



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE - ANNABA

Département de Génie Minier, de la Métallurgie et des Matériaux (G3M)

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme de MASTER

Domaine : Science et technologie

Filière : Génie minier

Spécialité : Contrôle de Terrain avancé

Présenté par

SAIDI Adam Younes

Contribution à l'Etude Pétrographique du Gisement de Kaolin de Tamazert, Jijel, NE Algérie

Encadré par

Dr. AICHOURI Imen. MCA

Ecole Nationale Supérieure de la Technologie et d'Ingénierie –ENSTI- Annaba

Membres du jury :

- | | | |
|------------------------|--------------|--------------|
| ▪ Dr. MESSAI Ali. MCB | Président | ENSTI Annaba |
| ▪ Dr. Habes Sameh. MCA | Examinatrice | ENSTI Annaba |

Remerciement

ربي إني أستودعك ما تعلمته وفهمته، فردّه إلي ساعة حاجتي له ان شئت يا رب العالمين
يا نور السماوات والأرض افتح علي فتحةً مبيناً و اجعل لي من لدنك سلطاناً نصيراً.
إني أعوذ بك ربي من قلب لا يخشع، ومن دعاء لا يسمع، ومن نفس لا تشبع، ومن علم لا ينفع.

D'abord, je tiens à remercier Dieu de m'avoir donné le temps et
l'opportunité d'accomplir ce présent travail

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou
de loin, à la réalisation de ce mémoire.

À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien indéfectible,
sources constantes de force et d'inspiration.

À mes frères et sœurs, pour leur présence bienveillante et leurs encouragements tout au long
de mon parcours.

À mes amis, dont l'amitié sincère a illuminé mon quotidien et enrichi cette expérience.

À mon encadrante, pour son accompagnement précieux, sa rigueur, sa patience et ses conseils
éclairés qui ont guidé mes pas avec exigence et bienveillance.

À vous tous, je dis merci, du fond du cœur.

Résumé

Le gisement de Tamazert est situé dans la Petite Kabylie (Kabylie de Collo), au sein de l'édifice métamorphique des Beni Ferguene. Il repose sur un socle cristallophyllien structuré et affecté par la tectonique. Les roches encaissantes sont principalement des gneiss, des micaschistes et localement des granites gneissiques.

Le kaolin se présente sous forme de lentilles localisées dans une zone d'altération intense des gneiss, prenant la forme d'un anticlinal à flancs doux, subdivisé en quatre corps principaux (Central, Nord, Oriental et Sidi Kader). L'altération in situ est à l'origine de la kaolinisation, parfois accompagnée de quartzites qui structurent les reliefs.

Le kaolin est une argile blanche issue de l'altération des feldspaths, composée principalement de kaolinite, un silicate d'aluminium hydraté. Il se distingue par sa structure lamellaire, sa faible dureté, sa blancheur et son inertie chimique, ce qui lui confère de nombreuses applications industrielles.

Ses domaines d'utilisation sont variés : industrie papetière, céramique, peintures, plasturgie, caoutchouc, cosmétique, pharmacie, fibres de verre et réfractaires. Chaque secteur exploite des propriétés spécifiques du kaolin, telles que sa finesse, sa blancheur ou sa résistance thermique. Cette étude a pour objectif de caractériser les propriétés minéralogiques, chimiques et granulométriques des différentes variétés de kaolin issues du complexe d'El Milia, en particulier les échantillons KT1 (Brut Blanc et Brut Marron), KT2, KT3. Elle vise à approfondir la compréhension des mécanismes d'altération ayant conduit à la formation de ce minéral, tout en évaluant son potentiel pour diverses applications industrielles.

Pour affiner cette analyse et mieux valoriser le gisement de kaolin de Tamazert, des investigations pétrographiques et minéralogiques complémentaires ont été menées. Ces dernières ont fait appel à des techniques avancées telles que la microscopie électronique à balayage (MEB) et la diffraction des rayons X (DRX), permettant une caractérisation détaillée de la structure et de la texture des minéraux présents.

L'ensemble des analyses menées sur les produits du complexe des kaolins d'El Milia, notamment les échantillons bruts (KT1 : brut marron et brut blanc) et traités (KT2 et KT3), permet de mettre en évidence l'impact significatif des traitements sur la qualité minéralogique et industrielle du kaolin.

L'analyse MEB/EDS/DRX confirme cette évolution qualitative, avec une distribution chimique plus homogène et une diminution des éléments indésirables dans les kaolins traités.

Mots clés : Kaolin, MEB, Pétrographie, Tamazert, DRX.

Abstract

The Tamazert deposit is located in the Petite Kabylie (Kabylie of Collo), within the metamorphic complex of Beni Ferguene. It lies on a structured crystalline basement affected by tectonic activity. The host rocks are mainly gneisses, micaschists, and, locally, gneissic granites

Kaolin occurs in the form of lenses located within a zone of intense gneiss alteration, forming a gently dipping anticlinal structure, subdivided into four main bodies (Central, North, East, and Sidi Kader). The in-situ alteration is responsible for the kaolinization, sometimes accompanied by quartzites that shape the local reliefs.

Kaolin is a white clay resulting from the alteration of feldspars, composed primarily of kaolinite, a hydrated aluminum silicate. It is characterized by its lamellar structure, low hardness, whiteness, and chemical inertness, which make it suitable for numerous industrial applications.

Its fields of use are diverse: paper industry, ceramics, paints, plastics, rubber, cosmetics, pharmaceuticals, fiberglass, and refractories. Each sector utilizes specific properties of kaolin, such as its fineness, whiteness, or thermal resistance.

This study aims to characterize the mineralogical, chemical, and granulometric properties of various types of kaolin extracted from the El Milia complex, particularly the samples KT1 (Raw White and Raw Brown), KT2, and KT3. It seeks to deepen the understanding of the alteration mechanisms that led to the formation of this mineral, while also assessing its potential for various industrial uses.

To refine this analysis and better exploit the kaolin deposit of Tamazert, additional petrographic and mineralogical investigations were conducted. These employed advanced techniques such as Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray Diffraction (XRD), allowing for a detailed characterization of the structure and texture of the present minerals.

All analyses conducted on products from the El Milia kaolin complex, particularly the raw (KT1: Raw Brown and Raw White) and processed samples (KT2 and KT3), highlight the significant impact of treatment on the mineralogical and industrial quality of the kaolin.

The SEM/EDS/XRD analyses confirm this qualitative improvement, showing a more homogeneous chemical distribution and a reduction in undesirable elements in the treated kaolins.

Keywords: Kaolin, SEM, Petrography, Tamazert, XRD.

المخلص

يقع منجم تمازيرت في منطقة القبائل الصغرى (قبائل القل)، ضمن البنية المتحولة لبني فرغون. ويستند إلى قاعدة صخرية بلورية مفلطحة، تعرضت لتشوهات تكتونية. وتتكوّن الصخور الحاضنة أساسًا من النيس، والميكاشيست، وأحيانًا من الغرانيت النيسي.

يظهر الكاولين على شكل عدسات محلية ضمن منطقة شهدت تجوية شديدة لصخور النيس، تأخذ شكل طية محدبة (أنتيكلينال) ذات جوانب مائلة بلطف، وتنقسم إلى أربعة أجسام رئيسية: المركزي، الشمالي، الشرقي، وسيدي قادر. وينتج الكاولين عن عملية تجوية موضعية، غالبًا ما تكون مصحوبة بتشكّل صخور الكوارتزيت التي تسهم في تشكيل التضاريس. الكاولين هو طين أبيض يتكون نتيجة تجوية الفلسبارات، ويتكوّن أساسًا من الكاولينيت، وهو سيليكات ألومنيوم مائية. يتميز الكاولين ببنيته الصفائحية، ونعومته، ولونه الأبيض، وخموله الكيميائي، مما يجعله ذا أهمية في العديد من التطبيقات الصناعية.

تتعدد مجالات استخدامه، وتشمل: صناعة الورق، السيراميك، الدهانات، البلاستيك، المطاط، مستحضرات التجميل، الأدوية، الألياف الزجاجية، ومواد الحرارية. ويستفيد كل قطاع من خصائص معينة للكاولين مثل النعومة، والبياض، والمقاومة الحرارية.

تهدف هذه الدراسة إلى توصيف الخصائص المعدنية والكيميائية والحبيبية لمختلف أنواع الكاولين المستخرجة من مركب الميلية، وبشكل خاص العينات: KT1 (الخام الأبيض والخام البني)، KT2 و KT3. كما تسعى إلى تعميق الفهم لآليات التجوية التي أدت إلى تكوّن هذا المعدن، إلى جانب تقييم إمكاناته في مختلف التطبيقات الصناعية. ومن أجل تحسين هذه الدراسة وتعزيز استغلال منجم كاولين تمازيرت، تم إجراء تحقيقات إضافية في علم الصخور والمعادن، باستخدام تقنيات متقدمة مثل المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) وحيود الأشعة السينية (DRX)، مما أتاح توصيفًا دقيقًا لبنية وتركيب المعادن الموجودة.

وتبرز جميع التحاليل المنجزة على منتجات مجمع الكاولين بالميلية، سواء العينات الخام: KT1 (الخام البني والأبيض) أو المعالجة (KT2 و KT3)، التأثير الواضح لعمليات المعالجة على تحسين الجودة المعدنية والصناعية للكاولين. وقد أكدت تحاليل MEB/EDS/DRX هذا التحسّن النوعي، من خلال توزيع كيميائي أكثر تجانسًا، وانخفاض في تركيز العناصر غير المرغوب فيها في الكاولين المعالج.

الكلمات المفتاحية: الكاولين، المجهر الإلكتروني الماسح، البتروغرافيا، تمازيرت، حيود الأشعة السينية.

Liste des Abréviations

K.H.D : Kloeckner Humboldt Deutz

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

KT1 : Kaolin Tamazert 1

KT2 : Kaolin Tamazert 2

KT3 : Kaolin Tamazert 3

EDS : Spectrométrie de Dispersion d'Énergie

MEB : Microscopie Électronique à Balayage

DRX : Diffraction des Rayons X

SOALKA : Société Algérienne du Kaolin

FWC : Federal White Cement

ENOF : Entreprise Nationale Des Produits Miniers Non Ferreux

ENSTI : École Nationale Supérieure de Technologie Industrielle

UBMA : Université Badji Mokhtar - Annaba

Liste des Tableaux

Tableau II.1: Carte d'identité de Kaolin.....	10
Tableau IV.1: Analyse chimique en poids (%).....	20
Tableau IV.2: Composition minéralogique en poids (%).....	20
Tableau IV.3: Analyse granulométrique en poids (%).....	21
Tableau IV.4: Propriétés physiques.....	22
Tableau IV.5: Résultats d'analyse EDS de l'échantillon KT1 (brut marron).....	23
Tableau IV.6: Résultats d'analyse EDS de KT1 (brut blanc).....	24
Tableau IV.7: Résultats d'analyse EDS de Kaolin KT2.....	25
Tableau IV.8: Résultats d'analyse EDS de l'échantillon KT3.....	26

Liste des Figures

Figure I.1: Gisement de Tamazert.....	5
Figure I.2 : Localisation géographique du gisement de Kaolin	5
Figure I.3: Carte géologique du gisement de Tamazert.....	6
Figure I.4: La texture du corps minéral.....	7
Figure II.1: Les applications industrielles du kaolin	11
Figure II.2: L'exploitation dans le corps central.....	12
Figure II.3: Enrichissement du kaolin brut : lévigation par cyclone, filtration et séchage.....	13
Figure III.1 : Microscopie Électronique à Balayage (MEB) de l'ENSTI.....	16
Figure III.2 : Appareil DRX (Département de physique à l'UBMA).....	17
Figure III.3: Échantillons de : KT1(brut blanc et brut marron), KT2, KT3.....	18
Figure IV.1: Spectre EDS de l'échantillon brut marron.....	22
Figure IV.2: Cartographie élémentaire EDS de l'échantillon KT1 (brut marron).....	23
Figure IV.3: Spectre EDS de l'échantillon KT1 (brut blanc).....	23
Figure IV.4: Cartographie élémentaire EDS de l'échantillon KT1 (brut blanc).....	24
Figure IV.5: Spectre EDS de l'échantillon KT2.....	24
Figure IV.6: Cartographie élémentaire EDS de l'échantillon KT2.....	25
Figure IV.7: Spectre EDS de l'échantillon KT3.....	25
Figure IV.8: Cartographie élémentaire EDS de l'échantillon KT3.....	26
Figure IV.9: Spectre DRX de l'échantillon brut marron.....	27
Figure IV.10: Spectre DRX de l'échantillon brut blanc.....	27
Figure IV.11: Spectre DRX de l'échantillon KT2.....	27
Figure IV.12: Spectre DRX de l'échantillon KT3.....	28

Sommaire

Remerciement.....	I
Résumé	II
Abstract.....	III
المخلص.....	IV
Liste des Abréviations	V
Liste des Tableaux	VI
Liste des Figures	VII
Introduction Générale	1
Chapitre I : Présentation de la Zone d'Etude	3
Introduction	4
1. La Société des Kaolins d'Algérie (SOALKA)	4
2. Gisement de Tamazert.....	4
2.1. Caractéristiques du gisement.....	4
2.2. Situation géographique du gisement	5
2.3. Etude géologique du gisement.....	6
2.4. Etude minéralogique du gisement	7
3. Conclusion.....	7
Chapitre II : Recherche Bibliographique.....	8
Introduction	9
.1 Généralités sur le Kaolin	9
1.1. Couleur	9
1.2. Morphologie et taille des particules	9
1.3. Dureté.....	9
2. Carte d'identité.....	10
3. Domaines d'application des kaolins.....	10
3.1. Industrie papetière	10
3.2. Céramiques.....	10
3.3. Charges minérales	10
3.4. Peintures	11
3.5. Caoutchouc.....	11
3.6. Cosmétique et pharmaceutique.....	11
3.7. Fibres de verre.....	11

3.8. Plasturgie	11
3.9. Réfractaires.....	11
4. Organisation de l'exploitation de la carrière.....	11
5. Méthode d'exploitation de la carrière.....	12
6. Abattage sélectif du kaolin : critères et moyens	12
7. Traitement du Kaolin de Tamazert à l'usine de Tenefdour	12
Conclusion.....	13
Chapitre III : Étude Pétrographique et Minéralogique	15
Introduction	16
1. Méthodologie	16
1.1. L'analyse par Microscope électronique à balayage (MEB)	16
1.2. L'analyse minéralogique du kaolin par diffraction des rayons X (DRX)	17
1.3. Préparation des Échantillons	17
Conclusion.....	18
Chapitre IV : Résultats et Discussion	19
Introduction	20
1. Composition chimique	20
2. Composition minéralogique	20
3. Analyse granulométrique	21
4. Propriétés physiques.....	22
5. Résultats issus des analyses MEB, EDS et de la cartographie élémentaire.....	22
5.1. Interprétation des résultats de l'analyse minéralogique par MEB.....	26
6. L'analyse minéralogique du kaolin par (DRX).....	27
6.1. Interprétation des résultats de l'analyse minéralogique par DRX.....	28
Conclusion.....	29
Conclusion Générale	30
Références Bibliographiques	31

Introduction Générale

Le kaolin est une argile blanche, douce et plastique, essentiellement constituée de particules fines en forme de plaquettes. Grâce à sa texture et à ses propriétés physico-chimiques, il est largement utilisé dans divers secteurs industriels tels que la céramique, la papeterie, les matériaux réfractaires, la peinture, le caoutchouc et les plastiques.

En Algérie, plusieurs gisements de kaolin ont été identifiés, notamment ceux d'El Milia (wilaya de Jijel) et de Djebel Debbagh (wilaya de Guelma), actuellement en phase d'exploitation [1]. Ces deux gisements couvrent environ 30 % de la demande locale en kaolin.

Parmi eux, le gisement de Tamazert, situé à El Milia dans l'est algérien, s'est formé à la suite d'un processus d'altération hydrothermale de roches feldspathiques riches en potassium. Connu depuis 1925, ce gisement a fait l'objet d'une première exploitation industrielle en 1932 par une société française [2]. Toutefois, l'exploitation a été rapidement abandonnée après seulement trois mois, en raison d'une teneur élevée en hydroxydes de fer et en séricite, des impuretés qui, à l'époque, ne pouvaient être éliminées avec les procédés de traitement disponibles.

Ce gisement a par la suite fait l'objet de nombreuses campagnes de prospection et d'études menées par divers organismes, tels que [3] :

- La mission géologique chinoise ;
- Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) ;
- La Sonarem ;
- Le groupe K.H.D.

Des échantillons ont également été soumis à des analyses techniques approfondies par plusieurs laboratoires internationaux, dont :

- Le laboratoire Zurich Bouz Allen ;
- Le laboratoire roumain Venotpic ;
- La Dravo Corporation (États-Unis) ;
- Le groupe K.H.D.

Le gisement de kaolin de Tamazert se situe en Petite Kabylie (région de Collo), dans l'unité métamorphique des Beni Ferguene. Il repose sur un socle cristallophyllien intensément déformé, composé principalement de gneiss, de micaschistes et ponctuellement de granites gneissiques. Le kaolin y apparaît sous forme de lentilles, formées par l'altération intense des gneiss dans une structure anticlinale à flancs doux. Ce processus d'altération, en grande partie in situ, est à l'origine de la kaolinisation, parfois accompagnée de formations quartzitiques.

Le kaolin est une argile blanche issue de la décomposition des feldspaths, constituée essentiellement de kaolinite — un silicate d'aluminium hydraté. Sa structure lamellaire, sa blancheur, sa faible dureté et son inertie chimique lui confèrent des propriétés recherchées dans de nombreuses industries : papeterie, céramique, peintures, plasturgie, cosmétique, pharmacie, caoutchouc, fibres de verre et matériaux réfractaires [4].

L'objectif de cette étude est de caractériser les propriétés minéralogiques, chimiques et granulométriques des différentes variétés de kaolin extraites du complexe d'El Milia, notamment les échantillons KT1 (bruts blanc et marron), KT2 et KT3. Elle vise également à mieux comprendre les processus d'altération à l'origine de ce minéral et à évaluer son potentiel pour des usages industriels spécifiques.

Afin de mieux valoriser le gisement de Tamazert, des analyses complémentaires ont été réalisées, notamment par microscopie électronique à balayage (MEB), spectrométrie dispersive en énergie (EDS) et diffraction des rayons X (DRX). Ces méthodes ont permis une caractérisation fine de la texture, de la structure et de la composition chimique des minéraux présents.

Les résultats obtenus montrent clairement que le traitement appliqué aux kaolins bruts (KT1) améliore considérablement leur qualité. Les kaolins traités (KT2 et KT3) présentent une composition chimique plus homogène, une blancheur accrue, une surface spécifique plus élevée et une réduction significative des impuretés (oxydes de fer et de titane), confirmée par les analyses MEB/EDS/DRX. Ces évolutions témoignent du potentiel industriel croissant de ces produits après traitement.

Chapitre I :

Présentation de la Zone d'Etude

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

Introduction

L'exploitation des ressources minérales joue un rôle stratégique dans le développement économique de nombreux pays, notamment ceux disposant d'un sous-sol riche et diversifié comme l'Algérie. Parmi les substances minérales d'intérêt croissant figure le kaolin, une argile blanche utilisée dans une large gamme d'industries grâce à ses propriétés physico-chimiques particulières.

Dans ce contexte, la Société des Kaolins d'Algérie (SOALKA) se distingue comme l'un des principaux acteurs du secteur minier national, spécialisée dans l'extraction, le traitement et la commercialisation du kaolin. Avec des unités de production modernes, notamment à El-Milia (Jijel) et Djebel Debbagh (Guelma), SOALKA répond à la fois aux besoins du marché local et aux exigences des marchés internationaux.

1. La Société des Kaolins d'Algérie (SOALKA)

C'est une entreprise spécialisée dans l'exploitation minière, la commercialisation et le développement des produits miniers, en particulier le kaolin. Fondée pour répondre à la demande croissante de kaolin en Algérie et sur les marchés internationaux, SOALKA possède et exploite deux principales unités de production de kaolin : le Complexe des Kaolins d'El-Milia à Jijel et la Mine Djebel Debbagh à Guelma.

La structure de propriété de SOALKA se compose principalement de deux actionnaires principaux : Federal White Cement (FWC) Canada, qui détient 63 % des parts, et ENOF, qui détient les 37 % restants. Cette structure d'actionariat permet à SOALKA de bénéficier d'une solide assise financière et de ressources techniques pour mener à bien ses opérations minières [5].

2. Gisement de Tamazert

2.1. Caractéristiques du gisement

Le gisement de Tamazert se présente sous forme d'un anticlinal aux flancs doux, divisé en quatre corps principaux : Central, Nord, Oriental et Sidi Kader. Le kaolin, associé à une zone d'altération, forme une couche arianisée et kaolinisée [6].

- Corps Central : le plus important, s'étend sur 600 m de long et 130 à 480 m de large.
- Corps Nord : orienté comme le Corps Central, avec une surface de 420 m × 240 m.
- Corps Oriental : plus étroit, avec des dimensions de 440 m × 10 à 50 m.
- Corps Sidi Kader : situé dans un bloc tectonique, formant une cuvette de 100 m × 80 m.

L'exploitation du kaolin est assurée par l'usine SOALCA-ENOF, qui applique un procédé de lévigation pour enrichir le kaolin (KT2) jusqu'à 65 % de kaolinite. Cependant, des résidus de quartz et de micas (10-20 %) ainsi que des impuretés comme l'oxyde de fer persistent, pouvant altérer la qualité et la réfractivité du matériau [3].

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude



Figure I.1: Gisement de Tamazert

2.2. Situation géographique du gisement

La région de M'chatt, où se situe le gisement de kaolin de Tamazert, est une zone montagneuse côtière densément boisée, traversée par de nombreux ravins et cours d'eau se déversant dans les oueds El Kebir et Zhour. Son altitude maximale atteint 701 mètres. Le climat est méditerranéen, avec des précipitations hivernales (octobre à mars) atteignant 1100 mm par an. Le gisement de Tamazert, situé au Nord-Est de l'Algérie, se trouve dans la Kabylie de Collo, à 45 km de Jijel, à 17 km au Nord d'El Milia, et à une altitude moyenne de 580 mètres, ses coordonnées géographiques sont approximativement $X = 6,254^\circ$ et $Y = 36,841^\circ$. Il est entouré par [3,7]:

- La mer Méditerranée au nord,
- Collo à l'est,
- Sidi Maarouf au sud,
- Jijel à l'ouest.

L'accès au site se fait via la route C.W.132 b, reliant El Milia à Collo par l'oued Zhour.

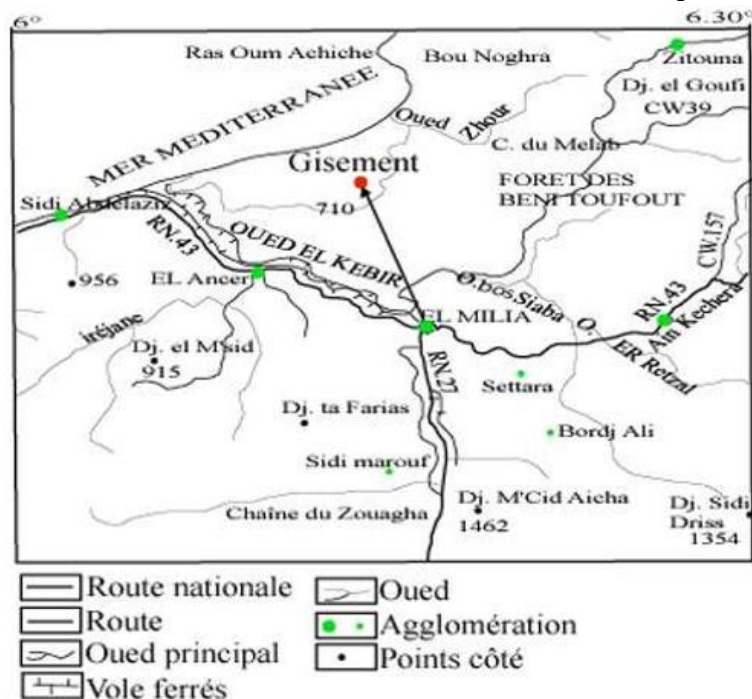


Figure I.2 : Localisation géographique du gisement de Kaolin [2]

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

2.3. Etude géologique du gisement

2.3.1. Géologie régionale

Le nord de l'Algérie s'inscrit dans le système alpin, avec une structure composée de nappes charriées reposant sur la plate-forme africaine. Dans la chaîne tellienne, on distingue trois grands domaines : kabyle, flyschs et tellien, souvent recouverts de formations détritiques.

La Petite Kabylie est formée par une superposition complexe d'unités géologiques séparées par des contacts tectoniques anormaux. Elle comprend notamment le socle kabyle, qui apparaît en trois massifs principaux, dont celui de la Petite Kabylie qui concerne notre zone d'étude.

Ce socle se divise en deux ensembles :

- Un ensemble peu ou non métamorphisé, composé de schistes, psammites, grès et calcaires fossilifères ;
- Un ensemble métamorphique, structuré en trois édifices tectoniques superposés : Bougaroun, Beni Ferguene, et l'unité supérieure.

L'édifice des Beni Ferguene, traversé par le pluton granitique miocène des Beni Touffout, est constitué de métapélites, pyroxénites, paragneiss et orthogneiss, révélant une histoire tectono-métamorphique complexe. Cette structure témoigne du charriage des terrains cristallins sur les formations mésozoïques et paléogènes de la région [6].

2.3.2. Géologie locale

Le gisement de Tamazert est situé dans la Petite Kabylie (Kabylie de Collo), au sein de l'édifice métamorphique des Beni Ferguene. Il repose sur un socle cristallophyllien structuré et affecté par la tectonique. Les roches encaissantes sont principalement des gneiss, des micaschistes et localement des granites gneissiques.

Le kaolin se présente sous forme de lentilles localisées dans une zone d'altération intense des gneiss, prenant la forme d'un anticlinal à flancs doux, subdivisé en quatre corps principaux (Central, Nord, Oriental et Sidi Kader). L'altération in situ est à l'origine de la kaolinisation, parfois accompagnée de quartzites qui structurent les reliefs.

L'orientation des gneiss varie entre l'Est et l'Ouest du secteur, suggérant la présence possible d'une faille séparant deux compartiments tectoniques distincts, appuyée par l'observation de roches mylonitiques dans la zone de Sidi Kader [6].

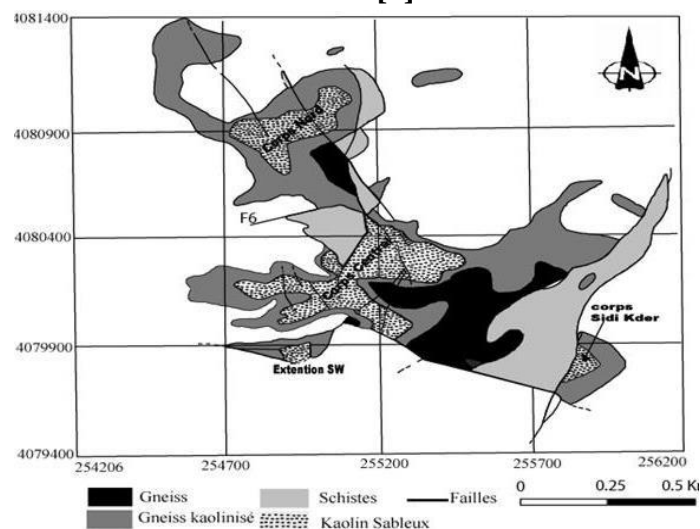


Figure I.3: Carte géologique du gisement de Tamazert

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

2.4. Etude minéralogique du gisement

La minéralisation du gisement de Tamazert s'étend en couverture sur les crêtes et atteint jusqu'à 80 mètres de profondeur dans le corps central. Le minerai présente une texture sableuse avec des grains grossiers de quartz visibles à l'œil nu. Trois structures principales sont observées : Gneissique, due à l'agencement de la kaolinite, l'halloysite, le quartz et le mica, rubanée, composée d'argiles avec alternance de bandes claires et sombres ferrugineuses liées à l'altération météorique, et massive, caractérisée par des argiles claires contenant des cristaux de quartz (0,5 à 3 mm) enrobés dans une pâte lisse [5].



Figure I.4: La texture du corps minéral

3. Conclusion

L'étude du gisement de kaolin de Tamazert, exploité par la Société des Kaolins d'Algérie (SOALKA), met en évidence l'importance stratégique de cette ressource minérale pour le développement industriel national. Grâce à une structure géologique favorable, une réserve significative et une localisation géographique avantageuse, ce gisement constitue un levier économique majeur. Toutefois, la complexité minéralogique du kaolin extrait, marqué par une forte teneur en quartz et en impuretés comme les oxydes de fer et le mica, impose un traitement rigoureux pour répondre aux exigences du marché.

La valorisation optimale de ce gisement passe par la maîtrise des procédés d'enrichissement, l'innovation technologique dans les méthodes de traitement. Ainsi, le kaolin de Tamazert, au-delà de son potentiel économique, s'inscrit dans une dynamique de modernisation du secteur minier algérien, conciliant rentabilité, performance industrielle et respect de l'environnement.

Chapitre II :

Recherche Bibliographique

Chapitre II : Recherche Bibliographique

Introduction

Le kaolin est une argile blanche issue de l'altération des feldspaths, composée principalement de kaolinite, un silicate d'aluminium hydraté. Il se distingue par sa structure lamellaire, sa faible dureté, sa blancheur et son inertie chimique, ce qui lui confère de nombreuses applications industrielles.

Ses domaines d'utilisation sont variés : industrie papetière, céramique, peintures, plasturgie, caoutchouc, cosmétique, pharmacie, fibres de verre et réfractaires. Chaque secteur exploite des propriétés spécifiques du kaolin, telles que sa finesse, sa blancheur ou sa résistance thermique. L'exploitation du gisement de Tamazert, en Algérie, se fait à ciel ouvert, selon une méthode structurée qui tient compte de la qualité du minerai. Le traitement s'effectue à l'usine de Tenefdour par voie humide, à travers des techniques de séparation gravimétrique, visant à enrichir le kaolin en kaolinite et à réduire les impuretés.

1. Généralités sur le Kaolin

Le kaolin appartient au groupe des roches sédimentaires et résulte de l'altération des feldspaths, qui donnent naissance à des aluminosilicates hydratés, aussi appelés phyllosilicates. Ces minéraux se caractérisent par une structure en fines lamelles, conférant au kaolin des propriétés spécifiques utilisées dans diverses applications industrielles.

Le composant principal du kaolin est la kaolinite, un silicate d'aluminium hydraté dont la formule chimique est $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Toutefois, d'autres phyllosilicates peuvent coexister avec la kaolinite, notamment la Dickite, la Nacrite et l'Halloysite [5,8].

1.1. Couleur

Le kaolin présente généralement une teinte blanche ou légèrement crème. Toutefois, sa couleur peut être altérée par la présence d'impuretés, notamment des éléments de transition. Ces impuretés sont souvent sous forme de minéraux accessoires contenant des oxydes, hydroxydes, oxydes-hydroxydes, sulfures ou carbonates, et peuvent affecter négativement les propriétés optiques et physico-chimiques du matériau.

1.2. Morphologie et taille des particules

Les cristaux de kaolinite, composant principal du kaolin, sont caractérisés par une morphologie plane, prenant la forme de feuillets très fins d'environ $2\ \mu\text{m}$ d'épaisseur et de quelques microns de diamètre. Ils adoptent généralement une forme pseudo-hexagonale et peuvent se présenter sous forme de structures empilées, évoquant des livres ou des formations vermiculaires.

1.3. Dureté

La kaolinite possède une dureté relativement faible, comprise entre 2 et 2,5 sur l'échelle de Mohs, ce qui classe le kaolin parmi les minéraux tendres. Les kaolins de grande pureté ne présentent pas de caractère abrasif, une propriété essentielle dans de nombreuses applications industrielles, notamment dans les secteurs de la céramique, du papier et des cosmétiques.

Chapitre II : Recherche Bibliographique

2. Carte d'identité

Tableau II.1: Carte d'identité de Kaolin

Propriété	Description
Formule chimique	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Composition	Silicate d'aluminium basique
Couleur	Blanc, gris, jaune, beige
Trâinée	Blanche
Dureté	2 - 2.5
Système cristallin	Monoclinique
Formes cristallines et agrégats	Sous forme de masses compactes non formées
Transparence	Opaque (rarement translucide)
Densité	2.6
Lustre	Terne
Clivage	1.1
Fracture	Terreuse
Ténacité	Fragile, sectile
Autres marques d'identification	Le kaolin est très friable, et peut être coupé et moulé, surtout lorsqu'il est mouillé
Caractéristiques frappantes	Habitude friable et texture argileuse

3. Domaines d'application des kaolins

Le kaolin constitue une matière première polyvalente utilisée dans de nombreux secteurs industriels. Ses propriétés physico-chimiques notamment sa blancheur, sa faible abrasivité, son inertie chimique et sa finesse en font un matériau de choix dans les domaines suivants [9]:

3.1. Industrie papetière

Le kaolin est couramment employé comme charge dans la pâte à papier et comme pigment de couchage en surface. Il confère au papier une excellente blancheur, une opacité élevée, une grande surface spécifique et une abrasivité minimale. Ces caractéristiques sont essentielles à la fabrication de papiers de qualité tels que les papiers couchés, les magazines, les brochures et autres imprimés haut de gamme.

3.2. Céramiques

Sous l'effet de températures supérieures à 1000 °C, le kaolin se transforme en mullite et en phase vitreuse. Il est largement utilisé dans la production de faïences (vaisselle, sanitaires, carrelage) en raison de sa plasticité, de sa résistance mécanique et de sa capacité à réduire la déformation pyroplastique pendant la cuisson.

3.3. Charges minérales

Selon ses propriétés optiques (éclat, viscosité), le kaolin est classé comme kaolin de charge ou de couchage. Il est apprécié pour sa blancheur, son inertie chimique sur une large plage de pH, sa faible conductivité thermique et électrique, ainsi que pour sa capacité à améliorer la brillance et l'opacité des matériaux dans lesquels il est incorporé.

Chapitre II : Recherche Bibliographique

3.4. Peintures

Le kaolin, sous forme hydratée ou calcinée, est intégré dans les formulations de peintures pour en améliorer les propriétés rhéologiques, mécaniques et optiques. Les kaolins calcinés sont particulièrement utilisés dans les peintures mates et satinées, pour renforcer leur opacité, leur blancheur et leur résistance à l'abrasion.

3.5. Caoutchouc

Incorporé dans les mélanges de caoutchouc, le kaolin améliore la rigidité, la résistance à l'abrasion et les propriétés mécaniques globales du produit fini.

3.6. Cosmétique et pharmaceutique

Le kaolin est utilisé sous des formes réglementées telles que le British Pharmacopoeia Light Kaolin (BPLK) et le Heavy Kaolin, répondant aux normes des pharmacopées européenne et britannique. Il est présent dans divers produits médicaux et cosmétiques, à usage humain et vétérinaire.

3.7. Fibres de verre

Le kaolin intervient dans la production de fibres de verre, jouant un rôle dans le renforcement des matériaux composites et dans l'amélioration de leurs propriétés mécaniques.

3.8. Plasturgie

Dans l'industrie des plastiques, le kaolin est valorisé pour sa finesse, sa capacité à améliorer la stabilité dimensionnelle, sa résistance chimique et son apport esthétique.

3.9. Réfractaires

Le kaolin entre également dans la composition des matériaux réfractaires, utilisés pour la fabrication de structures exposées à des températures élevées, grâce à sa stabilité thermique et sa résistance à la fusion.



Figure II.1: Les applications industrielles du kaolin [17]

4. Organisation de l'exploitation de la carrière

L'exploitation de la carrière de Tamazert se fait à ciel ouvert par gradins successifs, avec des hauteurs de gradins ne dépassant pas 5 mètres et des banquettes de 6 mètres de large. L'extraction est réalisée avec des engins tout en maintenant un accès permanent aux banquettes. Le gisement est divisé en trois corps principaux : le Corps Central, le plus riche en réserves, le Corps Nord, en seconde position, et le Corps Sidi Kader, moins important en

Chapitre II : Recherche Bibliographique

réserves mais offrant la meilleure qualité. Ces corps apparaissent sous forme de lentilles s'étendant sur plusieurs dizaines de mètres avec une épaisseur moyenne de 20 mètres [10,11].



Figure II.2: L'exploitation dans le corps central

5. Méthode d'exploitation de la carrière

La méthode d'exploitation employée à la carrière de Tamazert est le "système transversal à deux bords", défini par l'académicien Rjevski. Cette approche prend en compte plusieurs paramètres, dont la position des fronts de travail, le nombre de bords exploitables, la direction de progression, la disposition des terrils et l'angle d'inclinaison du gisement. L'exploitation se déroule en plusieurs étapes : découverture, abattage, homogénéisation et chargement [10].

6. Abattage sélectif du kaolin : critères et moyens

L'abattage du minerai de kaolin doit répondre à cinq critères : la blancheur, la teneur, la viscosité (TMSM), la surface spécifique (BET) et l'abrasivité. Les critères les plus importants sont la blancheur et la viscosité, en supposant une teneur moyenne de 13%. Pour cela, on utilise l'abattage sélectif. Les moyens d'abattage favorables à l'exploitation sélective sont la pelle excavatrice, à défaut la pelle rétro, et le bulldozer pour le ripage, le défonçage et l'ameublissement du minerai abattu. Le pelleteur exécutera l'abattage par degré de qualité, selon la destination du kaolin [12] :

- Kaolin destiné à l'usine de traitement ;
- Kaolin destiné aux céramiques vaisselles ;
- Kaolin destiné aux carreaux sol et faïences.

7. Traitement du Kaolin de Tamazert à l'usine de Tenefdour

Le processus de valorisation du kaolin de Tamazert commence par son traitement à l'usine de Tenefdour, une installation clé gérée par la Société des Kaolins d'Algérie. Cette usine est stratégiquement située à seulement 11 km de la carrière près d'El-Milia, où le minerai est extrait. La composition moyenne du minerai extrait est d'environ 13 % de kaolinite.

L'usine de Tenefdour est équipée d'un atelier de délayage qui joue un rôle crucial dans la séparation du kaolin des autres minéraux. Étant donné que le kaolin se trouve principalement dans la tranche granulométrique 0-20 μm , les équipements utilisés dans le délayage sont soigneusement sélectionnés pour assurer des coupures granulométriques de plus en plus fines de l'amont vers l'aval. Cette opération de séparation des kaolins s'effectue par voie humide.

Chapitre II : Recherche Bibliographique

Le traitement du minerai à l'usine de Tenefdour se déroule entièrement en voie humide, utilisant une méthode gravimétrique basée sur la différence de densité des particules. Ce processus implique plusieurs étapes, notamment l'homogénéisation du kaolin brut tout-venant de la carrière, l'alimentation des différentes sections de la laverie, l'alimentation des bassins de décantation et l'alimentation des différentes sections du hall de production.

Chaque étape est minutieusement planifiée et exécutée pour garantir la qualité et la pureté du kaolin produit. Les techniques utilisées visent à maximiser la concentration de kaolinite dans le produit final, répondant ainsi aux normes de qualité les plus strictes exigées par les clients. [2].

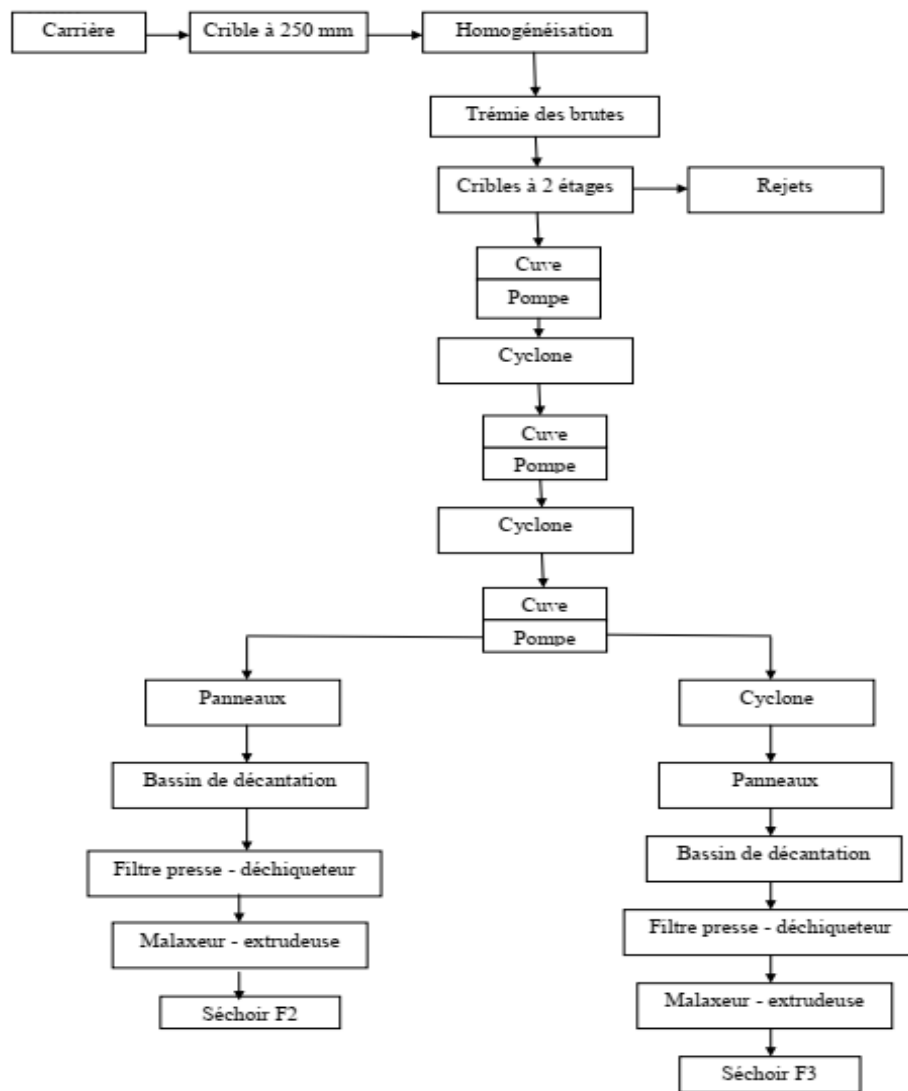


Figure II.3: Enrichissement du kaolin brut : lévigation par cyclone, filtration et séchage [3]

Conclusion

Le kaolin de Tamazert constitue une ressource minérale stratégique aux propriétés physico-chimiques remarquables, qui le rendent indispensable dans de nombreux secteurs industriels. Grâce à sa blancheur, sa faible abrasivité, sa finesse et son inertie chimique, il trouve des applications diversifiées dans les industries papetière, céramique, cosmétique, pharmaceutique, plastique, et bien d'autres encore.

Chapitre II : Recherche Bibliographique

L'exploitation du gisement de Tamazert, selon une méthode rigoureusement structurée à ciel ouvert, permet une extraction sélective du minerai en fonction de sa qualité, garantissant ainsi l'optimisation des ressources. Par ailleurs, le traitement par voie humide à l'usine de Tenehdour, basé sur la séparation gravimétrique, permet d'obtenir un kaolin de haute pureté conforme aux exigences des marchés.

L'organisation efficace de l'exploitation, alliée à des critères stricts de sélection et de valorisation, contribue à maximiser le rendement tout en assurant la constance de la qualité. L'ensemble de ces procédés témoigne de la maîtrise technique et du potentiel industriel important du kaolin de Tamazert, ouvrant la voie à une valorisation durable de cette ressource naturelle à fort intérêt économique.

Chapitre III :
Étude Pétrographique et Minéralogique

Chapitre III : Étude pétrographique et minéralogique

Introduction

Cette étude a pour objectif de caractériser les propriétés minéralogiques, chimiques et granulométriques des différentes variétés de kaolin issues du complexe d'El Milia, en particulier les échantillons KT1 (Brut Blanc et Brut Marron), KT2, KT3. Elle vise à approfondir la compréhension des mécanismes d'altération ayant conduit à la formation de ce minéral, tout en évaluant son potentiel pour diverses applications industrielles.

1. Objectif de l'étude pétrographique

Les objectifs de l'étude pétrographique du gisement de kaolin de Tamazert sont [13]:

- La détection des minéraux afin de repérer et analyser les divers minéraux présents dans la roche mère et les produits d'altération. Les minéraux comme la kaolinite, le quartz, les feldspaths ou les oxydes de fer sont identifiés selon leurs caractéristiques pétrographiques ;
- Évaluer la pureté, l'homogénéité et d'autres propriétés essentielles du kaolin, afin de déterminer son aptitude à différents usages industriels (céramique, papier, peinture, etc.) ;
- Étudier les propriétés et les caractéristiques du kaolin dans son contexte géologique pour mieux comprendre les processus d'altération (altération hydrothermale ou météorique) qui ont conduit à sa formation, et ainsi enrichir la compréhension géologique régionale de la zone de Tamazert, Jijel.

1. Méthodologie

1.1. L'analyse par Microscope électronique à balayage (MEB)

Une première analyse a été effectuée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) équipé d'un détecteur EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) pour la cartographie élémentaire. Cette analyse du MEB, a été réalisée au sein du laboratoire de L'ENSTI [14].

L'Objectifs de l'analyse par MEB :

- Il est nécessaire d'obtenir des images haute résolution afin d'étudier la microstructure, la texture et les liens entre les minéraux.
- Analyse Élémentaire : Étudier la composition chimique des minéraux du marbre en utilisant la spectrométrie de dispersion d'énergie (EDS).
- Caractérisation des microstructures : Analyser les incrustations, les fissures, les zones et les textures minérales.

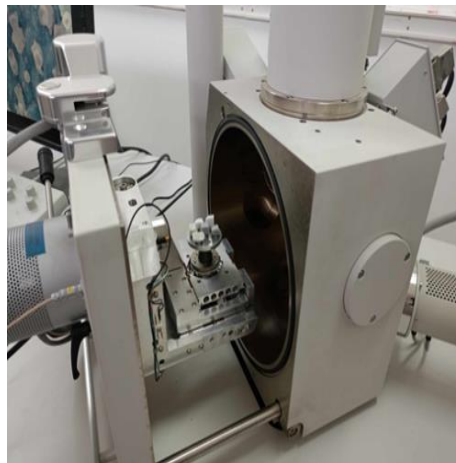


Figure III.1 : Microscopie Électronique à Balayage (MEB) de l'ENSTI

Chapitre III : Étude pétrographique et minéralogique

1.2. L'analyse minéralogique du kaolin par diffraction des rayons X (DRX)

Une deuxième analyse a été effectuée par diffraction des Rayons X. C'est une technique d'analyse utilisée en laboratoire pour étudier la structure et la composition des matériaux cristallins. Elle permet d'identifier les différentes phases d'un matériau, sa structure cristalline, et d'obtenir des informations sur la taille et la forme de ses cristallites.

La diffraction des rayons X (DRX) repose sur l'interaction d'un faisceau de rayons X (de longueur d'onde comprise entre 0,1 et 10 nm) avec un échantillon d'argile, qu'il soit orienté ou non. Lors de cette interaction, une partie de l'énergie est absorbée par la structure cristalline, provoquant une excitation atomique et l'émission de rayonnements dans différentes directions [15].

Le spectre produit comprend :

- Un fond continu ;
- Des raies caractéristiques.

Dans une analyse par diffraction, seules les radiations caractéristiques sont utilisées. Ces dernières interagissent avec les plans atomiques du cristal, produisant un faisceau cohérent détecté selon la loi de Bragg [16] :

$$n\lambda = 2 \times d \times \sin\theta$$

Avec:

- **n** : ordre de diffraction (entier) ;
- **λ** : longueur d'onde du rayonnement incident ;
- **d** : distance inter-réticulaire (ou espace basal) ;
- **θ** : angle de diffraction.

L'objectif de cette technique de DRX que nous avons réalisée au laboratoire de physique à l'UBMA, est d'identifier et de quantifier les minéraux présents dans les argiles, en fournissant des informations sur leur composition et structure cristalline.



Figure III.2 : Appareil DRX (Département de physique à l'UBMA)

1.3. Préparation des Échantillons

Les échantillons sont fragmentés en petites pièces adaptées à la chambre du MEB (typiquement quelques millimètres) et broyés en poudre adaptées à la chambre du DRX.

Le kaolin KT1 se décline en deux types : brut blanc et brut marron, exploités dans la mine de Tamazert. On a cinq petites pièces de Kaolin : KT1(Brut Blanc et Brut Marron) , KT2, KT3.

Chapitre III : Étude pétrographique et minéralogique

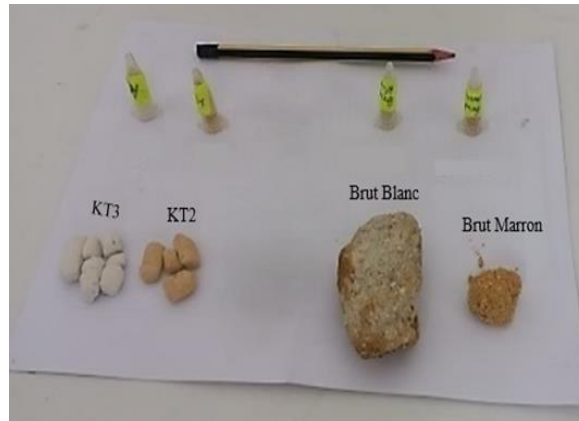


Figure III.3: Échantillons de : KT1(Brut Blanc et Brut Marron), KT2, KT3

Conclusion

Ce chapitre nous a donné un aperçu sur les techniques et le matériel utilisés dans notre étude sur le gisement de Kaolin.

Les différentes méthodes d'analyse pétrographique employées pour l'étude de la composition minéralogique, de la texture et de la structure du Kaolin dans ce travail, contribuent à la valorisation de cette ressource naturelle au niveau local et participe à l'enrichissement des connaissances géologiques de la région de Tamazert.

Chapitre IV :

Résultats et Discussion

Chapitre IV : Résultats et Discussion

Introduction

Afin de comparer les trois échantillons de kaolin (KT1, KT2 et KT3) en vue de leur utilisation dans diverses applications industrielles, une analyse approfondie a été réalisée à partir des rapports techniques fournis par la société SOALKA. Cette évaluation s'est basée sur trois critères principaux : la composition chimique, la composition minéralogique et les propriétés physiques de chaque échantillon.

Pour affiner cette analyse et mieux valoriser le gisement de kaolin de Tamazert, des investigations pétrographiques et minéralogiques complémentaires ont été menées. Ces dernières ont fait appel à des techniques avancées telles que la microscopie électronique à balayage (MEB) et la diffraction des rayons X (DRX), permettant une caractérisation détaillée de la structure et de la texture des minéraux présents.

1. Composition chimique

Tableau IV.1: Analyse chimique en poids (%)

Formule chimique	KT1	KT2	KT3
SiO ₂	70.50	49.30	48.50
Al ₂ O ₃	18.30	33.0	33.90
Fe ₂ O ₃	1.18	2.25 - 2.50	2.25 - 2.50
TiO ₂	0.36	0.24	0.21
CaO	0.09	0.09	0.08
MgO	0.34	0.40	0.39
K ₂ O	4 - 4.5	2.75 - 3.10	2.75 - 3.10
Na ₂ O	0.34	0.09	0.08
Perte au feu	4.5 - 5.5	10.5	10.80 - 11.00

• Interprétation

Le kaolin brut KT1, riche en silice et pauvre en alumine, révèle une faible teneur en kaolinite et une forte présence de quartz, indiquant un matériau peu altéré et moins pur. En revanche, les échantillons traités KT2 et KT3 présentent une composition plus riche en kaolinite, avec une teneur élevée en alumine et une perte au feu marquée, ce qui traduit une meilleure pureté et les rend plus adaptés aux applications industrielles exigeantes.

2. Composition minéralogique

Tableau IV.2: Composition minéralogique en poids (%)

Minéral	KT1	KT2	KT3
Kaolinite	13 - 15	62 - 65	65 - 70
Matières micacées	22.40	16 - 22	15 - 22
Quartz	43 - 45	8 - 11	6 - 10
Feldspath	3 - 4	3 - 4	3 - 4
Orthoclase et Albite	18 - 22	0	0

Chapitre IV : Résultats et Discussion

• Interprétation

L'échantillon KT1 se distingue par une faible teneur en kaolinite (13–15 %) et une forte proportion de quartz (43–45 %), ainsi que la présence notable de feldspaths alcalins tels que l'orthose et l'albite (18–22 %). Cette composition minéralogique révèle un matériau encore peu altéré, à l'état brut, avec une minéralisation primaire encore bien représentée. En revanche, les échantillons KT2 et KT3 présentent une richesse significative en kaolinite, pouvant atteindre 70 %, accompagnée d'une forte diminution du quartz et d'une disparition des feldspaths alcalins. Cette évolution minéralogique témoigne d'un degré d'altération avancé du matériau, conduisant à une purification naturelle favorable à des usages industriels exigeants, notamment dans les domaines de la céramique fine, des charges minérales ou des isolants thermiques.

3. Analyse granulométrique

Tableau IV.3: Analyse Granulométrique en poids (%)

Taille des particules	KT1	KT2	KT3
> 991 μm	14.40	—	—
991 – 495 μm	09.60	—	—
495 – 104 μm	21.50	—	—
104 – 43 μm	15.00	—	—
> 40 μm	60.50	0.03	0.02
< 15 μm	—	98 $\pm$ 1	99 $\pm$ 1
< 10 μm	19.40	88 $\pm$ 3	95 $\pm$ 3
< 5 μm	—	65 $\pm$ 3	74 $\pm$ 3
< 2 μm	6.60	43 $\pm$ 3	47 $\pm$ 3

• Interprétation

L'analyse granulométrique montre une nette différence entre le kaolin brut KT1 et les kaolins traités KT2 et KT3.

KT1 présente une granulométrie grossière, avec une majorité de particules > 40 μm , ce qui le rend moins adapté aux usages industriels exigeant une grande finesse.

En revanche, KT2 et KT3 affichent une granulométrie très fine, avec une forte proportion de particules < 2 μm , caractéristiques d'un kaolin purifié.

Ces résultats indiquent que KT2 et KT3 sont mieux adaptés aux applications industrielles de haute performance telles que la céramique, le papier et les peintures, contrairement à KT1 qui nécessite un traitement préalable.

Chapitre IV : Résultats et Discussion

4. Propriétés physiques

Tableau IV.4: Propriétés physiques

Propriété	KT1	KT2	KT3
Densité réelle	—	2.6	2.6
Densité apparente	—	1	1
Surface spécifique (m ² /g)	—	25	25
Blancheur à 110°C (%)	65.0	—	—
Blancheur à 1180°C (%)	—	82.0	76.4
Blancheur à 1280°C (%)	—	83.5	84.1
Absorption à 1180°C (%)	—	7.4	7.3
Absorption à 1280°C (%)	—	0.2	0.2
Absorption à 1410°C (%)	—	0.0	0.0
Retrait à 1180°C (%)	—	5.8	6.0
Retrait à 1280°C (%)	—	8.3	8.6
Retrait à 1410°C (%)	—	9.2	9.5
Indice d'abrasion	—	—	—
Humidité (% poids)	14 ± 2	—	—

• Interprétation

Les propriétés physiques du kaolin KT1 brut révèlent une blancheur faible (65 %) et une humidité élevée (14 %), limitant son usage industriel sans traitement. En revanche, les échantillons purifiés KT2 et KT3 présentent une blancheur accrue, une surface spécifique élevée (25 m²/g) et une vitrification complète à 1410 °C, avec une absorption d'eau nulle après cuisson. KT3 se distingue par une blancheur maximale (84,1 %) et un retrait élevé à la cuisson, indiquant une excellente aptitude au frittage, ce qui le rend idéal pour des applications haut de gamme comme la porcelaine, les revêtements céramiques et les matériaux techniques denses.

5. Résultats issus des analyses MEB, EDS et de la cartographie élémentaire

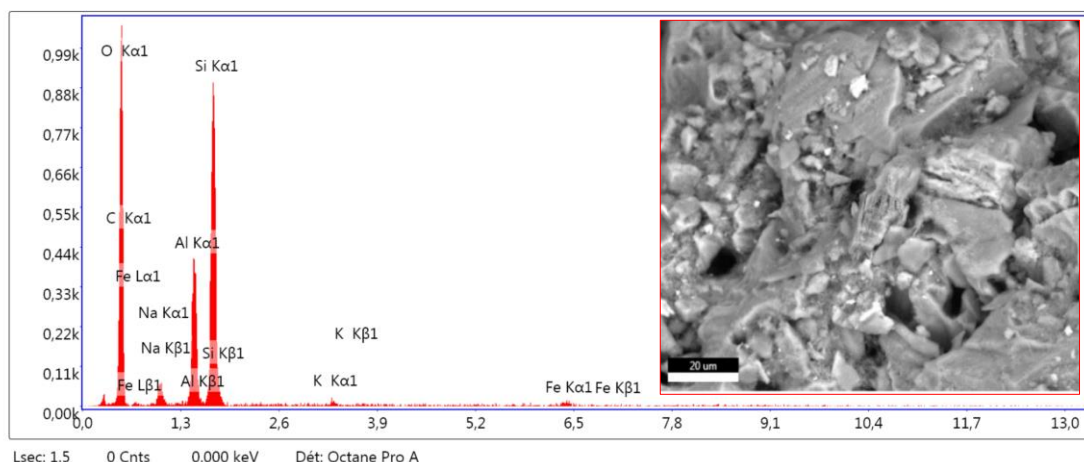


Figure IV.1: Spectre EDS de l'Échantillon Brut marron

Chapitre IV : Résultats et Discussion

Tableau IV.5: Résultats d'Analyse EDS de l'Échantillon KT1 (Brut marron)

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	28.00	37.07	71.20	9.46	0.0767	1.0530	0.2603	1.0000
O K	50.86	50.55	313.90	9.36	0.1019	1.0072	0.1990	1.0000
NaK	4.00	2.76	37.10	11.02	0.0062	0.9143	0.1699	1.0032
AlK	7.57	4.46	221.90	8.11	0.0237	0.8952	0.3481	1.0058
SiK	8.57	4.85	309.50	7.61	0.0305	0.9147	0.3888	1.0021
K K	0.10	0.04	6.30	22.98	0.0008	0.8475	0.8833	1.0196
FeK	0.91	0.26	38.90	6.06	0.0084	0.7687	1.0787	1.1226

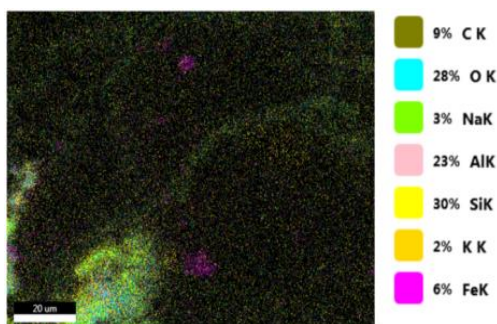


Figure IV.2: Cartographie élémentaire EDS de l'échantillon KT1 (Brut marron)

• Interprétation

L'analyse MEB couplée à l'EDS révèle que le kaolin brut marron est un matériau hétérogène composé principalement de silicates d'aluminium (comme la kaolinite), accompagnés de quartz, de feldspaths sodiques (albite) et potassiques (orthose ou microcline), et de faibles teneurs en oxydes de fer responsables de la teinte brunâtre du kaolin brut. Son faible pourcentage indique une teneur modérée en impuretés ferrugineuses. .

Les éléments dominants sont l'oxygène (50,86%) Forte teneur, typique des oxydes et des minéraux silicatés, le carbone (28%) Peut indiquer soit une contamination organique soit des impuretés, l'aluminium (7,57%) et le silicium (8,57%), Représentent les principaux éléments structuraux de la kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). La cartographie élémentaire montre une distribution inégale des composants, ce qui confirme la nature brute et peu transformée de l'échantillon.

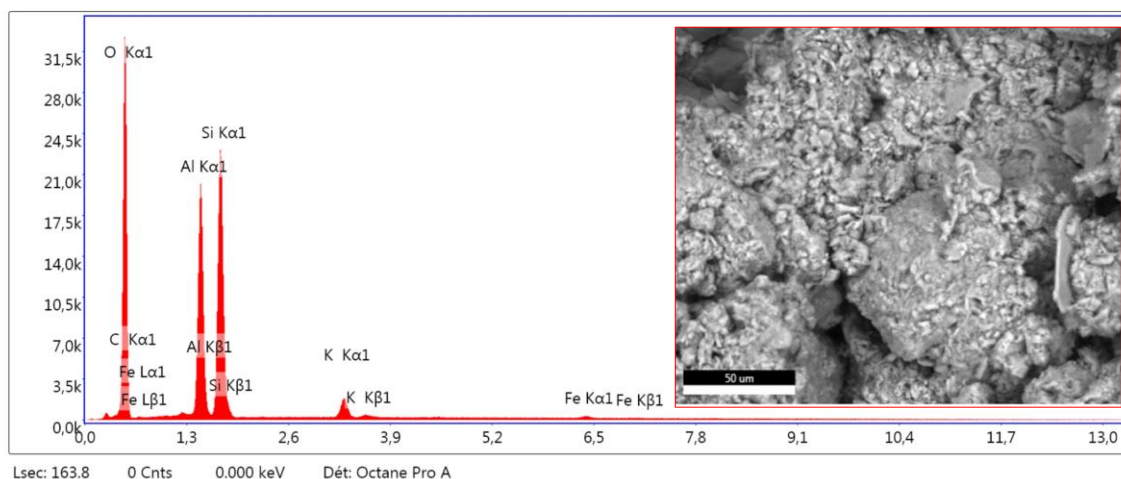


Figure IV.3: Spectre EDS de l'Échantillon KT1 (Brut blanc)

Chapitre IV : Résultats et Discussion

Tableau IV.6: Résultats d'Analyse EDS de KT1 (Brut blanc)

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	7.34	11.00	23.00	13.18	0.0147	1.0739	0.1867	1.0000
O K	61.03	68.61	903.90	8.38	0.1751	1.0279	0.2791	1.0000
AlK	14.40	9.60	772.40	7.68	0.0482	0.9143	0.3633	1.0078
SiK	16.05	10.28	862.10	8.01	0.0494	0.9344	0.3291	1.0015
K K	1.00	0.46	92.60	5.74	0.0066	0.8660	0.7531	1.0129
FeK	0.19	0.06	13.90	17.27	0.0017	0.7858	1.0492	1.1066

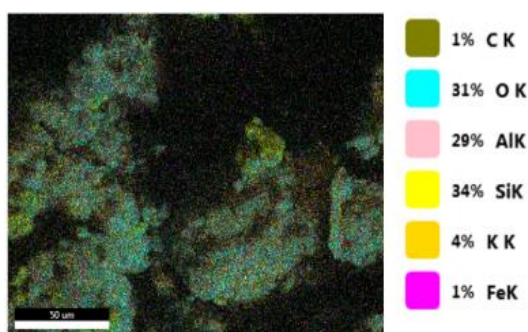


Figure IV.4: Cartographie élémentaire EDS de l'échantillon KT1 (Brut Blanc)

• Interprétation

L'analyse EDS/MEB montre que le Brut blanc est majoritairement composé d'oxygène (61,03%), de silicium (16,05%) et d'aluminium (14,40%), indiquant une forte présence de kaolinite et de quartz. Les faibles teneurs en fer (0,19%) et en potassium (1%) révèlent une grande pureté minéralogique.

La cartographie élémentaire confirme une distribution homogène des éléments principaux et une très faible présence d'impuretés.

Le Brut blanc est donc un matériau de qualité supérieure, adapté aux usages industriels exigeant une blancheur et une pureté élevées (céramique, papier, cosmétique).

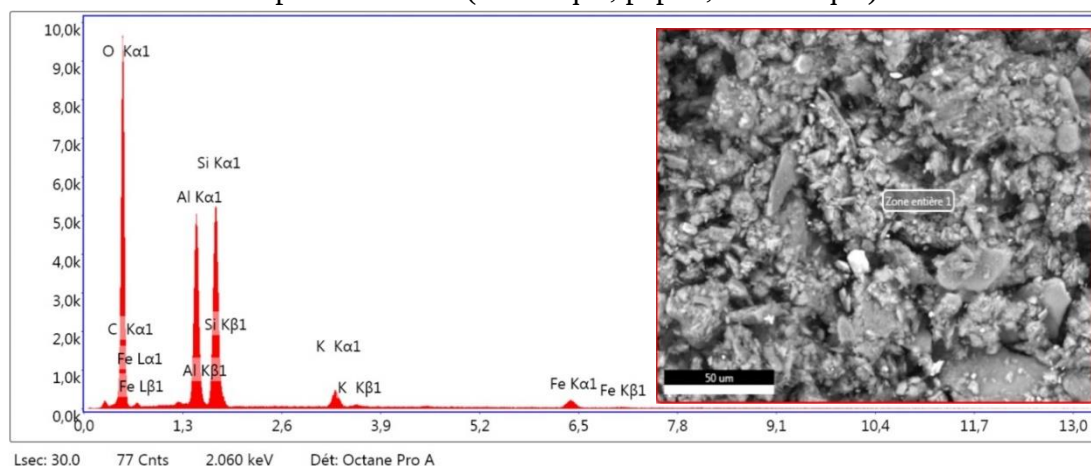


Figure IV.5: Spectre EDS de l'Échantillon KT2

Chapitre IV : Résultats et Discussion

Tableau IV.7: Résultats d'Analyse EDS de Kaolin KT2

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	6.60	9.88	39.27	15.72	0.0133	1.073	0.187	1.0000
O K	63.08	70.83	1855.25	8.42	0.1888	1.027	0.291	1.0000
AlK	13.78	9.17	1322.22	7.61	0.0502	0.914	0.395	1.0073
SiK	14.67	9.38	1442.49	7.78	0.0517	0.934	0.376	1.0017
K K	0.99	0.46	144.81	6.86	0.0071	0.866	0.809	1.0143
FeK	0.88	0.28	88.81	8.14	0.0079	0.785	1.038	1.0988

Tableau IV.7: Résultats d'Analyse EDS de l'échantillon KT2

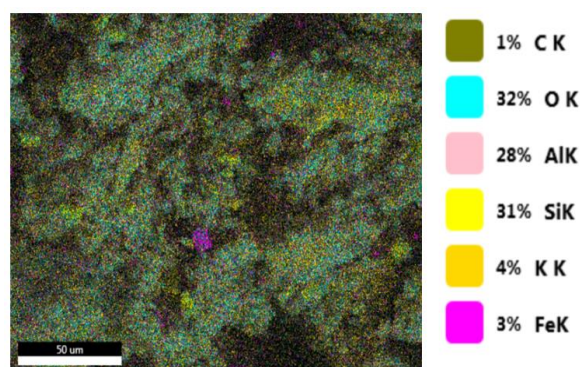


Figure IV.6: Cartographie élémentaire EDS de l'échantillon KT2

• Interprétation

L'échantillon KT2 présente une composition dominée par l'oxygène, le silicium et l'aluminium, indiquant une forte teneur en kaolinite purifiée. Les faibles concentrations en carbone, fer et potassium traduisent une bonne pureté minéralogique. La cartographie EDS montre une répartition homogène des éléments principaux. Ces caractéristiques font de KT2 un kaolin de qualité.

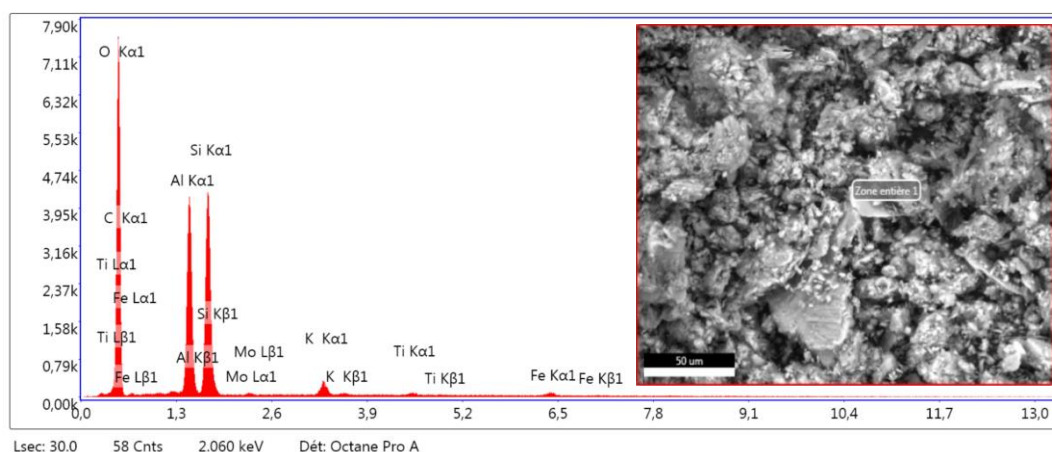


Figure IV.7: Spectre EDS de l'Échantillon KT3

Chapitre IV : Résultats et Discussion

Tableau IV.8: Résultats d'Analyse EDS de l'échantillon KT3

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	4.94	7.48	22.62	14.77	0.0101	1.075	0.189	1.000
O K	63.42	72.02	1469.05	8.31	0.2013	1.029	0.308	1.000
AlK	15.02	10.12	1133.74	8.34	0.0452	0.916	0.326	1.007
SiK	15.36	9.93	1155.07	8.75	0.0413	0.936	0.287	1.001
MoL	0.35	0.07	15.51	12.23	0.0019	0.715	0.772	0.998
K K	0.60	0.28	90.85	11.10	0.0037	0.867	0.699	1.013
TiK	0.09	0.04	15.92	26.01	0.0007	0.800	0.941	1.037
FeK	0.22	0.07	30.47	18.71	0.0020	0.787	1.062	1.105

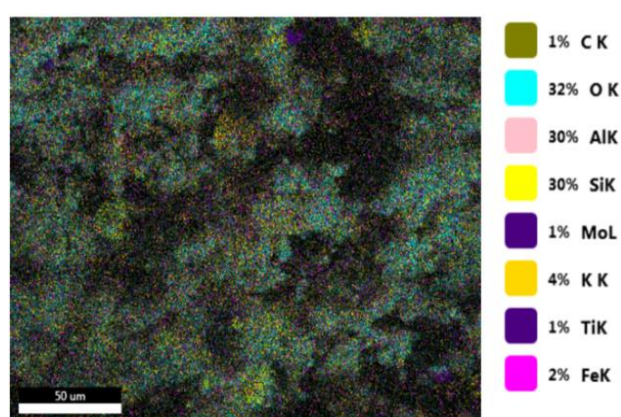


Figure IV.8: Cartographie élémentaire EDS de l'échantillon KT3

• Interprétation

L'échantillon KT3 est principalement constitué d'oxygène (63,42%), de silicium (15,36%) et d'aluminium (15,02%), ce qui confirme une forte présence de kaolinite. Les teneurs en fer (0,31%), potassium (0,60%), ainsi que des traces de titane (0,35%) et molybdène (0,01%), indiquent la présence de légères impuretés métalliques. La cartographie montre une distribution homogène des éléments principaux, avec des impuretés localisées.

5.1. Interprétation des résultats de l'analyse minéralogique par MEB

L'analyse MEB/EDS des échantillons de kaolin met en évidence des différences marquées entre les matériaux bruts et traités. Le kaolin brut marron se caractérise par une composition hétérogène et une teneur modérée en kaolinite, avec des impuretés ferrugineuses responsables de sa teinte. Le brut blanc présente une composition plus homogène, riche en kaolinite et quartz, avec très peu d'impuretés, ce qui en fait un matériau de meilleure qualité.

Les échantillons KT2 et KT3, issus d'un traitement de purification, affichent une forte teneur en kaolinite, une distribution homogène des éléments (O, Si, Al) et une faible présence d'éléments indésirables. KT3, en particulier, montre une pureté et une qualité supérieures, adaptées aux usages industriels exigeants tels que la céramique fine, le papier et les cosmétiques.

6. L'analyse minéralogique du kaolin par (DRX)

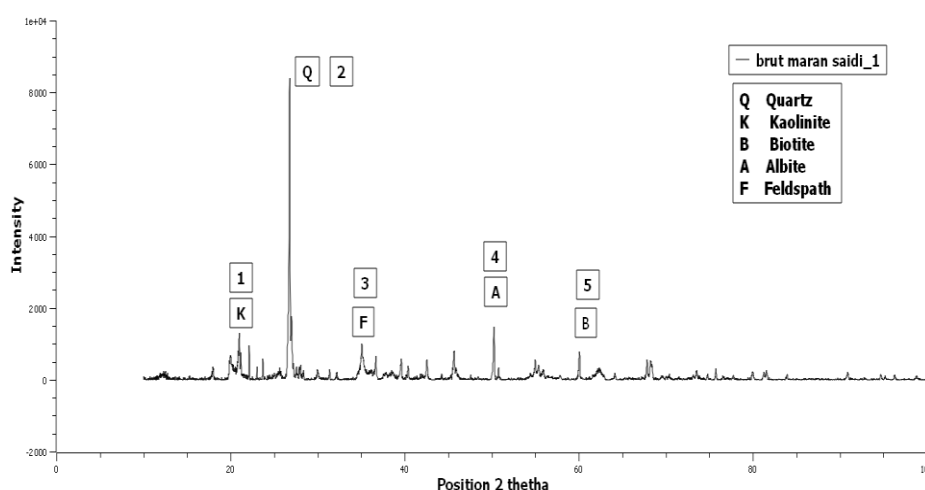


Figure IV.9: Spectre DRX de l'Échantillon Brut marron

- Interprétation les résultats DRX de l'échantillon Brut marron**

Le spectre DRX met en évidence une forte teneur en quartz, identifiable par un pic dominant autour de 26° (20), ainsi que la présence de kaolinite en quantité modérée. Des phases accessoires telles que les feldspaths (notamment l'albite) et la biotite sont également détectées. Ces résultats confirment que l'échantillon est peu pur et nécessite un traitement pour enrichir sa teneur en kaolinite et réduire les impuretés minérales.

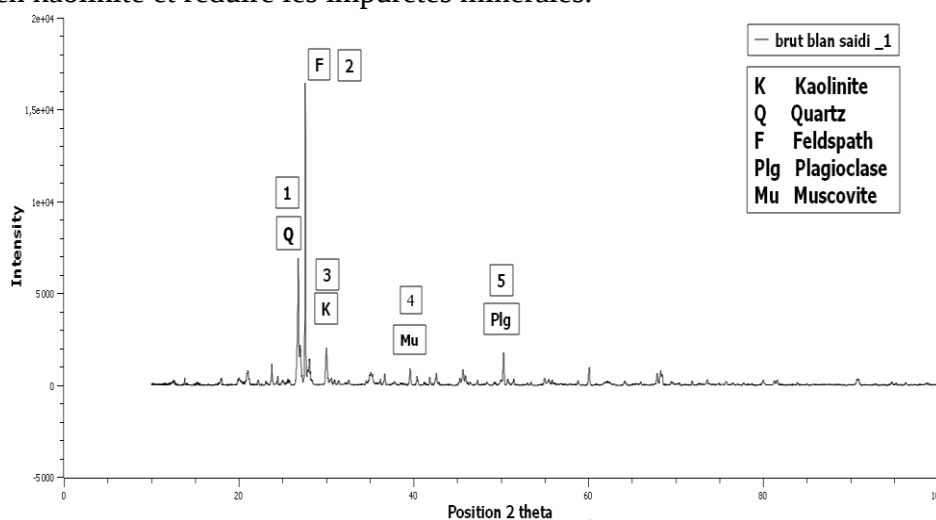
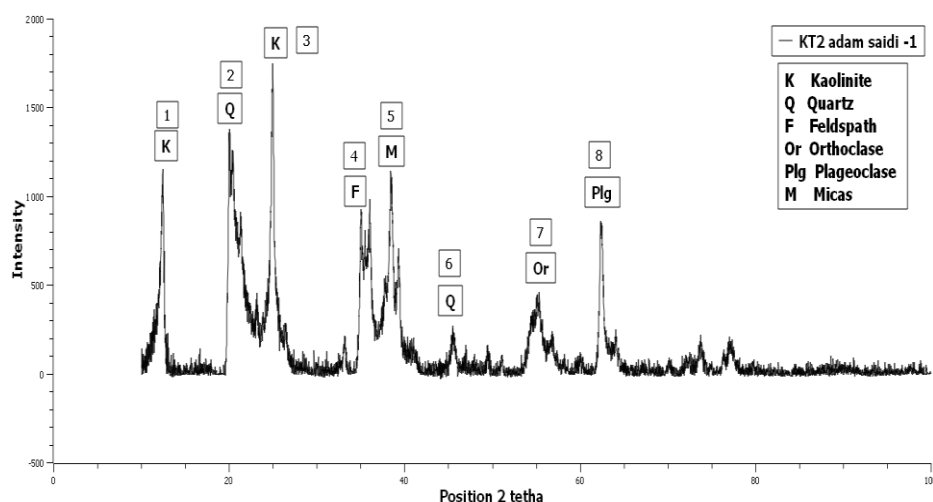


Figure IV.10: Spectre DRX de l'Échantillon Brut Blanc

- Interprétation les résultats DRX de l'échantillon Brut blanc**

Le spectre DRX de l'échantillon Brut blanc révèle une composition dominée par le feldspath et la kaolinite, accompagnés de quartz, plagioclase et muscovite. La présence marquée de feldspaths suggère un stade de décomposition moins avancé que dans les kaolins très purs. Toutefois, la proportion visible de kaolinite indique un bon potentiel de valorisation après traitement.

Chapitre IV : Résultats et Discussion



• Interprétation les résultats DRX de l'échantillon KT2

Le spectre DRX de l'échantillon KT2 montre une dominance claire de la kaolinite, confirmant l'efficacité du traitement de purification. La réduction des pics de quartz, feldspaths et micas par rapport aux échantillons bruts (marron et blanc) est significative. Cela suggère une amélioration de la qualité minéralogique, rendant le matériau plus apte aux usages industriels exigeants, notamment en céramique, papier ou cosmétique.

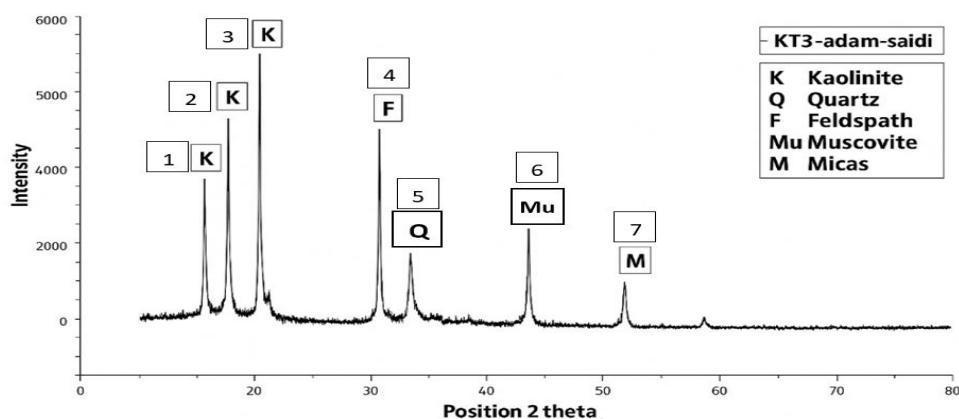


Figure IV.12: Spectre DRX de l'Échantillon KT3

• Interprétation les résultats DRX de l'échantillon KT3

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) de l'échantillon KT3 met en évidence une composition minéralogique dominée par la kaolinite, minéral caractéristique des kaolins. Les pics d'intensité élevés observés à faibles angles confirment la forte cristallinité de ce minéral. Par ailleurs, la présence de minéraux en quantités moindres, tels que le quartz, les feldspaths, la muscovite et d'autres types de micas, a également été détectée.

6.1. Interprétation des résultats de l'analyse minéralogique par DRX

L'analyse DRX des échantillons de kaolin met en évidence des différences notables de composition minéralogique selon leur état brut ou traité. L'échantillon Brut Marron est riche en quartz, avec peu de kaolinite, indiquant une faible pureté. Le Brut Blanc montre une dominance de feldspaths et une quantité modérée de kaolinite, traduisant un état d'altération intermédiaire. En revanche, les échantillons KT2 et KT3, après traitement, présentent une

Chapitre IV : Résultats et Discussion

forte teneur en kaolinite avec une nette réduction des impuretés (quartz, feldspaths, micas), confirmant l'efficacité du processus de purification et leur aptitude à des usages industriels de haute valeur ajoutée.

Conclusion

L'analyse comparative des échantillons de kaolin KT1, KT2 et KT3, issue des données fournies par la société SOALKA et complétée par des investigations avancées (MEB, EDS, DRX), a permis de mettre en évidence des différences significatives en termes de composition chimique, minéralogique, granulométrique et de propriétés physiques.

L'échantillon KT1, à l'état brut, présente une faible teneur en kaolinite, une forte présence de quartz et de feldspaths, ainsi qu'une granulométrie grossière et une blancheur limitée. Ces caractéristiques traduisent un matériau peu altéré, moins pur, et donc moins adapté, en l'état, aux usages industriels de haute exigence. Son enrichissement par traitement est nécessaire pour valoriser ses potentialités.

En revanche, les échantillons KT2 et KT3, ayant subi un traitement de purification, se distinguent par une forte teneur en kaolinite, une granulométrie fine, une blancheur élevée et une faible teneur en impuretés. L'analyse MEB/EDS et les spectres DRX confirment leur haute cristallinité et pureté minéralogique, notamment pour KT3, qui présente la meilleure blancheur et une aptitude supérieure au frittage. Ces deux échantillons sont donc particulièrement adaptés aux applications industrielles exigeantes telles que la céramique fine, le papier, les peintures, les cosmétiques ou encore les composants techniques.

Conclusion Générale

Le kaolin, en tant que ressource minérale stratégique, occupe une place de choix dans l'industrie moderne en raison de ses propriétés physico-chimiques uniques, notamment sa blancheur, sa finesse, sa plasticité et son inertie chimique. En Algérie, le gisement de Tamazert, situé à El Milia (wilaya de Jijel), se distingue par son potentiel économique significatif, bien que sa valorisation nécessite un traitement rigoureux en raison de la présence de diverses impuretés telles que les oxydes de fer, la séricite ou le quartz.

À travers cette étude, une caractérisation approfondie des différentes variétés de kaolin extraites du complexe d'El Milia (KT1, KT2 et KT3) a été entreprise. L'approche méthodologique adoptée, combinant des analyses chimiques, minéralogiques, pétrographiques et granulométriques, a permis de mieux comprendre les mécanismes d'altération responsables de la formation du kaolin ainsi que d'évaluer ses qualités industrielles. L'utilisation de techniques avancées telles que la microscopie électronique à balayage (MEB), la spectrométrie dispersive en énergie (EDS) et la diffraction des rayons X (DRX) a mis en évidence l'amélioration notable des propriétés du kaolin après traitement.

Les résultats ont montré que les kaolins traités (KT2 et KT3) sont nettement plus purs et mieux adaptés aux applications industrielles que le kaolin brut (KT1), notamment en céramique, papeterie, peinture ou cosmétique. En particulier, l'échantillon KT3 s'est distingué par une blancheur élevée, une cristallinité accrue et une excellente aptitude au frittage.

Ainsi, la valorisation du gisement de Tamazert s'inscrit dans une dynamique de développement durable, conjuguant performance industrielle, exploitation raisonnée des ressources naturelles et réduction de l'impact environnemental. Ce travail met en lumière non seulement l'intérêt économique du kaolin algérien, mais aussi la nécessité de poursuivre les efforts de recherche, d'innovation technologique et d'investissement pour faire de ce secteur un levier de croissance au niveau national et régional.

Références Bibliographiques

- [1] Merrouche Nora et Lahmar Abbou Fatiha, " Étude théorique et expérimentale des kaolins (Étude par DFT) ", Mémoire de Master, Université Abderahmane mira – Bejaia, 2015
- [2] CHEKNOUN RABAH et RABIA HAKIM, " Valorisation du kaolin de Tamazert pour les besoins de la céramique ", Travail de fin d'études d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique, 2015
- [3] CHOUAFA Mohamed, " Comportement du Kaolin à l'enrichissement par flottation. Cas de la mine de Tamazert – Jijel ", thèse de doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2016
- [4] Mr ACHOUR. Massinissa, "Caractéristiques Pétrographiques et Minéralogiques des Kaolins d'El-Milia-Jijel, Algérie nord oriental (cas du Djebel Tamazert) ", Mémoire de Master, Université de Jijel, 2013
- [5] Zegga Amel et Tahir Lynda, "Enrichissement des sous-produits siliceux générés par le traitement du kaolin de Tamazert (Wilaya de Jijel)", Mémoire de Master, 2022
- [6] DJIDJELI AHCENE, "rapport géologique actualisé complexe des kaolins d'EL Milia", 2020
- [7] Mehsas Boumediene et al, "Valorisation du kaolin de Tamazert (Algérie) dans l'industrie cimentaire : élaboration d'un Métakaolin et d'un écociment", Academic Journal of Civil Engineering, 2019
- [8] Bounib Hamou, " Elaboration et caractérisation micro structurale et mécanique des réfractaires à base de kaolin DD3 et la dolomite (5-20% poids) ", 2018
- [9] Murray H. H, " Applied clay mineralogy: occurrences, processing and applications of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite, and common clays ", Elsevier, 2006
- [10] BOURBALA Brahim, "Essais de valorisation de la Kaolinite du Gisement d'El Milia par Blanchiment Chimique et Flottation", Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2015
- [11] BARR Oussama et CHERFA Djaafar, " Contribution à l'étude géologique, géochimique et minéralogique des formations kaolinitiques du gisement de Tamazert El Milia (wilaya de Jijel), Mémoire de Master, Université de Sétif, 2019
- [12] SOALKA, "Procédures internes d'exploitation et de tri du kaolin sur le site de Tamazert", Rapport technique non publié, 2023
- [13] MRAD Chaima et GHENAI Ghazlane , " ETUDE PETROGRAPHIQUE DU MARBRE DU GISEMENT DE FILFILA (SKIKDA, NORD-EST ALGERIEN) ", Mémoire de Master, ENSTI, 2024

[14] BENMOSTEFA Racha, " Etude pétrographique du feldspath de la mine de Ain Barbar" , Mémoire de Master, ENSTI,2014

[15] Asif Ali, Yi Wai Chiang and Rafael M. Santos , " X-Ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions" , Minerals, School of Engineering University of Guelph, 2022

[16] Cullity B.D et Stock S. R.," Elements of X-ray Diffraction (3rd ed.)", University of Notre Dame, 2001

[17] SAIDI Adam Younes, " Le Complexe des Kaolins d'El-Milia ", Rapport de stage pratique, ENSTI,2024