

Réf :.....

Mémoire de fin de cycle

En vue d'obtention du diplôme de Master en Génie des Procédés

Option : Génie des Matériaux

Thème

**Comportement thermique et
propriétés des composites à base de
céramiques / déchets plastiques**

Présenté par :

ABDELLADIM Nadjet & ABOUD Fazia

Soutenu le : **10 septembre 2020**

Devant les jurys composer de :

| | | |
|------------------|-------------------|--------------|
| Mr DJIDJELLI. H | Professeur (UAMB) | Président |
| Mme BOUZIDI. N | MCA (UAMB) | Encadreur |
| Mme AISSOU. S | Doctorante (UAMB) | Co-Encadreur |
| Mme BELKACEMI. H | MCA (UAMB) | Examinatrice |

Année universitaire : 2019 / 2020

Remerciements

*Après avoir rendu grâce à **dieu** le tout puissant , nous tenons à exprimer nos remerciements avec un grand plaisir et un grand respect a nos promotrices Mme **N, BOUZIDI** et Mme **S, AISSOU** pour leur conseils, la disponibilité et leur encouragements qui nous ont permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions.*

*Nos sincère considération et remerciements aux membres des jurys Mr **DJIDJELLI** et Mme **BELKACEMI** : qui nous font l'honneur d'évaluer et d'examiner notre travail*

Nous exprimons de même notre gratitude envers tous ceux qui nous ont accordé leur soutien, tant par leur gentillesse que par leur dévouement.

A toute personne ayant contribué de près ou de loin a l'avancement de notre projet.

A notre famille et ami(e) s pour leur aides.



Dédicace

A l'aide de dieu tout puissant, qui m'a tracé le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce modeste travail que je dédie :

*A tous ceux que j'aime, aux deux être les plus chers que j'aime du fond du cœur :
A ma tendre mère pour son soutien, son encouragement permanent et ses prières.*

Que Dieu te protège.

*A la mémoire de mon père, qui est et qui demeurera dans mon cœur à tout jamais.
Que Dieu l'accueille dans son vaste paradis.*

*A mes deux sœurs : **Yasmina** et **Lydia**, a mon petit frère : **Yanis***

Pour leur aide, leur présence et leur soutien

*A ma meilleure copine, à ma sœur **Assia***

Pour son soutien, ses conseils et son aide

A tout mes amis surtout :

***Nihad, Lamia, Lyliá, et Mima**, qui m'ont accompagné et encouragé durant ces années*

A la personne qui m'a soutenu et a toujours été à mes coté...

*A mon binôme **Nadjet***

A toute ma famille

A tous ceux qui ont contribué de pré ou de loin à la réalisation de ce travail

Fazia



Dédicace

A ma Mère,

« Tu m'as donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir. Tout ce que je peux t'offrir ne pourra remplacer l'amour et la reconnaissance Que je te porte. En témoignage, je t'offre ce modeste travail pour te remerciant Pour tes sacrifices et l'affection dont tu m'as toujours donné. »

A mon Père,

« L'épaulé solide, l'œil attentif compréhensif et la personne La plus digne de mon estime et de mon respect. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments, Que dieu te préserve et te procure santé et longue vie. »

A mes chers grands parents,

A Qui je souhaite une bonne santé et longue vie.

A mes frères, Bilal, Karim.

A mes sœurs, Souad, Dehia.

Pour leurs soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

*A ma chère binôme, Fazia
Pour son entente et sa sympathie.*

*A ma très chère copine, Lylia
Qui m'a beaucoup aidé et supporté dans le moment difficiles.*

Madjet

Table des matières

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralités sur les kaolins

| | |
|---|----|
| I-1- Les Argiles | 3 |
| I-1-1- Origine | 3 |
| I-1-2- Définition | 3 |
| I-1-3- Structure des argiles | 3 |
| I-1-4- Classifications des argiles | 5 |
| I-2- Les Kaolins | 6 |
| I-2-1- Définition | 6 |
| I-2-2- Composition du kaolin..... | 7 |
| I-2-3- Propriétés du kaolin..... | 8 |
| I-2-4- Formation de kaolin..... | 8 |
| I-2-4-1- Les kaolins primaires ou kaolins résiduels | 8 |
| I-2-4-2- Kaolins secondaires ou sédimentaires | 9 |
| I-2-5- Structure de kaolin..... | 10 |
| I-2-6- Domaine d'utilisation des kaolins | 10 |

Chapitre II : Généralités et propriétés des céramiques

| | |
|--|----|
| II-1- Matières premières et élaboration des céramiques | 12 |
| II-1-1- Définition des céramiques | 12 |
| II-1-2- Les matières premières | 12 |
| II-1-2-1- Les matières premières naturelles | 12 |
| II-1-2-2- Matières premières synthétiques | 14 |
| II-1-3- Elaboration des céramiques | 14 |
| II-1-3-1- Préparation des poudres..... | 15 |
| II-1-3-2- Traitement thermique | 15 |
| II-1-3-3- Second broyage | 16 |
| II-1-3-4- Mise en forme | 16 |

| | |
|---|----|
| II-1-3-5- Le frittage..... | 17 |
| II-2- Transformation thermique du kaolin | 18 |
| II-2-1- La déshydratation..... | 18 |
| II-2-2- La déshydroxylation..... | 18 |
| II-2-3- La recristallisation..... | 18 |
| II-3- Propriétés des céramiques | 20 |
| II-3-1- Propriétés mécaniques | 20 |
| II-3-2- propriétés physiques..... | 21 |
| II-3-3- Propriétés chimiques | 21 |
| II-4- Déchets plastiques et leur valorisation dans le domaine des céramiques | 22 |
| II-4-1- Définition et classification des déchets plastiques | 22 |
| II-4-1-1- Les déchets plastiques industriels | 22 |
| II-4-1-2- Les déchets plastiques de post-consommation..... | 23 |
| II-4-2- Valorisation des déchets plastiques..... | 23 |
| II-4-2-1- Répartition des plastiques | 23 |
| II-4-2-2- Collecte, tri et recyclage des plastiques..... | 23 |
| II-4-2-3- Valorisation des déchets plastiques | 24 |
| II-4-3- Propriétés des céramiques avec incorporation des déchets plastiques..... | 26 |
| Chapitre III: Techniques expérimentales et traitements thermiques des kaolin | |
| III-1- Présentation des kaolins | 28 |
| III-2- Techniques expérimentales | 28 |
| III-2-1- Analyse Minéralogique par Diffraction des Rayons X (DRX) | 28 |
| III-2-2- Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF)..... | 29 |
| III-2-3- Composition chimique des kaolins | 30 |
| III-2-4- Durabilité chimique des kaolins..... | 30 |
| III-2-4-1- Attaque acide | 30 |
| III-2-4-2- Attaque basique..... | 31 |
| III-2-5- Propriété mécanique des kaolins : Microdureté Vickers | 33 |
| III-3- Traitements thermiques des kaolins | 32 |
| CHAPITRE IV : CARACTERISATION PHYSICO-CHEMIE DES KAOLINS CRUS ET CUITS A 900 ET 1100°C ET LEURS PROPRIETES | |
| IV-1- Caractérisation physicochimique des kaolins crus..... | 34 |
| IV-1-1- Analyse Minéralogique par Diffraction des Rayons X (DRX) | 34 |
| IV-1-2- Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF) | 36 |

| | |
|---|-----------|
| IV-1-3- Composition chimique des kaolins (RFX)..... | 39 |
| IV-2- Caractérisation physicochimique des kaolins cuits à 900 et 1100°C | 42 |
| IV-2-1- Analyse Minéralogique par Diffraction des Rayons X (DRX) | 42 |
| IV-2-2- Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF) | 44 |
| IV-3- Propriétés des pièces des kaolins élaborées | 47 |
| IV-3-3- Durabilité chimique des kaolins..... | 47 |
| IV-3-3-1- Attaque acide | 47 |
| IV-3-3-2- Attaque basique | 49 |
| IV-3-4- Propriété mécanique des kaolins : Micro dureté Vickers | 51 |
| Conclusion générale..... | 53 |
| Références bibliographiques | |

Liste d'abréviation

ATD : Analyse thermique différentielle

ATG : Analyse thermogravimétrique

DD3 : Produit fini du kaolin de Djebel Debbagh

DRX : Diffraction des Rayons X

DSC : Calorimétrie différentielle à balayage

IRTF : Infrarouge à Transformées de Fourier

KT3 : Produit Fini du Kaolin d'El Millia

PE : Polyéthylène

PFA : Pertes Au Feu

PP : Polypropylène

PS : Polystyrène

PVC : Polychlorure de vinyle

Listes des Figures

| | |
|---|----|
| Figure I. 1: a) Couche tétraédrique de silice. b) Couche octaédrique. c) Structure cristalline..... | 4 |
| Figure I. 2: Cristaux de kaolinite vus au microscope électronique à balayage | 7 |
| Figure I. 3: Représentation schématique de la structure cristalline de la kaolinite..... | 10 |
| Figure III. 1: Appareil de diffraction des rayons X | 29 |
| Figure III. 2: Photo du Microduromètre ZHU 2.5 (Zwick Hardiesse Unity)..... | 32 |
| Figure IV. 1: Diffractogramme des rayons X du kaolin KT3 (40 et 63 μm) cru..... | 35 |
| Figure IV. 2: Diffractogramme des rayons X du kaolin DD3 (40 et 63 μm) cru | 36 |
| Figure IV. 3: Spectres de l'infrarouge a transformée de Fourier de KT3 (40 et 63 μm) cru | 37 |
| Figure IV. 4: Spectres de l'infrarouge a transformée de Fourier de DD3 (40 et 63 μm) cru | 38 |
| Figure IV. 5: Histogramme de la composition chimique par fluorescence X du kaolin KT3 (40 et 63 μm) cru..... | 40 |
| Figure IV. 6: Histogramme de la composition chimique par fluorescence X du kaolin DD3 (40 et 63 μm) cru | 41 |
| Figure IV. 7: Diffractogramme DRX du kaolin KT3 (40 et 63 μm) cru et cuit à 900°C et 1100°C | 42 |
| Figure IV. 8: Diffractogramme DRX du kaolin DD3 (40 et 63 μm) cru et cuit à 900°C et 1100°C | 43 |
| Figure IV. 9: Spectres infrarouge à transformée de Fourier du kaolin KT3 (40 et 63 μm) cru et cuit à 900°C et 1100°C | 45 |
| Figure IV. 10: Spectre infrarouge a transformée de Fourier du kaolin DD3 (40 et 63 μm) cru et cuit à 900°C et 1100°C | 46 |
| Figure IV. 11: Histogramme des pourcentages des masses des kaolins KT3 et DD3 (40 et 63 μm) cuits à 900°C après attaque acide..... | 48 |

| | |
|--|----|
| Figure IV. 12: Histogramme des pourcentages des masses des kaolins KT3 et DD3 (40 et 63 μm) cuits à 1100°C après attaque acide | 48 |
| Figure IV. 13: Histogramme des pourcentages des masses des kaolins KT3 et DD3 (40 et 63 μm) cuits à 900°C après attaque basique | 50 |
| Figure IV. 14: Histogramme des pourcentages des masses des kaolins KT3 et DD3 (40 et 63 μm) cuits à 1100°C après attaque basique | 50 |
| Figure IV. 15: Histogramme des valeurs de micro dureté Vickers (Hv 0,5) des kaolins KT3, et DD3 (40 et 63 μm) cuits à 900°C et 1100°C | 52 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau I. 1: Classification des minéraux argileux..... | 6 |
| Tableau I. 2: Teneurs massiques des oxydes composant le Kaolin | 7 |
| Tableau I. 3: Propriétés générales du kaolin | 8 |
| Tableau I. 4: Applications traditionnelles des kaolins | 11 |
| | |
| Tableau II. 1: Ordre des étapes selon lesquelles sont élaborées les céramiques | 15 |
| Tableau II. 2: Quelques propriétés usuelles des matériaux plastiques et céramiques .. | 27 |
| | |
| Tableau IV. 1: Composition chimique par fluorescence X du kaolin KT3 (40 et 63 µm) cru..... | 39 |
| Tableau IV. 2: Composition chimique par fluorescence X du kaolin DD3 (40 et 63 µm) cru..... | 40 |
| Tableau IV. 3: Pourcentages des masses des kaolins cuits à 900°C après attaque acide..... | 47 |
| Tableau IV. 4: Pourcentages des masses des kaolins cuits à 1100°C après attaque acide..... | 47 |
| Tableau IV. 5: Pourcentages des masses des kaolins cuits à 900°C après attaque basique | 49 |
| Tableau IV. 6: Pourcentages des masses des kaolins cuits à 1100°C après attaque basique | 49 |
| Tableau IV. 7: Valeurs de la micro dureté Vickers (Hv 0,5) des pièces en kaolins KT3, et DD3 (40 et 63 µm) cuites à 900°C et 1100°C..... | 51 |

INTRODUCTION GENERALE

La technologie céramique est l'une des industries de transformation des plus anciennes mettant en œuvre dès les temps anciens des matières premières essentiellement argileuses. De nos jours, ces matériaux continuent de nous étonner par la diversité de leurs propriétés [1]. Ces matériaux sont au cœur du développement de nouvelles applications telles que les outils de coupes, les composants électroniques ou électrotechniques passifs, les tuiles de la navette spatiale, les implants chirurgicaux et de nombreux objets céramiques utilisés dans l'industrie du bâtiment [2].

D'un autre côté, les polymères sont de plus en plus présents dans la vie quotidienne. De tout temps l'homme a cherché à les exploiter pour se nourrir, produire de l'énergie, construire, améliorer et agrémenter son habitat, se protéger et se vêtir, se déplacer et transporter, mais aussi pour décorer [3].

Le problème du plastique n'est donc pas son utilisation, généralement vertueuse, mais la gestion de la fin de vie des produits. Le point le plus préoccupant reste l'impact sur l'environnement de tout le plastique qui se retrouve, intentionnellement ou accidentellement, jeté dans la nature, et qui contribue à la pollution et à la dégradation des écosystèmes naturels. Sur la terre ferme, dans les cours d'eau et en mer, les déchets dégradent les paysages et détruisent les écosystèmes [4].

Les applications et la réutilisation des plastiques dans les céramiques prennent une ampleur de plus en plus considérable. Cette réutilisation permet d'une part de prendre en charge les déchets plastiques, et d'autre part de créer une valeur ajoutée sur les sous-produits en fin de vie, et qui peut être une source économique et de création d'entreprises, et d'autre part une solution d'amélioration des propriétés physico-mécaniques des céramiques [4].

Dans cette optique là, ce travail est réaliser pour valoriser un déchet plastique de type gaine électrique dans des matériaux céramiques à base de deux kaolins Algériens KT₃ et DD₃. Ces deux argiles sont issues des gisements de Tamazert (Jijel) et de Djebel Debbagh (Guelma) respectivement.

De ce fait, la caractérisation physico-chimique des deux kaolins crus et les pièces formées ; à base d'eux ; cuites à 900 et 1100 °C par diffraction des rayons X, par la spectroscopie infrarouge à transformé de fourrier IRTF et par fluorescence X afin de déterminer leurs phases minéralogiques et compositions chimiques en oxydes est réalisée. La durabilité chimique en milieux acide et basique et la microdureté Vickers des pièces sont aussi déterminées.

Malheureusement suite a la pandémie sanitaire, la caractérisation du déchet plastique, l'élaboration des composites (céramiques / déchets plastiques) et le suivi de leur comportement thermique, par diverses méthodes d'investigation : DRX, ATD/ATG, DSC, FTIR, et leurs propriétés mécaniques, porosité, l'absorption en eau et la durabilité chimiques ne sont pas réalisées.

Notre manuscrit est réparti en une introduction générale suivi de quatre chapitres :

- Le premier est consacré à une étude bibliographique où on retrouve des généralités sur les argiles et leurs classifications, et plus particulièrement le kaolin en tant que matière argileuse ;
- Le deuxième comporte une étude bibliographique plus détaillée sur les matériaux céramiques et les déchets plastiques ainsi que leur valorisation ;
- Les différentes techniques expérimentales, les protocoles d'élaboration des pièces de kaolins et leurs traitements thermiques sont présentés et détaillés dans chapitre trois ;
- Le chapitre quatre englobe les résultats de la caractérisation physico-chimique des kaolins KT₃ et DD₃ crus et cuits à 900 et 1100°C et leurs propriétés.

Une conclusion générale, résumant l'essentiel des résultats de ce travail est développée dans la dernière partie.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES KAOLINS

Ce premier chapitre a pour but de présenter et de définir les argiles en général, rappeler quelques notions de base concernant la structure, classifications des argiles et plus particulièrement le kaolin en tant que matière argileuse, la composition, propriétés de kaolin ainsi sa formation et sa structure et les différents domaines d'utilisation.

I-1- Les Argiles

I-1-1- Origine

Les minéraux argileux désignent une matière rocheuse naturelle à base de silicate ou des aluminosilicates hydratés de structure feuilletée, provenant en général de l'altération de silicates à charpente tridimensionnelle, tels que les feldspaths, mica [5].

Les plus communs: la kaolinite, l'halloysite, la montmorillonite, l'illite et la vermiculite sont de très fines particules, de l'ordre de micromètre (μm). Ils constituent souvent des mélanges naturels complexes de minéraux dont la granulométrie et les propriétés physico-chimiques sont très variables [6].

Chaque minéral argileux a été formé dans un environnement chimique et climatique précis, avec lequel il se trouve en équilibre. Ainsi s'explique la variété des minéraux argileux [6].

I-1-2- Définition

Les argiles sont des matériaux omniprésents sous forme de roches de silicates en feuillets (phyllo silicates) d'Al, plus ou moins hydratés. Partiellement ils sont des matériaux composés pour une large part de minéraux à grains fins [7]. Les argiles se plastifient lorsqu'ils sont mélangés avec une quantité suffisante d'eau et durcissent avec le séchage ou à la cuisson [8]. Elles sont constituées de particules fines dont la taille est inférieure à $2 \mu\text{m}$. L'argile est un mélange de minéraux argileux et d'impuretés cristallines sous forme de débris rocheux [8].

I-1-3- Structures des argiles

Les cristaux d'argile sont constitués essentiellement des phyllo silicates, ce sont des minéraux lamellaires constitués par un empilement de feuillets bidimensionnels silicatés [9.10].

Les feuillets qui constituent le motif de base de ces matériaux, sont formés par un agencement d'une ou de deux couches de tétraèdres siliceux et d'une couche d'octaèdres alumineux, ferrifère ou magnésium reliées par les atomes d'oxygènes (O) et d'hydroxyle (OH) [9.10]. Les feuillets tétraédriques comprennent des cations de petite taille : Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+} . Le silicium est situé au centre du tétraèdre. Chaque tétraèdre est constitué d'un cation, coordonné à quatre atomes d'oxygène, et lié aux tétraèdres adjacents en partageant trois coins, constituant un arrangement de maille hexagonale. Le quatrième coin tétraédrique pointe dans une direction normale au feuillet et son oxygène fait partie du feuillet octaédrique [9.10].

Les feuillets octaédriques comprennent des cations d' Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} et des oxygènes aux 8 coins. Les octaèdres individuels sont liés latéralement aux octaèdres voisins et verticalement aux tétraèdres en partageant les oxygènes [9.10].

Lorsque les feuillets tétraédriques et octaédriques sont réunis en des couches, ces couches peuvent être électriquement neutres ou chargées négativement. Elles sont compensées par des cations qui s'installent dans l'espace inter foliaire [9.10]. Cet espace inter foliaire peut être vide, comme il peut renfermer des cations alcalins ou alcalino-terreux et des molécules d'eau. Ces cations peuvent quitter facilement l'espace inter foliaire et être remplacés par d'autres cations [9.10].

La figure I.1 (a, b et c) illustre une schématisation des couches tétraédrique de silice, octaédrique et la structure cristalline d'une argile.

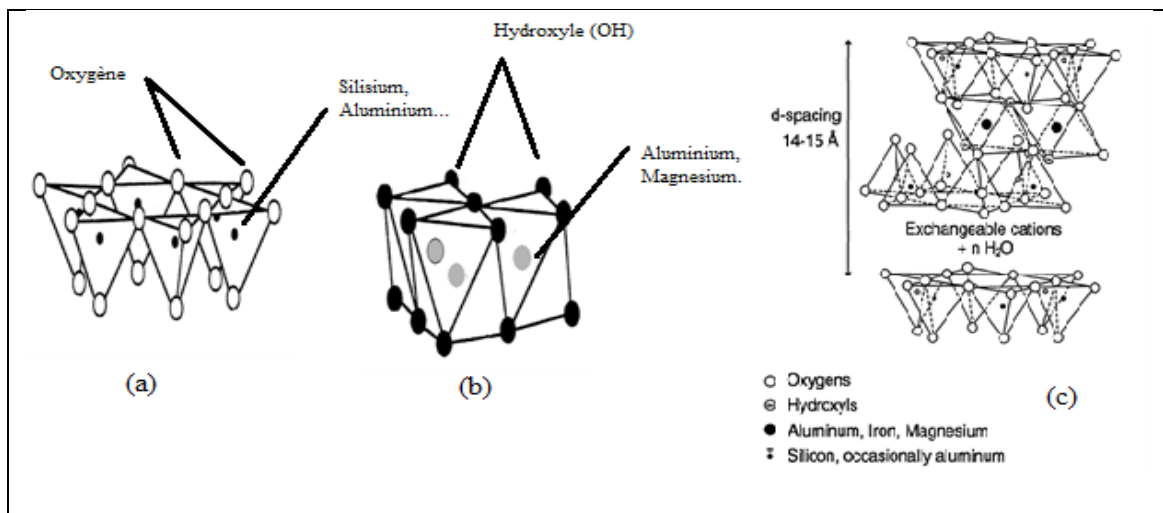


Figure I.1 : a) Couche tétraédrique de silice. b) Couche octaédrique d'alumine. c) Structure cristalline [10].

I-1-4- Classifications des argiles

Les minéraux argileux sont classés selon trois critères à savoir le type de feuillets 2/1 ou 1/1, la charge globale du feuillet et la nature des cations inter foliaires [11].

Il existe différentes classifications des argiles. La plus classique est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet. On distingue ainsi les trois groupes suivant :

- **Minéraux à 7 Å** : Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T/O ou de type 1/1. Son épaisseur est d'environ 7 Å [11] ;
- **Minéraux à 10 Å** : Le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T/O/T ou de type 2/1. Son épaisseur est d'environ 10 Å [11];
- **Minéraux à 14 Å** : Le feuillet est constitué de l'alternance de feuillets T/O/T et de couches octaédriques inter foliaire [11].

A ce niveau de classification s'ajoute deux autres niveaux : le sous groupe et l'espèce (famille).

Les unités des groupes précédents se subdivisent chacune en deux sous groupes suivant que les couches octaédriques sont di- ou tri-octaédriques [12].

Les espèces : troisième niveau de classification, n'est pas défini par les mêmes propriétés car dans certains cas c'est l'empilement des feuillets qui a été retenu, dans d'autres c'est la nature des cations des plans octaédrique. Le maintien des noms d'espèces en fonction de l'un ou l'autre de ces deux critères est justifié par des raisons très pragmatiques [12].

Le tableau I.1 illustre une classification de certains minéraux argileux.

Tableau I.1 : Classification des minéraux argileux [13.14].

| Type | Groupe | Sous groupe | Minéraux | Formule chimique |
|---------------|----------------|--------------|-----------------------------|--|
| 1 :1 7 Å | dioctaédrique | Kaolinite | Kaolinite, dickite, nacrite | $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ |
| | | | Halloysite | $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 4H_2O$ |
| | trioctaédrique | Serpentinite | Antigorite, Chrysotile.. | $Mg_3Si_2O_3(OH)_4$ |
| 2:1 10 Å | dioctaédrique | Smectite | Montmorillonite... | $(Al_{1,67}Mg_{0,33})Si_4O_{10}(OH)_2$ |
| | trioctaédrique | | Saponite... | $Mg_3(Si_{3,67}Al_{0,33})O_{10}(OH)_2$ |
| | dioctaédrique | Mica | Muscovite, Paragonite... | $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$ |
| | trioctaédrique | | Phlogopite, Biotite... | $KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$ |
| 2:1:1 14 Å | dioctaédrique | Chlorite | Sudoite | $Al_4(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$ |
| | trioctaédrique | | Penninite, Prochlorite | $(Mg,Fe...)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$ |

I-2- Les Kaolins

I-2-1- Définition

Le nom kaolin est dérivé du terme chinois "Koaling" qui signifie «haute colline», Cette matière première entrant dans la fabrication des porcelaines chinoises était extraite d'une colline proche de King Teching à partir de 210 avant Jésus-Christ [15].

Le kaolin est une argile relativement pure. Ces particules sont généralement de forme feuilletée. C'est l'une des matières premières les plus répandues dans le monde. Cette argile est constituée principalement de la kaolinite, résultant de la décomposition du granite et du feldspath par hydrolyse sous un climat chaud et humide ou par une action hydrothermale. Les autres minéraux sont : dickite, nacrite et halloysite [16.17]. La kaolinite se présente normalement sous forme de cristaux (Figure I.2) d'une taille allant d'une fraction de micron à plusieurs centaines de microns.

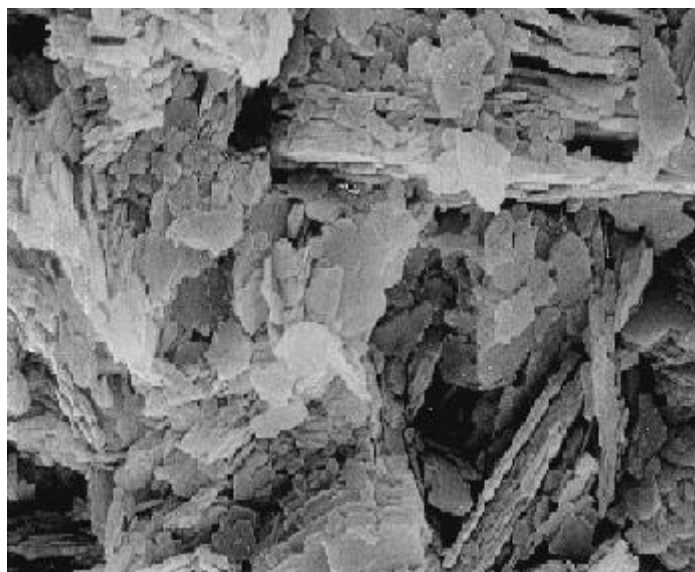


Figure I.2 : Cristaux de kaolinite vus au microscope électronique à balayage [6].

Les kaolins sont également des matières premières blanches. Leur constituant essentiel étant l'argile blanche à grains fins, ils se prêtent à l'enrichissement qui les rend idéals pour un assortiment d'applications industrielles.

Les gisements de kaolin peuvent être classés en deux types, primaires (résiduel) et secondaires (sédimentaire) [18].

I-2-2- Composition du kaolin

La kaolinite est un silicate d'aluminium de composition ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Structurellement, la kaolinite est constituée de feuilles d'alumine octaédriques et de silice tétraédrique, ce qui correspond aux teneurs massiques récapitulées dans le tableau I.2 suivant :

Tableau I.2 : Teneurs massiques des oxydes composant le Kaolin [18].

| Oxyde | Teneur (% massique) |
|-------------------------|---------------------|
| Al_2O_3 | 39.50 |
| SiO_2 | 46.55 |
| H_2O | 13.95 |

I-2-3- Propriétés du kaolin

Certaines propriétés des kaolins sont résumées dans le tableau I.3

Tableau I.3 : Propriétés générales du kaolin [19].

| Propriété | Valeur |
|---|----------------------------------|
| Masse volumique (g/cm ³) | 2.60 - 2.63 |
| Dureté (mohs) | 2 - 2.5 |
| Coefficient de dilatation linéaire | (20-700°) 5 - 7.10 ⁻³ |
| Conductivité thermique (cal/cm s °C) | 4 - 5.10 ⁻³ |
| Température d'utilisation (°C) | 1400 |
| Résistance de flexion (kg/cm ²) | 50 - 210 |

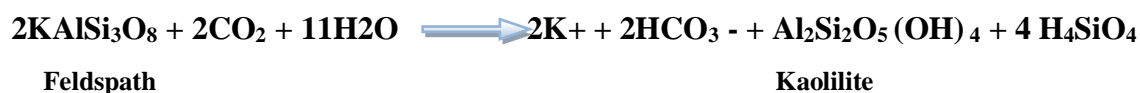
I-2-4- Formation de kaolin

I-2-4-1- Les kaolins primaires ou kaolins résiduels

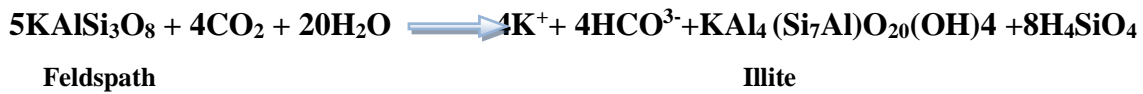
La plupart des argiles et minéraux argileux proviennent de la transformation de silicates primaires ou de roches volcaniques, sous l'influence de processus physiques et chimiques impliquant l'eau de la surface de l'écorce terrestre [20].

Certaines substances, une fois dissoutes dans l'eau, augmentent le caractère acide de celle-ci, accélérant ainsi la décomposition des minéraux primaires. Helgeson et Mackenzie [5], ont montré que la dissolution du gaz carbonique atmosphérique peut, lors de l'hydrolyse tripler les vitesses de décomposition des feldspaths potassiques et de formation de la kaolinite.

Autrement, Si le drainage de ces roches par l'eau est abondant, ce processus géochimique naturel conduit directement à la formation de la kaolinite suivant la réaction :



En revanche, si le drainage est faible, le transfert de potassium est incomplet et il se forme de l'illite selon la réaction:



Lors d'un drainage ultérieur, cette illite peut poursuivre son hydrolyse, en expulsant le potassium, pour conduire alors à la kaolinite :



Des réactions analogues permettent de décrire l'hydrolyse de l'albite (feldspath sodique) directement en kaolinite ou en un composé intermédiaire (montmorillonite sodique) [20].

D'après Helgeson et Mackenzie [5], dans les mêmes conditions d'hydrolyse, la formation de kaolinite est dix fois plus rapide à partir de l'albite que des feldspaths potassiques [20].

I-2-4-2- Kaolins secondaires ou sédimentaires

Les kaolins primaires peuvent être entraînés par les eaux de ruissellement. Ils se mélangent alors au sable et se déposent dans des fosses. Par conséquent, ils constituent des kaolins dits secondaires ou sédimentaires [20]. Il existe deux zones possibles pour la formation de ces dépôts :

a) En eau douce

Si les argiles, généralement chargées négativement dans l'eau "pure", ne rencontrent pas de cations susceptibles de favoriser leur floculation, elles restent longtemps en suspension. Il s'ensuit un tri sélectif des éléments indésirables en fonction de leur aptitude à sédimenter. Les particules les plus lourdes, qui se déposent en premier, sont ainsi recouvertes par un kaolin riche en kaolinite. Les micas, formés de feuillets qui flottent également longtemps sur l'eau, se retrouvent alors généralement mélangés à la kaolinite [20].

b) En eau de mer

Au contact de l'eau de mer, riche en cations, près de 90% des argiles chargées négativement floculent. Ces dépôts, qui forment alors des bouchons constitués de kaolinite

impure, sont communément appelés argiles kaoliniques (mélange avec d'autres éléments tels que micas, quartz, pyrites, etc.) [20].

I-2-5- Structure de kaolin

La kaolinite est un minéral argileux de type 1:1 avec une équidistance d'environ 7\AA , et elle est de type di octaédrique (un site octaédrique sur trois restes vacants). Les trois sites de la couche octaédrique sont donc remplis par deux cations d'aluminium et le troisième site est incomplet [21].

Les feuillets élémentaires de la kaolinite sont formés de l'empilement d'une couche de tétraèdres de silice et d'une couche d'octaèdres d'hydroxyde d'aluminium. Les faces basales sont donc de deux types, constituées, soit d'ions oxygène organisés en réseau hexagonal, soit d'OH en assemblage compact.

En l'absence de défauts, la famille cristalline élémentaire, qui contient deux motifs, appartient au système triclinique, ses paramètres cristallographiques de la maille d'après l'affinement structural de Bish et Von Dreele sont les suivants :

$$a \approx 5,16\text{\AA}, b \approx 8,95\text{\AA}, c \approx 7,41\text{\AA}, \alpha \approx 91,7^\circ, \beta \approx 104,9^\circ \text{ et } \gamma \approx 89,9^\circ [17].$$

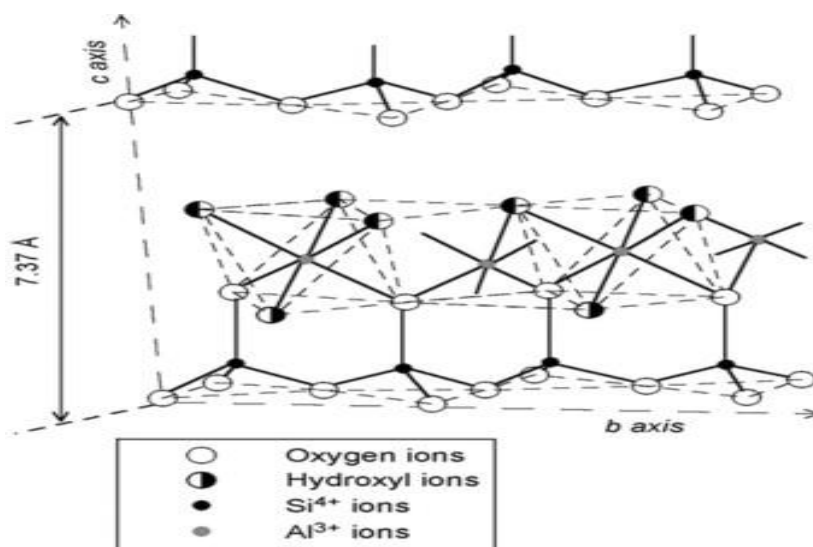


Figure I.3 : Représentation schématique de la structure cristalline de la kaolinite [23].

I-2-6- Domaine d'utilisation des kaolins

Les kaolins sont largement utilisés dans de nombreuses facettes de notre société et parmi les industries qui utilisent les kaolins sont les industries papetière, l'industrie céramique et le domaine pharmaceutique [10].

- Le kaolin est le plus utilisé pour le couchage du papier, cette utilisation continue de croître à un rythme estimé entre 2% et 3% par an.
- Une très large utilisation du kaolin est en céramique, (en particulier en blanc articles, articles sanitaires, isolants, poterie et réfractaires), cette utilisation continue de croître surtout sur les marchés des carreaux et des sanitaires.
- Un autre domaine d'utilisation du kaolin qui a connu une croissance rapide au cours des 10 dernières années est comme matière première dans la production de fibre de verre, fournit à la fois de la silice et l'alumine, qui sont nécessaires dans la formulation de fibre de verre. Les kaolins qui sont utilisés doivent avoir une teneur relativement faible en fer et en titane. La raison de la l'utilisation accrue de la fibre de verre est due à l'utilisation restreinte de l'amiante en raison de considérations de santé [10].

Le tableau I.5 ci-dessous résume les domaines les plus importants du kaolin :

Tableau I.5 : Applications traditionnelles des kaolins [10].

| | | |
|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Revêtement papier | Remplissage plastique | Les adhésifs |
| Remplissage de papier | Prolongateur d'encre | Emaux |
| Prolongateur de peinture | Catalyseurs de craquage | Médicaments |
| Ingrédient céramique | Fibre de verre | Crayons de couleur |
| Remplissage en caoutchouc | Ciment | Des tamis moléculaires |

CHAPITRE II : GENERALITES ET PROPRIETES DES CERAMIQUES

II-1- Introduction

Dans ce chapitre la notion de céramique est définie. Leur élaboration, leurs différents domaines d'application, leurs propriétés, ainsi que les transformations thermiques de kaolin sont brièvement décrits.

II-2- Matières premières et élaboration des céramiques

II-2-1- Définition des céramiques

Le mot céramique vient du grec **Keramikos** et signifie argile ou terre à potier. Pendant des milliers d'années, l'argile a servi de matière première pour la fabrication de poteries, de briques et de tuile. On peut affirmer que la technologie céramique est une des plus anciennes si ce n'est la plus ancienne des industries de transformation de l'homme. Il est plus que probable que les premières céramiques sont apparues dès que l'homme a su maîtriser le feu "c'est pourquoi il lui confère le nom de l'art de feu". Il désigne l'ensemble des objets fabriqués en terre qui ont subi une transformation physico-chimique irréversible au cours d'une cuisson à température plus ou moins élevée [25].

II-2-2- Les matières premières

II-2-2-1- Les matières premières naturelles

❖ Les matières plastiques

● Argiles

Les argiles sont la matière première fondamentale utilisée dans le domaine des céramiques. Elles possèdent la propriété de plasticité, cette dernière est déterminée par le contact intime de l'eau et de l'argile. Elle permet la mise en forme d'objets par simple déformation puis, après séchage, de donner à ces objets une certaine cohésion leur permettant d'être manipulés et, éventuellement, travaillés. Ces matières premières sont dites plastiques [25].

● kaolins

Le kaolin est l'une des matières premières les plus importantes pour les applications céramiques. Elle se présente comme une matière blanche, onctueuse au toucher, absorbant l'eau mise à son contact avec laquelle elle peut former une pâte plastique. Le kaolin est un matériau naturel minéral formé essentiellement de kaolinite. Il perd de manière réversible sa plasticité en séchant et prend alors l'aspect d'une masse compacte s'effritant facilement. Les

kaolins ont été formés par la décomposition et la transformation très lente sous l'action des éléments climatiques de feldspaths ou de roches contenant des feldspaths [25].

❖ **Les matières dégraissantes**

a) **Réfractaires**

• **Silice**

La silice (SiO_2) est le composé le plus pur et à la fois le plus abondant et répandu dans la croûte terrestre. Le quartz est la forme de silice la plus courante, c'est un constituant important des roches ignées telles que le granit et des roches métamorphiques. Il est un constituant de base des matériaux naturels transformés par cuisson pour donner les matériaux réfractaires. Les autres formes de la silice naturelles sont la cristobalite et la tridymite [26].

• **Chamotte**

Les chamottes sont des argiles calcinées et broyées ayant généralement peu de dilatation. La présence de chamotte diminue le retrait des pièces au séchage et à la cuisson. Si le chamottage a été réalisé à des températures inférieures à celle de la cuisson des pièces dans laquelle elles sont incorporées, elles prendront un peu de retrait lors de leurs cuissons. En revanche, si elles ont été réalisées à des températures supérieures ou égales à celle de la cuisson des pièces, les chamottes seront parfaitement inertes et n'auront alors strictement qu'un rôle de dégraissant [25]. Les chamottes sont utilisées pour la fabrication de briques réfractaires [25].

b) **Fondants**

• **Feldspaths**

Le feldspath est un aluminosilicate de sodium (Na), de potassium (K) ou de calcium (Ca). Son importance dans la céramique est due au fait qu'il est une source d'alcalins peu coûteuse et insoluble dans l'eau. Il existe de nombreux feldspaths, dont les principaux sont l'orthose ou le microcline potassique ($6\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3\text{K}_2\text{O}$), l'albite sodique ($6\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3\text{Na}_2\text{O}$) et l'anorthite calcique ($6\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3\text{CaO}$). Ces minéraux sont largement abondants dans la nature [26].

Les feldspaths sont des roches utilisées pour leurs propriétés fondantes. Ils sont des constituants majeurs des roches ignées (le granit par exemple contient 60% de feldspath). Ces minéraux sont utilisés comme fondant qui forme une phase vitreuse dans le corps en céramique [26].

- **Talcs**

Le talc est un minéral principalement blanc ou gris poudre. Il est homogène, non abrasif et insoluble dans l'eau ou l'alcool. En raison de sa nature douce, il est défini comme le silicate de magnésium hydraté sous sa forme pure [27].

Le talc et la stéatite qui n'est que le talc à l'état terreux, sont introduits quelquefois, mais en petite quantité, dans les pâtes céramiques, leur plasticité est faible mais leur broyage est facile [28].

II-2-2-2- Matières premières synthétiques

Les céramiques sont réalisées à partir de matières premières préalablement synthétisées par la technologie moderne [29]. Les plus courantes telles que l'alumine Al_2O_3 (synthétisé à partir de la bauxite par le procédé de Bayer) qui joue un rôle de stabilisateur en augmentant la résistance aux attaques chimiques et à la rayure des glaçures. Le carbure de silicium SiC (obtenu à partir du quartz pur et de coke), l'oxyde de titane TiO_2 (produit à partir de l'ilménite naturelle FeTiO_3) ; l'oxyde de fer $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (produit à partir de la décomposition thermique des sulfates hydratés naturels) qui joue un rôle de amphotère ; la zirconne ZrO_2 (obtenu à partir de zircon ZrSiO_4) ; l'oxyde de zinc ZnO (produit à partir la calcination de sulfate de zinc naturel) qui tient le rôle de fondant et de amphotère ; l'oxyde de magnésium MgO et l'oxyde de baryum BaO , ces derniers tiennent le rôle de fondants [30].

II-2-3- Elaboration des céramiques

L'élaboration est spécifique à chacune des familles de matériaux céramiques, la plupart des céramiques modernes sont préparées par frittage soit par fusion, à relativement haute température, ou soit par prise à la température ambiante, pour les liants minéraux [31].

Le procédé d'élaboration consiste en un traitement thermique réalisé à une température bien inférieure à la température de fusion du matériau. Ce traitement est appliqué à des objets formés de poudre. Pendant le frittage, les particules (les grains de la poudre) se soudent les unes aux autres en éliminant la plupart des pores ou cavités industrielles, suite à l'action de différents mécanismes de transport de matière et en conséquence le corps se contracte [31].

Les caractéristiques des matières premières influencent directement le procédé d'élaboration et les propriétés du produit final, la taille et la distribution de taille des particules influencent la façon dont elles s'empilent et en conséquence l'évolution de la microstructure pendant la mise en forme et le frittage.

Pour fritter une pièce, il est nécessaire de disposer d'une poudre avec de bonnes caractéristiques c'est-à-dire :

- Une pureté chimique connue et contrôlée ;
- Une réactivité élevée (particules de dimensions microniques et de surfaces spécifiques d'environ 5 à 15 m² g⁻¹) ;
- Des homogénéités (ou inhomogénéités) physique et chimique connues et contrôlées [25].

Le tableau II.1 illustre les étapes d'élaboration des céramiques.

Tableau II.1 : Ordre des étapes selon lesquelles sont élaborées les céramiques [31]

| Famille de céramiques | 1ère étape | 2ème étape | 3ème étape |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|
| Céramiques traditionnelles ou techniques | Poudre | Mise en forme | Traitement thermique |
| Verres | Poudre | Traitement thermique | Mise en forme |
| Liants minéraux | Traitement thermique | Poudre | Mise en forme |

II-2-3-1- Préparation des poudres

Tout commence par la poudre qui se doit d'être sélectionnée suivant des critères précis et de subir des prétraitements facilitant sa mise en forme, avec l'adjonction d'adjuvants, souvent organiques [8]. La pluparts des poudres sont soumises a une étape de broyage afin de casser les agglomérats, que celle-ci aient été synthétisées par voie solide [32].

II-2-3-2- Traitement thermique

Les poudres obtenues sont densifiées par un traitement thermique, appelé calcination, à l'état solide. Cette réaction chimique appelés chamottage. Elle peut avoir lieu sous différentes atmosphères. La chamotte (nom donné au matériau après chamottage) est une poudre

constituée de gros agglomérats plus ou moins soudés entre eux par un début de frittage. Le premier traitement thermique est réalisé vers 80°C avec une pente de montée en température de 2 °C /min [32].

II-2-3-3- Second broyage

Réduction de la taille des particules par broyage, est généralement relatif à des grandes entités qui peuvent atteindre des tailles de plusieurs dizaines de centimètres et les réduit à des dimensions de l'ordre du millimètre ou de quelques centaines de microns, éliminer une petite population d'agglomérats, homogénéiser la poudre qui n'a généralement pas réagi uniformément lors du chamottage, et réduire la taille des particules afin d'augmenter la réactivité de la poudre [25].

II-2-3-4- Mise en forme

L'étape de mise en forme consiste à donner au matériau sa forme définitive. Elle est un point central dans la fabrication des céramiques, car les matériaux céramiques ont inévitablement une forme spécifique, que ce soit une feuille, une couche mince, une tasse ou une bille [25].

On peut classer les principales technologies de mise en forme des céramiques en deux grandes catégories :

- Le pressage de poudres sèches ;
- La mise en forme par voie humide ou semi-humide de suspensions et pâtes.

Le choix de la méthode de mise en forme d'un objet formé de grains de poudres liés ensemble et présentant une forme et une microstructure particulières dépend de nombreux facteurs comme les propriétés requises, la forme, la taille, les tolérances dimensionnelles, le fini de surface, ainsi que le coût et la productivité [25].

Les céramiques sont mises en forme par pressage uni axial. Il permet d'assurer la tenue mécanique de la pièce. La pièce obtenue est dite « pièce crue » par opposition à la pièce frittée qui a subi un cycle thermique à haute température.

La pression appliquée est déterminée pour obtenir une densité en cru optimale. La valeur 1000 kg/cm^2 est la pression souvent retenue de la poudre du poids de 1g. Plus la densité en cru est importante, plus la densité après frittage est importante [25].

Les frottements de la poudre contre les parois du moule se traduisent par un flux hétérogène, Ces problèmes peuvent être évités application par d'une pression progressive et des temps de pressage suffisamment longs pour permettre une bonne transmission des contraintes. On ajoute à la poudre pressée des gouttes d'eau bi-distillée pour faciliter le compactage, pour avoir une bonne distribution des grains (augmenter la densité et la surface de contact des grains) et parfois pour facilite le glissement des grains entre eux. Les échantillons prennent alors des formes d'une géométrie cylindrique: pastilles ou tores, ce qui permet de s'affranchir de l'étape d'usinage [32].

II-2-3-5- Le frittage

Quand l'un des composants reste à l'état solide lors de la cuisson, le procédé est appelé frittage. Ce dernier est un procédé thermique qui consiste à chauffer une poudre a haute température sans atteindre la fusion. Sous l'effet de la chaleur, les grains sont soudés, ce qui forme la cohésion de la pièce [32]. Ce traitement thermique a pour but de terminer la formation de la phase cristalline et de permettre la densification de la céramique. Il s'agit de faire croître des liaisons entre les grains, ce qui se traduit par une consolidation et une diminution du volume [32].

La première étape du frittage correspond à la formation de ponts entre les grains. A l'issue de cette étape, la pièce présente une certaine tenue mécanique et l'ensemble des grains forment un squelette traversé de pores ouverts vers l'extérieur. Au cours de l'étape suivante, les grains grossissent et les porosités ouvertes sont éliminées. Les mécanismes de densification mis en jeu au cours de cette étape sont nombreux et complexes. Ils nécessitent des déplacements de matière qui se font soit par diffusion en volume soit par diffusion en surface des grains. Enfin, lors de la dernière étape, les joints de grains se déplacent et le volume des grains augmente [32].

La notion de frittage, est étroitement liée a celle de microstructure du matériau, un premier paramètre pris en compte dans le terme microstructure est la taille des grains qu'il faut prendre en considération: dans le cas de frittage d'un matériau cristallin, les rayons de courbure a l'interface solide-vapeur ainsi qu'aux joints de grains (lorsqu'ils existent) sont la

source des énergies motrices ayant pour conséquence la densification, aussi il est souvent plus avantageux de réaliser la densification avant la cristallisation [25].

Il est bien connu dans les technologies céramiques que toute anisotropie telle par exemple un gradient de température pendant le frittage ou l'existence d'un gradient de tensions mécanique, est susceptible d'avoir pour conséquence une anisotropie de la céramique réalisée.

Le cycle de frittage peut être soit relativement lent comme dans le cas de céramiques massives, soit très rapide, réalisé dans un four flash permettant d'atteindre la température de traitement en quelques secondes [25].

II-3- Transformation thermique du kaolin

Pendant le traitement thermique, la kaolinite subit de nombreuses transformations. Ces dernières sont observables sur une courbe d'analyse thermique différentielle. Elles sont relativement bien connues et sont citées comme suit :

II-3-1- La déshydratation

L'eau physiquement adsorbée à la surface des particules est dégagée, à pression atmosphérique, à des températures généralement vers à 100°C, tandis que l'eau résiduelle plus fortement liée peut être libérée à de plus hautes températures comprises entre 100 et 300°C. Le départ de l'eau libre ne modifie pas la structure cristalline de l'argile [33].

II-3-2- La déshydroxylation

C'est l'élimination de l'eau de cristallisation accompagnée d'une disparition progressive de la cristallinité. Le produit obtenu forme des phases quasi-stables mais qui gardant un certain degré d'organisation. Cette réaction peut être décomposée en deux étapes principales : la dissociation des groupements OH en O^{2-} et H^+ qui se combinent pour former des molécules d'eau (déshydroxylation au sens strict) puis élimination de l'eau du réseau cristallin.

Ce phénomène est caractérisé par un pic endothermique observé entre 400°C et 600°C. Suite à ce départ il résulte alors la formation d'une phase amorphe appelée métakaolinite selon la réaction : [33.40]



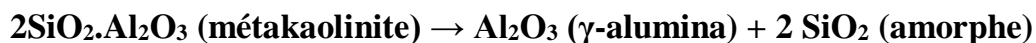
II-3-3- La recristallisation

La transformation de la métakaolinite associée au pic exothermique observé au voisinage de 950-980°C a fait l'objet de beaucoup de recherches quant à l'identification des mécanismes impliqués qu'à la détermination de la composition chimique de la phase cristalline formée. Dans l'étude avancée dans ce pic est observé à 1000°C. Dans ce domaine de température, l'état du matériau est quasi-amorphe, d'où la difficulté d'interprétations des résultats. Cependant les descriptions les plus fréquentes sont les suivantes : [41]

- 950°C → 980°C



Ou

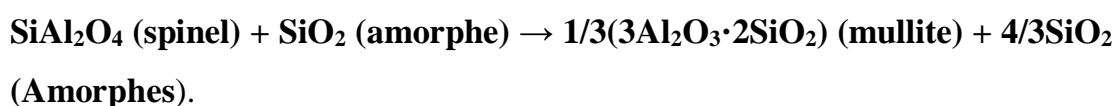


Trois phénomènes différents ont été ainsi proposés pour expliquer l'origine du phénomène exothermique : [40]

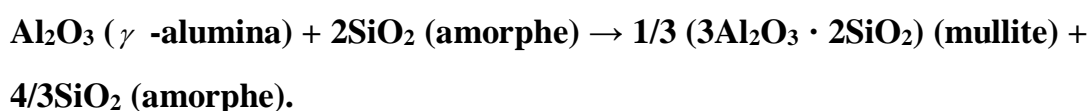
1. Formation d'une phase de structure spinelle et /ou nucléation de mullite ;
2. Evolution de l'aluminium vers la coordinence VI la plus stable ;
3. Dissolution de silice amorphe

La Kaolinite bien ordonnée, conduirait à une ségrégation entre des zones riches en silice et des zones riches en alumine. Ces dernières seraient à l'origine d'une phase intermédiaire de structure spinelle. Les matériaux très désordonnés conduiraient eux directement à la formation de mullite. Des vitesses de traitement thermique très faibles favoriseraient aussi la ségrégation au sein du métakaolin et la formation de la phase intermédiaire de structure spinelle. En revanche lors d'une montée en température rapide, la ségrégation restant très limitée, la mullite pourrait se former directement. Selon ce schéma, le rapport entre les quantités de phase de structure spinelle et de mullite formées pendant le phénomène exothermique dépendrait de l'importance de la ségrégation au sein du métakaolin [40].

- T > 1100 °C



Ou bien



Le faible pic exothermique observé vers 1200-1250°C est généralement attribué à la formation de mullite dite secondaire. La formation de cristobalite est responsable d'un troisième pic exothermique détecté vers 1350°C.

- $T > 1200 \text{ °C}$

La silice amorphe se transforme graduellement en cristobalite.

- $T > 1500 \text{ °C}$

La cristobalite se transforme encore en silice amorphe. Finalement le matériau est composé d'un mélange de phases amorphes et de phases cristallines (mullite et cristobalite).

II-4- Propriétés des céramiques

Les principales propriétés physiques, thermiques et chimiques des céramiques sont dominées par la nature des liaisons interatomiques et leur structure cristalline. Les liaisons interatomiques des céramiques sont essentiellement des liaisons fortes, iono-covalentes. Dans certains matériaux (silicates, graphite), il existe cependant des liaisons faibles de type van der Waals. Toutefois, une autre caractéristique, leur microstructure, joue également un rôle très important sur les propriétés des céramiques, en particulier les propriétés mécaniques [31].

II-4-1- Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des céramiques dépendent dans une large mesure, des matières premières employées. Les procédés de leur fabrication fixent aussi les microstructures finales et déterminent la répartition des différentes phases présentes. On déduit aisément que les céramiques préparées ainsi sont des matériaux hétérogènes constitués de phases solides distinctes, phase cristallines et phases vitreuses ou amorphes, et qu'elles renferment des pores plus ou moins nombreux, selon les conditions de frittage (temps et température). Ces pores qui représentent des discontinuités dans le matériau, sont le siège de concentration de contraintes et constituent l'une des causes principales de la fragilité des céramiques [37].

Le frittage sous pression-soit uniaxial, soit hydrostatique permet de diminuer le taux de porosité en accélérant la vitesse de diffusion et en conduisant ainsi à la fabrication de pièces qui présentent de meilleures propriétés mécaniques. Les propriétés mécaniques de céramique (résistance mécanique et ténacité) sont ainsi nettement améliorées [37].

- **L'élasticité**

Le module d'élasticité (module de Young) traduit la rigidité d'un matériau : la propriété qu'à un matériau à se déformer de façon élastique réversible sous l'action d'une contrainte. Sa formule est donnée par la relation (1) :

$$E = \sigma / \varepsilon, (E = \text{contrainte} / \text{déformation}) \quad (1)$$

- σ est la contrainte (en unité de pression).
- E est le module de Young (en unité de pression).
- ε est l'allongement relatif, ou déformation (adimensionnel) ; ($\varepsilon = \ell - \ell_0 / \ell_0$).

Le module de Young est la contrainte mécanique qui engendrerait un allongement de 100 % de la longueur initiale d'un matériau (il doublerait donc de longueur), dépend de l'intensité des liaisons atomiques [32].

II-4-2- propriétés physiques

- **Densités**

Une des caractéristiques principales des céramiques, comme classe de matériaux, est qu'elles sont moins denses. Par conséquent, elles sont très attractives quand les propriétés spécifiques ou ramenées à l'unité de masse sont décisives [25].

Le facteur principal déterminant la densité ou la masse volumique est la masse des atomes dont est constitué le solide. Il est évident que plus la masse atomique est élevée plus dense est le solide. Le second facteur est la nature des liaisons et leur caractère plus ou moins directionnel [25]. Les céramiques covalentes ont des structures plus ouvertes et ont tendance à être moins denses que les céramiques ioniques dont les empilements compacts d'anions conduisent à des densités plus élevée [25]. Le taux de porosité dans la microstructure de frittage influence la densité des matériaux céramiques monophasés [25].

- La densité cristallographique ou densité théorique qui correspond à celle du monocristal et qui peut se calculer à partir de la composition chimique et de la structure cristalline.

- La densité volumique qui inclut la porosité, les défauts du réseau et les phases secondaires, ces méthodes de mesure sont basées sur l'immersion dans un liquide (poussée d'Archimède).
- La densité squelettique qui est celle de la céramique en excluant la porosité ouverte.

II-4-3- Propriétés chimiques

La passivité chimique des céramiques, par rapport aux agents atmosphérique telle que l'eau est l'air et aux acides et bases faibles est bien connue [33].

Les liaisons ioniques et covalentes étant des liaisons fortes et stables, les températures de fusion des céramiques sont donc généralement très élevées. C'est pour cette raison que certaines sont utilisées comme matériaux réfractaires ou comme conteneurs à hautes températures. Du fait également de la stabilité des liaisons chimiques les céramiques possèdent une grande inertie chimique et sont donc peu sujettes à la dégradation par corrosion [33].

La vitesse de corrosion de céramiques est fonction de la perméabilité de la céramique et donc du volume de la répartition des pores qu'elle renferme [33].

A température ambiante ou modérée la passivité chimique des céramiques se maintient par rapport aux acides et bases fortes, A haute température la réactivité des céramiques augmente, au point de devenir la cause principale de la destruction des réfractaires, au contact des verres, métaux et laitiers fondus.

Les céramiques à base d'oxyde sont inertes dans l'oxygène à toute température, et les céramiques à base de non-oxyde ne le sont pas [33].

II-5- Déchets plastiques et leur valorisation dans le domaine des céramiques

II-5-1- Définition et classification des déchets plastiques

Les déchets plastiques proviennent des résidus de processus de production, de transformation et de consommation des matériaux plastiques. Il existe donc plusieurs types de déchets plastiques [37].

II-5-1-1- Les déchets plastiques industriels

Ces déchets sont constitués de tous les déchets issus des procédés de production de résine (trouvés principalement sur les sites pétrochimiques) et de transformation des résines en objets. Les déchets de production proviennent des arrêts des réacteurs de polymérisation, de la désinfection des réacteurs et des lots déclassés [37].

Ils ont la particularité d'un faible degré de pollution, voire inexistant. On retrouve, en très grande majorité, les polymères de grande diffusion (PE, PP, PS et PVC). Quant aux déchets de transformation, ils proviennent de toutes les opérations de plasturgie, qui permettent la production de produits finis (extrusion, injection, soufflage, polissage, etc.). Plus précisément, nous trouvons les carottes, lisières et bordures de ces opérations de thermoformage, les pièces défectueuses, ou même les chutes du démarrage et de l'arrêt de la machine [37].

II-5-1-2- Les déchets plastiques de post-consommation

C'est l'ensemble des déchets issus de la consommation industrielle ou des particuliers. On distingue :

- **Les déchets ménagers** : comme les récipients alimentaires, bouteilles de boissons gazeuses, sacs d'emballage, etc. [38];
- **Les déchets agricoles** : tels que les films, sacs d'alimentation, fûts et bidons de produits phytosanitaires, etc. [38];
- **Les déchets électriques et électroniques** : comme les appareils électroménagers, ordinateurs, câbles en tout genre, etc. [38];
- **Les déchets du bâtiment et des travaux publics** : tels que les revêtements de sols, fils, câble, mousses d'isolation, tuyaux, etc [39];
- **Les déchets commerciaux ou de distributions** : comme les emballages industriels et commerciaux, les fûts, bidons, sacs, etc [37].

II-5-2- Valorisation des déchets plastiques

La limitation, la collecte, le tri, le recyclage et la valorisation des déchets permettent l'atténuation du réchauffement climatique, la protection de l'environnement et des écosystèmes, la préservation de la santé ou encore l'économie de matières premières ou d'énergie [37].

En ce qui suit la technique primordiale dans la valorisation des déchets plastiques, qui est le recyclage et ses différentes étapes sont illustrées [37].

II-5-2-1- Répartition des plastiques

Les déchets de matières plastiques sont classés par catégorie, et par secteurs d'application comme suit :

- ❖ Déchets industriels ;
- ❖ Déchets de distribution (transport, emballage) ;
- ❖ Déchets des consommateurs finaux.

II-5-2-2- Collecte, tri et recyclage des plastiques

Nous allons examiner les étapes de valorisation des déchets plastique.

A- La collecte

Ensembles des opérations qui consistent à enlever les déchets chez le producteur ou aux point de regroupement et à les acheminer vers un centre de tri, de traitement ou un centre d'enfouissement technique C.E.T [40].

B- Le tri

Le tri permet de séparer, nettoyer et préparer les matières destinées à être revalorisées. En fonction de leur nature, Quelle que soit l'origine du plastique collecté (bouteilles, tubes, châssis de fenêtres...), Le tri permet de séparer les différents matériaux : papier, carton, journaux/magazines, briques alimentaires, plastique, aluminium, acier... [40].

Les plastiques triés seront directement traités sur le site de l'entreprise de recyclage chargée de les réceptionner, ou acheminés vers un centre de traitement spécialisé. Les familles de matières étant nombreuses, et les procédés de tri très variables selon les types de produits [40].

C- Recyclage des plastiques

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets (industriels ou ménagers) de produits arrivés en fin de vie, qui permet de réintroduire certains de leurs matériaux dans la production de nouveaux produits, la création de nouvelles matières, ou le renouvellement des matières initiales, par le biais du traitement des déchets [40].

Le recyclage du plastique est considéré comme l'une des meilleures voies de prise en compte du développement durable. Il est devenu, à cet effet, une priorité en termes de gestion du développement durable.

Jusqu'à récemment, la plupart des objets plastiques en fin de vie étaient mis en décharge. La tendance, aujourd'hui, est de valoriser au maximum ces plastiques usagés (non biodégradables), soit en les recyclant, soit, si cela n'est pas possible pour des raisons techniques ou économiques, en les brûlant dans des incinérateurs pour produire de l'énergie [40].

II-5-2-3- Valorisation des déchets plastiques

La valorisation des déchets est toutes les opérations de réutilisation, de recyclage ou de compostage des déchets, prend une ampleur de plus en plus considérable, du fait de l'évolution des réglementations sur l'écologie et les demandes sociétales et associatives pour la préservation et la qualité de l'environnement [41].

A- La valorisation énergétique

Consiste à incinérer les déchets plastiques pour récupérer l'énergie qu'ils contiennent sous forme de chaleur. Les plastiques, composés de pétrole raffiné, ont une capacité calorifique proche de celui-ci. Cette méthode de valorisation permet de recycler une grande partie des déchets plastiques.

La valorisation énergétique consiste à utiliser les matières plastiques comme combustibles et à récupérer ainsi l'énergie dégagée. Cette opération se déroule dans une unité d'incinération de déchets de matières plastiques. Compte tenu du pouvoir calorifique élevé des polymères, le recyclage énergétique est très efficace pour des déchets plastiques souillés ou non triés qui ne sont donc pas réutilisables [41].

B- Valorisation matière

B-1) Le recyclage chimique

Consiste à transformer la matière plastique en molécule de base (polymère, ester...), pouvant servir à la synthèse d'une nouvelle matière plastique, ou pour la pétrochimie. Ces technologies sont encore peu développées ou limitées à certaines natures de résines plastiques [41]

B-2) Recyclage mécanique

La valorisation des plastiques par voie fondue est une méthode simple, peu dommageable pour l'environnement et demandant peu d'investissements par rapport au recyclage chimique. Elle a pour but l'utilisation des matières plastiques usagées dans la production d'un nouvel objet, Cette technique est utilisée pour le traitement des déchets thermoplastiques [41]. Elle repose avant tout sur une collecte sélective ou un tri des déchets

plastiques à partir des ordures ménagères. Il est très souvent nécessaire d'avoir des déchets plastiques triés par type de résine plastique.

Plus le tri n'est efficace, plus le produit obtenu est de bonne qualité. Les techniques de recyclage des déchets plastiques par cette méthode les plus connus sont : La régénération et la fabrication d'éléments de construction [41].

II-5-3- Propriétés des céramiques avec incorporation des déchets plastiques

Le plastique est l'un des matériaux les plus utilisés au monde. Ses caractéristiques techniques avancées, sa légèreté et son faible coût en font un matériau adapté à de multiples applications [42].

Le problème du plastique n'est donc pas son utilisation, généralement vertueuse, mais la gestion de la fin de vie des produits. Le point le plus préoccupant reste l'impact sur l'environnement de tout le plastique qui se retrouve, intentionnellement ou accidentellement, jeté dans la nature, et qui contribue à la pollution et à la dégradation des écosystèmes naturels. Sur la terre ferme, dans les cours d'eau et en mer, les déchets dégradent les paysages et détruisent les écosystèmes [42].

Le recyclage du plastique constitue la meilleure réponse au problème de la gestion des déchets plastiques, tant d'un point environnemental que socioéconomique. Il existe une industrie du recyclage du plastique, qui doit continuer à se consolider pour monter en gamme, gagner en efficacité et augmenter ses capacités. Les recycleurs doivent travailler étroitement avec tous les acteurs de la chaîne de valeur pour débloquer les verrous techniques, psychologiques et économiques [42].

Les applications et La réutilisation des plastiques dans les céramiques prend une ampleur de plus en plus considérable, du fait de l'évolution des réglementations sur l'écologie et les demandes sociétales et associatives pour la préservation et la qualité de l'environnement, quelques codes d'identification de matières plastiques en fonction de leur recyclabilité ont été déterminés.

Elle permet d'une part de prendre en charge les déchets plastiques, et d'autre part de créer une valeur ajoutée sur les sous-produits en fin de vie, et qui peut être une source économique et de création d'entreprises, et d'autre part une solution d'amélioration des propriétés physico-mécaniques des céramiques [42].

L'incorporation des déchets plastiques dans les céramiques permet d'agir sur plusieurs propriétés différentes telles que :

- Les propriétés physico-chimiques (résistances aux produits acido-basiques...),

- Les propriétés mécaniques (résistances aux chocs, à la compression, aux cisaillements...),
- Les propriétés électriques (amélioration de la conductivité ou de la résistance)
- La facilité de mise en œuvre,
- La réduction du coût [42].

En général, la valorisation des matières plastiques rend les céramiques Polyvalentes, souples, résistantes, légères, durables et bon marché.

Le tableau suivant donne une indication des principales propriétés usuelles des deux matériaux plastiques et céramiques :

Tableau II.2 : Quelques propriétés usuelles des matériaux plastiques et céramiques [43].

| Matériaux | Polymères | Céramiques |
|---|---------------------------------|---|
| Densité | Faible | Faible |
| Rigidité (module d'Young) | Faible | Élevée |
| Coefficient de dilatation Thermique | Élevée | Faible |
| Dureté | faible à élevée (fibres) | Elevée |
| Ductilité (déformation à la rupture) | élevée sauf à l'état vitreux | faible et aléatoire |
| Conductivité électrique, Thermique | faible (isolants) | électrique : faible thermique : élevée |
| Résistance à corrosion | en général élevée | Elevée |
| Température max. d'utilisation | faible (toujours < 200°C) | très élevée |
| Mise en forme | très facile (moulage) | difficile (frittage) |

CHAPITRE III : TECHNIQUES EXPERIMENTALES ET TRAITEMENTS THERMIQUES DES KAOLINS

Ce chapitre est consacré à la présentation des différentes techniques d'analyse et de caractérisation. Les traitements thermiques à différentes températures des kaolins sont aussi détaillés.

III-1- Présentation des kaolins

Pour comprendre le comportement, la participation des kaolins au cours du traitement thermique dans le domaine des céramiques nous avons opté à faire une étude dans ce sens sur quatre (02) types de kaolin nommés respectivement KT₃ et DD₃ qui sont de deux origines (géographiques) et de deux (02) granulométries différentes 0,063 mm et 0,04 mm. Ce choix étant fixé d'avance vue que c'est la granulométrie la plus demandée dans l'industrie des matériaux céramiques

Le KT₃ est un produit marchand du gisement de Kaolin de Tamazert. Ce dernier est situé au nord-est de l'Algérie dans la commune d'El Milia Wilaya de Jijel dont elle est distante de 60 km (Sud – Est). Il a subi un traitement physico-chimique qui consiste en pré homogénéisation, fragmentation, homogénéisation, empulpage et classement, épaissement et enfin une déshydratation et un séchage. Le KT₃ est utilisé pour la fabrication de porcelaines et des réfractaires [44].

Le DD₃ est un produit marchand du gisement de Kaolin de Djebel Debbagh . Ce dernier se trouve à 35 Km au nord-ouest de la ville de GUELMA. Le kaolin de Djebel Debbagh (Guelma), étant grisâtre, ne répond pas aux normes requises pour alimenter le marché national, encore moins le marché international, précisément en ce qui concerne la production des porcelaines de table. Néanmoins, d'autres applications lui sont réservées dans la composition des briques réfractaires [45].

III-2- Techniques expérimentales

Plusieurs techniques d'analyses sont employées dans le but de caractériser les deux Kaolin crus et cuits. La description des techniques, l'appareillage utilisé et les conditions opératoires sont détaillés dans les paragraphes qui suivent.

III-2-1- Analyse Minéralogique par Diffraction des Rayons X (DRX)

La composition minéralogique des matières premières de Tamazert et Djebel Debbagh crues et cuites et de granulométries 40 et 63 µm (KT₃ et DD₃) est déterminée

par la diffraction des rayons X (DRX), qui est une technique d'analyse non destructive pour l'identification et la détermination qualitative des différentes phases minéralogiques [46].

Dans ce travail, les différentes phases minéralogiques qui composent les kaolins étudiés ont été déterminées par un diffractomètre de type X Pert Pro PANalytical avec la raie $K\alpha_1$ du cuivre de longueur d'onde $\lambda = 1,540598 \text{ \AA}$. L'échantillon a été déposé sur le porte échantillon. Les diffractogrammes ont été enregistrés de 0° à 80° (2θ) avec un pas de $0,01^\circ$. Les données collectées sont traitées par le logiciel PANalytical X'Pert Highscore. Les résultats obtenus sont représentés par des diffractogrammes.

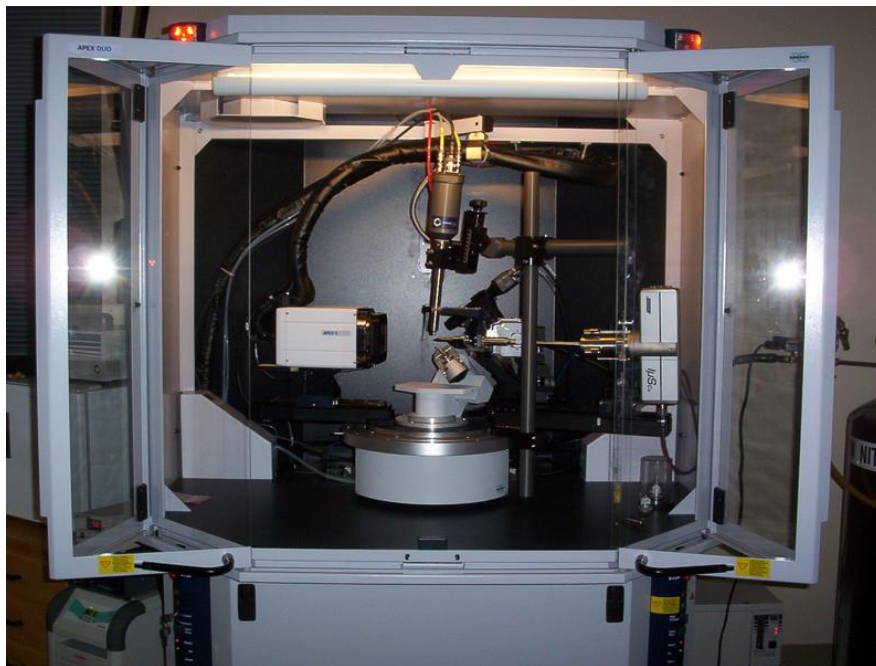


Figure III.1 : Appareil de diffraction des rayons X

III-2-2- Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF)

La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF) est une méthode d'analyse basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, d'effectuer l'analyse des fonctions chimiques présentes dans le matériau [47].

Les spectres IRTF des kaolins crus et cuits, ont été réalisés à l'aide d'un spectromètre FTIR-8400 de marque SHIMADZU qui donne une fourchette de longueurs d'ondes de 300 à 4000 cm^{-1} .

Cette méthode consiste à analyser une pastille constituée d'un mélange intime de 1% kaolin broyer et tamiser à 63 μm et 40 μm et de 99% de bromure de potassium KBr. Le mélange homogène est mis dans un moule et est pressé à quelque MPa. Des pastilles transparentes de 12.5 mm sont réalisées.

III-2-3- Composition chimique des kaolins

Afin de connaître la composition chimique des kaolins étudiés, une analyse chimique par fluorescence X est réalisée.

Cette analyse est une technique non destructive et rapide, qualitative et quantitative qui permet l'identification et la détermination des quantités des éléments contenus dans une poudre minérale et dans des échantillons à l'état liquide, de la plupart des éléments chimiques même à l'état de traces (de l'ordre de quelques $\mu\text{g/l}$).

Cette technique physique est caractérisée par sa fiabilité et sa grande précision dans le sens qu'elle permet de réaliser en même temps, l'analyse de plusieurs échantillons avec un minimum d'erreurs. Elle est fondée sur le principe du bombardement d'un échantillon porté à haute température (1050°C), par un rayonnement X.

III-2-4- Durabilité chimique des kaolins

La résistance à l'attaque chimique des pièces de kaolins cuites autrement dit la durabilité chimique de ce même matériau face aux acides et aux bases est l'un des facteurs importants puisque c'est contre ces agressions chimiques qu'un matériau est classé de bonne qualité ou non.

A cet effet nous soumettons nos matériaux composés de kaolins cuits à différentes températures (KT₃, et DD₃) de deux granulométries différentes 40 et 63 μm respectivement à une attaque acide et basique.

III-2-4-1- Attaque acide

Les différentes pastilles (KT₃ et DD₃) de deux granulométries (40 et 63 μm), cuites à 900 et 1100°C sont immergées dans une solution de l'acide sulfurique H₂SO₄ de 70% en volume et cela dans des petits béchers. Les béchers sont recouverts et maintenus à température ambiante pendant une semaine.

Après 7 jours, les pastilles sont retirées et leurs masses sont mesurées par le biais d'une balance analytique et cela après les avoir bien essuyées avec du papier absorbant.

III-1-2-2- Attaque basique

Les mêmes étapes effectuées dans la réalisation de l'attaque acide sont refaites sauf que cette fois ci, les pastilles sont immergées dans une solution de soude NaOH titrée à 200g/l. Après une semaine les observations sont notées et les masses des pastilles sont mesurées.

III-2-5- Propriété mécanique des kaolins : Microdureté Vickers

La mesure de dureté Vickers se fait avec un indenteur en forme de pyramide normalisée. L'empreinte que laisse le pénétrateur peut être utilisée pour calculer la dureté du matériau [48].

Afin d'étudier l'influence de la température, la granulométrie et le type de la matière première, des essais de dureté Vickers ont été réalisés sur les kaolins cuits aux températures 900°C et 1100°C.

Les échantillons composés de KT₃ et DD₃ pour les deux granulométries (40 µm et 63µm), sont mis dans un moule de forme cylindrique de 1 cm de diamètre et 1.5 cm de hauteur et pressés sans ajout de liant à l'aide d'une presse hydraulique de marque SHIMADZU. Le pressage est uniaxial et d'environ 5 tonnes pendant 5min, la montée et la descente sont lentes pour éviter la formation de défauts dus à l'emprisonnement de l'air dans la poudre.

Les pastilles obtenues sont séchées dans l'étuve à une température de 105°C pendant 24 h, puis elles sont cuites dans un four programmable de marque « Nebertherm », avec une montée en température de 10°C/min et un palier de 20 min et cela à différentes températures : 900°C et 1100°C. Le refroidissement se fait à une vitesse de 6°C/min.

Une fois cuites et refroidies les pastilles sont polies à l'aide d'une polisseuse de marque « META SERV 2000, GRINDER / POLISHER » en les faisant passées par trois qualités de papier abrasif P320, P600 et P1200.

La mesure de la micro dureté de nos échantillons est faite par le biais d'un duromètre ZHU 2.5 de marque « ZWICK / Roell » (Figure III.1) qui est mené d'un indenteur formé d'une pointe pyramidal en diamant à base carrée dont les faces opposées font un angle de 136° , un microscope et un ordinateur.



Figure III.2 : Photo du Microduromètre ZHU 2.5 (Zwick Hardiesse Unity)

Au début, l'échantillon sous forme cylindrique est placé sur un support pour visualiser son état de surface à l'aide d'un microscope avec un agrandissement de (20 fois), puis l'indentation est réalisée à l'aide de l'indenteur en lui appliquant une force de 5 N pendant 15 s avec une vitesse de charge (pénétration) $250 \mu\text{m}/\text{min}$. En fin, l'état de surface de l'échantillon est visualisé une deuxième fois à l'aide du microscope à fin de permettre à l'appareil de mesurer l'emprunte et ainsi la micro dureté de notre pastille.

L'appareil nous donne le tracé de la courbe de l'évolution de la force en fonction de la pénétration ainsi que la valeur du module d'Young, la mesure de la micro dureté en 0.5Hv est la photo de l'emprunte.

III.3- Traitements thermiques des kaolins

A fin de suivre l'évolution, le comportement thermique des kaolins lors du traitement thermique et cela pour comprendre les différents phénomènes physico-chimiques que subissent ces derniers, nous les avons fait subir à des températures de cuisson différentes (900°C et 1100°C) pour les mêmes paliers de cuisson (20 min) et d'une vitesse de chauffe de $10^\circ\text{C}/\text{min}$.

La réalisation par frittage à différentes températures 900°C et 1100°C de pièces formé à partir des différents kaolins sans ajout d'eau est faite grâce a des moules de différentes formes cylindriques de 1 cm de diamètre et de 1,5 cm de hauteur, circulaires de 30 mm de diamètre et de 2 à 2,5 mm d'épaisseur et de poids similaires. Les poudres sont pressées à des pressions variantes entre 4 à 5 tonnes pendant 5 min à l'aide d'une presse hydraulique du type SHIMADZU, opérant jusqu'à 10 tonnes et sous vide. La montée et la descente sont lentes pour éviter la formation de défauts dus à l'emprisonnement de l'air dans la poudre, selon le mode opératoire suivant :

On a pris environ 3g de chaque kaolin. On les a pressés à l'aide d'une presse hydraulique. Les pastilles obtenues sont séchées dans l'étuve à une température de 105°C pendant 24 h, puis ils sont cuits dans un four de type Naberterm à différentes températures 900°C et 1100°C, on a utilisé une montée en température de 10°C/min et le refroidissement se fait suivant l'inertie du four. De chaque kaolin on prépare plusieurs pastilles de poids similaires pour déterminer les différentes caractéristiques.

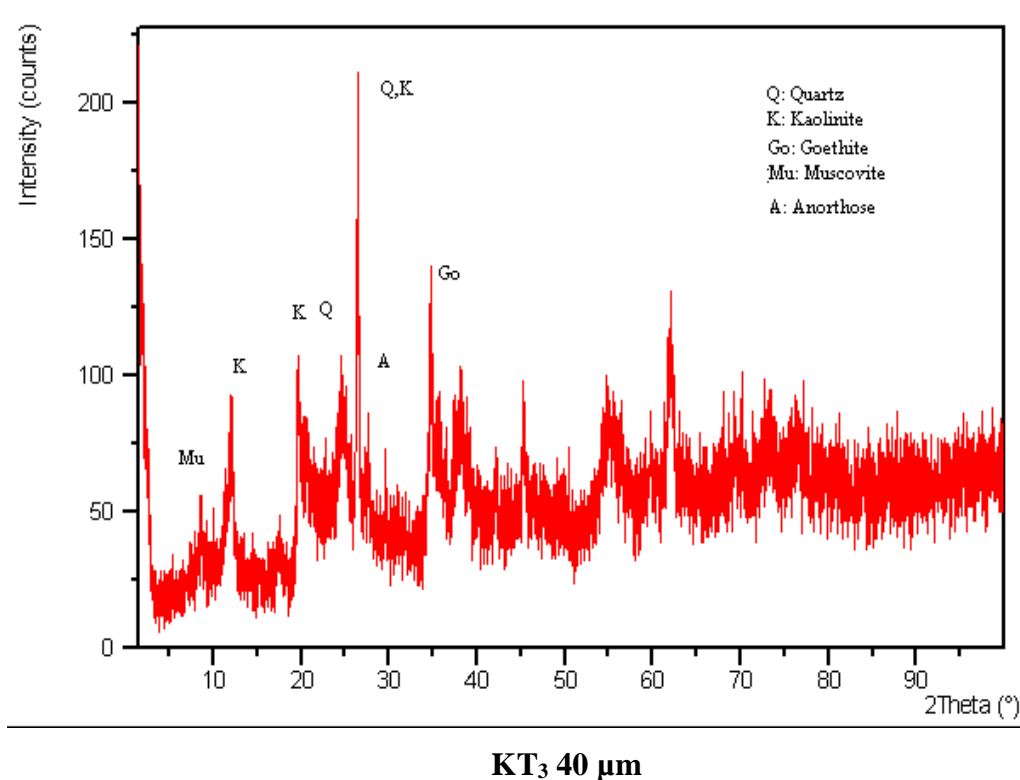
CHAPITRE IV : CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES KAOLINS CRUS ET CUITS A 900 ET 1100°C ET LEURS PROPRIETES

Ce chapitre englobe les résultats de la caractérisation physico-chimique des kaolins KT₃ et DD₃ crus et cuits à 900 et 1100°C. Les propriétés chimiques et mécaniques des pièces élaborées à base de ces kaolins sont aussi discutées.

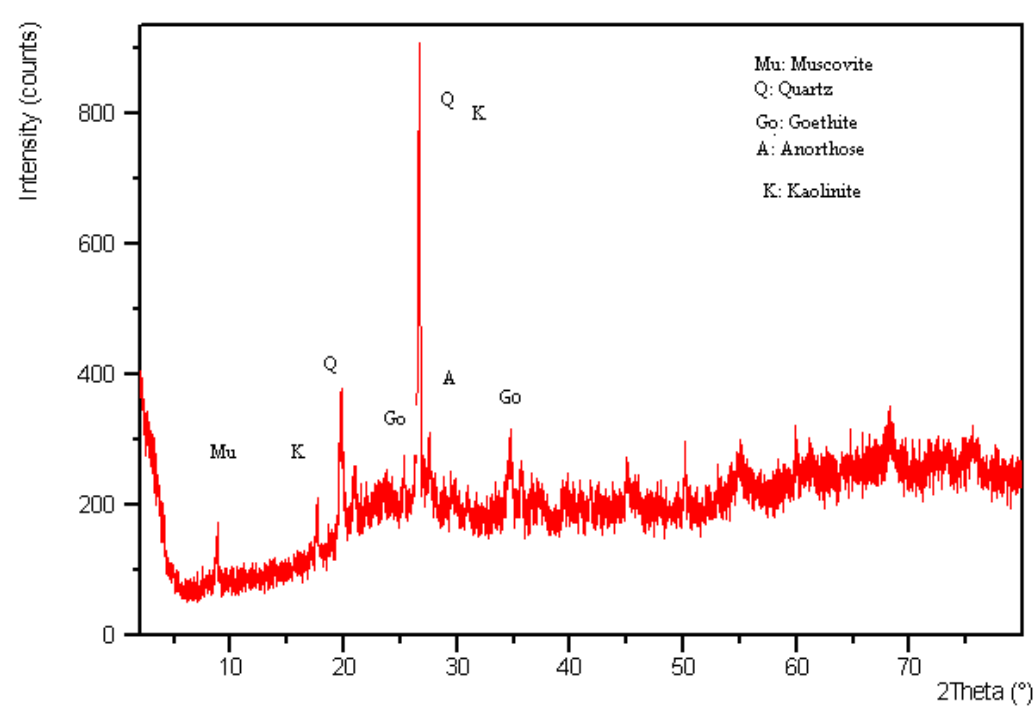
IV-1- Caractérisation physicochimique des kaolins crus

IV-1-1- Analyse Minéralogique par Diffraction des Rayons X (DRX)

Les figures IV.1 et IV.2 illustrent les diffractogrammes DRX des deux fractions 40 et 63 µm des deux kaolins KT₃ et DD₃ crus étudiés.

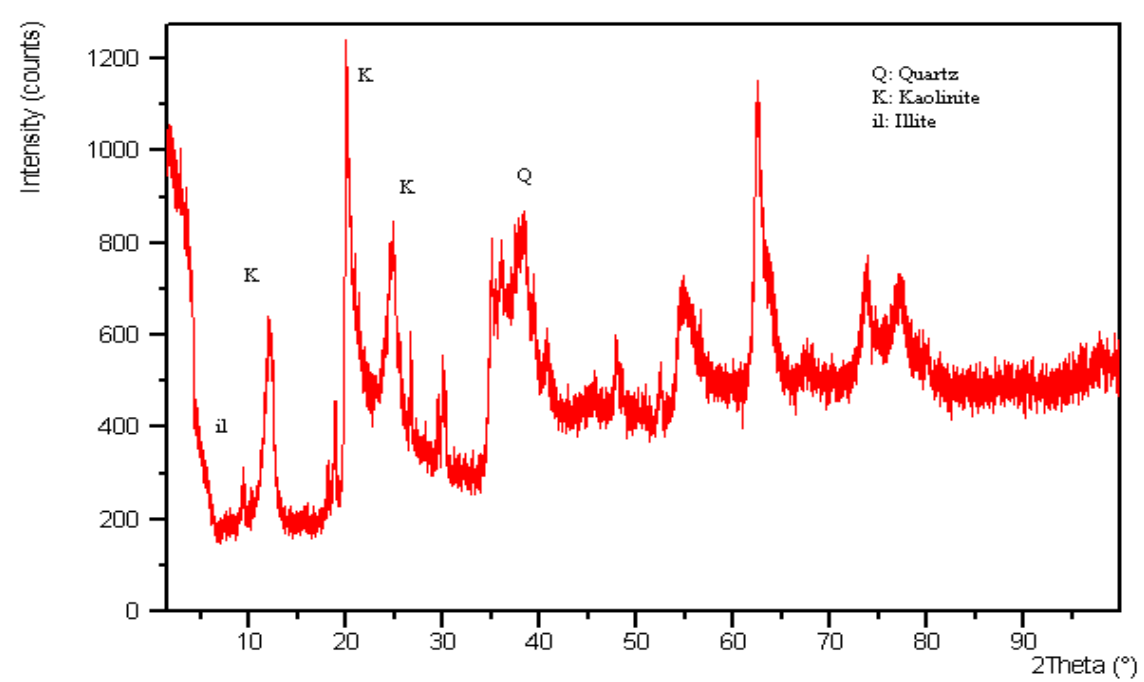


D'après les résultats de l'analyse par DRX représentés sur les figures IV.1 et IV.2, la présence des phases minéralogiques quartz et kaolinite dans les deux fractions 40 et 63 µm des échantillons KT₃ et DD₃ est remarquée. Les phases minéralogiques goethite, anorthose et muscovite sont aussi présentes dans le KT₃. Tandis que le kaolin DD₃ comporte de l'illite et de la goethite.



KT₃ 63 μm

Figure IV.1 : Diffractogramme des rayons X du kaolin KT₃ (40 et 63 μm) cru



DD₃ 40 μm

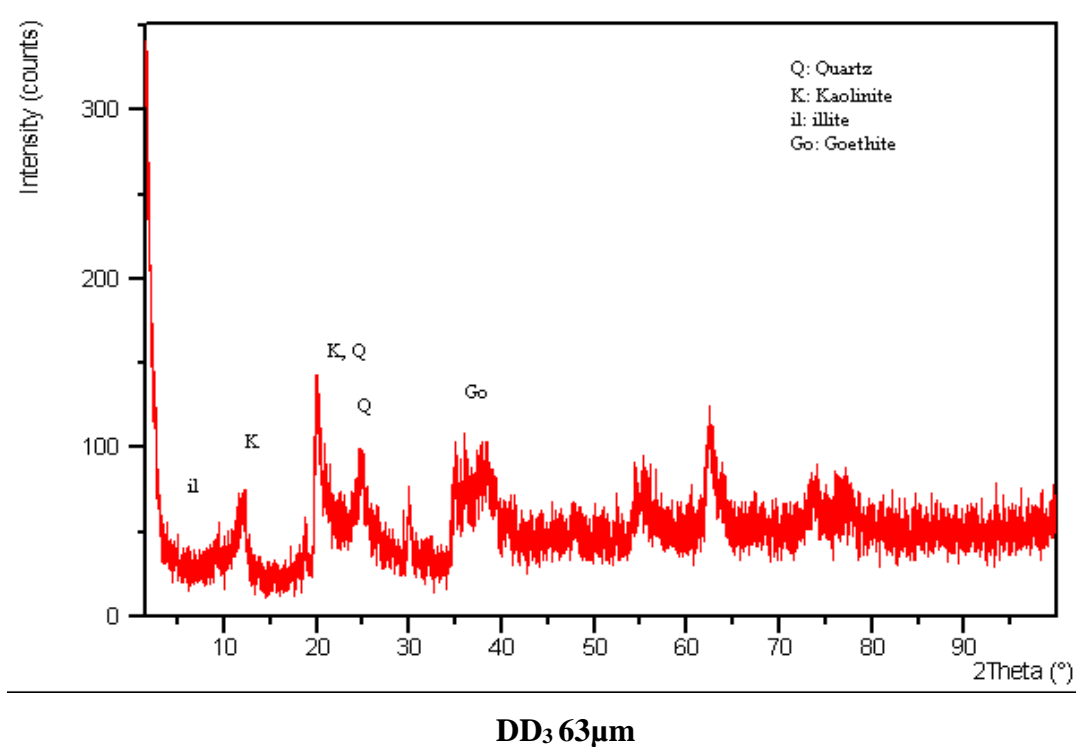


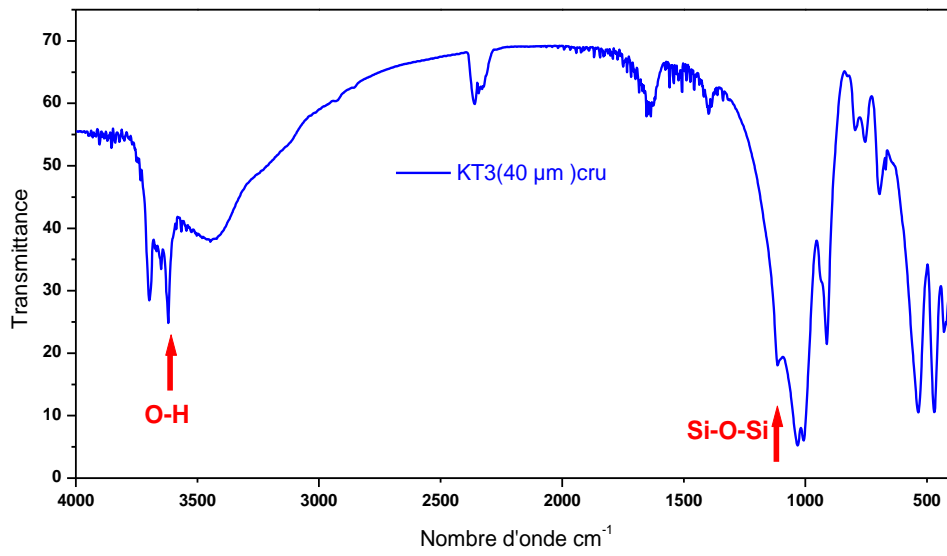
Figure IV.2 : Diffractogramme des rayons X du kaolin DD₃ (40 et 63 μm) cru

D'après la figure IV1, les proportions des phases minéralogiques sont différentes dans les fractions granulométriques 40 et 63 μm du kaolin KT₃. La muscovite et la goethite sont moins présents dans la fraction granulométrique 40 μm par contre le quartz est beaucoup plus prépondérant dans la fraction granulométrique 63 μm.

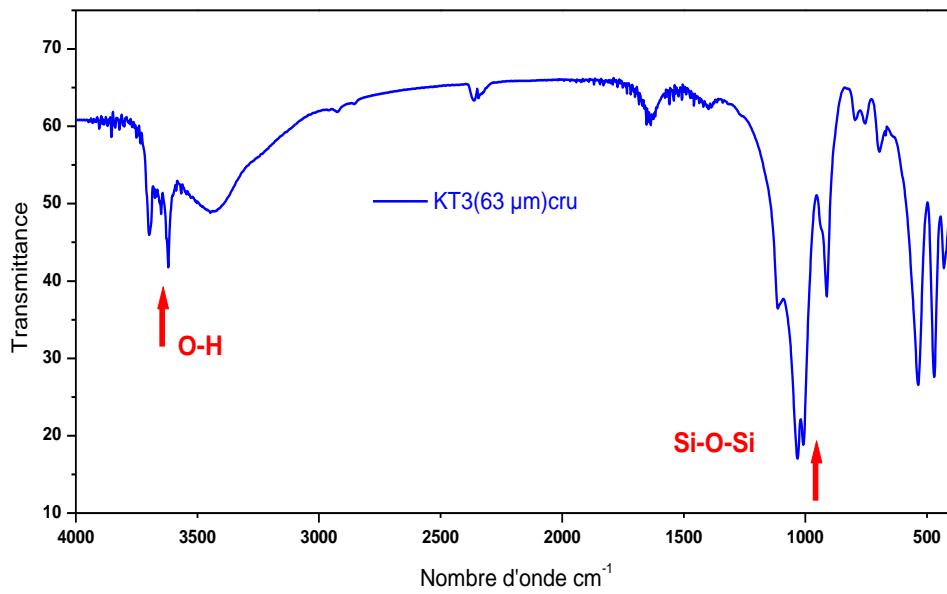
Concernant le kaolin DD₃ présenté dans la figure IV.2, la présence des phases minéralogiques illite, kaolinite, quartz et goethite dans les deux fractions granulométrique est notée. Les pics caractéristiques de ces phases sont plus larges que ceux des phases contenues dans le kaolin KT₃. Notons aussi que les taux de la kaolinite et l'illite sont beaucoup plus importants que celui du quartz dans la fraction 40 μm est la goethite est absente dans cette même fraction.

IV-1-2- Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF)

Les spectres des deux fractions 40 et 63 μm des deux kaolins KT₃ et DD₃ crus étudiés obtenus par IRTF sont représentés su les figures IV.3 et IV.4.

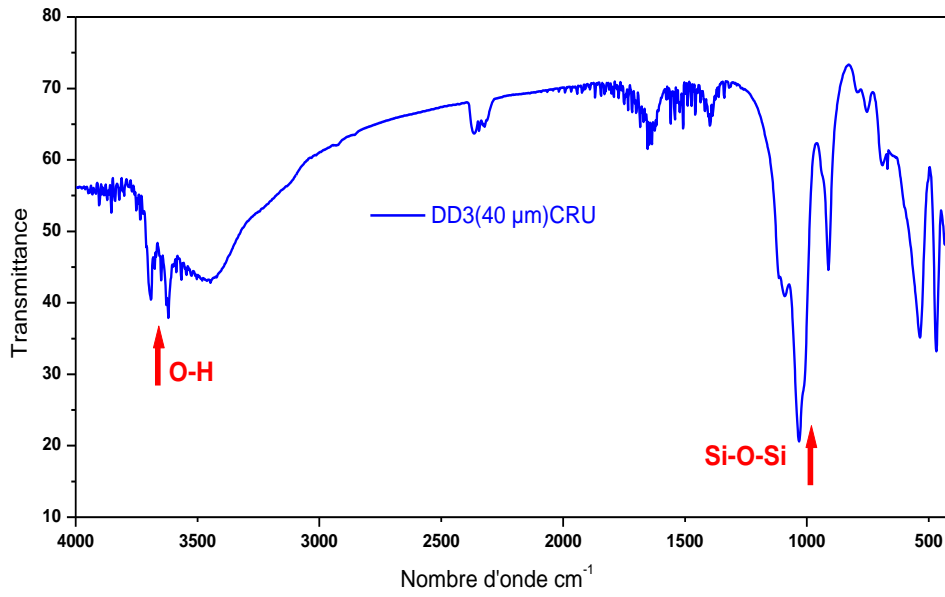


KT3 40

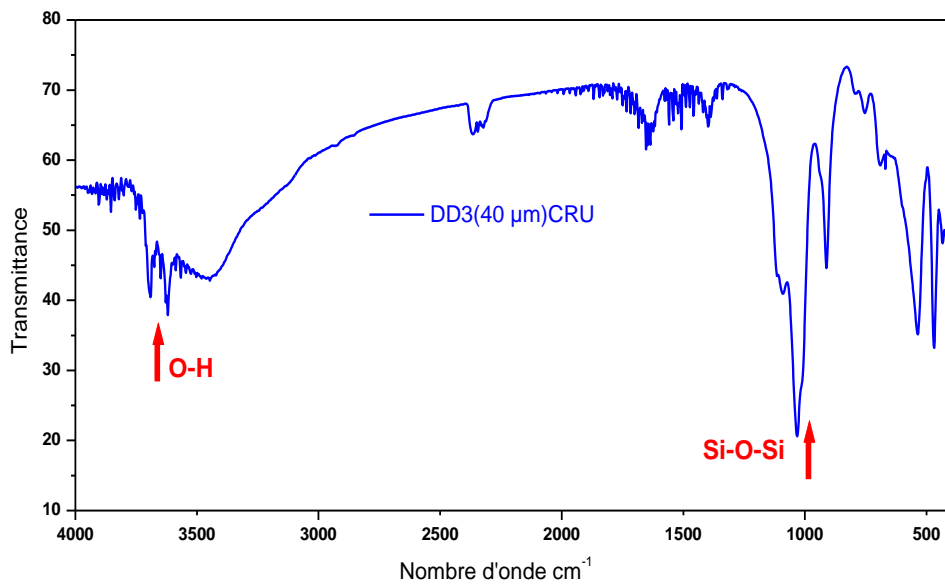


KT3 63

Figure IV.3 : Spectres de l'infrarouge a transformée de Fourier de KT₃ (40 et 63 μm) cru.



DD3 40



DD3 63

Figure IV.4 : Spectres de l'infrarouge a transformée de Fourier de DD₃ (40 et 63 μm) cru.

D'après les figures IV.3 et IV.4, deux types de bandes sont observés dans les spectres IRTF des deux kaolins étudiés. Le premier est relatif aux élongations du groupement OH de la kaolinite entre 3697 et 3622 cm^{-1} . Ces bandes sont caractérisées par de fortes intensités. Le deuxième est un massif observé entre 1112 et 992 cm^{-1} . Il est dû aux vibrations de Si-O-Si. Elles sont très intenses et larges. Ce qui montre une teneur assez forte en quartz et une très faible teneur en phases minéralogiques argileuses micacées et feldspathique.

Pour l'échantillon KT₃, les bandes relatives aux élongations du groupement OH de la kaolinite et celles dues aux vibrations de Si-O-Si sont beaucoup plus intenses dans la fraction granulométrique 40 μm .

L'échantillon DD₃ ne présente qu'un seul pic intense aux environs de 1100 cm^{-1} dû aux vibrations Si-O-Si se qui décèle une faible présence du quartz. Les bandes d'absorption aux environs de 3690-3620 cm^{-1} relatives aux élongations du groupement OH sont beaucoup plus intenses. Ces dernières sont moins intenses dans la fraction granulométrique 63 μm .

IV-1-3- Composition chimique des kaolins (RFX)

Les résultats de l'analyse par fluorescence X des deux fractions 40 et 63 μm des kaolins KT₃ et DD₃ crus étudiés sont regroupés dans les tableaux IV.1 et VI.2 et illustrés dans les figures IV.5 et IV.6 sous formes d'histogrammes.

Tableau IV.1 : Composition chimique par fluorescence X du kaolin KT₃(40 et 63 μm) cru.

| Classes granulométriques (%) | SiO₂ | Al₂O₃ | Fe₂O₃ | CaO | MgO | K₂O | Na₂O | P₂O₅ | TiO₂ | PAF |
|-------------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------|------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------------|------------------------|------------|
| 63 μm | 48.65 | 33.52 | 1.07 | 0.28 | 0.62 | 4.42 | 1.01 | 0.02 | 0.04 | 10.70 |
| 40 μm | 47.40 | 34.68 | 1.11 | 0.19 | 0.45 | 4.25 | 0.58 | 0.02 | 0.05 | 11.56 |

D'après les résultats de l'analyse fluorescence X, on constate d'une manière générale que le composant chimique majoritaire des kaolins étudiés (KT₃ et DD₃) pour les deux granulométries (40 μm et 63 μm) est la silice avec un taux moyen d'environ 47% puis l'alumine avec un taux moyen de 33%.

Toujours en ce qui concerne ces deux composants on constate que le taux de silice est plus élevé dans les kaolins de grande granulométrie (63 µm) tandis que celui de l'alumine est plus considérable dans les kaolins de petite granulométrie (40 µm) sauf pour le DD₃ ou s'est l'inverse qui s'est produit.

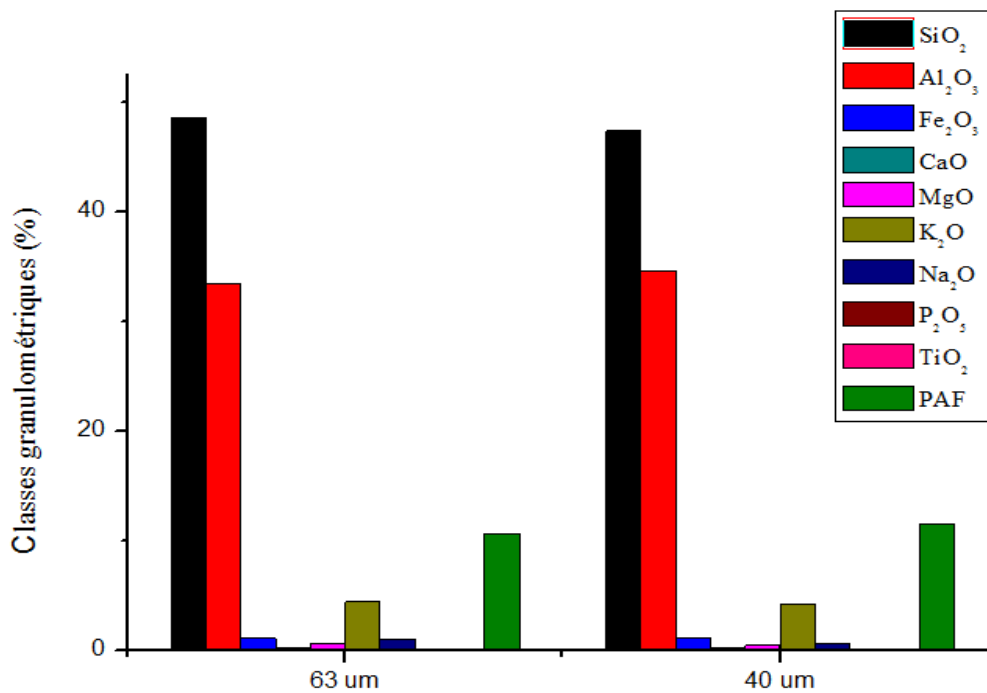


Figure IV.5 : Histogramme de la composition chimique par fluorescence X du kaolin KT₃ (40 et 63 µm) cru.

Tableau IV.2: Composition chimique par fluorescence X du kaolin DD₃ (40 et 63 µm) cru.

| Classes granulométriques (%) | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | TiO ₂ | PAF |
|------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|-------|
| 40 µm | 48.06 | 37.66 | 1.67 | 1.89 | 0.50 | 3.36 | 0.36 | 0.01 | 0.12 | 10.66 |
| 63 µm | 47.12 | 36.17 | 1.57 | 1.88 | 0.66 | 3.33 | 0.28 | 0.02 | 0.10 | 9.80 |

Le plus grand taux de silice est celui de KT₃ ce qui indique la présence du quartz, tandis que le grand taux d'alumine est celui du DD₃ ce qui fait de lui une bonne matière première pour les réfractaires. En ce qui concerne les autres composants

chimiques minoritaires que les kaolins contiennent, c'est le taux d'oxyde de potassium qui est le plus considérable ce qui indique que nos kaolins renferment des feldspaths potassiques.

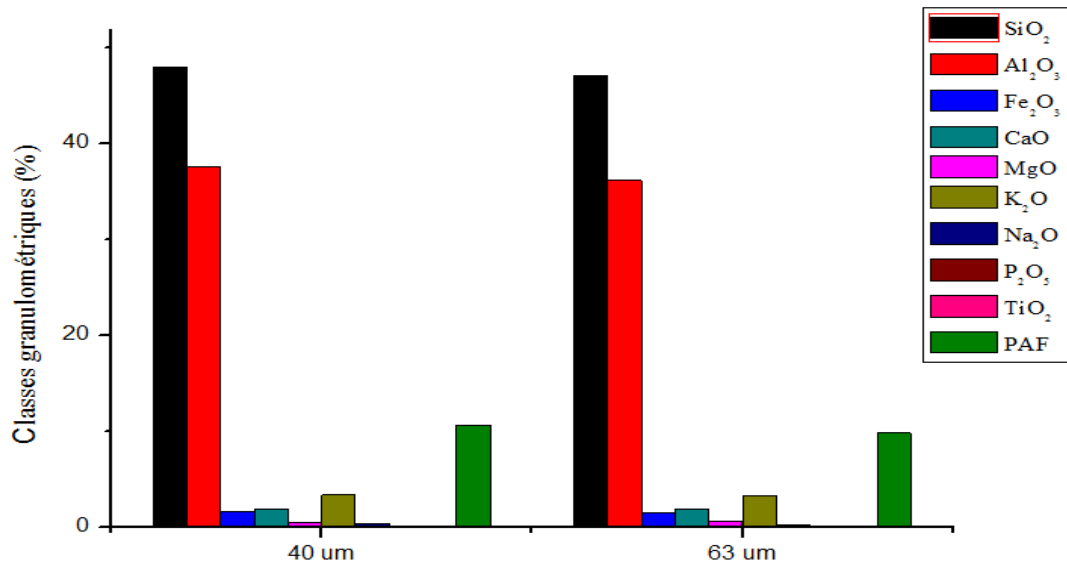


Figure IV.6 : Histogramme de la composition chimique par fluorescence X du kaolin DD₃ (40 et 63 µm) cru.

On constate aussi la présence d'oxyde de fer dans nos échantillons et surtout dans ceux qui ont une fine granulométrie (40 µm). Le taux le plus élevé en oxyde de fer est celui de DD₃ (1,67 %) tandis que le plus faible est celui de KT3 (1,07 %) ce qui est expliqué par le traitement de blanchissement qui a subi dont le but d'éliminer le fer.

On remarque aussi la présence d'oxyde de titane surtout dans le DD₃ ce qui explique leurs colorations. Nous remarquons le taux important de la chaux (CaO) (1,89 %) par rapport à KT3.

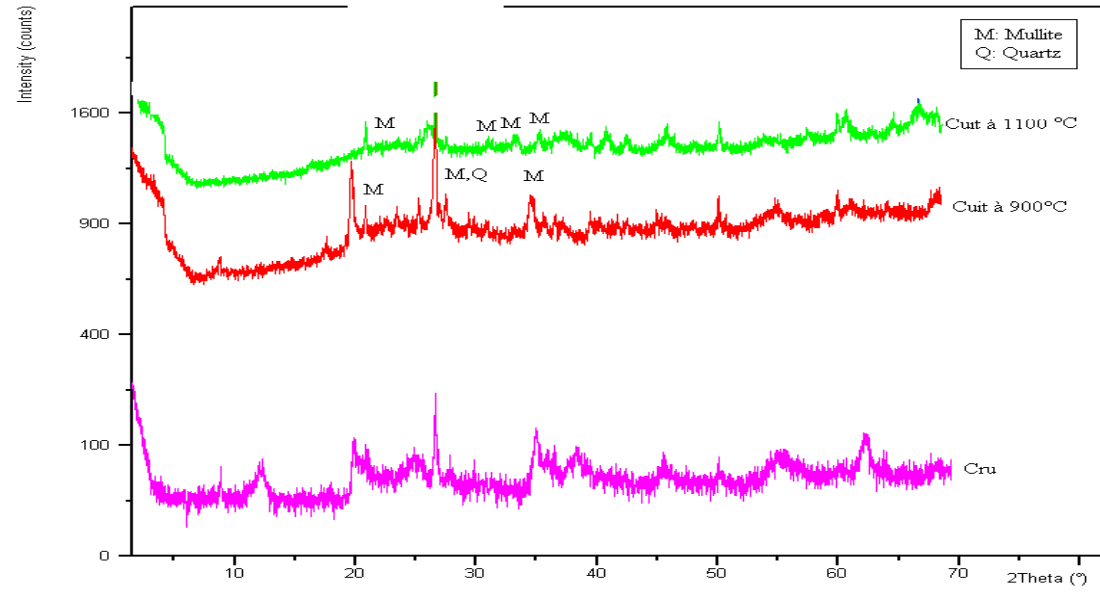
On constate que les pertes au feu sont plus importantes dans les kaolins de faible granulométrie. Les pertes aux feux sont considérables pour le KT3 (11,56 % pour la granulométrie 40 µm et 10,70 pour la granulométrie 63 µm) et moins importantes pour le DD₃ (10,66 pour la granulométrie 40 µm et 9,81 pour la granulométrie 63 µm).

Les pertes au feu sont dues à la présence de carbonates, des sulfures, à l'eau de constitution des minéraux hydratés et le CO₂ qui est le principal gaz qui se dégage lors de la calcination des matières organiques qui se décomposent vers 400°C.

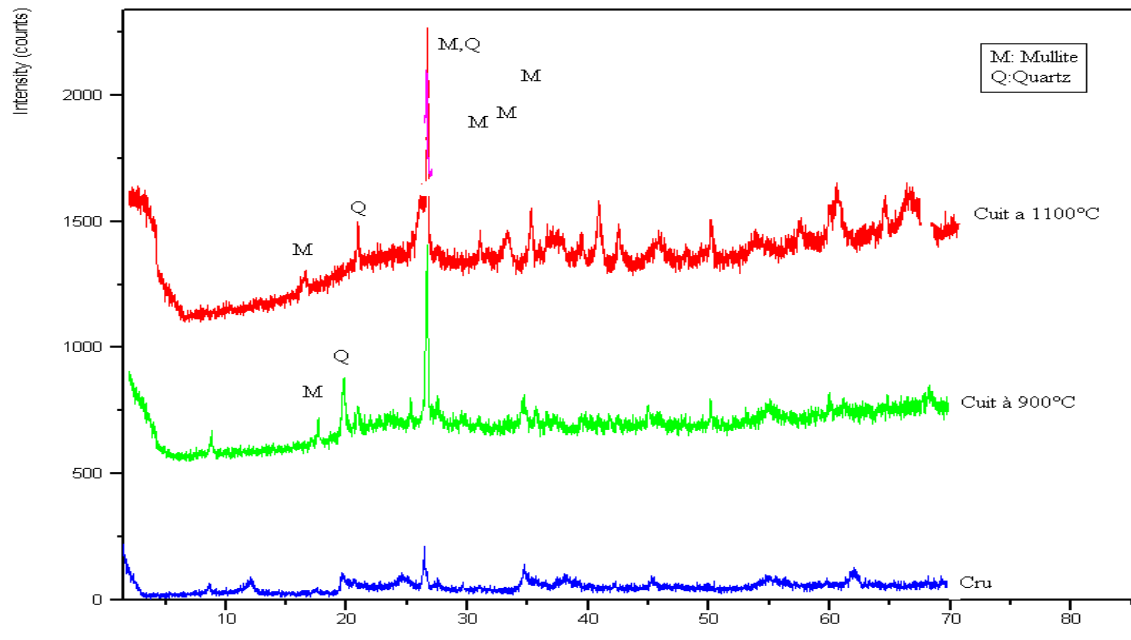
IV-2- Caractérisation physicochimique des kaolins cuits à 900 et 1100°C

IV-2-1- Analyse Minéralogique par Diffraction des Rayons X (DRX)

Les figures IV.9 et IV.10 illustrent les diffractogramme DRX des deux fractions 40 et 63 µm des deux kaolins KT₃ et DD₃ cuits à 900 et 1100 °C étudiés.



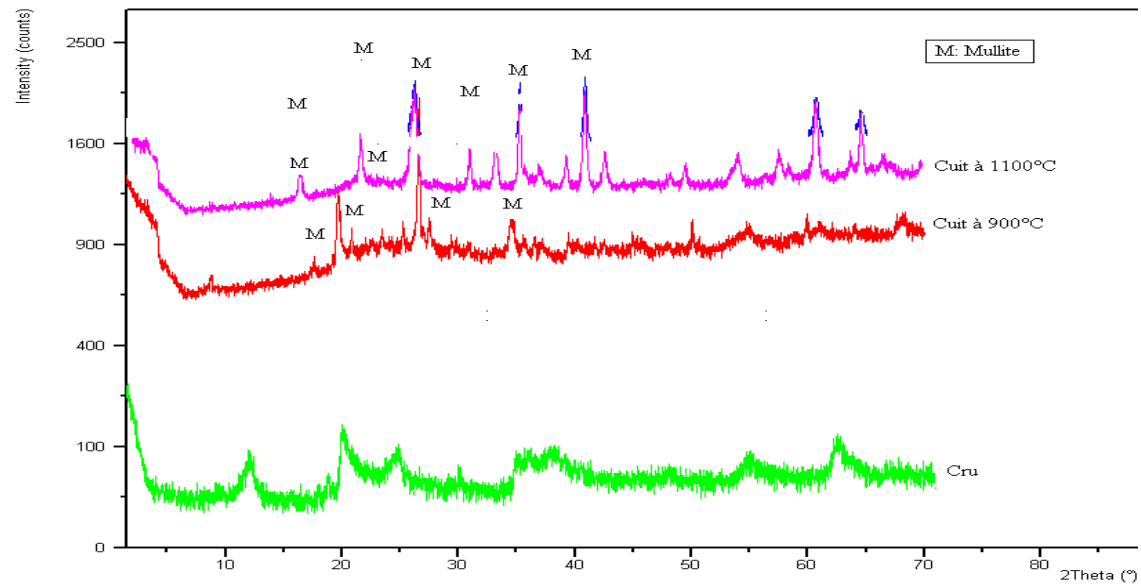
KT3 40 µm



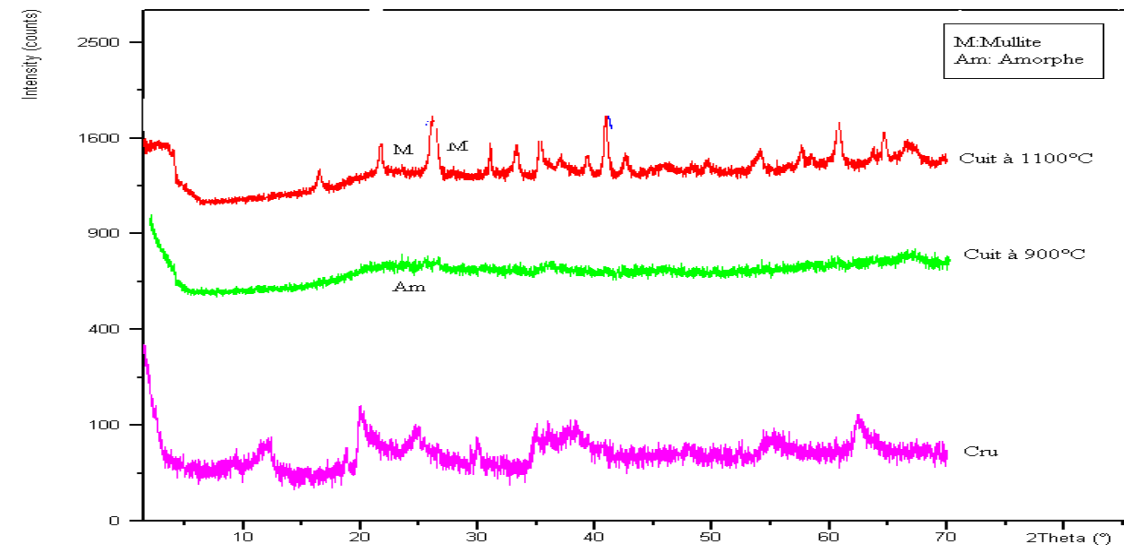
KT3 63 µm

Figure IV.7 : Diffractogramme DRX du kaolin KT₃ (40 et 63 µm) cru et cuit à 900°C et 1100°C

D'après les diffractogramme DRX représentés sur la figure IV.7, nous remarquons l'apparition de nouvelles phases minéralogiques dans le kaolin KT₃ cuit à savoir la mullite primaire (900°C) et secondaire a partir de 1100°C ou la silice se transforme en deux formes la silice libre, le quartz et la silice sous forme d'une phase vitreuse combinée avec les impuretés. Nous notons aussi que l'intensité de ces pics tende à diminuer avec l'augmentation de la granulométrie.



DD₃ 40 μm



DD₃ 63 μm

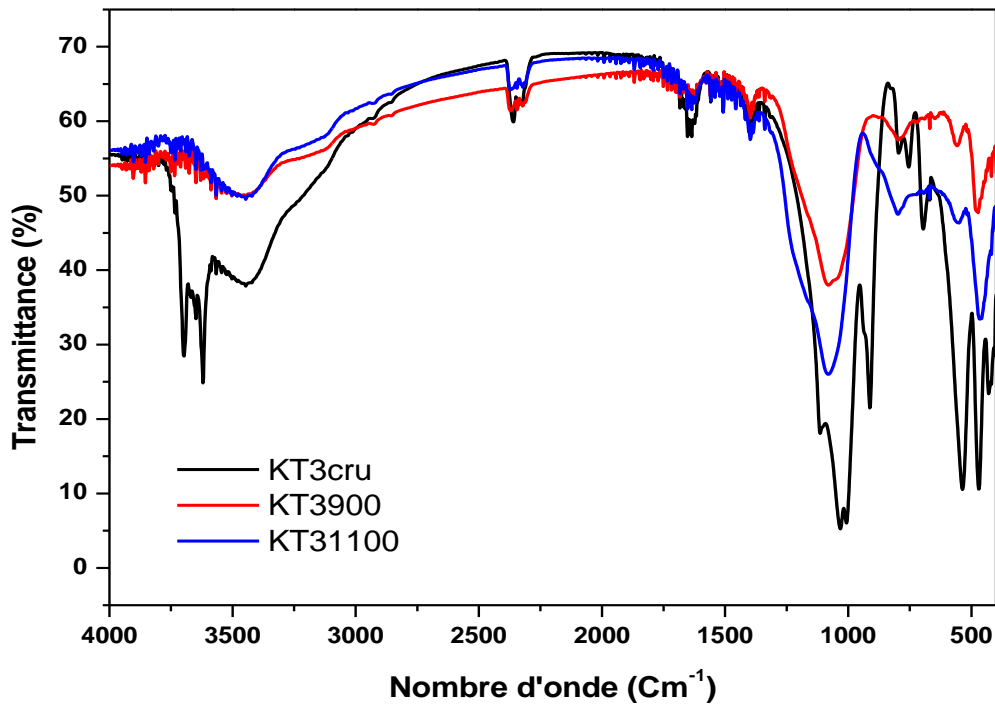
Figure IV.8 : Diffractogramme DRX du kaolin DD₃ (40 et 63 μm) cru et cuit à 900°C et 1100°C.

Concernant le kaolin DD₃ cuit, ces diffractogrammes DRX représentés sur la figure IV.8 montrent aussi la présence des nouvelles phases minéralogiques rencontrées dans le cas du KT₃. Néanmoins la mullite est beaucoup plus prépondérante dans ce dernier échantillon.

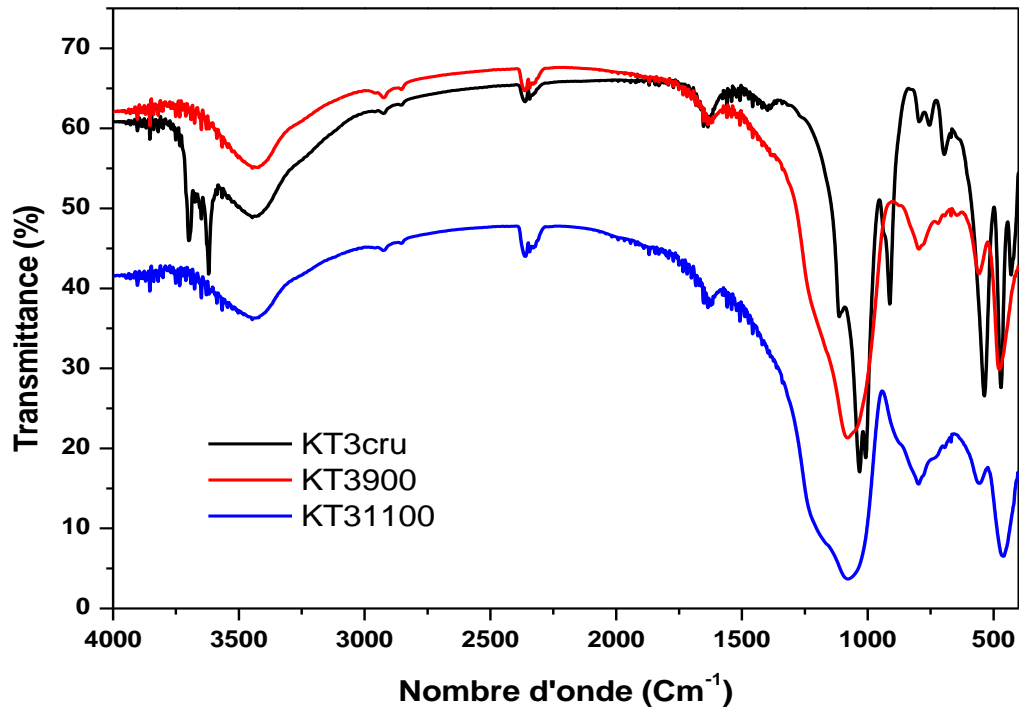
Après la calcination à 900 °C, l'amorphisation du diffractogramme DRX caractéristique du kaolin DD₃ 63 µm est notée. Ce phénomène explique le passage de la kaolinite cristalline à son état amorphe. Le kaolin DD₃ (40 µm) cuit a 900°C présente une proportion prépondérante de mullite primaire.

IV-2-2- Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF)

Les spectres des deux fractions 40 et 63 µm des deux kaolins KT₃ et DD₃ crus, cuits à 900 et 1100 °C étudiés obtenus par IRTF sont représentés sur les figures IV.9 et IV.10.



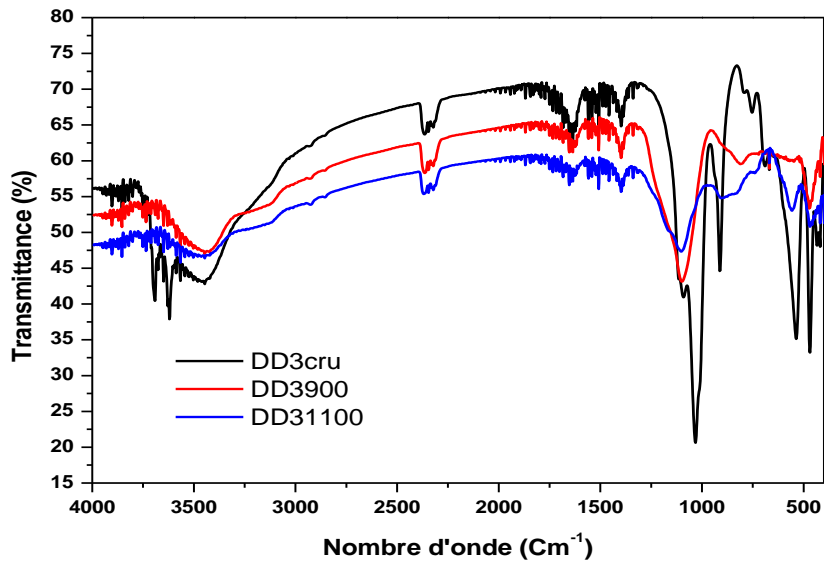
KT₃ 40 µm



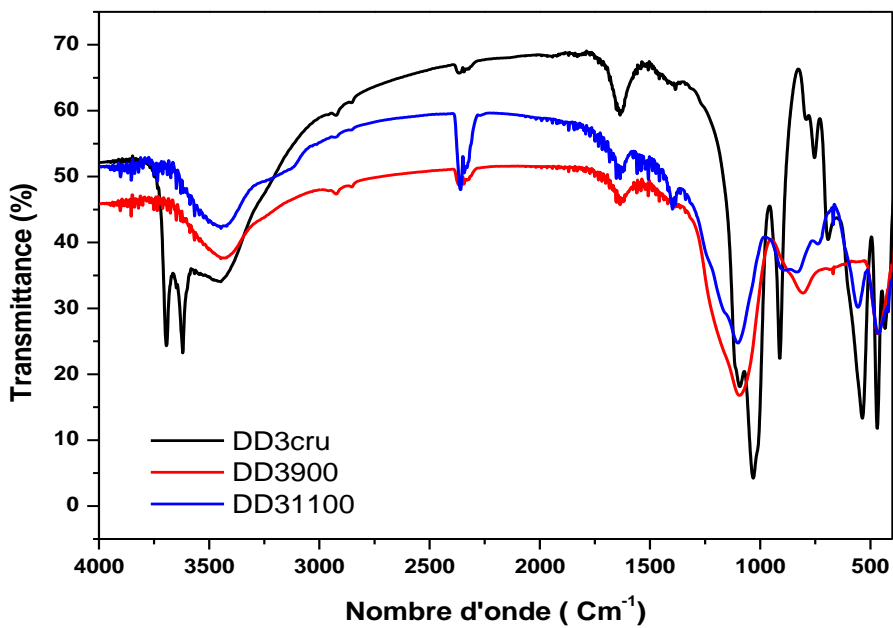
KT₃ 63 µm

Figure IV.9 : Spectres infrarouge à transformée de Fourier du kaolin KT₃ (40 et 63 µm) cru et cuit à 900°C et 1100°C.

D'après les spectres IRTF du kaolin KT₃ (40 et 63 µm) de Tamazert représentés dans la figure IV.9, l'absence des bandes d'absorption des groupements (OH) vers 3697 et 3622 cm^{-1} en fonction de l'augmentation de la température est constatée. Les groupements fonctionnels de la liaison (Si-O) pour ces mêmes échantillons (1112- 992 cm^{-1}) tendent à s'aplatir et en devenir qu'un seul et se rétrécissent au fur et à mesure que la température augmente. Les groupements fonctionnels de la liaison (Si-O-Al^{IV}) situés aux environs de 789 et 752 cm^{-1} tendent aussi à s'atténuer.



DD₃ 40 μm



DD₃ 63 μm

Figure IV.10 : Spectre infrarouge a transformée de Fourier du kaolin DD₃ (40 et 63 μm) cru et cuit à 900°C et 1100°C.

Pour le kaolin DD₃ (40 et 63 µm) de Djebel Debbagh, ces spectres IRTF illustrés dans la figure IV.10 montrent une large bande à 3445 cm⁻¹ représentant le groupement OH qui tend à s'aplatir au fur et à mesure que la température augmente. Les pics localisés entre 1100 et 1200 cm⁻¹ caractérisent la mullite qui augmente avec l'augmentation de la température. Ce phénomène est expliqué par le fait que la stœchiométrie de la mullite change.

IV-3- Propriétés des pièces des kaolins élaborées

Les résultats des tests de durabilité chimique et de microdureté Vickers des pièces frittées à 900 et 1100 °C formées à base des deux kaolins KT₃ et DD₃ (40 et 63 µm) sont regroupés en ce qui suit.

IV-3-3- Durabilité chimique des kaolins

IV-3-3-1- Attaque acide

Le pourcentage des gains en masse des kaolins KT₃ et DD₃ (40 et 63 µm) cuits respectivement à 900°C et 1100°C, après attaque acide sont regroupés dans les tableaux IV.3 et IV.4 et leurs histogrammes correspondants sont représentés dans les figures IV.11 et IV.12.

Tableau IV.3 : Pourcentages des masses des kaolins cuits à 900°C après attaque acide.

| Produits paramètre | KT ₃ | KT ₃ | DD ₃ | DD ₃ |
|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | (63µm) | (40 µm) | (63 µm) | (40 µm) |
| Δm (g) | 0.3388 | 0.6518 | 1.2463 | 1.4027 |
| Δm / m ₀ (%) | 14.44 | 27.73 | 49.84 | 60.77 |

Tableau IV.4 : Pourcentages des masses des kaolins cuits à 1100°C après attaque acide

| Produits paramètre | KT ₃ | KT ₃ | DD ₃ | DD ₃ |
|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | (63 µm) | (40 µm) | (63µm) | (40 µm) |
| Δm (g) | 0.3238 | 0.2810 | 0.2448 | 0.2544 |
| Δm / m ₀ (%) | 12.74 | 11.20 | 10.51 | 11.20 |

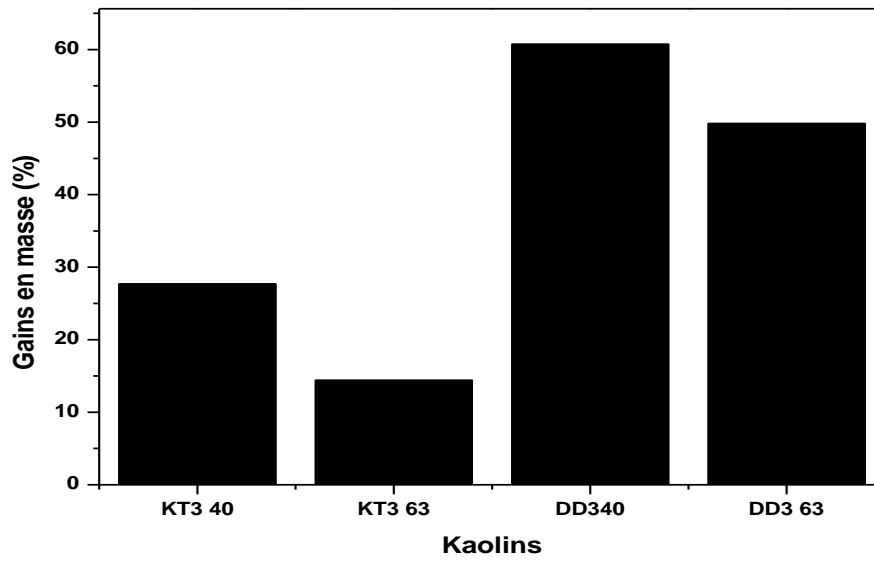


Figure IV.11 : Histogramme des pourcentages des masses des kaolins KT_3 et DD_3 (40 et 63 μm) cuits à 900°C après attaque acide.

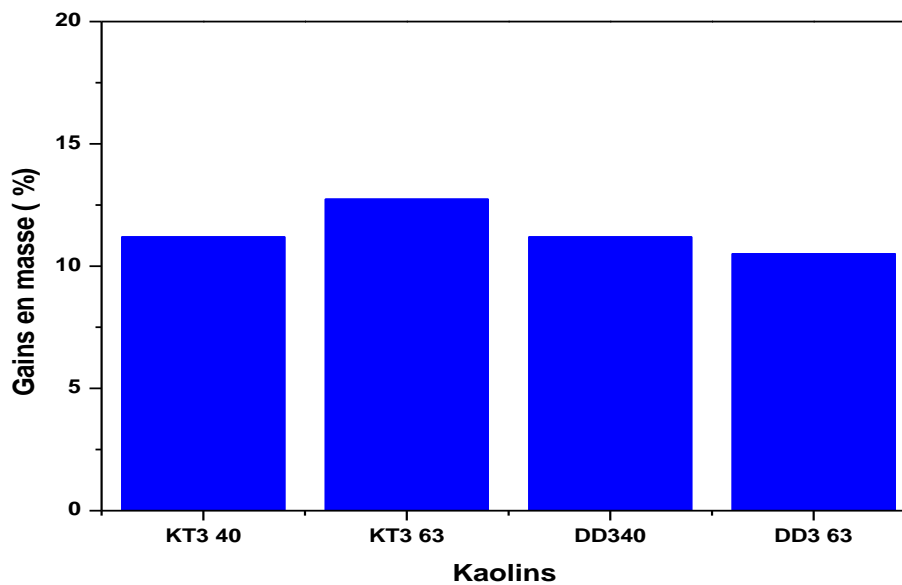


Figure IV.12 : Histogramme des pourcentages des masses des kaolins KT_3 et DD_3 (40 et 63 μm) cuits à 1100°C après attaque acide.

Après l'attaque acide on constate qu'il y ait une variation de masse des pièces en kaolin qui est traduite par leurs gonflements. Cette augmentation de masse après attaque acide dépend de la température de cuisson des pièces, plus précisément : elle diminue avec l'augmentation de la température, ce qui est expliqué par la diminution de la porosité. Ce qui est observé dans le cas du kaolin DD₃ (63 µm) qui passe d'un pourcentage de gain en masse de 49,84% à 900°C à 10,51 % quand il est cuit à 1100 °C.

IV-3-3-2- Attaque basique

Le pourcentage des gains en masse des kaolins KT₃ et DD₃ (40 et 63 µm) cuits respectivement à 900°C et 1100°C, après attaque alcaline sont regroupés dans les tableaux IV.5 et IV.6 et leurs histogrammes correspondants sont représentés dans les figures IV.13 et IV.14.

Tableau IV.5 : Pourcentages des masses des kaolins cuits à 900°C après attaque basique.

| Produits paramètre | KT ₃ (63 µm) | KT ₃ (40 µm) | DD ₃ (63 µm) | DD ₃ (40 µm) |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | Δm (g) | 0.3906 | 0.3938 | 0.5417 |
| $\Delta m / m_0$ (%) | 17.02 | 17.25 | 23.41 | 28.86 |

Tableau IV.6 : Pourcentages des masses des kaolins cuits à 1100°C après attaque basique.

| Produits paramètre | KT ₃ (63 µm) | KT ₃ (40 µm) | DD ₃ (63 µm) | DD ₃ (40 µm) |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | Δm (g) | 0.1711 | 0.1358 | 0.1270 |
| $\Delta m / m_0$ (%) | 6.84 | 6.73 | 5.64 | 5.31 |

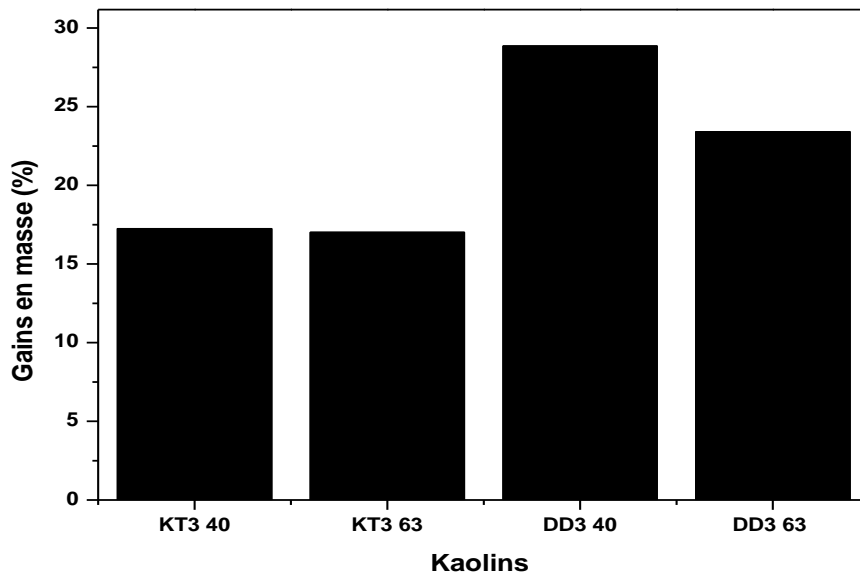


Figure IV.13 : Histogramme des pourcentages des masses des kaolins KT_3 et DD_3 (40 et 63 μm) cuits à 900°C après attaque basique.

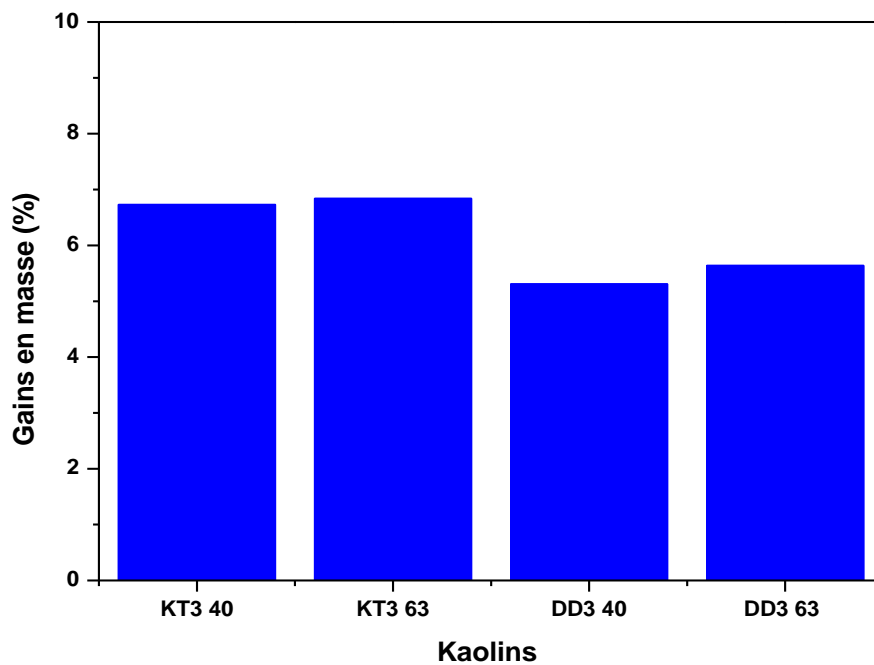


Figure IV.14 : Histogramme des pourcentages des masses des kaolins KT_3 et DD_3 (40 et 63 μm) cuits à 1100°C après attaque basique.

Après l'attaque basique, on constate aussi une augmentation de la masse des pièces en kaolin sauf que celle-ci est moins que celle obtenue après l'attaque acide.

L'augmentation en masse, après l'attaque basique, suit la même tendance, elle diminue avec l'augmentation de la température de cuisson des pièces, ce qui est expliqué par la diminution de la porosité de nos matériaux avec l'augmentation de la température de leur cuisson. Ce qui est visible dans la pastille de DD₃ (63µm) qui a un pourcentage de gonflement qui varie de 23.41% quand elle est cuite à 900°C jusqu'à 5.64% quand elle est cuite à 1100°C.

On peut dire que les pièces de Kaolins : KT₃, DD₃, cuites à 900 et 1100°C ont résistées à l'attaque acide avec HCL ainsi qu'à l'attaque basique avec Na OH car elles ne sont pas détériorées.

IV-3-4- Propriété mécanique des kaolins : Micro dureté Vickers

Les résultats de la microdureté Vickers (Hv 0,5) obtenus pour les kaolins KT₃, et DD₃ (40 et 63 µm) cuits à 900 et 1100°C sont regroupés sur le tableau IV.7 et représentés en figure IV.15

Tableau IV.7 : Valeurs de la micro dureté Vickers (Hv 0,5) des pièces en kaolins KT₃, et DD₃ (40 et 63 µm) cuites à 900°C et 1100°C

| T(°C) | 900 °C | 1100°C |
|-----------------------------|--------|--------|
| KT₃ 63 µm | 2.6265 | 5.6709 |
| DD₃ 63 µm | 1.7241 | 6.5172 |
| KT₃ 40 µm | 1.8578 | 8.9895 |
| DD₃ 40 µm | 1.9452 | 7.2096 |

D'après le tableau IV.7, les valeurs de la microdureté Vickers obtenues montrent que la dureté est fortement liée à la température de cuisson de nos pastilles à base de kaolins qui détermine avec la pression appliquée la densité de nos matériaux.

L'augmentation de la température de cuisson de nos pastilles engendre l'augmentation de la densité qui à son tour engendre l'augmentation de sa dureté. Gross et al [49] et Gao et al [50,51] ont expliqué l'augmentation de la dureté avec l'augmentation de sa densité par sa microstructure qui est responsable de dureté. Une

structure poreuse peut permettre le glissement de la matière et la réorganisation de celle-ci sous la charge ce qui se matérialise par un enfoncement plus profond.

Nous constatons qu'il y ait un comportement quasi linéaire entre la dureté Vickers et la température de cuisson et cela pour les pastilles cuites à 900°C et 1100°C.

En ce qui concerne l'influence de la granulométrie des poudres à kaolin avec lesquelles on a élaboré nos pastilles, on remarque que les pastilles de poudre 40 µm sont plus dures que celles de 63 µm car elles sont plus compactes.

La plus grande valeur de microdureté est attribuée au kaolin KT₃ (63 µm) cuit à 900°C qui est 2,6265 Hv0,5 et KT₃ (40 µm) cuit à 1100°C d'une valeur de 8,9895 Hv 0,5.

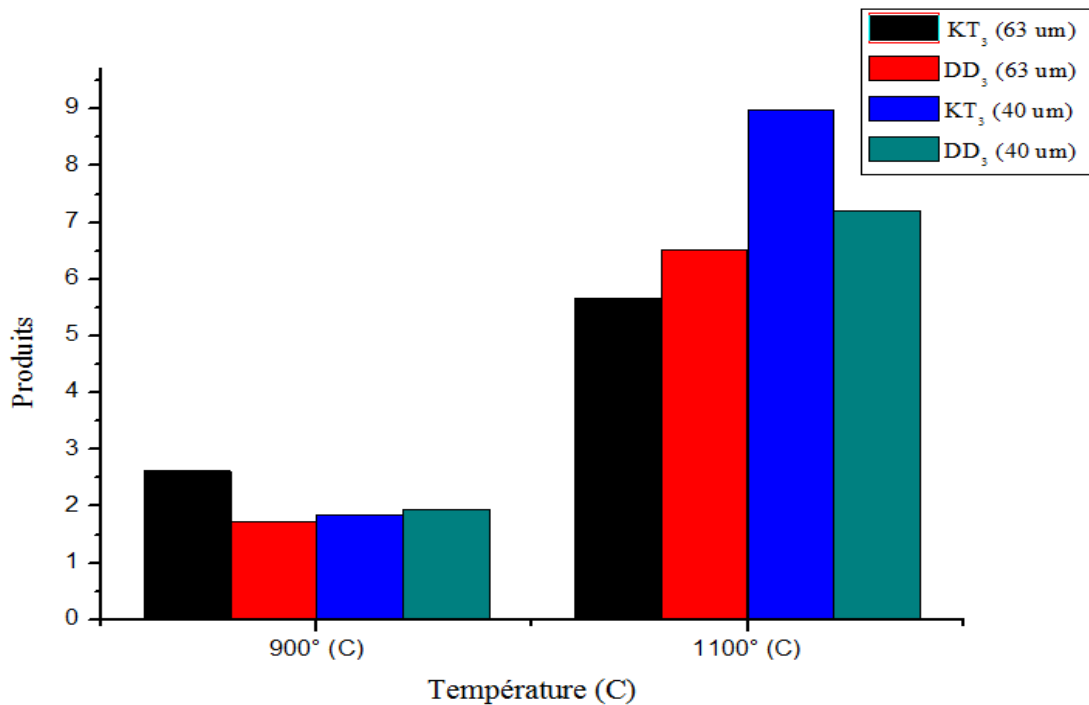


Figure IV.15 : Histogramme des valeurs de micro dureté Vickers (Hv 0,5) des kaolins KT₃, et DD₃ (40 et 63 µm) cuits à 900°C et 1100°C.

Conclusion générale

L'objectif de cette étude, effectuée au Laboratoire de Technologie des Matériaux et du Génie des Procédés (LTMGP), est porté sur la caractérisation de deux kaolins : un produit marchand de Tamazert KT₃ et un kaolin de Djebel Debbagh nommé DD₃ afin de les utiliser comme matières premières de matériaux céramiques destinés à la valorisation d'un déchet plastique, nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- ❖ Les résultats de l'analyse chimique par fluorescence X des kaolins crus de Tamazert et de Djebel Debbagh KT₃ et DD₃ respectivement, ont montré qu'ils ont des teneurs élevées en silice (SiO₂) et des teneurs moins élevées en alumine (Al₂O₃) ;
- Les teneurs en CaO, MgO, Na₂O et TiO₂ sont faibles pour les deux kaolins, à l'exception du DD₃ qui est riche en chaux. Par contre la teneur en K₂O est élevée pour les deux kaolins utilisés à cause de la présence de feldspath potassique et de la muscovite ;
- La teneur en Fe₂O₃ est relativement forte pour les kaolins de Tamazert KT₃, et de Djebel Debbagh DD₃ ou la teneur excède 1% ;
- ❖ Les analyses par DRX avant cuisson révèlent la présence de la muscovite, quartz et kaolinite, Après cuisson ces phases tendent à disparaître en faveur de l'apparition du quartz et de la muscovite ;
- ❖ Les analyses par Spectroscopie Infra-rouge IRTF montrent la présence des principales bandes d'absorption correspondant aux groupements fonctionnels et aux liaisons dans ces kaolins. Les intensités des groupements hydroxyles diffèrent d'un kaolin à un autre, et on a aussi d'autres bandes d'absorption correspondant à l'élongation de la liaison Si-O, et aussi attribués à la déformation des liaisons d'Si-O-Al ;
- ❖ Les pastilles à base des Kaolins : KT₃, et DD₃ (à 40 µm et 60 µm) cuites à 900 et 1100°C ont résisté à l'attaque acide avec H₂SO₄ ainsi qu'à l'attaque basique avec NaOH car elles ne sont pas détériorées ;

- ❖ L'étude de l'évolution en fonction de la température de la dureté Vickers a montré que les kaolins présentent une densification progressive après traitement thermique. Ce résultat met en évidence la bonne tenue mécanique de ces échantillons après traitement thermique.

Malheureusement suite à la pandémie sanitaire, la préparation du déchet (gaine électrique en PVC), sa caractérisation et l'élaboration des composites céramique-déchet ainsi que leurs caractérisations n'ont pas été réalisés.

Références bibliographiques

- [1] Haussonne. J.M, Carry. C, Bowen. P, Barton, J. 2005. « CERAMIQUES ET VERRES. Principes et techniques d'élaboration». Presse polytechnique et universitaires romandes. (Lausanne). Première édition.
- [2] Callister. W.D, Jr.2001. Science est génie des matériaux. Modulo éditeur. Mont-royal (Canada).
- [3] SEYNI A, 2008. "Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produit par Co-broyage". Thèse de Doctorat. Université de Toulouse.
- [4] BILLARD.G, BOUCHER.J, 2019. "L'indispensable réinvention des plastique". La revue de L'institut Veolia. Université of the Pacific.
- [5] MACKENZIE R and MITCHELL.B.D, 1966. "Clay mineralogy. Earth Science Reviews".2: P, 47-91.
- [6] MERROUCHE N, LAHMAR ABBOU F, "Etude théorique et expérimentale des kaolins (Etude par DFT) ". Thèse de Master. Université de Bejaïa, faculté de technologie 2015.
- [7] GUGGENHEIM S, MARTIN R T, 1995. "Definition of clay and clay Mineral: joint report of the AIPEA nomenclature and CMS nomenclature committees". Vol 43.No.2: p, 255-256.
- [8] OBAJE.S O, OMADA J I and DAMBATTA.U.A, 2013." Clays and their Industrial Applications : Synoptic Review". International Journal of Science and Technology, Volume 3. No.5: p, 264-270.
- [9] BRIGATTI M. F, GALAN E, and THENG.B.K.G, 2006. Chapitre2, "Structure and Mineralogy of clay Minerals". Handbook of clay science. Vol 1: p, 19-86.
- [10] CHAMLY H, 1989. "Clay Sedimentology ". Springer-verlag Berlin Heidelberg, New York.
- [11] MURRAY H H, 2000. "Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview". Applied Clay Science. 17: P, 207-221.

- [12] HENIN S, 1956. " Classifications des Minéraux Argileux". Bulletin du Groupe Français des Argiles. Tome 8, Série 3 : p, 29-35.
- [13] CAILLERE S, HENIN S, RAUTUREAU M. « Minéralogie des argiles, ,, Structure et propriétés physico-chimiques ».2ème édition, INRA : Actualités scientifiques et agronomiques 8.éd. Masson, 182 p.1982
- [14] MACKENZIE R C, 1959. "The classification and nomenclature of clay minerals". Clay minerals. 4(21) : p, 52-66.
- [15] PEDRO G, 1967. " Commentaire sur la classification et la nomenclature des minéraux argileux". Bulletin du groupe français des argiles. Tome 19. Fascicule 1 : p, 69-86.
- [16] SIAD.A.H, 2014. " Caractéristiques d'adsorption du kaolin modifié". Mémoire de master : chimie des matériaux. Université LARBI BEN M'HIDI (OUM EL BAOUAGHI).
- [17] CHEN C Y, LAN G S, TUAN.W.H, 2000. "Microstructural evolution of mullite during the sintering of kaolin powder compacts". Ceramic international. 26: P, 715-720.
- [18] KONESHLOO M, CHILES J P, 2010. "Modeling of the kaolin deposits and reserve classification challenges of Charentes Basin, France". International Journal of Mining end Environmental Issues. Vol.1. No.1: P, 55-63.
- [19] PRASAD M S, REID.K.J and MURRAY.H.H, 1991." Kaolin: processing, properties and applications". Applied Clay Science. 6: P, 87-119.
- [20] LAKEL A GH, 2009. " Etude de la microstructure de quelques kaolin avec la méthode de Warren et AverBach". Magister en physique. Université MENTOURI- Constantine.
- [21] SORO N S, 2003. "Influence des ions fer sur les transformations thermique de la kaolinite". Thèse de Doctorant. Science des matériaux céramiques et traitements de surface. Université de LIMOGES.
- [22] GRIDI BENNADJI F, 2007. " Matériaux de mullite à microstructure organisée composés d'assemblages muscovite-kaolinite". Thèse de Doctorat. Matériaux céramiques et traitement de surface. Université de LIMOGES.
- [23] The product solid phases, 2007. "Geological Sequestration Of Carbon Dioxide". Thermodynamics, Kinetics and Reaction Path Modeling. P, 79-167.

- [24] HAUSSONNE.J.M, CARRY.C, BOWEN.P, BARTON.J, 2005. « Céramiques et verres : principes et techniques d'élaboration ». Presses polytechnique et universitaires romandes. Lausanne. 1ère édition.
- [25] RING.T.A, 1996. « Fundamentals of ceramic powder processing and synthesis ». Academic press. San Diego.
- [26] JANSSEN.J.P, 2004. « Is thoracoscopic talc pleurodesis really safe ». Monaldi Arch Chest Dis, 61 (1). 35-38.
- [27] BRONGRIANT.A, 1844. « Traité des arts céramiques ou des poteries considérées dans leur histoire, leur pratique et leur théorie ». Académie Royale des sciences. Paris. Volume 1.
- [28] MERCIER.J.P, ZAMBELLI.G, KURZ.W, 1999. « Introduction à la science des matériaux ». Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne. 3ème édition.
- [29] MARY.J.P, ORLIAC.PH, TISON.V, POIRIER.TH and GAILLARD.J.M, 2015 « technologie céramique ». Institut de céramique française.1-390p.
- [30] FANTOZZI.G, NIEPCE.J.C, BONNEFONT.G, 2013. « Les céramiques industrielles ». Dunod, paris. 2013.
- [31] LEBSSISSE.L, 2017. « Synthèse, étude structural et morphologie des nouveaux matériaux en céramique ». Mémoire de fin d'étude. Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [32] AISSOU.S, TIGHZERT.W, 2009. « Traitement thermiques des kaolins locaux et leurs propriétés chimiques et mécaniques ». Mémoire de fin de cycle. Université de Bejaia. Faculté de Technologie.
- [33] LEMAITRE.J, LEONARD.A.J, DELMON.B, 1982. « Le mécanisme de la transformation thermique de la métakaolin ». Bulletin de Minéralogie. Volume 105.5.
- [34] BOUNIB.H, 2013. « Elaboration et caractérisation microstructurale et mécanique des réfractaires à base de kaolin DD3 et la dolomie (5-20% poids) » Thèse de Doctorat ES-Science. Université FERHAT ABBAS- Setif 1.
- [35] BAILON.J.P, DORLOT.J.M, 2000. « Des matériaux ». Presses internationales polytechnique. Montréal. 3ème édition.

- [36] TRAORE.B, 2018. “Élaboration et caractérisation d’une structure composite (sable et déchet plastique recyclés) : Amélioration de la résistance par des charges en argiles“. Thèse de Doctorat, matériaux. Université Bourgogne Franche-Comté : Université Félix Houphouët-Boigny.
- [37] PANDA. A. K, SINGH. R. K, MISHRA. D. K, 2010. “Thermolysis of waste plastic to liquid fuel: A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products- A world prospective “. Renewable and sustainable energy reviews, 14(1), 233-248.
- [38] BEMMAMI.K.E, TCHOUAR.A, 2016-2017. “Conception et réalisation d’une unité de recyclage- plastique“. Projet de fin d’étude. Génie industriel. Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen.
- [39] DJEFFAL.H, YOUNESCHAOUCHE.Y, 2016-2017. “Le recyclage des déchets plastiques dans le cadre du développement durable : cas des entreprise de recyclage de la wilaya de Tizi-Ouzou“. Mémoire de Master en Science Économiques. Université Mouloud
- [40] BENMEKIDECHE- GOUISSEM. L, 2015. “Étude de l’effet des paramètres de transformation et des extenseurs de chaines sur les propriétés du poly (éthylène téréphtalate) (PET) recyclé“. Thèse de Doctorat, Génie des polymères. Université Ferhat Abbas Sétif-1.
- [41] BILLARD.G, BOUCHER.J, 2019. “L’indispensable réinvention des plastique“. La revue de L’institut Veolia. Université of the Pacific.
- [42] SEYNI. A, 2008. “Propriétés physico-chimiques et d’usage de matériaux composites à charge dégradable produit par Co-broyage“. Thèse de Doctorat. Université de Toulouse.
- [43] HIDOURI.A, 2017-2018. “Cours de caractérisation des matériaux au profil des étudiant de 1^{ère} année licence génie mécanique“. Technologie à l’institut supérieur des études technologiques de Gafsa.
- [44] Mission chinoise, »Travaux géologique sur la prospection du gisement du kaolin sableux de Tamazert. Octobre 1968.
- [45] ENOF, entreprise national des produits miniers non ferreux et des substances utile.32, rue Mohamed Hattab Belfort, Alger. Algérie 2009.

- [46] Serna F., Lagneau J., Carpentier J.M., « La diffraction des rayons X : une technique puissante pour résoudre certains problèmes industriels et technologiques », chimie nouvelle 116 - octobre (2014).
- [47] Ghosh S.N, Handoo S.K.1992. «infrared and raman spectral studies » .cement and concrete research. N°10, p 717-782.
- [48] W.D. Callister. Jr. Science est génie des matériaux. Modulo éditeur. Mont-royal (Canada) 2001.
- [49] K. A. GROSS and L. M. RODRIGUEZ-LORENZ .2004. Biomaterials, vol. 25, num. 7-8, pp.1385-1394.
- [50] L. GAO, J.S. HONG, H. MIYAMOTO, S.D.D.L. TORRE. .2000. Journal of the European Ceramic Society, vol. 20, num. 12, pp. 2149-2152.
- [51] L. GAO, H. Z. WANG, J. S. HONG, H. MIYAMOTO, K. MIYAMOTO, Y. 1999.NISHIKAWA and S.D.D.L. TORRE, Journal of the European Ceramic Society, vol. 19, num. 5, pp.609-61

Résumé

Les déchets plastiques prennent de plus en plus d'ampleurs dans le monde en général et en Algérie particulièrement. De tout temps l'homme a cherché à les exploiter pour se nourrir, pour produire de l'énergie, pour construire, améliorer et agrémenter son habitat, pour se protéger et se vêtir, pour se déplacer et transporter, mais aussi pour décorer. C'est dans cette optique qu'on se propose de les réutiliser comme ajout dans les céramiques à base du kaolin

Ce travail fait partie d'un projet de recherche sur les caractérisations physico-chimique de quelques kaolins produits marchands prélevés sur le site de Tamazert (Jijel) KT₃ et de Djebel Debbagh (DD₃) pour la fabrication des produits céramiques ont constitué l'objectif d'analyses physico-chimiques. Afin d'arriver à des conclusions pratiquement exploitable, il a été nécessaire d'introduire des analyses de microstructures telles que : DRX et l'IRTF.

Pour cela, une étude expérimentale a été menée sur les traitements thermiques de ces kaolins crus et cuits à 900 et 1100°C ont provoqué l'apparition et la disparition de nouvelles phases minéralogiques.

Par frittage, des pièces à base de ces kaolins de deux granulométries différentes (40 et 63µm) cuites à différentes températures (900 et 1100°C) sont élaborées et cela sans ajout de liants, leur caractérisations chimiques (durabilité chimique) ainsi que leurs propriétés mécaniques (dureté Vickers) ont été déterminés les résultats s'avèrent intéressants tant sur le plan résistance chimique ou mécanique.

Mot clés : déchet plastique, céramique, caractérisation, propriétés, DRX, IRTF.

Abstract

Plastic waste is on the increase in the world in general and in Algeria in particular. Man has always sought to exploit them for food, to produce energy, to build, improve and enhance their habitat, to protect and clothe themselves, to move and transport, but also to decorate. It is with this in mind that we propose to reuse them as an addition in kaolin-based ceramics.

This work is part of a research project on the physico-chemical characterizations of some kaolins market products sampled from the site of Tamazert (Jijel) KT₃ and Djebel Debbagh (DD₃) for the manufacture of ceramic products was the objective of 'physico-chemical analyzes. In order to reach practically exploitable conclusions, it was necessary to introduce analyzes of microstructures such as: DRX and IRTF.

To do this, an experimental study was carried out on the heat treatments of these raw kaolins cooked at 900 and 1100 ° C, causing the appearance and disappearance of new mineralogical phases.

By sintering, parts based on these kaolins with two different grain sizes (40 and 63µm) fired at different temperatures (900 and 1100 ° C) are produced without adding binders, their chemical characterizations (chemical durability) as well as their mechanical properties (Vickers hardness) were determined the results are interesting both in terms of chemical or mechanical resistance.

Keywords: plastic waste, ceramic, characterization, properties, DRX, IRTF.