RFD, Ndome-Priso E, Nanga Bineli MT, Hamadjida G, Ngo'o Ze A, Onana VL (2023) Mineralogical, geochemical, and geotechnical features of lateritic soils from termite mounds in two contrasting savannah areas (central Cameroon) as raw materials for brick making. *Heliyon* 9:e17257. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17257>
- Kornmann M (2005) *Ingénieurs du Centre Technique des Tuiles et Briques, Matériaux de construction en terre cuite, fabrication et propriétés*. Editions Septima, Paris, pp 33–34
- Kreimeyer R (1987) Some notes on the firing color of clay bricks. *Appl Clay Sci* 2:175–183. [https://doi.org/10.1016/0169-1317\(87\)90007-X](https://doi.org/10.1016/0169-1317(87)90007-X)
- Lahcen D, Elboudour EIH, Saadi L, Albizane A, Bennazha J, Waqif M, Elouahabi M, Fagel N (2014) Characteristics and ceramic properties of clayey materials from Amezmiz region (Western High Atlas, Morocco). *Appl Clay Sci* 102:139–147. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.09.029>
- Lee VG, Yeh TH (2008) Sintering effects on the development of mechanical properties of fired clay ceramics. *Mater Sci Eng* 48:5–13. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.07.068>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.12.008>
- Mango Itulama LAM, Collin F, Pilate P, Courtejoie F, Fagel N (2019) Evaluation of Belgian clays for manufacturing compressed earth blocks. *Geol Belg* 22:139–148. <https://doi.org/10.20341/gb.2019.002>
- Marsigli M, Dondi M (1997) Plasticità delle Argille Italiane per Laterizi e Previsione Del. Loro Comportamento in Foggatura. *L'industria Laterizi* 46:214–222
- Mbey JA, Ngally Sabouang CJ, Makon TB, Coulibaly SL, Kong S (2021) The thermal dihydroxylation of kaolinite using thermogravimetric analysis and controlled rate thermal analysis. *J Cameroon Acad Sci* 16(3):225–245. <https://doi.org/10.4314/Jcas.V16i3.4>
- Mbumbia L, Mertens De Wilmars A, Tirlocq J (2000) Performance characteristics of lateritic soil bricks fired at low temperatures: a case study of Cameroon. *Constr Build Mater* 14:121–131. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00024-6](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00024-6)
- McNally GH (1998) *Soil and rock construction materials*. CRC Press, London, pp 291–310
- Meimaroglou N, Mouzakis C (2019) Cation exchange capacity (CEC), texture, consistency and organic matter in soil assessment for earth construction: the case of earth mortars. *Constr Build Mater* 221:27–39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.036>
- Melo C, Kamseu E, Djangang C (2001) In Proceedings of the 1st Conference on the Valorization of Clay Materials in Cameroon and Launching of the Cameroon Clay Group, Ed. by Nkoumbou, C and Njopwouo, D., April 11–12, Yaoundé, Cameroon. 57–69
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.02.016>
- Moore D, Reynolds RC Jr (1997) *X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*, 2nd edn. Oxford University Press, Oxford
- Monterio 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. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2004.03.002>
- Murray HH (2007) *Applied clay mineralogy: occurrence, processing and application of kaolins, bentonite, palygorskite-sepiolite and common clays*, 1st edn. Elsevier, Amsterdam
- Mvondo H, Owona S, Mvondo Ondo J, Essono J (2007) Tectonic evolution of the Yaounde segment of the Neoproterozoic Central African Orogenic Belt in Southern Cameroon. *Can J Earth Sci* 44:433–444. <https://doi.org/10.1139/e06-107>
- Nedelec A, Macaudiere J, Nzenti JP, Barbey P (1986) Evolution crustale et métamorphique des chloritoschistes de Mbalmayo (Cameroon). Implications sur la structure de la zone mobile panafricaine d'Afrique Centrale au contact du Craton du Congo. *C R Acad Sci* 303(II-1):75–80
- Nesbitt HW, Young GM (1984) Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochem Cosmochim Acta* 48:1523–1534. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90408-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90408-3)
- Ngun BK, Mohamad H, Sulaiman SK, Okada K, Ahmad ZA (2011) Some ceramic properties of clays from central Cambodia. *Appl Clay Sci* 53:33–41. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.017>
- Ntoulala RFD, Onana VL, Kamgang V, Ekodeck GE (2016) Mineralogical, geochemical and mechanical characterization of Ayos (East-Cameroon) lateritic and alluvial clayey mixtures: suitability for building application. *J Build Eng* 5:50–56. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.11.007>
- Ntoulala RFD, Ndome-Priso E, Nanga Bineli MT, Mutlen JA, Ngo'o Ze A, Onana VL, Ekodeck GE (2023) Mineralogy, geochemistry, and geotechnical characterization of lateritic and alluvial clay deposits from Batouri, East Cameroon. *Arab J Geosci* 16:355. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11451-9>
- Nzenti JP, Barbey P, Macaudiere J, Soba D (1988) Origin and evolution of the late-Precambrian out grade Yaounde gneisses (Cameroon). *Precambrian Res* 38:91–109. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(88\)90086-1](https://doi.org/10.1016/0301-9268(88)90086-1)
- Nzeukou Nzeugang A, El Ouahabi M, Aziwol B, Mache JR, MHS M, Fagel N (2018) Characterization of kaolin from Mankon, NW Cameroon. *Clay Miner* 53:1–29. <https://doi.org/10.1180/clm.2018.45>
- Nzeukou Nzeugang A, Tsozué D, Kagonbé Pagna B, Balo Madi A, Fankam Deumeni A, Ngos III S, Nkoumbou C, Fagel N (2021) Clayey soils from Boulgou (North Cameroon): geotechnical, mineralogical, chemical characteristics and properties of their fired products *SN Appl Sci* 3:551. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04541-4>
- Onana VL, Ntoulala RFD, Noa Tang S, Ndome Effoudou E, Kabeyene VK, 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. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.09.026>
- Onana VL, Ntoulala RFD, Mbey JA, Ngo'o Ze A, Kabeyene VK, Ekodeck GE (2019) Mineralogy and preliminary assessment of the

- potential uses of alluvial clays from Batouri (Eastern-Cameroon). *Cerâmica* 65:407–415. <https://doi.org/10.1590/0366-69132019653752626>
- Picard MD (1971) Classification of fine-grained sedimentary rocks. *J Sediment Res* 41(1):179–195. <https://doi.org/10.1306/74D7221B-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Pourmand A, Dauphas N, Ireland TJ (2012) A novel extraction chromatography and MC-ICP-MS technique for rapid analysis of REE, Sc and Y: revising CI-chondrite and Post-Archean Australian Shale (PAAS) abundances. *Chem Geol* 291:38–54. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.08.011>
- Reeves GM, Sims I, Cripps C (2006) Clay materials used in construction. Eng Geol Special Publication, Geol Soc, London. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/07-108>
- Roudouane TH, Mbey JA, Bayiga EC, Ndjigui P-D (2020) Characterization and application test of kaolinite clays from Aboudeia (Southeastern Chad) in fired bricks making. *Sci Afr* 7:e00294. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00294>
- Savazzini-Reis A, Possamai DSV, Oliveira DNJ, Teixeira PG (2017) Characterization and evaluation of ceramic properties with spherical and prismatic samples of clay used in red ceramics. *Mat Res* 20:543–548. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0915>
- Semiz B (2017) Characteristics of clay-rich raw materials for ceramic applications in Denizli region (Western Anatolia). *Appl Clay Sci* 137:83–93. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.12.014>
- Singh P (2009) Major, trace and REE geochemistry of the Ganga River: influence on provenance and sedimentary processes. *Chem Geol* 266:242–255. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.06013>
- Souza GP, Sanchez R, de Holanda JNF (2002) Characteristics and physical-mechanical properties of fired kaolinitic materials. *Cerâmica* 48:102–107. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132002000200009>
- Tardy Y (1993) *Pétrologie des Latérites et des Sols, Tropicaux* edn. Masson, Paris
- Tsozué D, Nzeukou Nzeugang A, Mache JR, Loweh S, Fagel N (2017) Mineralogical, physico-chemical and technological characterization of clays from Maroua (Far-North, Cameroon) for use in ceramic bricks production. *J Build Eng* 11:17–24. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.03.008>
- Ukwatta A, Mohajerani A (2017) Characterisation of fired-clay bricks incorporating biosolids and the effect of heating rate on properties of bricks. *Constr Build Mater* 142:11–22. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.047>
- Vieira CMF, Sanchez R, Monteiro SN (2008) Characteristics of clays and properties of building ceramics in the Rio de Janeiro, Brazil. *Constr Build Mater* 22:781–787. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.006>
- Winkler HGF (1954) Bedeutung der Korngrößenverteilung und des mineral bestandes von tonen für die herstellung grobkeramischer erzeugnisse. *Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft* 31:337–343
- Yvon J, Lietard O, Cases JM, Delon J-F (1982) *Minéralogie des argiles kaoliniques des Charentes*. *Bull Minéral* 105:431–437

Springer Nature or its licensor (e.g. a society or other partner) holds exclusive rights to this article under a publishing agreement with the author(s) or other rightsholder(s); author self-archiving of the accepted manuscript version of this article is solely governed by the terms of such publishing agreement and applicable law.