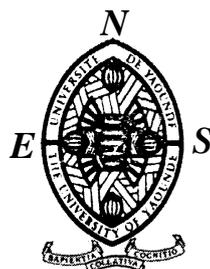


REPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix-Travail-patrie
.....
UNIVERSITE DE YAOUNDE I
.....
ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE YAOUNDE
.....
DEPARTEMENT DE CHIMIE



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace-Work-Fatherland
.....
UNIVERSITY OF YAOUNDE I
.....
HIGHER TEACHERS TRAINING COLLEGE OF
YAOUNDE
.....
DEPARTMENT OF CHEMISTRY

Département de Chimie

Department of Chemistry

**EQUIPE DE RECHERCHE EN PHYSICO-CHIMIE DES MATERIAUX
MINERAUX (Faculté des sciences, UY1)**

**PHYSICO-CHEMISTRY OF MINERAL MATERIALS RESEARCH TEAM
(Faculty of sciences, UY1)**

**ÉFFET DU TRAITEMENT THERMIQUE SUR LA
CAPACITÉ D'ÉCHANGE CATIONIQUE DES ARGILES
KAOLINIQUES**

**Mémoire rédigé et soutenu en vue de l'obtention du diplôme de
professeur d'Enseignement Secondaire Général de deuxième grade
(DI.P.E.S.II).**

Section : Sciences

Spécialité : Chimie Inorganique

Option : Physico-chimie des matériaux minéraux

Par

NKOULOU OYONO Pascal

Matricule : 09T0632

Licencié en chimie(UY1)

Sous la direction de :

NJOPWOUO Daniel

Professeur, Faculté des sciences, UY1

JUIN 2016



A

Mes parents :

Mon feu père : **M. OYONO ELA Michel**

Et

Ma mère : **Mme NFONO MENGUE Salomé**



CERTIFICATION

THEME : Effet du traitement thermique sur la capacité d'échange cationique des argiles kaolinitiques.

Je soussigné **Pr NJOPWOUO Daniel**, certifie que ce travail qui s'intitule « **Effet du traitement thermique sur la capacité d'échange cationique des argiles kaolinitiques** » est le travail original et authentique de l'étudiant « **NKOULOU OYONO Pascal** » matricule **09T0632** effectué dans le laboratoire de physico-chimie des matériaux minéraux de la faculté des sciences de l'Université de Yaoundé I.

Fait à Yaoundé le 1^{er} juin 2016

Le directeur

REMERCIEMENTS

Je ne saurais entamer la rédaction de ce travail sans exprimé ma profonde gratitude à ceux qui, de façon certaine ont contribué à son élaboration. Compte tenu de cette raison, je tiens à adresser mes remerciements sincères aux personnes suivantes :

- Au Professeur **NJOPWOUO Daniel** qui m'a fait le grand honneur de m'accepter dans son équipe de recherche et de m'encadrer et qui malgré ses multiples occupations trouve du temps pour partager son expérience et son savoir pointilleux avec les étudiants ;
- Au Professeur **DJOUFAC WOUMFO E.** pour avoir accepté que j'effectue mes travaux dans son laboratoire et pour son encadrement. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance ;
- Au Docteur **NJOYA DAYIROU**, pour m'avoir facilité l'acquisition des échantillons de matériaux et pour ses conseils. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude ;
- Au corps enseignant du Département de Chimie de l'Ecole Normale Supérieure, pour les connaissances qu'ils nous ont permis d'acquérir à travers les enseignements dispensés ;
- J'adresse un merci particulier à mon grand frère, le Maréchaux de logie **ELA OYONO Thaddéi** qui s'investi avec abnégation pour ma réussite ;
- A toute ma famille, en particulier à mes frères : **MESSA OYONO Georges**, **OYONO ELA Michel Junior** et **ESSONO OYONO Julien** pour le soutien permanent et l'intérêt manifeste à mon succès ;
- Que **M. TOMO MENYE Paul** et son épouse **Mme MBIANDA A EFANDENE Verenne Angel** trouvent ici l'expression de ma reconnaissance pour leur soutien quotidien et l'accueil toujours chaleureux qu'ils me réservent ;
- Je dois beaucoup à mes aînés de laboratoire en particulier à **TSOPBOU NGUEAGNI Patrick** et au **Dr SIEWE Mermoz** pour leur disponibilité et leur encadrement technique au moment indiqué ;
- A mes amis et camarades de promotion pour leur solidarité, en particulier à **ZOUA F**, **NGAILLAME C**, **TCHINDA O**, **MOUTOUMDJOU O**, **MADOPSI S**, **NJOMO D**, **TCHUINDJANG Y**, **NGWETH M**, **NGATAT NGUEMOU C**, **WAMBO NGUESSI C**, **LIKENG BELL D**, **PAMBOU A** et **MBAKOP S**.

TABLE DES MATIERES

DÉDICACE..... i

CERTIFICATION ii

REMERCIEMENTS..... iii

TABLE DES MATIERES iv

RESUME vi

ABSTRACT vii

LISTE DES ABREVIATIONS viii

LISTE DES FIGURES..... ix

LISTE DES TABLEAUX x

INTRODUCTION GENERALE 1

**CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE SUR LES MATERIAUX
ARGILEUX KAOLINITIQUES 4**

I.1- HISTORIQUE ET DEFINITIONS DE KAOLIN ET KAOLINITE 5

I.2- PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE LA KAOLINITE 6

I.2.1- Pétrographie 6

I.2.2- Morphologie 6

I.2.3- Propriétés structurales..... 6

I.2.4- Propriétés superficielles..... 8

I.2.4.1- Aptitude à la formation des colloïdes 8

I.2.4.2- Surface spécifique..... 9

I.2.4.3- Capacité d'échange cationique (CEC)..... 9

I.2.5- Propriétés thermiques 10

I.2.7- Quelques utilisations.....	12
CHAPITRE II : MATERIAUX ETUDIES ET TECHNIQUES	
EXPERIMENTALES	14
II.1. MATERIAUX	15
II.1.1. Origine des matériaux.....	15
II.1.2. Aspect physique.....	15
II.1.3- Composition Chimique et Minéralogique.....	16
II.2. TECHNIQUES EXPERIMENTALES.....	17
II.2.1- Préparation des échantillons et tamisage.....	17
II.2.2- Traitement thermique des matériaux.....	17
II.2.3. Mesure de la CEC.....	18
II.2.3.1. Conditionnement des échantillons et de la résineH.....	18
II.2.3.2. Traitement des échantillons : Décationisation.....	19
II.2.3.3. Titrage de l'argileH par la soude (NaOH).....	21
II.2.3.4.- Calcul de la C.E.C.	21
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	23
III.1. TRAITEMENT THERMIQUE.....	24
III.2. MESURE DES CEC	25
INTERETS PEDAGOGIQUES.....	30
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	31
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	33
ANNEXES	38

RÉSUMÉ

La rareté des argiles type smectiques de CEC élevée dans les régions du Centre, Ouest et Littoral ou abondent plutôt les argiles kaolinitiques de CEC très faible (3-15 cmol/kg) est la véritable motivation de la présente étude. Il est donc question d'examiner l'effet de la température sur la CEC des argiles kaolinitiques.

Deux échantillons de matériaux dénommés KK et KG prélevés à Koutaba (localité de Fouban, région de l'Ouest Cameroun) ont fait l'objet d'un traitement thermique à 30, 200, 400, 600, 800 et 1000 °C. La détermination de leur CEC à ces températures a été faite par la méthode à la résineH échangeuse de protons H⁺.

Nous avons obtenu pour le matériau KK des valeurs de CEC de 7, 10, 30, 25, 25 et 15 meq/100 g respectivement pour les températures 30, 200, 400, 600, 800 et 1000 °C. En ce qui concerne l'échantillon KG, on a obtenu les valeurs de 11, 17, 20, 27, 14 et 13 meq/100 g respectivement pour les températures 30, 200, 400, 600, 800 et 1000 °C. En somme, le matériau KK atteint son maximum de CEC (30 meq/100 g) à 400 °C soit un taux d'accroissement de 76.67 % alors que le matériau KG atteint son maximum (27 meq/100 g) à 600 °C soit un taux d'accroissement de 59.26 %. Ces deux matériaux subissent les mêmes phénomènes et se comportent donc de la même façon à quelques différences près.

Mots clés : Kaolinite, CEC, température, résineH, Minéralogie.

ABSTRACT

The scarcity of smectite clays of high CEC in the Central, West and Littoral regions of Cameroon where kaolinitic clays of very low CEC (3-15 cmol / kg) is the real motivation of this study. It is therefore a question of determining the effect of temperature on the CEC kaolinitic clays.

Two samples of materials known as KK and KG taken from Koutaba (town of Foumban West Region Cameroon) have undergone heat treatment: 30, 200, 400, 600, 800 and 1000 °C. Determining their CEC at these temperatures was made by the method in the résineH proton exchange H⁺.

We have obtained for the material KK CEC values of 7, 10, 30, 25, 25 and 15 meq / 100 g respectively for the temperatures 30, 200, 400, 600, 800 and 1000 °C. As regards the KG sample, there were obtained the values of 11, 17, 20, 27, 14 and 13 meq/100 g respectively for the temperatures 30, 200, 400, 600, 800 and 1000 °C. In sum, the KK material reaches its maximum CEC (30 meq /100 g) at 400 °C an increase of 76.67 % while the KG material peaks (27 meq /100 g) at 600 °C an increase of 59.26 %. This two samples undergo to the same phenomena with a few differences.

Keywords: Kaolinite, CEC, temperature, résineH, mineralogy.

LISTE DES ABREVIATIONS

AFNOR :	Association Française de Normalisation
CEC :	Capacité d'échange cationique
DRX :	Diffractogramme / diffraction de rayons X
ICP-AES:	Inductively coupled plasma.-Atomic Emission spectroscopy
KG :	Kaolinite Gris de Koutaba
KK :	Kaolinite de Koutaba
MEB:	Microscope/Microscopie Electronique à Balayage
MIPROMALO :	Mission de promotion des matériaux locaux
O_c:	Octaédrique
pH :	Potentiel Hydrogène
PVC :	Polyvinylchlorure
RPE:	Résonance Paramagnétique Electronique
Te :	Tétraédrique

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Morphologie d'une kaolinite très bien cristallisée (a) et représentation d'une plaquette de kaolinite (b)	6
Figure 2: Feuillet élémentaire de la Kaolinite.....	7
Figure 3 : Projection de la couche tétraédrique sur le plan de clivage (a) et Projection de la couche octaédrique sur le plan de clivage (b).	7
Figure 4 : Echantillons de KG (a) et KK (b).....	18
Figure 5 : Tamis AFNOR de maille 160 μm (a) et le refus ($\text{\O} > 160 \mu\text{m}$) (b).	19
Figure 6 : Echantillon de K G en agitation (a) et au repos (b).....	20
Figure 7 : Suspension argileuse (a) et suspension argileuse après décantation (b).....	20
Figure 8 : Résumé du mode opératoire.	22
Figure 9 : Aspect des échantillons après la cuisson de KK(a) et KG(b).	24
Figure 10: Variation de CEC du matériau KK en fonction de la température. .	26
Figure 11: Variation de CEC du matériau KG en fonction de la température. .	27
Figure 12: Variation comparée de la CEC dans KK et KG en fonction de la température	28

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Surface spécifique et C.E.C de quelques minéraux argileux..... 10

Tableau 2: Quelques caractéristiques physique des échantillons 16

Tableau 3: Résultats de l’analyse chimique des matériaux KK et KG..... 16

Tableau 4: Volume de base versée..... 25

Tableau 5: CEC des matériaux KK et KG..... 25



INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les argiles constituent une famille de minéraux très diversifiée, et leurs utilisations sont tout aussi variées. Les argiles en tant que matériau d'origine des poteries et des briques représentent sans doute, après la pierre taillée ou polie et le bois l'un des tous premiers matériaux naturels utilisés par l'espèce humaine (**YVON et al, 1982**). Cependant, l'évolution de la science a conduit à l'extension de l'usage des argiles. Ainsi, les applications de plus en plus croissantes des matériaux argileux incitent les chercheurs à s'attarder sur la kaolinite, minéral argileux et matière première de nombreux produits industriels. Situé dans la zone intertropicale, le Cameroun regorge de nombreux sites kaolinitiques notamment dans le grand Sud (Régions du Centre, Sud, Ouest, et Littoral). Les applications de la kaolinite sont nombreuses et intéressantes surtout dans le domaine industriel. L'un des grands domaines d'application des argiles est la céramique, mais les argiles sont aussi utilisées dans les domaines tels que : l'industrie du plastique, l'industrie de la papeterie, l'industrie de la peinture (**BENSALEM et al, 2011**), les industries cosmétiques et pharmaceutiques, le traitement des eaux usées, le raffinage des huiles végétales alimentaires. C'est dans ces derniers domaines que sont mis en exergue les propriétés de surface des argiles et notamment la capacité d'échange cationique (CEC). A cet effet, les argiles smectitiques sont les plus sollicitées parce que possédant des surfaces spécifiques et des CEC élevées (**MESTDAGH et al, 1982**).

Si ce type d'argiles est abondant dans la région de l'Extrême-nord du Cameroun, il se pose malheureusement l'épineux problème de sa rareté dans les autres régions du pays et en particulier dans le Centre, le Sud, le Littoral et l'Ouest où sont installées les industries susceptibles de recourir à leur utilisation. Par contre dans ces régions abondent plutôt les argiles kaolinitiques de CEC très faible (3-15 cmol/kg) d'où la question : Comment peut-on faire pour augmenter la capacité d'échange cationique (CEC) de ces argiles kaolinitiques ?

OBJECTIF GÉNÉRAL :

Examiner l'effet de la température sur la capacité d'échange cationique des argiles kaolinitiques.

OBJECTIFS SPÉCIFIQUES :

- Choisir des échantillons d'argiles kaolinitiques à compositions variées.
- Choisir une méthode appropriée de mesure de la CEC des échantillons d'argiles.
- Soumettre les échantillons d'argiles à un traitement thermique, puis déterminer leurs CEC à des températures variant entre 25 et 1000 °C.

HYPOTHESE DE LA RECHERCHE :

Le traitement thermique provoque des modifications structurales et chimiques du minéral argileux, ces modifications entraînent des variations des propriétés de surface donc la capacité d'échange cationique.

PLAN :

La présente étude s'articulera autour de trois chapitres.

1. Revue de la littérature sur les argiles kaolinitiques ou kaolins, sur les propriétés structurales, superficielles, thermiques et quelques utilisations de la kaolinite.
2. Présentation des échantillons à étudier ainsi que des techniques expérimentales mise en œuvre dans l'étude.
3. Présentation et discussion des résultats obtenus.

Une conclusion générale et des perspectives seront dégagées à la fin de l'étude.

**CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE
SUR LES MATERIAUX ARGILEUX
KAOLINITIQUES**

I.1- HISTORIQUE ET DÉFINITIONS DES TERMES KAOLIN ET KAOLINITE

Le terme kaolinite vient du Chinois "*gaoling tsu*" signifiant "terre de hautes collines" qui désigne une carrière située à Jingdezhen, dans la province de Jianxi localité Chinoise où la roche a été découverte pour la première fois. La kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) est potentiellement un minerais de l'aluminium et de la silice, car chimiquement composé de (teneurs massiques) : Al_2O_3 (36,53 %), SiO_2 (46,50 %), et H_2O (13,95 %) (**KESRI N, 2014**). Depuis lors, cette roche blanche chinoise a été rencontrée dans un grand nombre de gisements à travers le monde. La kaolinite est le minéral majoritaire du kaolin (teneur ≥ 60 %) ce dernier étant la matière première utilisée pour la fabrication de la porcelaine, découverte et invention chinoise qui a eu lieu à Jingdezhen (**MARCOUX E, 2012**). La kaolinite est susceptible de se former dans des conditions d'altération poussées comme les sols tropicaux ou les milieux hydrothermaux, le kaolin provient généralement de l'altération in-situ des feldspaths de roches granitiques. Les plus grands gisements de kaolinites sont d'origine sédimentaire (bassin de Georgie, USA, bassin Amazonien, Brésil, bassin de Charentes, France) (**BICHE C, 2005**).

La Kaolinite peut se définir comme un minéral argileux de type 1/1 dioctaédrique à équidistance stable entre les feuillets appartenant à la famille des phillites et qui se forme à concentration sensiblement égale (proportion massique atomique) de Si et d'Al (monosiallisation). La kaolinite est constituée de feuillets élémentaires formés par une couche de tétraèdre de silicium (Te) et une couche d'octaèdre d'aluminium (Oc). Si et Al occupent respectivement les centres des tétraèdres et des octaèdres.

La kaolinite étant le minéral principal des kaolins ou argiles kaoliniques, les propriétés et les utilisations de ces derniers matériaux dépendront des principales caractéristiques intrinsèques de la kaolinite.

I.2- PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE LA KAOLINITE

I.2.1- Pétrographie

La kaolinite pure est une roche blanche (ce qui constitue une de ces caractéristiques exigées en industrie), mais la présence de certaines impuretés peut changer sa teinte en fonction de leur teneur. L'anatase par exemple colore le kaolin en jaune et l'oxyde de fer en rouge brun. Le kaolin peut prendre d'autre couleur en fonction des impuretés qu'il contient.

I.2.2- Morphologie

La morphologie des cristaux est généralement assez régulière. Ceux-ci se présentent sous la forme de plaquettes hexagonales (**Figure 1.a**), parfois allongées ou réduite à de simples losanges, délimitées par des faces basales et des faces latérales (**Figure 1.b**). Les dimensions des cristaux varient sensiblement, leur diamètre est compris entre 0,04 et 5 μm et leur épaisseur entre 10 et 200 nanomètres. Les faces latérales portent des groupes $-\text{SiOH}$ ou $-\text{AlOH}$, susceptibles de dissociation amphotériques en fonction du pH du milieu.

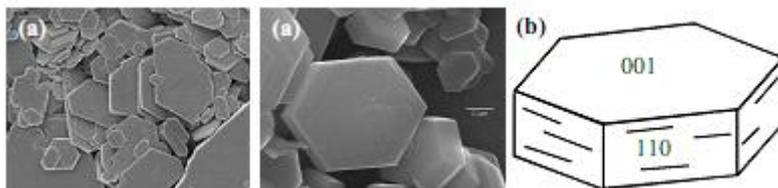


Figure 1: Morphologie d'une kaolinite très bien cristallisée (a) et représentation d'une plaquette de kaolinite (b) (GRIDI-BENNADJI F, 2007).

I.2.3- Propriétés structurales

Les minéraux de la famille de la kaolinite sont les plus simples des minéraux argileux. Ils appartiennent au groupe des phyllosilicates, les silicates en feuillets. La **Figure 2** représente le feuillet élémentaire constitué d'une couche de tétraèdre à cœur de silicium SiO_4 située au-dessus d'une couche d'octaèdre à cœur d'aluminium AlO_6 . Plus précisément les tétraèdres au cœur de

silicium de la couche supérieure ont tous trois sommets d'oxygène coplanaires (**Figure 3.a**). Les oxygènes restant, forment des hexagones au centre desquels se logent les hydroxyles OH appelés hydroxyles internes.

A cette couche succède une couche octaédrique à cœur d'aluminium (**Figure 3.b**). Dans la couche octaédrique, seulement deux des trois sites pour l'atome d'aluminium sont occupés. Il reste, toujours un site vacant. **BAILEH** a distingué la position de ces sites en les identifiant avec des lettres A, B ou C (**BAILEH, 1963**).

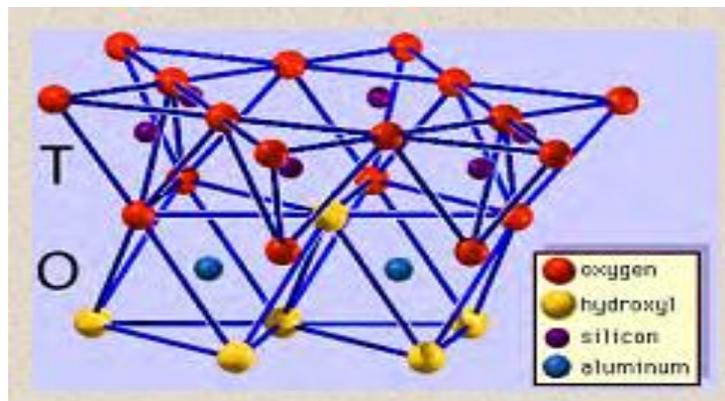


Figure 2: Feuillet élémentaire de la Kaolinite (CAILLERE et *al*, 1982).

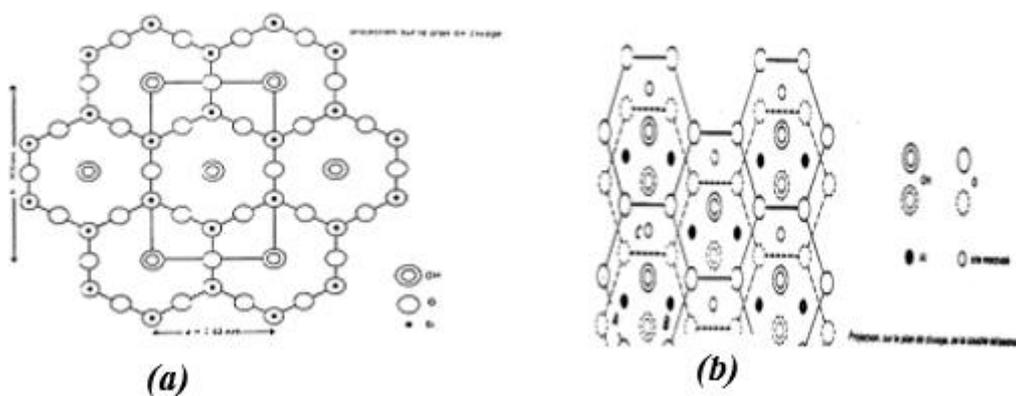


Figure 3 : Projection de la couche tétraédrique sur le plan de clivage (a) et Projection de la couche octaédrique sur le plan de clivage (b) (CAILLERE et *al*, 1982).

Les trois structures polymorphes de même composition chimique ($\text{Al}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}$) que sont, la Kaolinite, la Dickite et la Nacrite, vont différenciées d'un point de vue cristallographique. Les différences structurales sont dues à la séquence d'empilement des feuillets, à la position du site octaédrique vacant et à la disposition relative des deux feuillets successifs. Compte tenu de ces différences, la kaolinite va posséder une structure triclinique, alors que la dickite aura une structure monoclinique, les paramètres de maille sont (SEBASTIA, 2007).

- Pour la Kaolinite : $a = 5,139 \text{ \AA}$; $b = 8,932 \text{ \AA}$; $c = 7,371 \text{ \AA}$; $\alpha = 91,6^\circ$; $\beta = 104,8^\circ$; $\gamma = 89,9^\circ$
- Pour la Dickite : $a = 5,15 \text{ \AA}$; $b = 8,94 \text{ \AA}$; $c = 14,73 \text{ \AA}$; $\beta = 103,58^\circ$

La Nacrite, elle est constituée par les séquences de six feuillets translétés les uns par rapport aux autres par une translation de vecteur $b/3$. Ces types d'empilements conduisent à une structure triclinique de paramètre de maille :

$a = 8,909 \text{ \AA}$; $b = 5,136 \text{ \AA}$; $c = 15,197 \text{ \AA}$ et $\beta = 113,70^\circ$.

A ces trois structures polymorphes s'ajoute l'halloysite, forme hydratée de la kaolinite et qui a pour formule chimique $\text{Al}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{H}_2\text{O})_2$. L'halloysite peut être décrite comme une kaolinite hydratée dont le réseau cristallin est désordonné (COSTANZO et al, 1984 ; STANLEY et al, 1935).

I.2.4- Propriétés superficielles

I.2.4.1- Aptitude à la formation des colloïdes

Cette propriété est d'une grande importance pour les procédés de purification des argiles. Elle est liée à la présence de charges négatives à la surface de chaque grain d'argile.

En suspension dans l'eau, les propriétés des minéraux argileux dépendent de quatre caractéristiques essentielles (SEBASTIA, 2007): la dimension des particules, la structure minéralogique particulière (structure phyliteuse), la

densité de charge électrique négative constante sur les surfaces de base et le caractère amphotère des hydroxyles formés aux extrémités des feuillets.

La finesse des particules (inférieur à quelques microns) leur confère des propriétés des substances dites colloïdales. C'est cette propriété qui permet aux autres caractéristiques (charge, structure,..) de se manifester.

I.2.4.2- Surface spécifique

Elle désigne la superficie réelle de la surface d'un matériau par opposition à sa surface apparente. Cette grandeur est d'une grande importance pour les phénomènes faisant intervenir les surfaces, comme l'adsorption, l'absorption et les échanges de chaleur. On l'exprime en général en surface par unité de masse, en mètre carré par kilogramme (m^2/kg) ou en une des unités dérivées (m^2/g par exemple), on parle de ce fait parfois d'aire massique. On peut éventuellement l'exprimer en surface par unité de volume, soit en (m^2/m^3). La surface spécifique est influencée par les paramètres comme la porosité et la granulométrie du matériau. Les kaolinites ont une surface spécifique comprise entre 5 - 20 m^2/g de matériau.

I.2.4.3- Capacité d'échange cationique (CEC)

Les kaolinites ont la propriété de fixer de façon réversible (échangeable) des cations contenus dans les solutions environnantes.

La capacité d'échange cationique (CEC) correspond au nombre de charge négatives susceptibles de fixer des cations de cette manière ; elle s'exprime en centi-moles par kilogramme (cmol/kg) ce qui est traduit dans le système des unités internationales par des milliéquivalents pour 100 g de produit (meq/100 g).

L'échange de cation n'est possible que s'ils sont retenus par des liaisons faibles sur les surfaces externes ou internes (zone inter-foliaire) des cristaux. La structure des minéraux argileux, organisés en feuillets et espaces inter-foliaires de dimensions variables pour certains types d'argiles, conduit aux caractéristiques et propriétés générales suivantes :

- Une très grande surface spécifique (**Tableau 1**) ;
- Des propriétés d'insertion, dans les espaces inter-foliaires, d'ions minéraux de molécules organiques et d'eau en quantité parfois importante (hydratation). Ces propriétés sont quantifiées par un paramètre appelé capacité d'échange cationique (CEC).

La présence de charges électriques induit des propriétés capitales et en particulier :

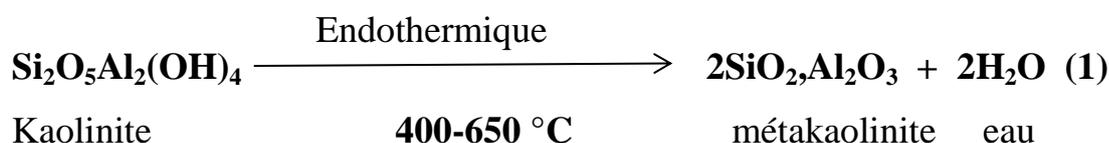
- ❖ La possibilité de fixation ionique et d'échange ioniques ;
- ❖ Des propriétés de floculation et de dispersion.

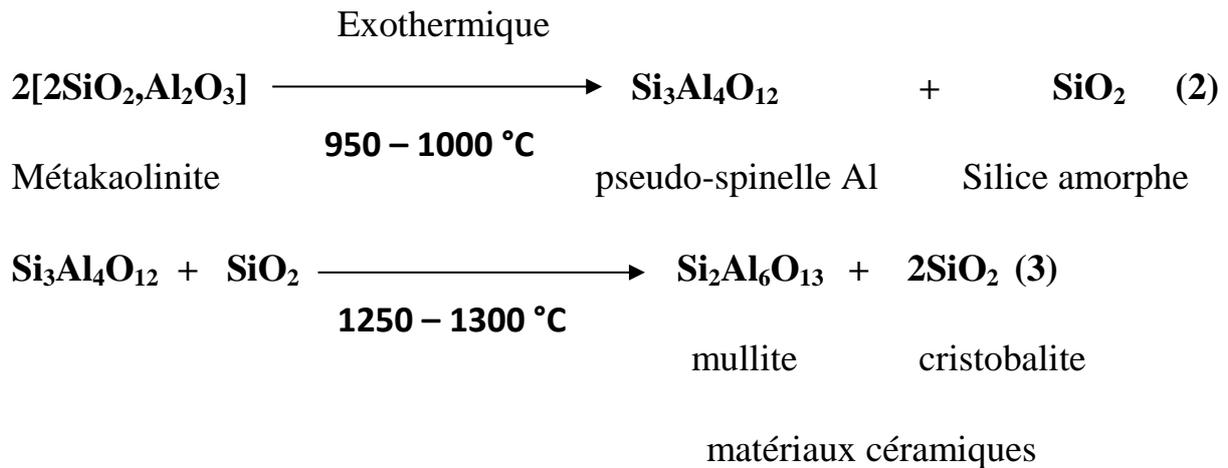
Tableau 1: Surface spécifique et C.E.C de quelques minéraux argileux (MESTDAGH et al, 1982).

Minéral	Surface interne (m ² / g)	Surface externe (m ² / g)	Surface totale (m ² / g)	C.E.C (milliéquiv/100 g).
Kaolinite	0	10 - 30	10 - 30	3 - 15
Illite	20 - 55	80 - 120	100 - 175	10 - 40
Smectite	600 - 700	80	700 - 800	80 - 150
Vermiculite	700	40 - 70	760	100 - 150
Montmorillonite	750 - 800	80	880	50 - 150
Chlorite	-	100 - 175	100 - 175	10 - 40

I.2.5- Propriétés thermiques

Plusieurs études ont été faites au sujet du comportement de la kaolinite au cours d'un traitement thermique (**HILLEY et al, 2010**), ses principales transformations structurales sont les suivantes :





I.2.6- Minéraux où composés associés

Du fait de leur genèse, les kaolins ou argiles kaolinitiques contiennent divers minéraux accessoires associés à la kaolinite en diverses proportions selon leurs origines direct ou indirect. Parmi ceux-ci on peut citer :

❖ Les composés du fer :

Le fer présent dans le kaolin est essentiellement sous forme d'oxyhydroxyde et/ou d'oxyde sauf en présence de matières organiques.

❖ Les oxydes de Titane :

Le titane oxyde TiO_2 se présente sous trois formes cristallines : l'anatase, le rutile et le brookite. L'anatase existe sous forme de particules fines qui donnent au kaolin une couleur grise jaunâtre (SORO N.S, 2003).

❖ Les feldspaths :

Les feldspaths résiduels sont des feldspaths qui ont résistés aux différents facteurs d'altération physico-chimiques externes. Les Kaolins primaires contiennent presque toujours des feldspaths résiduels (PERCIVOL et al, 1977). A l'inverse ils sont inconnus dans les Kaolins secondaires. Ils sont porteurs de potasse et/ou de soude et ont donc tendance à abaisser les températures d'apparition du verre.

❖ Les quartz :

Les oxydes de silicium cristallisés sont presque toujours associés à la kaolinite. Ils peuvent être présents sous forme de microquartz d'origine éolienne et peuvent atteindre une proportion de 30 % de la roche.

❖ Les matières organiques :

Les matières organiques sont l'ensemble des constituants organiques d'un sol, mort ou vivant, d'origine végétale, animale ou microbienne, fortement transformé ou non.

Dans les kaolins les matières organiques ne représentent qu'un très petit pourcentage. Elles participent à la coloration des kaolins crus. Elles disparaissent en générale à des températures variant entre 400 °C et 550 °C.

I.2.7- Quelques utilisations

Au niveau microscopique, le kaolin est composé de cristaux qui ont une forme feuilletée, ce type de structure cristalline est à l'origine des propriétés (comme la viscosité) du kaolin, qui en font un minérale à usage multiples.

❖ Papier : Le kaolin est utilisé dans l'industrie du papier à la fois comme charge dans la masse du papier et comme revêtement de surface. Sa blancheur, son opacité, sa grande surface spécifique et sa très faible abrasivité en font une matière première idéale pour la production du papier. Le kaolin est également utilisé comme matière de charge et revêtement pour les articles en carton et les encres.

❖ En raison de sa plasticité, de sa couleur pale et de sa résistance, le kaolin est utilisé dans la fabrication de porcelaine.

❖ Céramique : Le kaolin se transforme en mullite et en verre lorsqu'il est cuit à des températures dépassant 1000 °C. Il procure la résistance et la plasticité nécessaire pour la mise en forme de ces produits.

❖ **Peinture** : sous ses formes hydratées ou calcinées, le kaolin peut améliorer les propriétés optiques, mécaniques et rhéologiques d'une peinture.

❖ **Caoutchouc** : Le kaolin augmente la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion et la rigidité du caoutchouc. Le kaolin calciné en particulier, avec ou sans traitement chimique de surface au silane, est également utilisé dans les élastomères thermoplastiques de haute qualité notamment dans les isolants à base de caoutchouc sur les installations électriques à haute tension **(NJOPWOUO D, 1984)**.

❖ **Plastiques** : Le kaolin est utilisé dans les plastiques pour leur apporter finesse d'aspect, stabilité dimensionnelle et résistance aux attaques chimiques. Il est également utilisé comme modificateur rhéologique et charge fonctionnelle car améliore les propriétés mécanique, électrique et thermique notamment la propriété d'isolation électrique du PVC.

❖ **Cosmétique et produits pharmaceutiques** : Le kaolin peut être utilisé comme cataplasme pour les problèmes de digestion. Il peut également être utilisé comme excipient dans les produits et soin corporels y compris en thalassothérapie (bains et traitement cutanés) et dans les cosmétiques.

❖ **En médecine** : La kaolinite a des vertus antibactérienne, anti-inflammatoire et cicatrisante. Elle est l'argile la plus polyvalente et peut être utilisée en masque ou cataplasme **(BODO, 2014)**.

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ÉTUDIÉS ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

II.1. MATÉRIAUX

II.1.1. Origine des matériaux

Les deux matériaux argileux dénommés KK (blanc avec une teinte jaune) et KG (grisâtre) concernés par cette étude sont issus du gisement argileux de Koutaba dans le Département du Noun, Région de l'Ouest Cameroun (**POUNTOUENCHI, 2013**). Koutaba est situé sur l'axe Bafoussam-Foumban à une quinzaine de kilomètres au sud de Foumban (**POUNTOUENCHI, 2013**). Le site de prélèvement du matériau KK a pour coordonnées géographiques 5°35'27''N et 10°41'18''E, et à 1143 m d'altitude. Tandis que celui de l'échantillon KG a pour coordonnées géographiques 5°35'20''N et 10°41'26''E et culmine à 1120 m d'altitude (**POUNTOUENCHI, 2013**).

II.1.2. Aspect physique

D'après **POUNTOUENCHI, (2013)** le matériau KK est issu de l'altération des roches cristallines, et situé à environ 2,5 m sous le plancher de la colline. Il est fin et pulvérulent de couleur blanche (25YR8 /1) (**MUNDELL SOIL, 1975**) avec des taches rouges latéritique. Le matériau KG est d'origine sédimentaire car, il est transporté par l'eau (rivière Nkoupe) depuis la zone topographiquement élevée (Mont Mbêpit) où il serait formé jusqu'au bas-fond le long de la rivière Nkoupe. Il constitue ainsi le dépôt d'argile alluvionnaire et situé à 20 cm de profondeur de couleur grisâtre (10YR6/1) (**MUNDELL SOIL, 1975**). Les caractéristiques physiques de ces échantillons sont consignées dans le **tableau 2**.

Tableau 2: Quelques caractéristiques physique des échantillons

Echantillons	KG	KK
Origine	Koutaba	Koutaba
Couleur	Grisâtre	Blanchâtre
Consistance au prélèvement	Roche compacte difficile à briser	Roche compact facile à briser
Type de phyllosilicate de base	Kaolinite	Kaolinite
Rhéologie	Plastique	Friable non plastique

II.1.3- Composition Chimique et Minéralogique

La composition chimique des matériaux argileux de Koutaba (KK et KG) a été déterminée par (POUNTOUENCHI A, 2013) et les résultats sont consignés dans le **Tableau 3**.

Tableau 3: Résultats de l'analyse chimique des matériaux KK et KG (pourcentage d'oxyde par rapport au matériau séché à 105 °C ; Id = inférieur à la limite détection), (POUNTOUENCHI, 2013)

Matériaux	KK	KG
SiO ₂	64,9	58,1
Al ₂ O ₃	27,7	20,2
Fe ₂ O ₃	0,8	3,1
TiO ₂	0,1	1,4
K ₂ O	0,9	0,6
CaO	<Id	0,5
MnO	<Id	0,01
MgO	<Id	<Id
P ₂ O ₅	<Id	<Id
Na ₂ O	<Id	<Id
Perte au feu	5,4	15,9
TOTAL	99,8	98,5

La silice et l'alumine sont des oxydes constitutifs majoritaires dans les argiles KK et KG. Les rapports massiques $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ sont de 2,34 pour KK et 2,88 pour KG au lieu d'environ 1,18 pour la kaolinite pure. Cet écart suggère la présence de silice sous forme de quartz ou de phyllosilicates de type 2 :1.

➤ Les diagrammes de diffraction des matériaux KK et KG (annexes) montrent que dans KK et KG il y'a la kaolinite principalement à laquelle est associé le quartz, SiO_2 dans KK et dans KG sont associés : le quartz (SiO_2), le rutile (TiO_2), une montmorillonite probablement ferrifère (3,1 % de Fe_2O_3), minéral argileux gonflant et justifiant de ce fait la grande plasticité du matériau KG (POUNTOUENCHI A, 2013).

II.2. TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

II.2.1- Préparation des échantillons et tamisage

Broyage et tamisage des matériaux :

Dans un récipient en porcelaine, les échantillons ont été broyés et tamisés au tamis AFNOR de 160 μm de diamètre de maille afin de recueillir la fraction d'argile inférieure à cette granulométrie car pouvant être par la suite facilement séparable avec la résineH après protonation.

II.2.2- Traitement thermique des matériaux

Le traitement thermique de KK et KG a été réalisé à la MIPROMALO. Pour chaque échantillon, environ 25 g de matériau ont été traités dans un four aux températures suivantes : 200, 400, 600, 800 et 1000 °C avec un temps de palier de deux heures et une vitesse de chauffe de 5 °C/minute.

II.2.3. Mesure de la CEC

Les manipulations pour cette phase ont été effectuées au laboratoire de granulométrie (Faculté des sciences Université de Yaoundé I). Plusieurs méthodes de détermination de la CEC des argiles ont été mises au point. De toutes ces méthodes, celle par le traitement aux résines décationisantes est largement utilisée, parce que de mise en œuvre facile. Elle nécessite une mise en contact de l'argile et de la résineH. **DJOUFACK et al (1999)**, utilisant cette méthode ont travaillé avec le rapport de masse résineH (m_r) sur masse d'argile (m_a) égal à 1/2. Le protocole de détermination de la CEC par la méthode à la résine échangeuse de cations comporte quatre étapes :

II.2.3.1. Conditionnement des échantillons et de la résineH

Les échantillons ont été séchés à l'air (température du laboratoire ≈ 25 °C) pendant au moins deux semaines et décapés (**Figure 7**), puis tous sont broyés et tamisés avec passage intégral au tamis AFNOR de maille 160 μm .

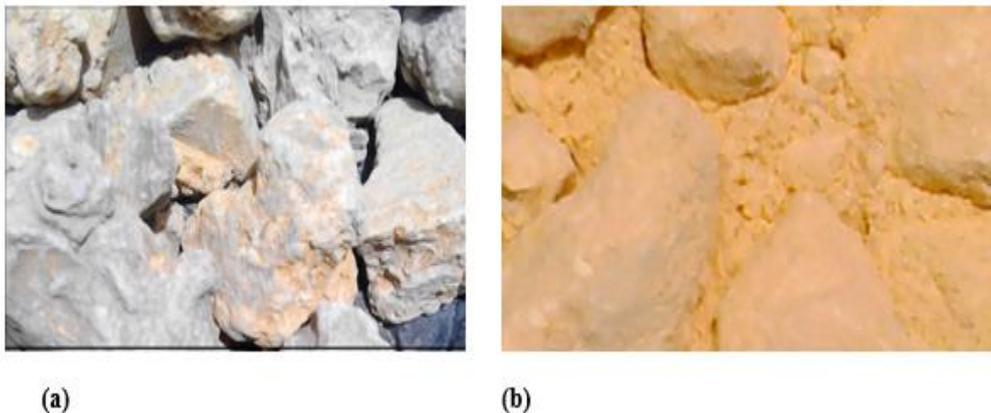


Figure 4 : Echantillons de KG (a) et KK (b).

La résine est tamisée au tamis AFNOR (**Figure 5a**) de maille 160 μm et le refus ($\varnothing > 160 \mu\text{m}$) (**Figure 5b**) est utilisé pour la décationisation des argiles ; ceci permet de pouvoir, à la fin, séparer la résine de l'argile protonée, par simple tamisage.



Figure 5 : Tamis AFNOR de maille 160 μm (a) et le refus ($\varnothing > 160 \mu\text{m}$) (b).

II.2.3.2. Traitement des échantillons : Décationisation

Pour chaque échantillon, une masse m_a (4 g) d'argile est mise dans un bécher de 250 mL environ, puis additionnée d'une masse m_r (2 g) de résineH telle que le rapport $\frac{m_r}{m_a}$ soit égale à 1/2. Le mélange est mis en suspension dans 100 mL d'eau distillée. La suspension est soumise alternativement à 5 min d'agitation électromagnétique (**Figure 6a**) et 30 min de repos (**Figure 6b**), pendant huit heures.



Figure 6 : Echantillon de K G en agitation (a) et au repos (b).

Au bout de ce temps, la résine est retenue sur le tamis de 160 μm et la suspension contenant l'argileH est recueillie dans un bécher (**Figure 7a**), puis décantée (**Figure 7b**).

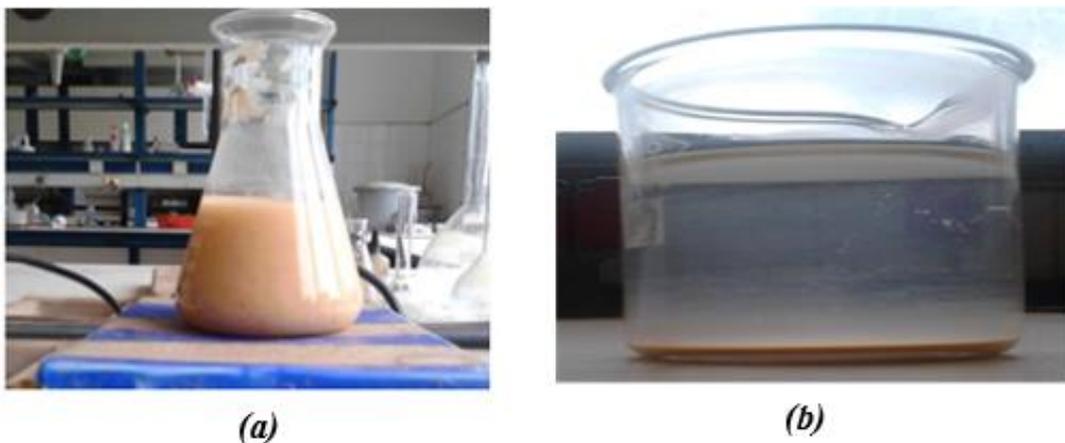


Figure 7 : Suspension argileuse (a) et suspension argileuse après décantation (b).

Cette suspension est laissée à décanter pendant environ douze heures de temps et filtrée sur un papier filtre de faible porosité. L'argileH ainsi obtenue, est séchée à la température du laboratoire ($\approx 25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Pour certains échantillons, après décantation le surplus d'eau a été versé de telle sorte à ne laisser que le minimum d'eau, puis les échantillons ont été placés au rebord de fenêtre en vitre

du laboratoire où se produit un effet de serre surtout lorsque la journée est ensoleillée. Grâce à cet effet de serre, le reste d'eau s'évapore et l'échantillon reste sèche et prête pour la dernière étape.

Lors de cette décationisation, l'argile échange tous ses cations faiblement liés par les protons suivant l'équation simplifiée :



II.2.3.3. Titrage de l'argileH par la soude (NaOH)

Le dosage est effectué par une méthode chimique. Elle consiste à :

- Mettre 1.00 g d'argileH et 50 mL d'eau distillée dans un bécher de 150 mL ;
- Laisser sous agitation électromagnétique pour homogénéisation pendant 15 minutes ;
- Titrer à l'aide de la solution de soude 0,005 N suivant un débit de 1 mL toutes les 15 minutes, la titration étant suivie par pH-métrie.

II.2.3.4.- Calcul de la C.E.C.

Le volume V et la normalité N de soude versée au pH 7 permettent d'évaluer la quantité de proton H⁺ fixée sur la surface de 1 gramme d'argileH. Cette quantité exprimée en milliéquivalent rapporté à cent gramme d'argile représente la CEC au pH = 7, et est donnée par la relation :

$$\text{C.E.C} = 100.N.V \text{ méq/100 g} \quad \text{Avec V en mL}$$

La **figure 8** résume le mode opératoire.

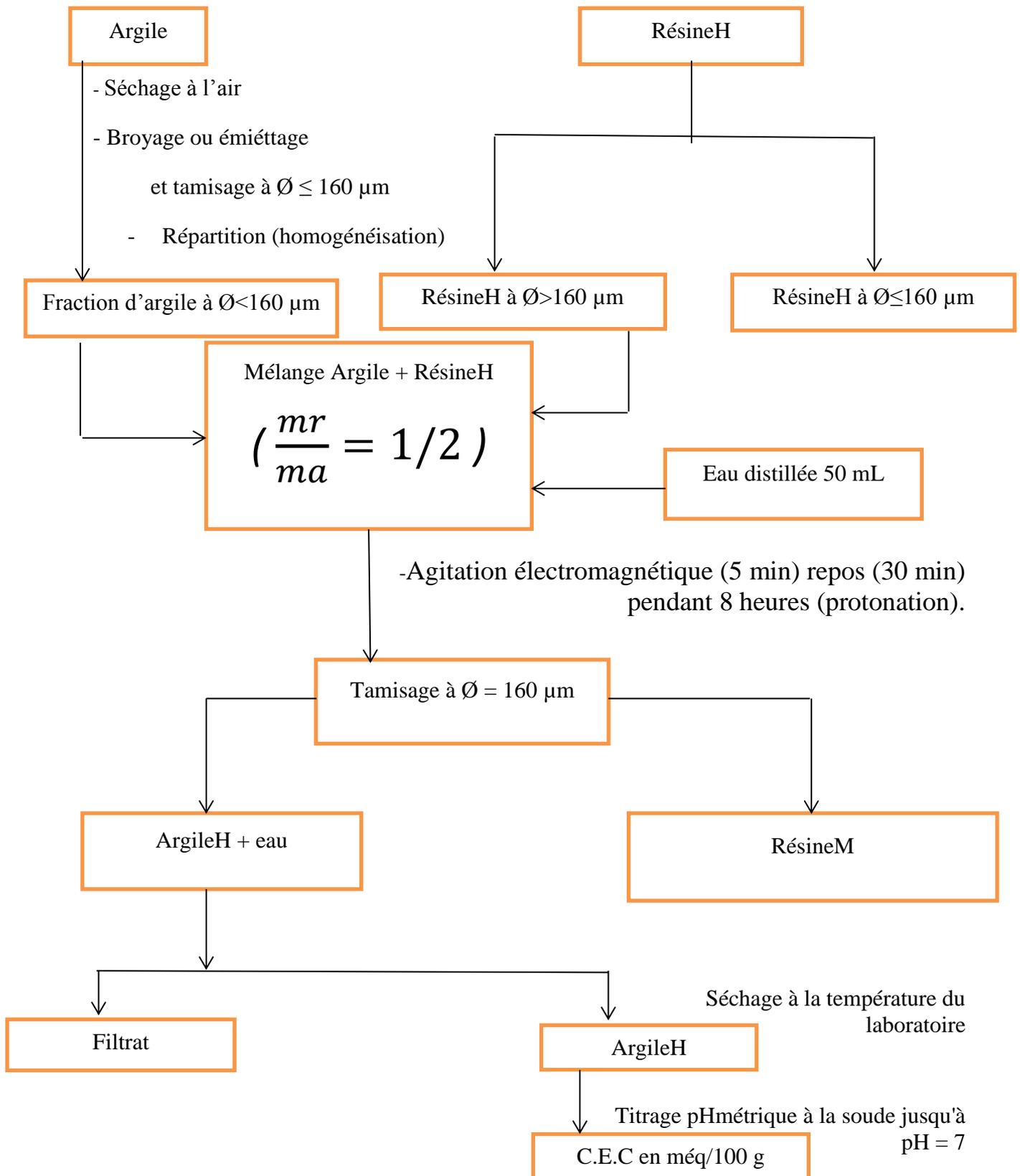


Figure 8 : Résumé le mode opératoire.



CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. Traitement thermique

La conséquence de l'effet de la température sur un matériau est l'ensemble des modifications structurales qui s'y produisent se manifestant à vue par des changements de teinte en fonction de la température. Les échantillons KK et KG ont à ce titre subit un changement de couleur et cette coloration varie selon la température de cuisson. La **Figure 9** montre l'aspect des échantillons suite au traitement thermique.



Figure 9 : Aspect des échantillons après la cuisson de KK(a) et KG(b).

Il en ressort que :

- Les matériaux ont perdu leur couleur initiale.
- La couleur varie avec la température de cuisson.
- La couleur est d'autant plus claire que la température est élevée.
- Aux températures égales ou supérieures à 600 °C (600, 800 et 1000 °C) la coloration est pratiquement la même.

Ces observations peuvent s'expliquer par le changement de phase qui intervient à partir de 400 °C (**équation 1**) ce qui confirme l'hypothèse de la recherche à savoir le traitement thermique provoque des modifications structurales qui vont faire varier les propriétés de surface et par conséquent, la

CEC. En effet, le traitement thermique diminue la proportion des résidus argileux et augmente celle des oxydes colorants (fer oxyde et titane oxyde) qui au départ étaient noyer dans la maille cristalline.

III.2. Mesure des CEC

Le dosage de KK et KG pour la détermination de CEC a donné les volumes de base versés, ces données sont contenues dans le **Tableau 4**.

Tableau 4: Volume de base versée

T (°C)	30	200	400	600	800	1000
KG	21	33	40	54	27,5	26
V (mL)						
KK	14	19	59,5	49	50,5	29

Connaissant la normalité de la solution de NaOH (0.005 N), on peut aisément trouver la CEC de nos matériaux. Les valeurs de CEC trouvées sont consignées dans le **Tableau 5**.

Tableau 5: CEC des matériaux KK et KG

T (°C)	30	200	400	600	800	1000
KG	11	17	20	27	14	13
CEC (meq/100g)						
KK	7	10	30	25	25	15

Ces différentes données nous ont permis de réaliser les histogrammes illustrant la variation de la CEC en fonction de la température de KK (**Figure 10**) et de KG (**Figure 11**).

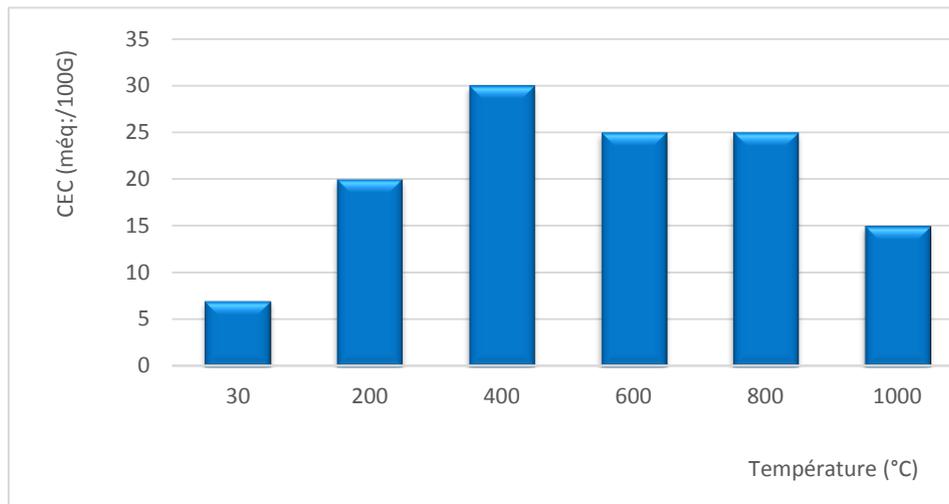


Figure 10: Variation de CEC du matériau KK en fonction de la température.

Il ressort de la figure 10 que :

- ❖ La CEC de KK croît (de 7 à 30 meq/100 g) entre 30 et 400 °C.
- ❖ Au-delà de 400 °C, la CEC reste constante entre 600 et 800 °C (25 meq/100 g).
- ❖ En fin, après 800 °C elle chute de 25 à 15 meq/100 g entre 800 et 1000 °C.

La croissance de la CEC jusqu'à 400 °C peut s'expliquer par le fait que le traitement thermique augmente la CEC sans modification structurale du minéral argileux. L'anomalie intervient dès le début de décomposition qui intervient à partir de 400 °C.

La chute modérée de 30 à 25 meq/100 g entre 400 et 600 °C peut s'expliquer par le début du phénomène de transformation structurale kaolinite-métakaolinite (**équation 1**).

La stabilisation de la CEC (25 meq/100 g) entre 600 et 800 °C se justifie par le fait de l'apparition de la nouvelle phase (métakaolinite) avec la restructuration du minéral.

La chute de CEC entre 800 et 1000 °C peut s'interpréter par la transformation structurale métakaolinite en pseudo-spinelle Al (**équation 2**) qui intervient dans le minéral entre 950 et 1000 °C. Cela suggère que, la

restructuration du minéral modifierait l'électro-neutralité du feuillet pour atténuer sa charge négative conduisant à une CEC moins importante.

En ce qui concerne le matériau KG, le graphe de la **Figure 11** présente la variation de la CEC en fonction de la température.

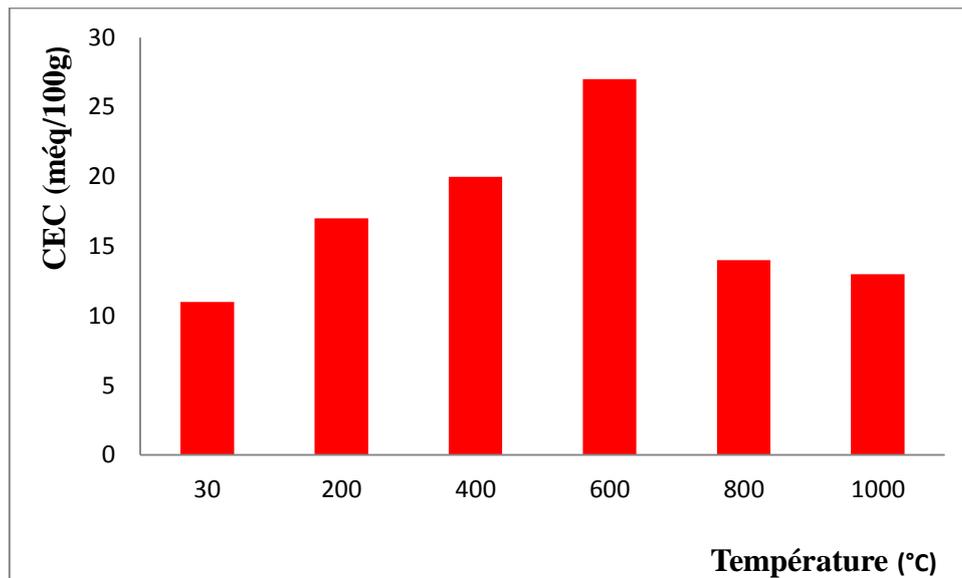


Figure 11: Variation de CEC du matériau KG en fonction de la température.

Il ressort de cet histogramme que :

- ❖ La CEC croît régulièrement de 11 à 27 meq/100 g entre 30 et 600 °C.
- ❖ Après 600 °C, elle chute de 27 à 14 meq/100 g entre 600 et 800 °C pour se stabiliser presque entre 800 et 1000 °C.

La croissance ici de 11 à 27 meq/100 g entre 30 et 600 °C s'interprète par le même fait à savoir le traitement thermique augmente régulièrement la CEC sans transformation structurale.

La chute brusque entre 600 et 800 °C de 27 à 14 meq/100 g se justifie aussi par une décomposition de la structure cristalline du minéral de base.

La nouvelle phase formée autour de 800°C justifie la stabilisation de la CEC entre 800 et 1000 °C.

La présence de minéraux supplémentaires dont on ne maîtrise pas le comportement pourrait expliquer la chute brusque entre 600 et 800 °C. Il conviendrait de faire une DRX à ces températures pour connaître les espèces minérales présentes afin mieux expliquer cette chute. L'explication ne pourrait être complète qu'après l'identification des phases en présence à 600, 800 et 1000 °C.

Si on étudie de façon comparative la variation de la CEC à ces différentes températures dans les matériaux KK et KG, on obtient les résultats présentés sur la **Figure 12**.

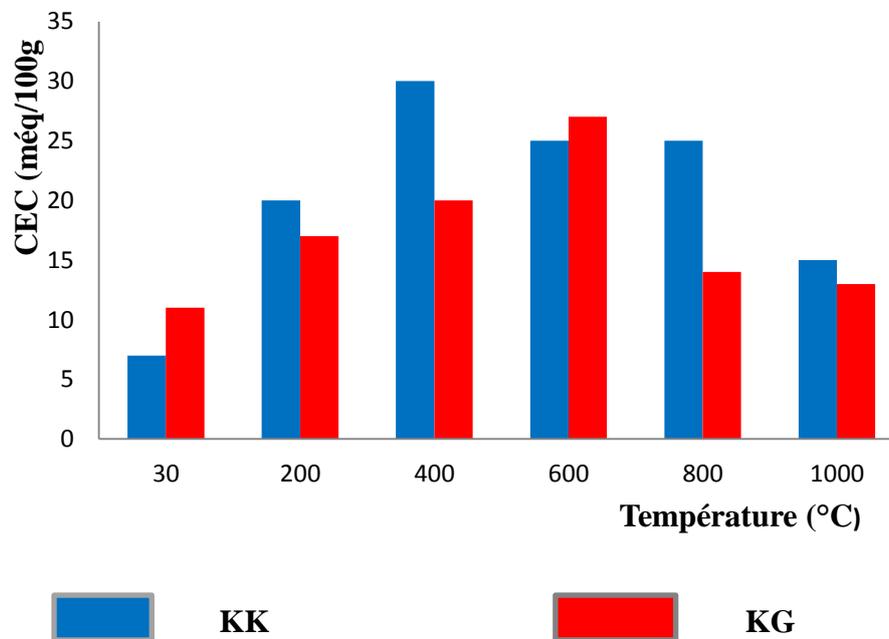


Figure 12: Variation comparée de la CEC dans KK et KG en fonction de la température

Il ressort de la figure 12 que :

- ❖ La CEC est plus importante à température ambiante dans KG (11 meq/100 g) par rapport à KK (7 meq/100 g).
- ❖ La CEC croît entre 30 et 400 °C pour KK et jusqu'à 600 °C pour KG.
- ❖ Le matériau KK atteint son maximum à 400 °C et KG à 600 °C.

La valeur de la CEC à 30 °C plus élevée dans KG que dans KK peut s'expliquer par la présence de la montmorillonite dans KG qui est une argile de la famille des phylites 2/1, constituée par une superposition de feuillets à espaces inter-foliaires expansibles, expansibilité qui contribuerait à accroître les caractéristiques superficielles telles que la surface spécifique et la CEC (NJOPWOUO, 1984). Les valeurs de CEC trouvées à 30 °C sont de 7 meq/100 g pour KK et 11 meq/100 g pour KG. Ces valeurs sont conformes avec ce que prévoit la littérature pour une argile kaolinitique (3-15 meq/100 g) d'après GRIM (1963) et ne sont pas très éloignées de celles trouvées par NJOPWOUO (1984) sur une argile de Balengou (8.2 meq/100 g).

Le décalage de maximum entre KK et KG peut se justifier par la présence de la montmorillonite qui se décompose à des températures plus élevées que 600 °C, déplaçant ainsi l'optimum de KG à une valeur plus grande de celui de KK.

INTÉRETS PÉDAGOGIQUES

Bien que la présente étude soit un pas sûr vers la voie de la recherche scientifique, on peut en dégager quelques aspects forts intéressants sur un plan pédagogique :

- ❖ La maîtrise de certaines techniques de laboratoire utilisées au secondaire pour les cours pratiques (dosages acido-basiques).
- ❖ Le renforcement des aptitudes dans l'utilisation des NTIC (nouvelles technologies de l'information et de la communication) cette compétence sera très utile pour appliquer les nouvelles méthodes de didactique dans nos établissements d'affectations.
- ❖ Le renforcement d'un esprit de synthèse, qui sera un atout lors de la préparation des cours dans les lycées et collège vue la documentation diverse et variée disponible.
- ❖ Le renforcement des capacités dans la recherche bibliographique pour l'exploitation des documents et la culture scientifique en générale.

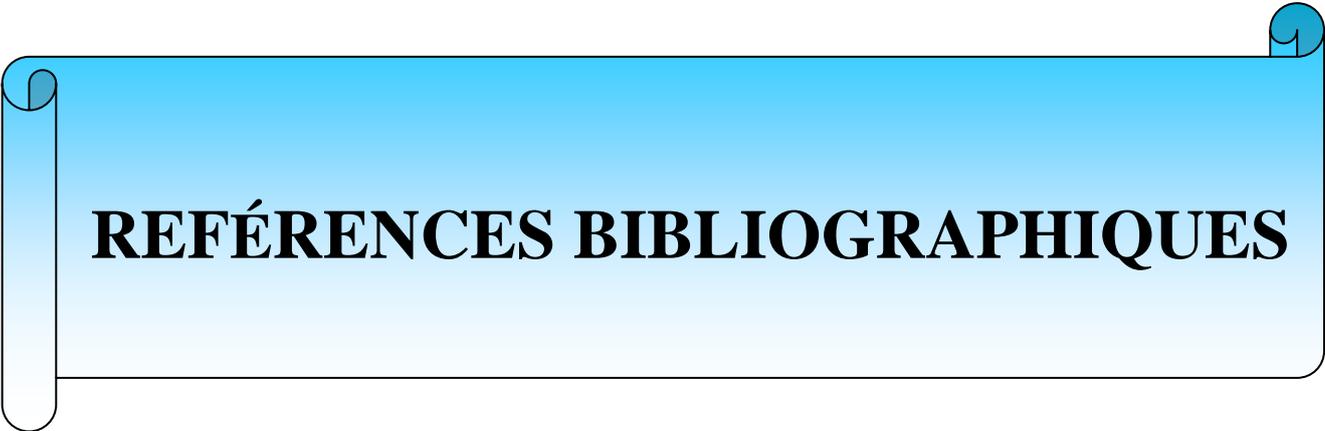
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Le présent mémoire est une contribution à l'étude de l'effet du traitement thermique sur la CEC des argiles kaolinitiques du secteur de Koutaba. Au terme de ce travail, un ensemble de résultats permet aujourd'hui un peu plus qu'hier de se faire une idée de l'effet de la température sur les propriétés de surfaces des argiles kaolinitiques. Deux échantillons d'argiles kaolinitiques dénommés KK et KG ont fait l'objet d'un traitement thermique à 30, 200, 400, 600, 800 et 1000 °C suivi de la mesure de la CEC ; il-y ressort que :

- ❖ La CEC croît avec la température puis atteint son optimum à 400 °C pour KK et 600 °C pour KG en suite, elle chute jusqu'à 15 meq/100 g à 1000 °C pour KK et jusqu'à 13 meq/100 g pour KG;
- ❖ Le traitement thermique augmente régulièrement la CEC des matériaux étudiés avec les taux d'accroissements de 76,67 % pour KK et 59,26 % pour KG. Le traitement thermique a donc un effet d'exaltation de la CEC des matériaux jusqu'à des températures précises (températures du début de changement de phase).

En guise de perspectives, ce travaille pour être amélioré en :

- ❖ Faisant plusieurs essais par température pour une plus grande fiabilité des résultats et en élargissant la gamme de température au-delà de 1000 °C pour une plus grande visibilité sur la progression des valeurs obtenues.
- ❖ Diminuant l'incrémentation de température pour avoir les valeurs intermédiaires de cette propriété (100, 300, 500, 700 et 900 °C).
- ❖ Réalisant les DRX sur les matériaux à 600, 800 et 1000 °C pour connaître les phases minérales contenus dans les matériaux à ces températures afin de mieux interpréter les résultats obtenus.
- ❖ Travaillant sur les fractions fines ($\Phi < 2 \mu\text{m}$) de matériaux, enrichies en argile minéralogique pour mieux apprécier l'impact de la température sur le minéral argileux.



REFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABIBA NKALIH., NJOYA André., MACHE Jacques YONGUE FOUATEU., FLAMENT Pierre., FAGEL Nathalie (2014) Indice de kaolin de Koutaba (Ouest-Cameroun). Congrès scientifique et symposium, Université de Liège, Belgique. p 1.

BAYLEH S.W. (1963). Polymorphism of the kaolin minerals. Department of Geology, University of Wisconsin, Madison 6, Wisconsin, 48,1196-1209.

BELAMRI Zehira (2008) Elaboration et caractérisation des matériaux poly-cristallins à base de kaolin DD et KT_2 . Mémoire de Magister, Université Mentouri-Constantine, Faculté des sciences exactes, Département de physique, République Algérienne, p.100.

BENSALEM H., ALI E.O, ABDELLAH M.,MALIKA A., NAJIB S.(2011) Caractérisation physico-chimique des argiles fibreuses de Souk el Arbaa du Gharb, Maroc, Revue internationale des sciences et technologie, Université Hassan II-Mohammedia-Rabat, Maroc, vol.7 N°1.

BICHE C.(2005) Contribution à l'étude de l'activation thermique du kaolin : évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique. Thèse de doctorat, Université de Lyon, France, p.264.

BODO B.H. (2014) Caractérisation chimique et minéralogique du matériau du vaste gisement argileux des localités d'Akom et de Ngat (région du centre). Mémoire de DIPES 2, Université de Yaoundé I, Ecole Normale Supérieure, Cameroun, p.32.

BRADLY W.F., GRIM J R.E., (1951) differential thermal analysis of clays and carbonates, Am.Min., 36, PP. 182-201.

BRINDLEH G.W., CHIH-CHUM., HARRISON J.L., LIPSICAS M. (1986) Relation between structural disorder and other characteristics of kaolinites and dickites. *Clays and Clay Miner* 3(34), 239-249.

CAILLERE S., HENIN S., RAUTUREAU M. (1982) Minéralogie des argiles, Tomes 1 et 2, Intra Actualités scientifiques et agronomiques, Masson Paris, p.12.

COSTANZO P.M., GIESE R.F., LIPSICAS J M. (1984) Static and dynamic structure of water in hydrated kaolinites. In The static structure. *Clays and clay Miner* 5(32), 419-428.

DJOUFAC W.E., DJIOGUE C., NJOPWOUO D. (1999) Capacité d'échange ionique de quelques argiles consommées au Cameroun par geophagysme et/ou des fins thérapeutiques. *Anales de la faculté des sciences, Laboratoire de chimie minérale appliquée. Université de Yaoundé 1, Faculté des sciences, Cameroun*, pp.125-135.

EBERHART (1963) Transformation de la muscovite par chauffage entre 700 et 1200°C. *Bull. Society.fromc. Miner. Cristallography.* 86, 213-251.

GRIDI-BENNADJI F. (2007) Matériaux de mullite à microstructure organisée composés d'assemblage muscovite-kaolin. Thèse de Doctorat, Université de Liège, Faculté des sciences et techniques, Belgique, p.181.

GREH I.E., REID A.F. (1975) The structure of pseudo-rutile and its role in the natural alteration of ilmenite. *American Mineralogist*60, pp. 898-906.

HEIGUESON H.C., GARRETS R.M., MACKENZIE F.T. (1968) *Acta*, 33, PP. 455-481.

HILLEY G.E., CHAMBERLAIN C.P., MOON S., PORDER S., WILLET S.D. (2010) Competition between erosion and reaction kinetics in controlling silicate-weathering rates. *Earth and planetary Science Letters* 293, 191-199.

KESRI N. (2014) Contribution à l'étude minéralogique du gisement de kaolin de Jejel. Mémoire de Master professionnel en Chimie, spécialité science et technologie, option chimie des matériaux industriels, Université MOUHAMED BOUDIAF-USTO-ORAN, Faculté de Chimie industrielle, République Algérienne, p.1505.

KUZVART M., JIRI KONTA (1968) *Acta University. Carol. Geologica*, N° 1-2, Prague Vol. 3, N°4 (144), p 1-19.

MARCOUX E. (2012) Introduction aux ressources minérales. Université d'Orléans, eric.marcoux@univ-orleans.fr.

MESTDAGH M., HERBILLON A.J., Rodrigue L., ROUVHET P.G. (1982) Evaluation du rôle du fer structural sur la cristallinité des kaolinites. *Bull Mineral*105, 457-466.

MOHAMAD KONESHLOO (2007) Caractérisation, estimation et valorisation des gisements d'argiles kaolinitiques du bassin de Charente. Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure des mines de Paris, France, p.334.

MUNDELL S. C. C. (1975) Quoted in part from U.S. department Agriculture hand book. 18.

NDZIE M.A.T. (2011). Caractérisation et géotechniques des roches et des graveleux latéritiques de la région de Batchenga (Centre Cameroun) en vue de leurs application en construction routière. Mémoire de Master II, Faculté des sciences, Université de Yaoundé I. p.88.

NJOPWOUO D. (1984) Minéralogie et physico-chimie des argiles de Bankoul et de Balengou (Cameroun). Utilisation dans la polymérisation du styrène et dans le renforcement du caoutchouc naturel. Thèse de doctorat, Université de Yaoundé 1, Faculté des sciences, Cameroun, 300p.

OKADA K., OTSUKA N., OSAKA J. (1986) J.Am. Ceram. Soc, 69, pp.251-253.

PERCIVOL H. J., DUCAN J. F., FOSTER P. K. J. (1977) Am. Ceram. Soc, 57, pp.37-43.

PLANÇON A., GIESE R. F., SNYDER R., DRIS V. A., BOOKIN A. S. (1989) Stacking fault in the kaolin-group minerals: defect structure of kaolinite. *Clays and clay Miner* 3(37), 203-210.

POUNTOUENCHI A. (2013) Contribution à l'étude physico-chimique et minéralogique des matériaux argileux de koutaba. Mémoire de Master II, Université de Yaoundé 1, Faculté des Sciences, Cameroun, p.63.

SEBASTIA J. (2007) Prise en compte de la réactivité de différentes fractions de matières organiques du sol dans la prévision de la spéciation des métaux: Cas du cuivre. Thèse de doctorat de l'Agroparistech, spécialité environnement et agronomie, institut d'agronomie Paris-Grignon, France, p.326.

SONUPARLAK B., M. SARIKOYA., A. AKSAY. J. (1948) Am. Ceram. Society., 31, 254-259.

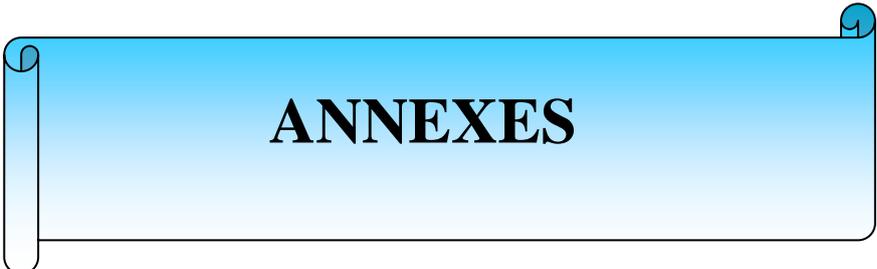
SORO N. S. (2003) influence des ions fer sur les transformations thermiques de la kaolinite. Thèse de doctorat, GEMH, ENSCI Université de Limoge, France, p.176.

STANLEY C., COSTANZO P.M., GIESE R.F.(1935) Static and dynamic structure of water in hydrated kaolinites. I the dynamic structure. *Journal of colloid interface Society.* 1(107), 221-230.

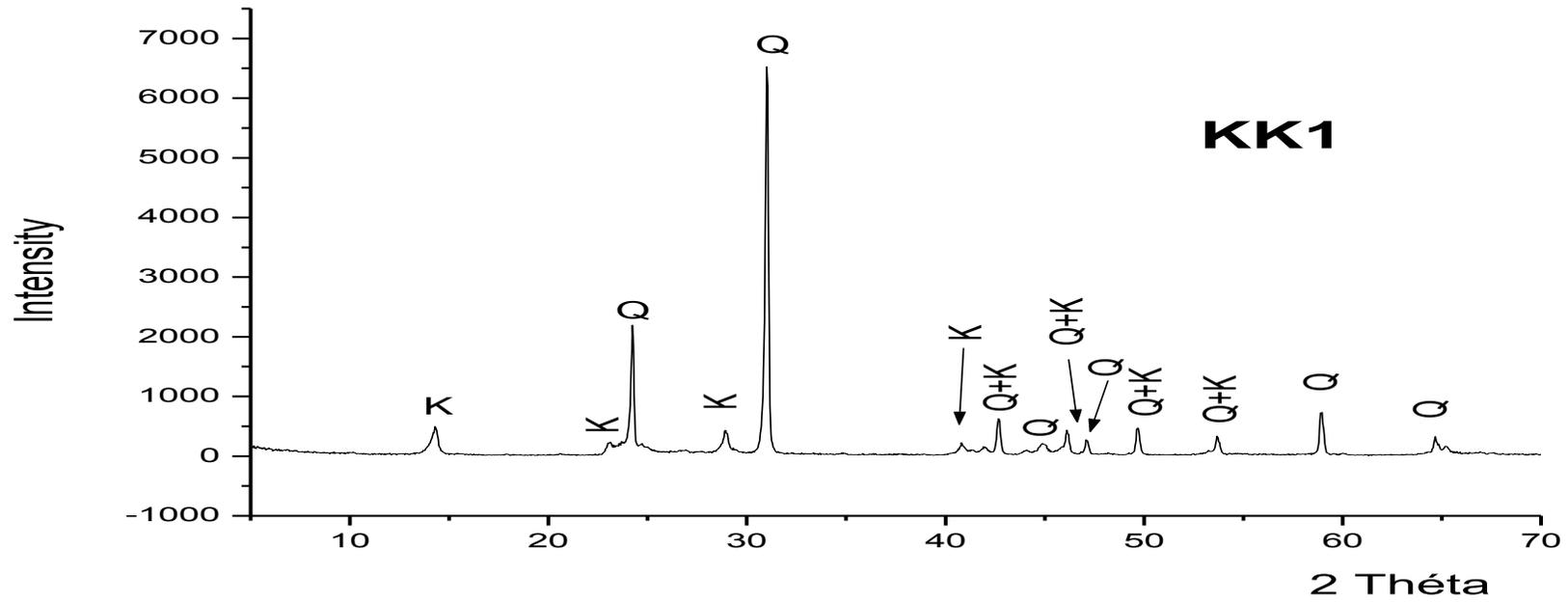
TCHUINDJANG Y.D. (2015) Etude physico-chimique et minéralogique des indices de bauxite de la région de Fouban. Mémoire de Master II, Université de Yaoundé I, Faculté des sciences, Cameroun, p.73.

WEST A.J., GALY A., BICKLE M. (2005) Tectonic and climatic control on silicate weathering. *Earth and planetary Science Letters* **235**, 211-228.

YVON J., GARIN P., DELON J.F., CASES J.M. (1982) Valorisation des argiles kaolinitiques de Charente dans le caoutchouc naturel, *Bull Mineral.* 105 in : Nadia EL YAKOUBI (2006)-38p.

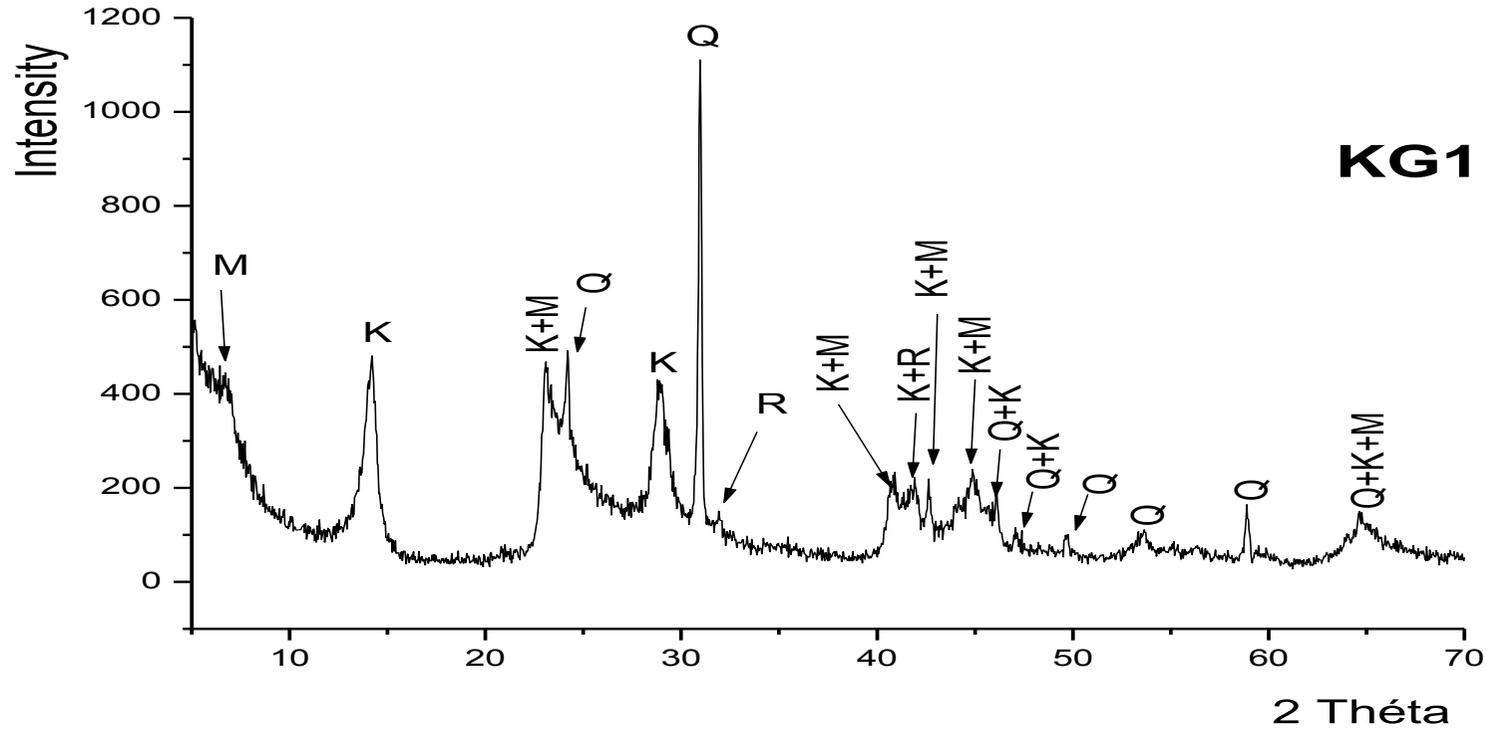


ANNEXES



(K= Kaolinite ; Q= quartz)

Annexe 1 : Diagramme de diffraction des rayons X du matériau KK



(K= Kaolinite ; Q= quartz ; M=Montmorillonite ; R= Rutile)

Annexe 2 : Diagramme de diffraction des rayons X du matériau KG