



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

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme de MASTER

Domaine : Science et Technique

Filière : Génie Minier

Spécialité : Génie Minier

Présenté par

ASMA BELAZLA

AYA BOUFENAR

**Amélioration de la qualité de la
Céramique par la réduction du risque de rupture ultérieure
(Cas de l'entreprise Céramica Seklouli –Sétif).**

Encadré par

Mr. HAMID GOUCHENE

Département

Génie Minier, de la Métallurgie et des Matériaux

Membres du jury :

- Pr. SALIM BENSEHAMDI Président ENSTI
- MCB. TOUFIK BATOCHE Examineur ENSTI

Année 2025

Remerciement :

Tout d'abord, nous remercions le bon Dieu, le Tout Miséricordieux, de nous avoir donné la vie et la santé afin de pouvoir atteindre nos objectifs.

Nous remercions l'école pour son soutien et son encouragement tout au long de notre formation.

Les enseignements et les conseils reçus ont été essentiels à notre apprentissage, et nous sommes fières de faire partie de cette communauté éducative.

Nous tenons à remercier notre encadrants, Mr GOUCHENE HAMID, qui nous a accueillies chaleureusement et nous a prodigué de précieux conseils.

Nous remercions les membres du jury qui nous feront l'honneur de juger ce travail.

Nous remercions également tous ceux qui nous ont enseigné et guidé durant nos études.

C'est avec un immense plaisir que nous exprimons toute notre gratitude et notre satisfaction à l'ingénieur ALLEM ABD ELGHANI, qui n'a ménagé aucun effort pour nous encadrer.

Sans oublier également tous les travailleurs de l'entreprise CIRAMICA SEKLOULI.

Dédicace :

Aux deux âmes pures, mes chers parents, à **mon père** modèle de sagesse de patience et de courage ta présence dans ma vie est un pilier ton regard une force silencieuse qui m'a toujours guidée.

À **ma mère** la source d'amour inconditionnel ton soutien tes prières et tes sacrifices sont gravés dans mon cœur rien ne serait possible sans toi.

À mon frère bienaimé **Joud**, à mes chers sœurs **Hanane** et **Samiha** pour votre affection nos encouragements et tous les petits gestes qui font toute la différence, et au Mari de ma sœur **Fouad** merci pour chaque moment de soutien et chaque mot d'encouragement.

À mes petites nièces **Nourssine** et **Taline** trésor de joie et d'innocence, dont les sourires illuminent mes journées.

À toute la famille pour leur amour simple et sincère.

À mes amis **Amel, Amani, chahrazed, Bouthaina, Dina, Rim, Hamza, Zaki**, qui ont partagé avec moi les rires, les larmes, le stress et les moments de motivation, Merci d'avoir été là, chacune à votre manière "que dieu vous protège" merci énormément pour votre présence et vos encouragements qui ont enrichi ma vie et m'ont donné la chaleur d'une véritable amitié.

À mes collègues de la promo génie minier de l'ENSTI, À tous ceux qui me connaissent ce travail vous est dédié.

ASMA

Dédicace :

Je dédie avec beaucoup d'émotion et de fierté ce modeste travail :

A, celle qui me donne la force et le courage et qui fait que ma vie est un sens ; **ma mère.**

A, mon exemple d'honnêteté et de volonté ; **mon père.**

Tous les deux m'ont guidé vers le bon chemin grâce à leur éducation leur précieux conseils, leur encouragement durant toutes ces années d'étude que Dieu les protège.

À mon grand frère, **Islam**, qui a toujours été un soutien et un modèle, merci pour ta rassurante et ton affection inestimable.

À mon frère, **Oussama**, mon compagnon d'esprit et d'âme, qui m'a appris que la vraie force réside dans le calme et la sagesse.

Et à mon petit frère, **ilyes**, mon compagnon d'enfance et mes rires incessants, tu resteras à jamais le plus proche de mon cœur.

À tous mes collègues de la cinquième année génie minier de l'École supérieure de technologie et d'ingénierie.

AYA

ملخص:

تهدف هذه المذكرة إلى تحسين جودة المنتجات السيراميكية من خلال دراسة سبب خفي للانكسار المتأخر، وهو ترطيب الجير المطفأ (Ca(OH)_2) بعد الحرق، الناتج عن تحلل مركبات الكالسيوم مثل الكالسيت أثناء المعالجة الحرارية. تم إجراء تحاليل فيزيائية وكيميائية لعينة من الطين المستعمل في صناعة البلاط باستخدام تقنيات MEB و EDS، مما مكن من الكشف عن نسب مرتفعة من الأكاسيد غير المستقرة (CaO ، SO_3 ، MgO) التي تتسبب في الانتفاخ الداخلي بعد التخزين. من أجل الحد من هذه الظاهرة، تم اقتراح حلول تقنية شملت الترسيب، والتحكم في التدرج الحبيبي، وتحسين مراحل التجفيف والطبخ، مما أدى إلى تحسين واضح في جودة واستقرار المنتج النهائي.

الكلمات المفتاحية: السيراميك، الجير المطفأ، الانكسار المتأخر، الانتفاخ، الطين، الشوائب، الترسيب.

Abstract :

This study focuses on improving the quality of ceramic products by investigating a hidden cause of delayed rupture : the post-firing hydration of slaked lime (Ca(OH)_2), resulting from the thermal decomposition of calcareous compounds like calcite. Through physico-chemical analysis of a clay sample used in tile production, several methods (SEM, EDS) were applied to identify high levels of unstable oxides (CaO , SO_3 , MgO), which are responsible for internal swelling after storage. Technical solutions such as clay decantation, particle size control, and drying/firing optimization were proposed to reduce these defects and enhance product stability. Keywords : ceramics, slaked lime, delayed rupture, swelling, clay, impurities, decantation.

Résumer :

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de la qualité des produits céramiques, en étudiant une cause de rupture différée souvent négligée : l'hydratation post-cuisson de la chaux éteinte (Ca(OH)_2), issue de la décomposition thermique de certains composés calciques comme la calcite. À travers une analyse physico-chimique d'un échantillon d'argile utilisé dans la fabrication des carreaux, plusieurs méthodes ont été mises en œuvre (MEB, EDS), permettant d'identifier des teneurs élevées en oxydes instables (CaO , SO_3 , MgO), responsables de gonflements internes après stockage. Des solutions techniques comme la décantation, le contrôle de la granulométrie, et l'optimisation du séchage et de la cuisson ont permis de limiter ces défauts et d'améliorer la stabilité du produit final.

Mots-clés : céramique, chaux éteinte, rupture différée, gonflement, argile, impuretés, décantation

Sommaire :

Liste des abréviations et des symboles :	8
Liste des tableaux :	9
Liste des figures :	10
Introduction générale :	1
Chapitre 01 : Description de l'entreprise du stage, motivation et problématique	2
Introduction :	2
2. Processus de fabrication :	2
a. Préparation du mélange et stockage :	2
.b Préparation et stockage de la poudre à presser :	3
c. Pressage de la poudre :	4
d. Séchage des carreaux :	4
e. Cuisson des carreaux :	4
f. Emaillage et décoration :	5
g. Cuisson des carreaux émaillés :	5
h. Sélection des produits finis et emballage :	5
3. Motivation :	6
4. Problématique :	6
Conclusion :	6
Chapitre 02 : Revue de la littérature bibliographique	7
Introduction :	7
1. Les argiles :	7
1.1. Définition :	7
1.2. Composition mineralogique :	7
2. Les céramiques :	8
2.1. Définition :	8
2.2. Propriétés générales des céramiques :	8
2.3. Classification des céramiques :	8
Conclusion :	9
Chapitre 03 : Matériaux et Méthodes expérimentales	10
Introduction :	10
1. Matières premières utilisées :	10
1.1. L'argile kaolinique :	10
1.2. L'argile illitique :	10

2. Méthodes d'analyse :	10
2.1. La microscopie électronique à balayage (MEB) :	10
3. Préparation des échantillons :	11
a. Séchage :	11
b. Broyage :	11
c. Tamisage :	11
d. Stockage :	11
Conclusion :	12
Chapitre 04 : Résultats et discussion	13
Introduction :	13
1. Résultats des analyses :	13
2. Caractérisation des matières premières :	16
3. Matériaux argileux :	17
4. Proposition de solutions :	17
5. Conditions de stockage de la matière première (humidité, hygrométrie) :	19
6. Contrôle de la granulométrie :	20
7. Séchage :	20
8. Test de cuisson :	21
Conclusion :	23
Conclusion générale :	25
Références bibliographiques :	26

Liste des abréviations et des symboles :

CaCO_3 : Carbonate de calcium (calcite).

CaO : Oxyde de calcium (chaux vive).

Ca(OH)_2 : Hydroxyde de calcium (chaux éteinte).

SO_3 : Trioxyde de soufre (indique la présence de sulfates).

MgO : Oxyde de magnésium.

MEB : Microscopie électronique à balayage.

EDS : Spectroscopie Dispersive en Énergie.

$^{\circ}\text{C}$: Température en degrés Celsius.

μm : Micromètre ($1\ \mu\text{m} = 10^{-6}$ mètre).

SiO_2 : Dioxyde de silicium

Al_2O_3 : Oxyde d'aluminium

K_2O : Oxyde de potassium.

K^+ : Ion potassium

Liste des tableaux :

Tableau 1. Analyse chimique quantitative des argiles	13
Tableau 2. Composition chimique d'une argile de haute qualité.	17
Tableau 3. Analyse chimique quantitative d'argile après Décantation	18
Tableau 4. Comparaison entre deux échantillons d'argile avant et après la décantation	19

Liste des figures :

Figure 1. Localisation géographique de ceramica seklouli	2
Figure 2. Stockage de mélange.....	3
Figure 3. Stockage de la poudre à presser.	3
Figure 4. Pressage de la poudre et formation des carreaux céramiques.	4
Figure 5. Four de cuisson.	5
Figure 6. Les émaux.	5
Figure 7. Manifestations visuelles du défaut.	6
Figure 8. Pièces de céramique traditionnelles.	9
Figure 9. Pièces de céramique technique.....	9
Figure 10. Le microscope électronique à balayage (MEB).	11
Figure 11. Echantillon d'argile.	12
Figure 12. Observation de la structure de l'argile au MEB (200×).....	14
Figure 13. Observation de la structure de l'argile au MEB (400×).....	14
Figure 14. Observation de la structure de l'argile au MEB (800×).....	15
Figure 15. Observation de la structure de l'argile au MEB (1600×).....	15
Figure 16. Observation de la structure de l'argile au MEB (3000×).....	15
Figure 17. Analyse élémentaire de l'argile brute par EDS.....	16
Figure 18. Echantillon d'argile après Décantation.....	18

Introduction générale :

La céramique est l'un des matériaux les plus anciens qui a été façonné et utilisé par l'homme depuis des millénaires à des fins artistiques, esthétique et architecturales. Jusqu'à présent, la céramique joue encore un rôle important dans de nombreux secteurs, notamment la construction grâce à ses propriétés mécaniques, chimiques et thermiques remarquables.

Cependant, malgré le développement technologique actuel, l'industrie de fabrication de la céramique est encore confrontée à de nombreux obstacles et défauts qui affectent la qualité et la durabilité des produits finis. Parmi eux, le phénomène de rupture différée de la céramique né à cause de l'hydratation de la chaux éteinte est un défaut préoccupant dans la fabrication de carreaux céramiques. Il s'agit d'une réaction chimique accompagnée d'un gonflement, alors susceptible de créer des fissures parfois, voire d'entraîner l'éclatement du matériau bien après sa mise en service.

Ce travail s'inscrit dans une démarche d'amélioration de la qualité des carreaux céramiques par une compréhension approfondie des matières premières, des conditions de stockage, des méthodes de préparation et des paramètres de cuisson, ce qui est crucial pour améliorer les performances des produits finis.

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un stage effectué au sein de l'entreprise ceramica seklouli, spécialisée dans La fabrication du carreau mural en bi cuisson. Elle repose sur des analyses expérimentales comme la caractérisation des matières premières, et aussi sur l'observation des processus industriels.

Le manuscrit proposé est organisé comme suite :

Le premier chapitre présente l'entreprise du stage ainsi que les processus de fabrication de ses carreaux céramiques, la motivation du travail ainsi que la problématique abordée.

Le deuxième chapitre concerne le cadre théorique général relatif aux matériaux céramiques (définitions, propriétés, classification, et domaines d'utilisation).

Le troisième chapitre détaille les matières premières utilisées et les méthodes analytiques employées ainsi que les résultats expérimentaux obtenus.

Le quatrième chapitre expose les résultats et discussion de ces derniers, en y intégrant une discussion critique puis des préconisations pour réduire les défauts liés à l'hydratation de la chaux.

Ce travail se termine par une conclusion générale qui résume les points essentiels et forts de ce travail.

Chapitre 01 : Description de l'entreprise du stage, motivation et problématique

Introduction :

L'industrie de la céramique joue un rôle fondamental dans le domaine des matériaux de construction, notamment ceux liés aux revêtements muraux. Dans ce chapitre, nous découvrirons l'entreprise ceramica Sklouli et les méthodes utilisées dans la fabrication de carreaux céramiques muraux en plus d'aborder le problème principal auquel l'entreprise est confrontée.

1. Description de l'entreprise du stage :

Ceramica sklouli est une entreprise spécialisée dans la fabrication de carreaux céramiques muraux. Elle est une filiale du Groupe SOFCER. Fondée en 2014 par M. Sklouli Azouz, elle a été créée sous un nouveau nom et un nouveau logo. L'entreprise est située dans la deuxième tranche de la zone industrielle de la ville de Sétif. [1]

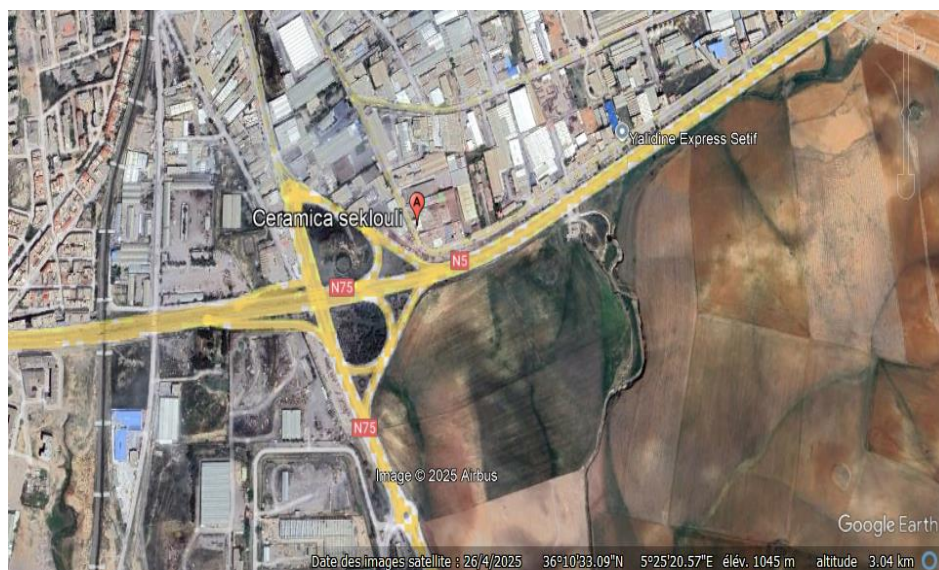


Figure 1. Localisation géographique de ceramica sklouli

2. Processus de fabrication :

La fabrication de ses carreaux muraux en bi cuisson repose sur un processus industriel constitué des étapes suivantes [2] :

a. Préparation du mélange et stockage :

Après la réception de la matière première provenant de la wilaya de Khenchela, celle-ci est constituée d'argile, de sable et de chamotte (rebuts de biscuit qui sont recyclés). Ces éléments sont ajoutés pour préparer un mélange à composition spécifique, lequel est ensuite stocké dans des zones de stockage à l'air libre en été et en intérieur (sous hangar) en hiver.

La quantité consommée par jour est de 40 tonnes."



Figure 2. Stockage de mélange

b. Préparation et stockage de la poudre à presser :

La préparation de la poudre s'effectue au moyen d'installations automatiques et comprend plusieurs phases :

- Chargement du mélange dans l'alimentateur.
- Nettoyage du mélange pour éliminer les objets paramagnétiques (acier), réalisé par un séparateur magnétique situé entre l'alimentateur et un concasseur.
- Concassage des blocs à l'aide d'un concasseur.
- Broyage du mélange pour assurer une granulométrie conforme, en utilisant un broyeur d'une capacité de 2,5 tonnes/heure.
- Stockage : Le transfert de la poudre prête pour l'humidification est effectué par une pompe à hélice vers un silo de stockage.
- Humidification de la poudre afin d'atteindre un taux d'humidité moyen de 7,5 %.
- Stockage alterné de la poudre préparée pour le pressage dans deux silos d'une capacité de 25 à 30 tonnes chacun.



Figure 3. Stockage de la poudre à presser.

c. Pressage de la poudre :

L'opération de pressage est réalisée à l'aide d'une presse hydraulique équipée d'un moule composé de deux parties, permettant de compacter l'unité à produire.

La pièce obtenue, appelée carreau pressé, est ensuite acheminée par un convoyeur vers la zone de séchage.



Figure 4. Pressage de la poudre et formation des carreaux céramiques.

d. Séchage des carreaux :

Un temps de séchage de 1h30 à une température de 230 C° est prévu dans cette phase avant la phase suivante de cuisson.

e. Cuisson des carreaux :

La cuisson consiste à faire transiter les carreaux pressés et séchés dans un four à rouleaux, à travers plusieurs compartiments successifs, selon une température et un temps de passage bien déterminés :

- Pré-four
- Zone de préchauffage
- Zone de cuisson (entre 900 °C et 1085 °C)
- Zone de refroidissement rapide par soufflage d'air frais
- Zone intermédiaire
- Zone de refroidissement final (environ 50 °C)

Le biscuit obtenu après cuisson est soumis à un contrôle visuel afin de détecter les défauts apparents (déformation, flexion, fissuration, casse).

Il est ensuite mis sur palette et acheminé vers la ligne d'émaillage.



Figure 5. Four de cuisson.

f. Emaillage et décoration :

L'engobe, de nature mate et opaque, est appliqué comme première couche sur le biscuit afin de masquer les défauts de surface et la couleur brune du support, et ainsi conférer une base blanche aux carreaux.

La cristalline est ensuite utilisée comme deuxième couche pour apporter de la brillance.

L'ensemble des émaux et des produits utilisés pour la sérigraphie sont préparés dans la zone dédiée à la préparation des émaux et des couleurs.

La décoration des carreaux émaillés, réalisée par sérigraphie, permet de créer les différents motifs. Cette opération est effectuée à l'aide de machines de sérigraphie classiques ou de machines planes spécialisées.



Figure 6. Les émaux.

g. Cuisson des carreaux émaillés :

Durant cette étape, la Cuisson du biscuit émaillé est effectuée dans un four à rouleaux appelé four email. La pièce finie est déplacée vers la zone de sélection et emballage des produits finis.

h. Sélection des produits finis et emballage :

Enfin, les produits compatibles avec les normes sont sélectionnés et envoyés à l'emballage pour la vente.

3. Motivation :

Dans le cadre de notre formation en génie minier on a dû explorer plus à fond les matériaux minéraux et leur impact sur la qualité des produits finis. Ce choix de stage s'est posé comme une évidence vers une entreprise spécialisée dans la fabrication de céramique qui est un domaine où les matières premières minérale jouent un rôle crucial.

Le sujet abordé concerne l'amélioration de la qualité de la céramique en réduisant le risque de rupture dû à l'hydratation de la chaux éteinte, nous a particulièrement intéressé car il traite d'un phénomène qui a un impact direct et majeur au niveau industriel. Ce travail nous aide à coordonner nos connaissances théoriques avec un problème concret tout en développant nos connaissances en observation et analyse des défauts et amélioration des procédés de fabrication.

4. Problématique :

Pendant l'opération de cuisson des carreaux céramique certaines impuretés contenues dans les matières premières notamment les sulfates (CaSO_4) et les carbonates de calcium (CaCO_3) sont se décomposent en raison de la température élevée cela crée la chaux vive (CaO).

Après la fabrication, cette chaux vive a le pouvoir de se lier et réagir avec l'eau pour former de la chaux éteinte (Ca(OH)_2) par un processus d'hydratation, ce dernier s'accompagne d'un gonflement important des contraintes internes capables de provoquer des microfissures qui évoluent en rupture avec le temps.

Ce phénomène, difficilement détectable en fin de production, constitue un grand problème de qualité pour l'entreprise, car il compromet la durabilité du produit et causer des pertes économiques et des insatisfactions des clients.

Pour illustrer le problème étudié, les figures ci-jointes montrent la présence d'impuretés (notamment le gypse) dans la matière première ainsi que les défauts observés sur les carreaux céramiques.



Figure 7. Manifestations visuelles du défaut.

Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de présenter le lieu de notre stage ainsi que les raisons de notre choix. Nous avons abordé une problématique industrielle réelle qui est la rupture des carreaux céramiques causée par la présence de chaux éteinte. Ainsi, l'objectif principal a été déterminé et qui est de comprendre ce phénomène et proposer des solutions qui amélioreraient la qualité des produits finis.

Chapitre 02 : Revue de la littérature bibliographique

Introduction :

La céramique est un matériau très répandu dans l'industrie, notamment dans la construction, en raison de ses propriétés mécaniques, thermiques et chimiques. L'un des principaux composants de ces matériaux est l'argile qui est une matière première d'origine minérale, sa composition et sa structure affectent directement la qualité des produits finis. Par conséquent, ce chapitre est consacré aux généralités sur les argiles et les céramiques.

1. Les argiles :

1.1. Définition :

L'argile est une roche sédimentaire qui se forme par la cristallisation de minéraux en très petites particules minérales tel que les silicates d'alumine et/ou la magnésie hydratée. Les argiles sont des aluminosilicates hydratés appartenant à la famille des phyllosilicates.

Ces particules, dont la taille est très fines inférieure à 2 micromètres, présentent une grande surface spécifique et confèrent à l'argile des propriétés physico-chimiques uniques.

Les argiles se caractérisent principalement par une structure en feuillets [3].

• **Propriétés et utilisation :**

Grâce à la granulométrie très fine de l'argile, et à sa structure minéralogique particulière, il possède un ensemble de propriétés physico-chimiques dont les plus importantes sont :

- **Absorption d'eau :** Les matériaux argileux sont capables d'absorber une grande quantité d'eau en raison de la présence de pores très fins.
- **Plasticité :** la capacité d'un matériau argileux à se déformer élastiquement sous l'effet des contraintes ou de forces externes.
- **Compaction importante :** Lorsqu'une force importante est appliquée aux matériaux argileux, une grande quantité d'eau est libérée des espaces entre les molécules, ce qui conduit à :
 - La réduction de l'espace poreux.
 - Rendre un matériau plus rigide et moins perméable à l'eau (impermeable).
- **Pouvoir adsorbant :** la capacité des particules d'argile à attirer et à fixer des molécules ou des ions de la solution à leur surface, sans qu'ils pénètrent dans la structure.
- **Dispersion dans l'eau et floculation :** Dans l'eau pure ou en mouvement, les fines particules d'argile restent en suspension car elles sont très légères et ne se déposent pas facilement.

L'argile est également utilisée dans de nombreux domaines, dont les plus importants sont : ciment (avec calcaire) , céramiques (poteries, briques, tuiles) , pharmacie et cosmétique...[4].

1.2. Composition minéralogique :

La composition minéralogique des argiles est dominée par la présence de minéraux argileux appartenant à la famille des phyllosilicates. En plus de ces minéraux argileux, on retrouve aussi des impuretés minérales qui peuvent représenter un pourcentage important de la roche.

Parmi ces composants on a :

- Le quartz : sous forme de microquartz d'origine éolienne qui peut représenter jusqu'à 30 % de la roche.
- La calcédoine et l'opale : des formes mal cristallisées et hydratées de la silice, issues de sources organiques.
- Les oxydes et hydroxydes de fer, comme l'hématite et la goethite, sont également courants et déterminent la couleur des argiles.
- Sulfures de fer : présents en milieu réducteur, tel que le pyrite

- La gibbsite (un oxyde d'aluminium) : Sous climats chauds et humides.
- Les carbonates tels que la calcite et la dolomite, ainsi que des matières organiques [4]

2. Les céramiques :

2.1. Définition :

Le mot céramique dérive du grec « keramos », voulant dire « argile ». Les céramiques sont des matériaux solides synthétiques dont la production nécessite un traitement thermique. Elles ne sont ni métalliques ni polymères. Ce sont des matériaux polycristallins contenant un grand nombre de cristaux fins et bien ordonnés (grains), reliés par des régions moins ordonnées.[4]

2.2. Propriétés générales des céramiques :

Les céramiques possèdent un ensemble de propriétés dont les plus importantes sont :

- Liaisons chimique :** les céramiques se caractérisent par de fortes liaisons chimiques dues à leur nature covalente, ionique et éventuellement mixte, qui assurent la cohésion du matériau et contribuent à déterminer certaines propriétés physiques et la classification des céramiques..
- Propriétés mécaniques :** les céramiques sont généralement fragiles car la force nécessaire à leur rupture est inférieure à celle nécessaire à leur déformation. On suppose donc, avec une approximation très proche, que leur comportement est élastique jusqu'à la rupture. Grâce à ces liaisons solides, les céramiques présentent des modules d'élasticité élevés par rapport aux métaux. Les propriétés qui rendent les céramiques fragiles leur confèrent également les propriétés recherchées de dureté, de résistance mécanique et de résistance chimique..
- Propriétés thermiques :** En raison de ses fortes liaisons chimiques, les céramiques nécessitent une température de fusion très élevée, qui peut dépasser 2000. Ils sont également considérés comme des isolants thermiques.
- Propriétés électroniques :** Les céramiques contiennent trois catégories de matériaux : les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs. Cependant, en général, la plupart des céramiques sont des isolants et présentent une faible conductivité par rapport aux métaux en raison de l'absence d'électrons libres de la nature des liaisons.
- Propriétés optiques :** La couleur est l'une des propriétés optiques les plus importantes qui permet aux céramiques d'être utilisées dans diverses applications . [5]

2.3. Classification des céramiques :

2.3.1. Les céramiques traditionnelles :

Les céramiques traditionnelles sont fabriquées en modelant les matières premières naturelles (argile, quartz et feldspath) avec de l'eau. Et sont généralement formées en versant le mélange liquide dans des moules. Les céramiques traditionnelles sont destinées généralement à usage alimentaire, pour la construction et la décoration par exemple la Terre cuite (Briques, poteries), Faïence et la porcelaine (vaisselle et objets décoratifs).[5]



Figure 8. Pièces de céramique traditionnelles.

2.3.2. Céramiques techniques ou industrielles :

Les céramiques techniques sont principalement obtenues par frittage, qui est un traitement thermomécanique dans des fours spéciaux, qui conduit à la cohésion de grains de poudre avec un aggloméré préparé à froid. ou par électrofusion, ce qui signifie que les oxydes sont coulés directement dans un moule [5].



Figure 9. Pièces de céramique technique.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons appris à connaître la matière première utilisée dans la céramique, et qui est l'argile en expliquant sa structure, ses propriétés et son rôle dans la fabrication. Nous avons également abordé la définition de la céramique, ses types et leurs applications. Cette base théorique est essentielle pour analyser la performance des produits céramiques.

Chapitre 03 : Matériaux et Méthodes expérimentales

Introduction :

Au sein de tout travail de recherche, de caractérisation et d'amélioration d'un matériau, il est impératif de débiter par une compréhension des matières premières utilisées ainsi que des méthodes employées pour leur analyse. Pour la céramique, la qualité du produit dépend généralement de la Nature, proportion et comportement des composants minéraux tels que l'argile. Ce chapitre sera ainsi consacré à l'étude des matières premières utilisées pour la fabrication de carreaux céramiques, Il présentera ensuite les principales techniques d'analyse pour identifier les phases minérales présentes, y compris les défauts et les phénomènes à l'origine des ruptures.

1. Matières premières utilisées :

Les matières premières utilisées dans la fabrication des carreaux céramiques étudiés sont essentiellement des argiles naturelles en particulier l'argile kaolinique et l'argile illitique.

1.1. L'argile kaolinique :

L'argile kaolinique se caractérise par l'absence de substitution dans les couches, ce qui signifie que la couche est neutre. L'argile kaolinique se forme dans les sols bien drainés au pH acide, notamment sous les climats subtropicaux et tropicaux. Ses cristaux sont souvent de grande taille atteignant 15 μm [4].

1.2. L'argile illitique :

L'argile illitique est composée principalement de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et de potassium (K_2O). Mais il peut y avoir des substitutions (remplacement de Si par Al). Des cations (K^+) sont adsorbés dans l'espace interfoliaire afin de compenser le déséquilibre des charges. Sa structure est proche de la muscovite mais contient plus d'eau et moins de potassium [4].

2. Méthodes d'analyse :

2.1. La microscopie électronique à balayage (MEB) :

La microscopie électronique à balayage (MEB) est un instrument d'analyse permettant d'obtenir rapidement des informations sur la morphologie et la composition chimique d'un objet solide. Le principe du MEB est proposé par KNOLL dès 1935, celui-ci se développa très vite et devint opérationnel vers 1939, permettant des grossissements allant de quelques unités à 50000 ou 100000. Son utilisation est courante en biologie, chimie, métallurgie, médecine et géologie [6].

2.1.1. Principe du MEB :

Le fonctionnement du microscope électronique à balayage (MEB) repose sur un faisceau d'électrons, produit par un filament de tungstène en émission thermique, puis accéléré sous une haute tension, pouvant atteindre 40 Kv. après avoir traversé un canal à vide, Le faisceau est focalisé par des lentilles électromagnétiques, qui contrôlent l'orientation et la largeur du faisceau. Dans la chambre à vide, les électrons interagissent avec la surface de l'échantillon et génèrent des électrons secondaires, des électrons rétrodiffusés et des rayons X. Traités et

analysés, ces signaux permettent d'obtenir une imagerie en trois dimensions de la surface et une analyse qualitative et quantitative de la composition chimique de l'échantillon [6].



Figure 10. Le microscope électronique à balayage (MEB).

3. Préparation des échantillons :

Avant de procéder aux analyses en laboratoire, les échantillons sont soumis à un processus de préparation qui garantit la fiabilité et la reproductibilité des résultats obtenus. Ce processus comprend les étapes suivantes :

a. Séchage :

À cette étape, l'échantillon est séché puis placé dans un four à une température de 100 degrés Celsius pour éliminer toute trace d'humidité qui pourrait interférer avec les analyses thermiques et structurales.

b. Broyage :

Après le processus de séchage, l'échantillon est broyé mécaniquement à l'aide d'un petit broyeur pour obtenir une poudre fine, ce qui contribue à l'homogénéité du mélange et à une bonne représentativité lors de l'analyse.

c. Tamisage :

La poudre obtenue a ensuite été tamisée à travers un tamis à mailles fines (100 μ m) pour garantir une granulométrie uniforme, ce qui est particulièrement important pour l'analyse par DRX et pour une bonne dispersion dans les analyse de MEB .

d. Stockage :

Les échantillons préparés ont été conservés dans des récipients hermétiques, à l'abri de l'humidité et de la lumière, jusqu'à leur utilisation. Cela a permis de garantir la stabilité des propriétés physiques et chimiques des matériaux avant analyse.



Figure 11. Echantillon d'argile.

Conclusion :

Dans ce troisième chapitre, nous avons abordé les types de matières premières utilisées dans la fabrication des carreaux céramiques ainsi que les principales méthodes d'analyse permettant d'étudier leur structure, leur composition minéralogique et leurs propriétés.

L'échantillons ainsi préparés et caractérisés à l'aide de méthode précédente a permis d'établir une base d'interprétation solide pour les résultats expérimentaux qui seront présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 04 : Résultats et discussion

Introduction :

Ce chapitre présente et analyse les résultats de notre étude. Ces conclusions portent principalement sur la caractérisation des matières premières des carreaux céramiques et leur comparaison avec les matériaux argileux. Les conditions de stockage, le contrôle granulométrique, le séchage et les tests de cuisson seront également abordés. Chaque paramètre sera analysé et son influence sur la qualité de produit finis sera examiné, afin de mieux comprendre les causes des défauts possibles et de proposer des solutions d'amélioration.

1. Résultats des analyses :

L'analyse MEB a été réalisée afin d'obtenir des informations sur la morphologie et la composition chimique ainsi que la structure fine des grains, leur distribution et leur agglomération des matières premières utilisées, ce qui permet de détecter la présence éventuelle de défauts ou d'impuretés capable d'influencer la qualité du produit final.

Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous :

Tableau 1. Analyse chimique quantitative des argiles

Elements	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃
% de masse	54.67	22.42	2.77	0.54	6.41	7.01	1.27	2.34
% atomique	56.96	13.77	1.08	0.42	7.15	10.89	0.84	1.83

Pour mieux comprendre la microstructure de l'argile que nous avons étudiée, nous avons observé un échantillon à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB).

Nous avons pris plusieurs images avec différents grossissements. (200×, 400×, 800×, 1600×, 3000×).

Cela nous permet de voir à la fois la forme générale des grains et les petits détails de leur surface.

En combinant ces différentes images, on obtient une vision complète de la texture de l'échantillon, ce qui nous aide à mieux comprendre des phénomènes comme la présence de phases secondaires, l'agglomération des particules ou la porosité.

Les images suivantes représentent des sections de l'échantillon sous un microscope électronique à balayage.

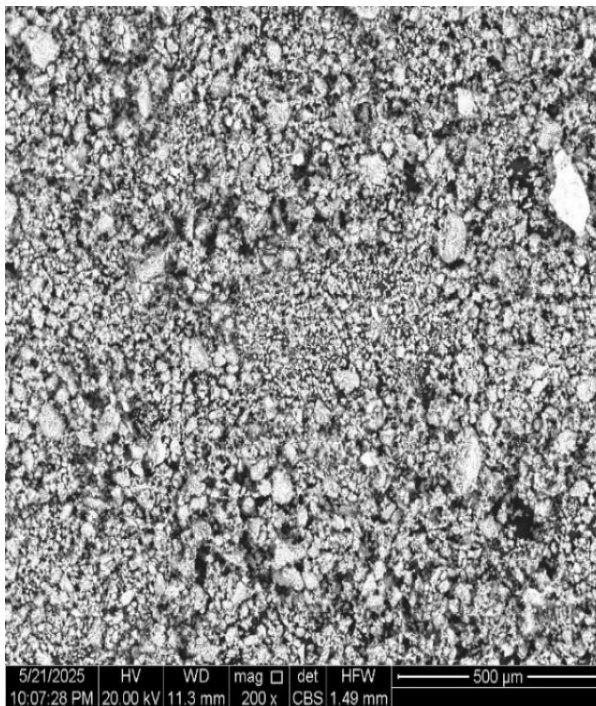


Figure 12. Observation de la structure de l'argile au MEB (200×)

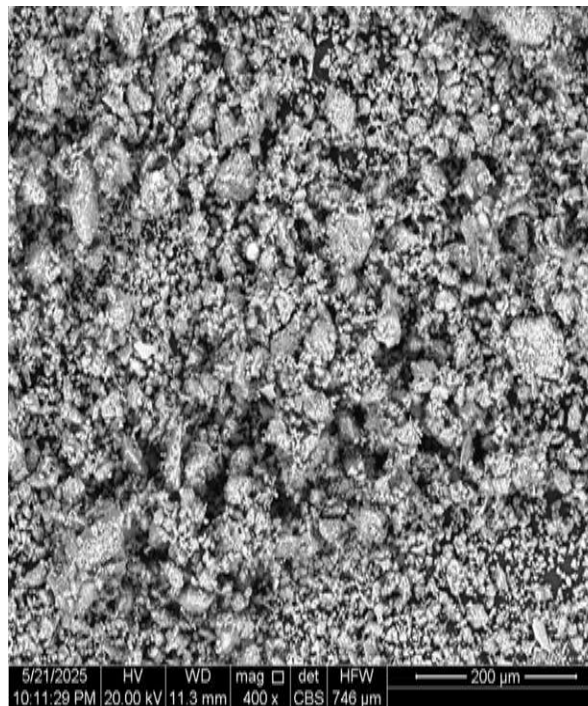


Figure 10. Observation de la structure de l'argile au MEB (400×)

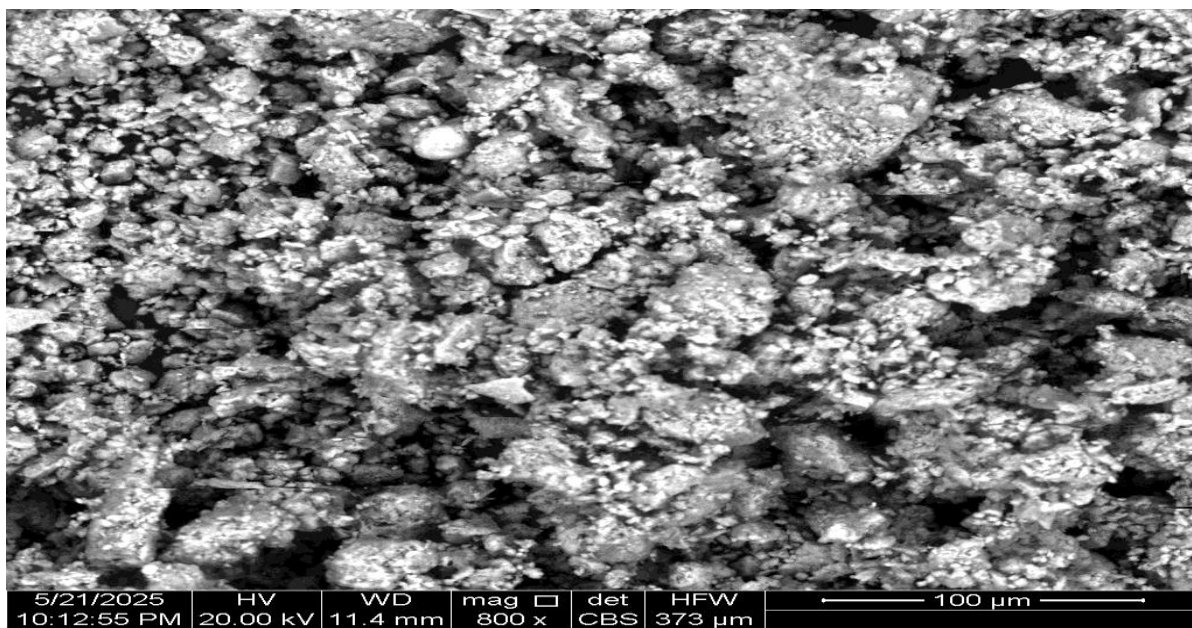


Figure14. Observation de la structure de l'argile au MEB (800×)

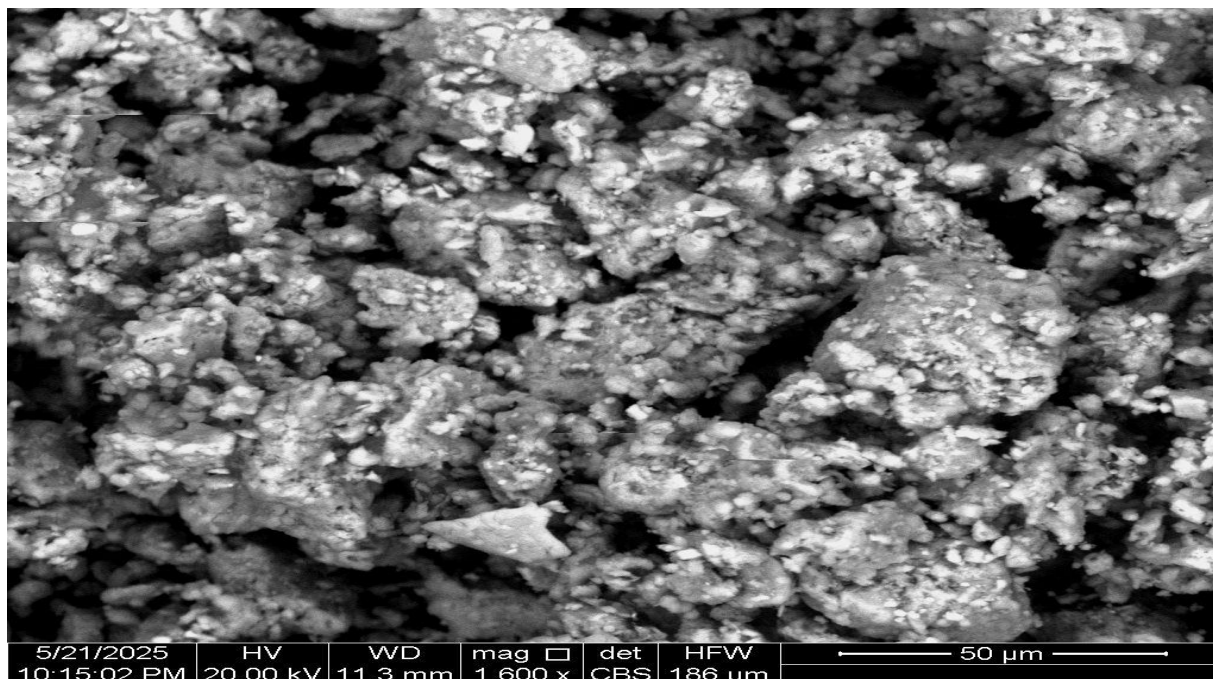


Figure 115. Observation de la structure de l'argile au MEB (1600×)

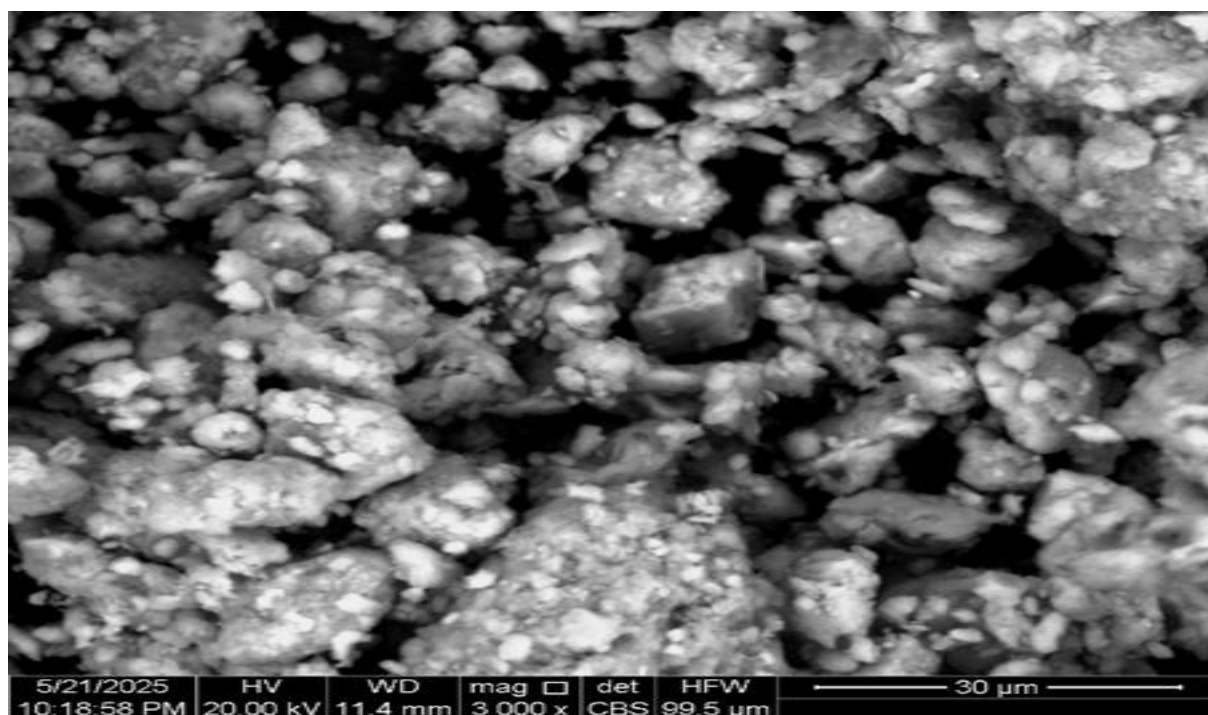


Figure16. Observation de la structure de l'argile au MEB (3000×)

Ci-dessous se trouve un schéma montrant une analyse spectrale d'un échantillon d'argile (la matière première utilisée) à l'aide d'une spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDS ou EDX) généralement associée à un microscope électronique à balayage.

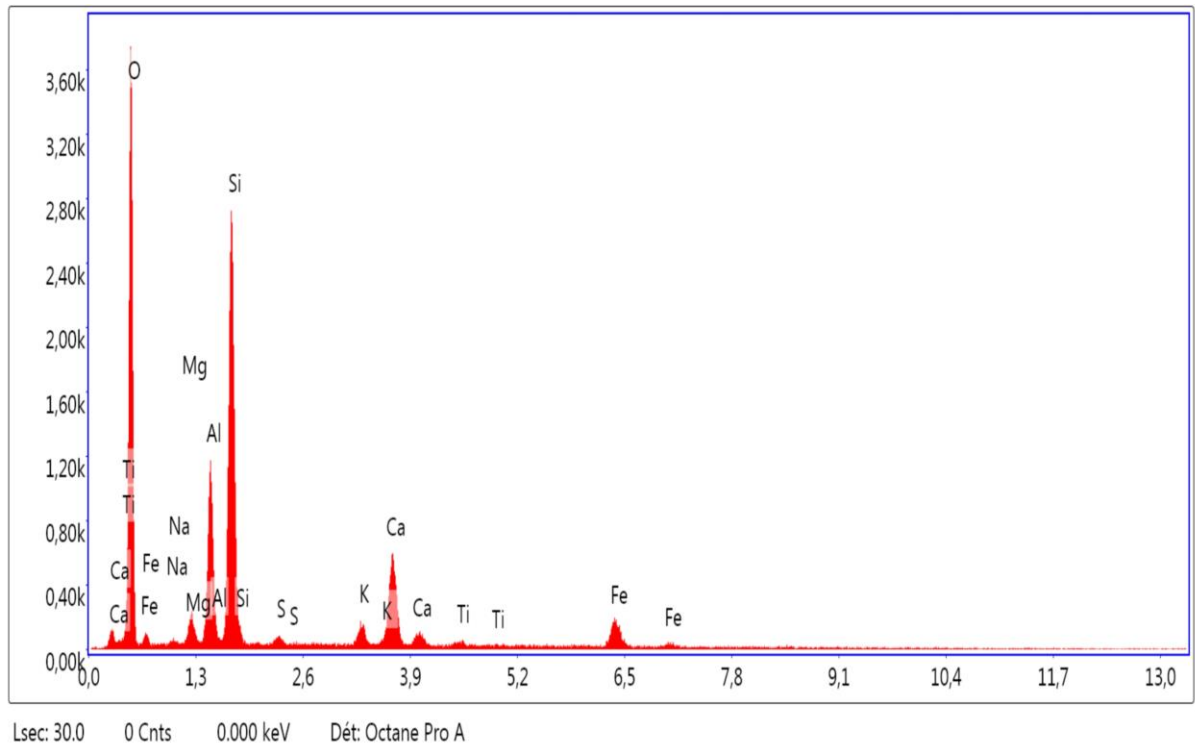


figure 17. Analyse élémentaire de l'argile brute par EDS.

2. Caractérisation des matières premières :

Les images obtenues par microscope électronique à balayage (MEB) d'un échantillon d'argile (Figure 12), prises à différents niveaux de grossissement (180x et 3000x) permettent d'observer la structure sous divers angles, ce qui facilite la compréhension de la composition de l'échantillon.

D'après les images précédentes (figure. 13,14,15,16,17), on peut conclure que :

- la répartition des grains et leur apparence extérieure. La taille et la forme des grains varient, ce qui suggère un mélange de différents composants ou une certaine homogénéité encore incomplète.
- On voit aussi la présence de grains très fins, dits microparticules, qui sont très serrés entre eux. Cela indique qu'il s'agit d'un mélange d'argile très fin avec des grains plus gros, qui pourraient être des impuretés minérales ou des restes non décomposés.
- Certains grains ont une surface rugueuse, ce qui pourrait signifier la présence de minéraux autres que l'argile.

A travers la (figure 18) qui permet de préciser les éléments chimiques présents à la surface de l'échantillon d'argile, on peut remarquer que :

- L'élément le plus abondant est l'oxygène (O_2), suivi de la silice (Si) et de l'aluminium (Al), car ils sont les principaux composants de la plupart des matériaux argileux. Donc nous en concluons que l'échantillon d'argile est riche en minéraux silicatés.
- La présence de calcium (Ca) est importante, Cela indique la présence de la chaux vive (CaO) ou de carbonate de calcium ($CaCO_3$), ce qui peut entraîner des problèmes de qualité de la céramique.
- La présence de titane (Ti) et de fer (Fe), responsables de donner à l'argile sa couleur rouge.

3. Matériaux argileux :

D'après les informations du tableau 1.2 issues d'une étude sur les matériaux céramiques (porcelaine), l'argile kaolinique de haute qualité se caractérise par les teneurs suivantes [7] :

Tableau 2. Composition chimique d'une argile de haute qualité.

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O
% de masse	69,4	21,5	0,83	0,1	0,31	2,38

En comparant l'échantillon étudié avec une argile céramique de haute qualité, nous remarquons que :

- L'échantillon de l'argile étudié est moins riche en silice (54,67 par rapport au 69,21).
- Très bonne teneur d'Oxyde d'aluminium (Al₂O₃) (22,42 par rapport au 21,5).
- Teneur Moyennement faible d'Oxyde de potassium (K₂O) (21,27 par rapport au 2,38).
- La teneur de CaO = 6,41 %, est très élevé par rapport au (0,1 %).
- Teneur élevée d'oxyde de fer (Fe₂O₃) et d'oxyde de magnésium (MgO) (2,77 et 7,01 par rapport au 0,83 et 0,31).

De cela, nous pouvons conclure que l'apparition de problèmes dans la qualité finale du produit céramique, tels que la fissuration ou le gonflement, est due à la proportion relativement élevée de CaO, Fe₂O₃ et MgO.

4. Proposition de solutions :

Parmi les solutions proposées pour améliorer la qualité de la matière première utilisée dans la fabrication des carreaux céramique, nous suggérons l'élimination des impuretés minérales (telles que les carbonates de calcium, les oxydes de fer, le gypse...) par décantation avant la mise en forme.

Ce traitement permet de réduire la teneur en oxydes indésirables tels que CaO et Fe₂O₃, de limiter le risque de gonflement dû à la chaux éteinte, et d'améliorer la qualité du produit céramique final.

Pour y parvenir, nous avons mené une expérience de décantation sur un autre échantillon d'argile au laboratoire de l'entreprise, comme suit :

a. Matériel utilisé :

- Argile brute
- Récipient en plastique
- Eau pure
- Bâtonnet pour mélanger
- Récipient pour recueillir la pâte après décantation
- Four de séchage
- Tamis et broyeur

b. Protocole expérimental :

1. Nous avons mis une quantité d'argile dans un récipient en plastique, puis ajouté progressivement de l'eau pure jusqu'à obtenir un mélange liquide et homogène.
2. Nous avons remué le mélange pendant plusieurs minutes avec un bâton en bois pour briser les grumeaux et séparer les impuretés. Nous avons ensuite laissé reposer le mélange pendant 24 heures, le temps que les particules lourdes se déposent au fond du récipient.

3. Après 24 heures, nous avons séparé la partie supérieure et l'avons coulée sans déranger la partie qui s'est déposée au fond (Nous avons répété le processus deux fois).
4. Après avoir terminé les étapes précédentes, nous avons placé la partie précipitée et l'avons séché à l'étuve. Nous l'avons ensuite broyé à l'aide d'un petit broyeur et placé dans une bouteille en plastique pour l'analyser.



Figure 18 : Echantillon d'argile après Décantation

Ci-dessous, nous montrerons les résultats des analyses MEB obtenues :

Tableau 3. Analyse chimique quantitative d'argile après Décantation

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃
% en masse	36.94	15.94	2.12	0.15	3.60	4.73	0.58	0.18

c. Comparaison des résultats avant et après la décantation :

Le tableau suivant montre les résultats de la comparaison entre deux échantillons d'argile avant et après la décantation :

Tableau 4. Comparaison entre deux échantillons d'argile avant et après la décantation

Les éléments	% avant la décantation	% après la décantation	Commentaire
SiO ₂	54.67	36.94	Elle a diminué et cela peut être dû à la perte d'une partie de l'argile très fine.
Al ₂ O ₃	22.42	15.94	Une baisse relativement acceptable
Fe ₂ O ₃	2.77	2.12	La diminution de la teneur en fer améliore la couleur finale.
TiO ₂	0.54	0.15	Diminution significative entraînant une réduction des oxydes colorés
CaO	6.41	3.60	Teneur en carbonate de calcium significativement plus faible, ce qui signifie un risque de rupture réduit.
MgO	7.01	4.73	Une diminution relative significative conduit à une réduction de l'impact de la dolomie.
K ₂ O	1.27	0.58	Diminution notable
SO ₃	2.34	0.18	Excellente réduction du SO ₃

d. Conclusion :

Sur la base des résultats de l'analyse après la décantation, nous observons une nette diminution de la plupart des oxydes classés comme impuretés, en particulier CaO, Fe₂O₃, SO₃ et TiO₂, ce qui indique l'efficacité de la technique de filtration pour améliorer la qualité de la matière première et améliorer les propriétés finales de la céramique.

5. Conditions de stockage de la matière première (humidité, hygrométrie) :

Le maintien de la qualité des matériaux céramiques nécessite la surveillance de nombreux paramètres clés notamment l'humidité et l'hygrométrie. En générale :

Il est important de protéger l'argile contre l'humidité, car elle y est très sensible où trop d'eau la rend collante, alors qu'un manque la dessèche et diminue sa plasticité.

Il faut éviter les températures extrêmes, car le gel peut casser la pâte, et la chaleur excessive peut provoquer un séchage trop rapide.

Pour limiter la poussière, il est conseillé de manipuler les matières pulvérulentes comme la silice ou le kaolin dans un espace propre et bien aéré.

Enfin, utiliser des contenants adaptés, comme des récipients fermés ou des emballages plastiques hermétiques, permet de prévenir la contamination et de contrôler l'humidité.

En ce qui concerne la conservation de l'argile, qui est une matière première principale en céramique, il est important de la stocker dans un environnement où l'humidité relative se situe entre 40 et 60 %, avec une température stable entre 18 et 22 °C.

Pour éviter qu'elle ne se dessèche ou ne se gorgue d'humidité, il est recommandé de l'envelopper dans un plastique épais et hermétique, puis de la placer dans un endroit frais, sec, et à l'abri de la lumière directe du soleil. Si l'argile devient trop sèche, on peut la réhydrater en ajoutant un peu d'eau et en la malaxant soigneusement pour retrouver sa plasticité d'origine.

6. Contrôle de la granulométrie :

Contrôler la granulométrie, c'est vraiment essentiel dans la fabrication des céramiques. C'est parce que cela affecte la plasticité des pâtes, la façon dont elles se densifient pendant le frittage, leur comportement lorsqu'elles sèchent, la porosité et enfin la résistance mécanique des pièces. En générale, si on a beaucoup de particules fines, ça aide à mieux densifier le matériau, mais ça peut aussi provoquer un retrait trop élevé si leur proportion est trop importante.

D'un autre côté, les particules plus grosses limitent ce retrait, mais à force d'en avoir trop ou de mal répartir les différentes tailles, cela peut affaiblir la résistance de la pièce.

C'est pour ça qu'il est important d'avoir une répartition granulométrique équilibrée.

Pour l'analyser, on utilise plusieurs méthodes comme le tamisage (pour les particules au-dessus de 40 μm), la densimétrie (jusqu'à 1 μm), et la diffraction laser (qui est très précise et rapide), ou encore l'analyse d'image, qui donne aussi des informations sur la forme des particules.

7. Séchage :

Le séchage est une étape clé dans la fabrication de céramiques de haute qualité. Si cette étape est mal gérée, elle peut provoquer de gros problèmes comme des fissures, des déformations ou même l'éclatement de la pièce lors de la cuisson.

L'objectif principal consiste à éliminer l'eau contenue dans la pâte de manière progressive, uniforme et sous contrôle.

L'eau dans l'argile se présente sous trois formes :

- **L'eau libre** : qui donne la plasticité, s'évapore en début de séchage et peut causer un retrait important.
- **L'eau de porosité** : retenue dans les pores ouverts, s'évapore plus lentement avec un retrait modéré.
- **L'eau chimiquement liée** : insérée dans la structure moléculaire, n'est éliminée qu'au moment de la cuisson (entre 400 et 600 °C) et ne joue pas de rôle lors du séchage.

Ainsi, le séchage se concentre principalement sur l'élimination de l'eau libre et de l'eau de porosité. Le processus de séchage se divise en deux grandes phases :

- **La phase de retrait constant** : où l'eau libre s'évapore rapidement, provoquant un retrait important. C'est la partie la plus critique par ce qu'un séchage trop rapide peut créer des tensions internes et des fissures. Il est donc important de sécher lentement, en veillant à une évaporation homogène sur toutes les faces, tout en maintenant une atmosphère humide.
- **La phase de retrait décroissant** : qui survient quand la majorité de l'eau libre a disparu. L'évaporation ralentit considérablement, le retrait devient minime, et la pièce passe de l'état encore malléable à totalement sèche. Bien que moins critique, cette étape doit aussi être surveillée pour éviter toute déformation résiduelle.

Pour un séchage efficace, plusieurs facteurs doivent être pris en compte :

- **Température idéale** : entre 18 et 22 °C. Trop chaud, elle accélère le séchage de façon excessive ; trop froid, cela peut le ralentir inutilement.
- **Humidité relative recommandée** : variée entre 40 et 60 %. Un air trop sec (moins de 40 %) favorise les fissures, tandis qu'un air trop humide (plus de 60 %) ralentit le processus et peut faire apparaître des moisissures.

- **Ventilation** : elle doit être douce et régulière. Éviter les courants d'air directs, qui provoquent un séchage inégal et des contraintes internes. Une légère circulation d'air permet d'évacuer l'humidité de façon homogène.
- **Durée du séchage** : elle dépend de l'épaisseur, de la forme de la pièce, du type d'argile et des conditions ambiantes. Plus le séchage est lent, plus il sera sûr et efficace. Certaines pièces peuvent nécessiter plusieurs jours, voire plusieurs semaines.

Pour assurer un séchage progressif plusieurs techniques sont appliquées :

- **Création d'un microclimat humide** : enroulé la pièce encore plastique dans un plastique épais ou la placer dans une boîte hermétique, éventuellement avec un petit récipient d'eau à l'intérieur.
- **Ouverture progressive** : il faut empêcher le plastique de fermer complètement, en le laissant entrouvert petit à petit au fil du temps, pour accompagner la transition vers un environnement plus sec.
- **Protection des parties fines** : ces zones sèchent plus vite que le reste. Il faut les couvrir localement avec du plastique ou un chiffon humide pour ralentir leur séchage et éviter des déformations dues à un séchage trop rapide.

8. Test de cuisson :

Le test de cuisson est une étape clé dans la fabrication de la céramique. C'est là qu'on vérifie et ajuste les paramètres de chaleur pour s'assurer que le produit final est de bonne qualité.

En gros, on cherche à trouver la meilleure température pour que la pâte cuise parfaitement, tout en contrôlant :

- Son retrait.
- Sa porosité.
- Sa densité.
- Sa compatibilité avec les émaux.

En faisant des tests à différentes températures et cycles, on ajuste la courbe de cuisson (montée en température, paliers, refroidissement) pour éviter les problèmes comme les fissures, les bulles ou les déformations.

Pour cela, on prépare des échantillons types (plaques, cylindres), qu'on cuit à diverses températures.

Ensuite, on les regarde de près :

- **La couleur** : La couleur de la pâte cuite peut varier considérablement avec la température et l'atmosphère du four.
- **La déformation** : Observer si l'échantillon a fléchi, s'est affaissé ou s'est gondolé.
- **Les fissures** : Rechercher toute fissure, grande ou microscopique.
- **Bulles/Boursouflures** : Vérifier la présence de bulles ou de cloques, surtout sur les pièces émaillées.
- **L'aspect d'émail** : Pour les pièces émaillées, vérifier la brillance, la texture, l'absence de défauts.

Les résultats des tests sont comparés aux spécifications et aux standards de qualité.

Si certaines propriétés ne sont pas atteintes, on ajuste le cycle de cuisson en modifiant par exemple :

- La température (plus chaude ou plus froide).
- La durée des paliers (plus longs ou plus courts) ou l'atmosphère utilisée.

Quand des défauts apparaissent, on cherche à en comprendre la cause, cela peut venir de la matière première, du processus de formation de la pièce, du séchage ou encore du cycle de cuisson lui-même.

On utilise aussi des outils pour avoir une meilleure précision sur la température à l'intérieur du four les plus importants sont :

- **Utilisation des cônes pyrométriques :**

Les cônes pyrométriques, aussi connus sous le nom de montres fusibles, sont de petites pièces en céramique conçues pour fondre et s'incliner à des températures précises. Leur tâche principale est de donner une idée fiable de la chaleur que la pièce en céramique ressent, en prenant en compte à la fois la température maximale atteinte dans le four et la durée pendant laquelle cette température est maintenue. Chaque cône est associé à une température spécifique et à une quantité d'énergie thermique accumulée. Pour une utilisation efficace, plusieurs cônes sont placés à divers endroits dans le four :

Un cône guide qui commence à s'incliner juste avant d'atteindre la température souhaitée.

Un cône cible pour la température exacte désirée.

Un cône témoin qui ne doit pas fondre.

Ils permettent de vérifier que la cuisson est bien uniforme dans tout le four. L'avantage principal de ces cônes, c'est leur fiabilité, en particulier pour évaluer la maturité réelle de la pâte, sans se fier uniquement aux erreurs possibles des thermocouples.

Quand on travaille avec des pièces émaillées, le test permet aussi de vérifier si l'émail adhère bien, si l'aspect est correct, et s'il n'y a pas de défauts liés à l'émail.

- **Échantillons de terre (tuiles de test) :**

Les échantillons de terre sont souvent réalisés sous forme de petites tuiles ou de cylindres standard, et servent à tester comment la pâte céramique réagit à différentes températures de cuisson, généralement par paliers de 50 à 100 °C. Ces petits échantillons, qui portent des inscriptions utiles comme le type de terre ou la température ciblée, permettent d'évaluer précisément le résultat après cuisson. On examine plusieurs aspects :

Le retrait, c'est-à-dire la différence de taille avant et après cuisson, qui donne une idée de la maturation de la pâte.

La porosité ou l'absorption d'eau, mesurée après immersion pendant 24 h, où une faible absorption (de 0 à 3 %) indique une bonne vitrification.

La couleur, qui peut changer en fonction de la température.

La sonorité, car une pièce bien cuite émettra un son clair lorsqu'on la tapote.

La dureté, testée en rayant la surface pour voir à quel point elle est résistante.

Ce genre de tests est essentiel pour ajuster les réglages de cuisson et s'assurer d'obtenir une céramique de haute qualité.

- **Échantillons d'émail :**

Les échantillons d'émail servent à tester comment l'émail se comporte sur des carreaux en terre, surtout ceux qui ont déjà subi une première cuisson, qu'on appelle « biscuités ». On applique l'émail de différentes façons : en couches épaisses ou fines, en superposant plusieurs couches, sur des carreaux ou des formes variées comme des cylindres ou de petites pièces, pour voir comment il réagit selon la forme.

Une fois cuits, on regarde plusieurs choses : si la couleur et la brillance correspondent à ce qu'on attend, si la texture est lisse, mate ou brillante selon le type d'émail, et surtout s'il n'y a pas de défauts comme des bulles, coulures, craquelures ou décollements. On vérifie aussi si l'émail est opaque ou transparent, pour s'assurer qu'il couvre bien la surface ou, au contraire, laisse voir la couleur de la terre selon l'effet recherché.

- **Thermocouples et enregistreurs de données :**

Les thermocouples, combinés à des enregistreurs de données, sont vraiment indispensables pour suivre précisément la température à l'intérieur du four. Le thermocouple mesure la température en temps réel, tandis que l'enregistreur trace et sauvegarde toute la courbe du cycle de cuisson. Ensemble, ils permettent de voir clairement chaque étape : la montée en température, le maintien et le refroidissement.

Cela est particulièrement utile lorsqu'on travaille sur des cycles complexes. En utilisant cette combinaison, on peut garder un contrôle précis du processus thermique, ce qui est essentiel pour que les pièces cuites soient toujours de bonne qualité et comme prévu.

En plus, ces tests sont super utiles pour valider de nouveaux matériaux, créer des recettes spécifiques ou ajuster la cuisson selon le type de four utilisé. C'est une méthode précise, répétitive, et essentielle pour garantir que les produits céramiques soient fiables, beaux et constants, que ce soit pour l'artisanat ou pour la production en série.

Conclusion :

En conclusion, ce chapitre montre à quel point chaque étape de préparation des matières premières influence la qualité finale de la céramique.

En analysant les matériaux argileux, on a découvert certains composants qui peuvent affecter la performance du produit, ce qui souligne à quel point il est essentiel de bien choisir son argile. Le stockage joue aussi un rôle important, surtout en contrôlant l'humidité et l'hygrométrie, pour maintenir la plasticité de la matière.

En ajustant la granulométrie, on peut mieux répartir les particules, ce qui aide à rendre la produit plus dense et plus solide.

Un bon séchage, bien maîtrisé, limite les risques de fissures et de déformations.

Les tests de cuisson ont permis d'obtenir des infos importantes, comme la maturité de la pâte, le retrait, la porosité et comment le matériau réagit avec les émaux.

En résumé, pour améliorer la qualité de la céramique, il faut contrôler chaque étape, depuis le choix des matières premières jusqu'à la cuisson finale, avec rigueur et attention.

Conclusion générale :

Après avoir terminé ce travail, nous avons pu explorer en détail les facteurs qui influencent la qualité des céramiques, notamment le phénomène de rupture tardive causé par l'hydratation de la chaux éteinte.

Nous avons appris les différentes techniques d'analyse comme la diffraction des rayons X (DRX) et la microscopie électronique à balayage (MEB), et en utilisant le MEB nous avons étudié les matières premières, en particulier les argiles, et repéré la présence d'impuretés qui peuvent entraîner un gonflement interne après la cuisson.

L'approche expérimentale que nous avons choisie nous a aidés à mieux comprendre comment se comportent les composants minéraux, tout en soulignant l'importance des conditions de stockage, de la granulométrie, du séchage et de la cuisson pour éviter certains défauts.

Nous avons aussi mis l'accent sur la chaux résiduelle, dont l'hydratation tardive peut devenir un gros problème pour la solidité du produit final.

Enfin, en comparant nos résultats avec les standards industriels pour des argiles de haute qualité, nous avons pu voir où en est la performance du matériau que nous avons étudié et réfléchir à des pistes pour l'améliorer. Cela inclut notamment un meilleur contrôle des matières premières et des étapes du processus de fabrication.

Ce travail ouvre la porte à d'autres recherches, comme des traitements pour purifier les argiles, l'ajout de composants ou encore l'optimisation des températures de cuisson, afin d'assurer que les produits céramiques durent plus longtemps.

Références bibliographiques :

- [1] : Ceramica seklouli.Société. [En ligne]. Disponible sur <https://www.ceramicaseklouli.com/>
- [2] : Rapport technique interne, Ceramica Seklouli, 2025
- [3] : Mekhissi.N et Boudellal.A,2024« Traitement, modification et caractérisation d'une argile algérienne »projet de fin d'étude, université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib.
- [4] : Jacques Beauchamp.les argile[en ligne].Université de Picardie Jules Verne,2005.Disponible sur : <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/argiles.htm>.
- [5] : Mokhtari.M et Bessad.O,2021« Fabrication et contrôle de qualité de carreaux céramiques de l'entreprise SARL-TOUGRES-CERAMIC »mémoire de master,université saad dahleb - blida 1.
- [6] : Mecheri.F, 2014 « Préparation et caractérisation des nano-cristallites de TiO₂ Effets des conditions préparatoires » mémoire de master, universite kasdi merbah ouargla.
- [7] : Laabadla.H,2012 « Etude théorique des matériaux céramiques » mémoire de master, université 8 Mai 1945 Guelma.