

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir
El Ibrahimi Bordj Bou Arreridj
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Génie Civil



جامعة محمد البشير الإبراهيمي « برج بوعريريج »
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم هندسة مدنية

Mémoire fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : MASTER

Filière : Génie Civil

THÈME

Fabrication de briques réfractaires à base de matières
premières locales algériennes

Préparé par :

- BELAISSAOUI youcef
- AIDEL akram
- RAHMANI Nouari

Encadré par :

Mr. BELKADI AHMED ABDERAOUF

*** 2025 - 2026 ***

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

En conclusion de ce travail, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements :

À Dieu Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force et la patience nécessaires à la réalisation de ce projet.

À nos familles : vous avez toujours été une source de soutien et d'encouragement tout au long de nos études.

À notre directeur de thèse, le professeur Belkadi Ahmed Abdelraouf, pour nous avoir guidés avec justesse.

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude à l'ensemble du corps professoral de la Faculté des Sciences Techniques, Département de Génie Civil, pour leurs précieux conseils, leur disponibilité et leurs encouragements.

À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse.

Youcef & akram & nouari

Dédicace

Il n'y a rien de plus beau que le fruit de notre travail, que nous offrons du fond du cœur à nos proches et pour lequel nous les remercions, en leur exprimant notre gratitude et notre reconnaissance tout au long de notre vie.

Je dédie cette lettre

À ma chère maman : qui m'a guidée dans les moments les plus difficiles de ce long parcours. Elle a été pour moi un formidable modèle de persévérance, et je te remercie pour tout le soutien et l'amour que tu m'as prodigués.

À mes sœurs : pour leur soutien moral et leurs précieux conseils tout au long de mes études. Que Dieu vous accorde santé, bonheur, courage et, surtout, réussite.

À mes chers amis, à tous mes proches et à tous ceux qui m'aiment.

Belqissgoui youcef

Dédicace

Je consignais mon travail

Je dédie ce travail à mes précieux parents, pour leur amour, leurs sacrifices, leurs encouragements et leur soutien sans faille durant tout mon cursus universitaire.

À mes frères et soeurs pour leur amour, leur présence et leurs sages conseils.

À toute ma famille pour son soutien et ses encouragements dans mes défis personnels.

À mes amis et collègues, pour leur aide, leur compréhension et les bons moments passés ensemble au cours de ces années d'études.

À tous mes professeurs qui ont contribué à ma formation et à l'acquisition de mes connaissances.

Enfin, à toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Avec toute ma reconnaissance et mon profond respect.

RAHMANI NOUARI

❖ بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

(وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا)

—سورة طه، الآية 114—

إهداء

بمناسبة التخرج الجامعي المبارك

من الطالب : عيدل سعيد أكرم

في هذه اللحظة التي طالما حلمتُ بها، وطال انتظارها،
أقف اليوم خاشعاً أمام الله شاكراً، ثم أهدي ثمرة جهدي وتعبي
إلى كلِّ مَنْ كان لي سنداً ونوراً في هذا الدرب الطويل...

إلى أُمِّي الغالية وشن

إلى من حملتني وهنّاً على وهن، وسهرت الليالي من أجل راحتي،
إلى من كان دعاؤها سلاحاً الأقوى في كل امتحان وكل عقبة،
إلى ينبوع الحنان الذي لا ينضب... أُمِّي الحبيبة وشن،
هذا النجاح ما كان إلا بدعائك وتضحياتك. أحبك من أعماق قلبي.

(رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا)

إلى أبي العزيز — عيدل مبروك

إلى من علّمني معنى الصبر والعزيمة بصمته قبل كلامه،
إلى من أتعب نفسه لأرتاح، وضحّى بكثير لأصل إلى ما أنا عليه،
إلى قدوتي ومثلي الأعلى... أبي الغالي عيدل مبروك،
أسأل الله أن يجعل هذا النجاح قرّة عين لك كما كنت قرّة عيني.

إلى إخوتي الاعزاء

إلى رفاق الطفولة وشركاء الذكريات، إخوتي الأحباء،

كنتم مصدر بهجتي وسرّي حين ثقل عليّ الهمّ،
أتمنى أن يكون نجاحي اليوم دافعاً ومحقّقاً لكم نحو أعلى الأهداف.
أحبّكم ولكم مني خالص الدعاء بالتوفيق والسداد.

إلى أستاذي المشرف الفاضل — بالقاضي عبد الرؤوف

إلى من أضاء لي دروب العلم بصبره ورحابة صدره،
إلى من لم يبخل عليّ بتوجيه ولا بنصيحة ولا بوقته الثمين،
فأنت يا أستاذي أوّل من أستمضه في هذا المقام.
جزاك الله عني خير الجزاء، وبارك في علمك وعمرك.

إلى أصدقائي الأوفياء

إلى رفاق المشوار الذين جعلوا الدراسة أجمل مما تكون،
وكنتم لي خير جلساء وأصدق الرفاق.

عبد الجليل ♦ محمد ♦ ياسين ♦ عيسى ♦ أمين ♦ شريف
كمال ♦ أيمن ♦ مصطفى ♦ أنيس ♦ عبد القادر ♦ محمد ♦ شريف
أسأل الله أن يديم محبّتنا، ويجمعنا دائماً على الخير والنجاح.

﴿ رَبِّ أَوْزِغْنِي أَنْ أَشْكُرَ نِعْمَتَكَ الَّتِي أَنْعَمْتَ عَلَيَّ وَعَلَىٰ وَالِدَيَّ ﴾

—سورة الأحقاف، الآية 15—

عيدل سعيد أكرم

2025 — الجامعي التخرّج حفل ♦

Sommaire

Chapitre I : Généralités sur les matériaux réfractaires

Introduction 1	1
I.1 Définition des matériaux réfractaires	1
I.2 Historique des matériaux réfractaires	2
I.3 Composition et structure des matériaux réfractaires	3
I.3.1 Les constituants principaux	3
I.3.2 Les matières premières	4
I.3.3 La microstructure	4
I.4 Classification des matériaux réfractaires	5
I.4.1 Classification selon la nature chimique	6
I.4.2 Classification selon la forme de présentation	6
I.4.3 Classification selon la densité et la compacité	8
I.4.4 Classification selon le mode de fabrication	8
I.5 Propriétés des matériaux réfractaires	9
I.5.1 Propriétés physiques	9
I.5.2 Propriétés mécaniques	10
I.5.3 Propriétés thermiques	11
I.5.4 Propriétés chimiques	12
I.6 Comportement des matériaux réfractaires à haute température	12
I.6.1 Le fluage	12
I.6.2 Les chocs thermiques	13
I.6.3 La dilatation thermique	13
I.7 Transfert thermique dans les matériaux réfractaires	14
I.8 Influence de la porosité sur les performances	15
I.9 Dégradation et durabilité des matériaux réfractaires	16
I.10 Critères de choix d'un matériau réfractaire	17
I.11 Domaines d'utilisation des matériaux réfractaires	17
I.12 Importance des matériaux réfractaires dans le génie civil	18
Conclusion	19

Chapitre II : La brique réfractaire et les matières premières utilisées

Introduction	20
II.1 Généralités sur la brique réfractaire	21
II.1.1 Définition de la brique réfractaire	21
II.1.2 Caractéristiques générales de la brique réfractaire	22
II.1.3 Types de briques réfractaires	22
II.1.4 Importance de la brique réfractaire	24
II.2 Choix des matières premières	25
II.3 Le kaolin.....	26
II.3.1 Définition et nature du kaolin	26
II.3.2 Rôle du kaolin dans la brique réfractaire	27
II.3.3 Importance du kaolin dans l'étude	27
II.4 Le sable siliceux	28
II.4.1 Définition et composition	28
II.4.2 Rôle du sable siliceux dans la formulation	28
II.4.3 Importance et limites du sable siliceux	29
II.5 La chamotte	29
II.5.1 Définition de la chamotte	29
II.5.2 Rôle de la chamotte dans la brique réfractaire	30
II.5.3 Importance de la chamotte dans cette étude	30
II.6 Complémentarité entre le kaolin, le sable siliceux et la chamotte.....	30
II.7 Formulation des mélanges	31
II.8 Intérêt de l'utilisation de matières premières locales	31
Conclusion du chapitre	32

Chapitre III : Matériaux et méthodes expérimentales

III.1 Introduction	33
III.2 Matières premières utilisées	33
III.2.1 Kaolin algérien	33
III.2.2 Métakaolin (MK)	34
III.2.3 Chamotte recyclée	35
III.2.4 Sable siliceux	36
III.2.5 Laitier	37
III.3 Préparation des poudres	37
III.3.1 Séchage du kaolin	37
III.3.2 Broyage	38
III.3.3 Tamisage	38
III.4 Élaboration des formulations	39
III.4.1 Composition des formulations	40
III.4.2 Préparation et homogénéisation des mélanges	41
III.5 Préparation des éprouvettes	42
III.6 Compactage des éprouvettes	43
III.7 Cuisson des éprouvettes	44
III.8 Deuxième campagne expérimentale : Élaboration de formulations à base de matières premières algériennes et françaises	45
III.8.1 Matières premières françaises	45
III.8.2 Objectif de la deuxième campagne expérimentale	45
III.8.3 Formulations étudiées	46
III.8.4 Préparation des mélanges	46
III.8.5 Mise en forme et compactage	47
III.8.6 Cuisson des éprouvettes à 1300°C	48
III.9 Essai de compression	49
III.10 Essai d'absorption d'eau et porosité ouverte	50
III.10 Conclusion du chapitre	51

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1 Introduction	52
IV.2 Résultats de la première campagne expérimentale	52
IV.2.1 Conditions de cuisson	52
IV.2.2 Résistance à la compression	53
IV.2.3 Comparaison entre les formulations avec chamotte et sable siliceux	55
IV.2.4 Absorption d'eau	56
IV.2.5 Porosité ouverte des échantillons de la première campagne	57
IV.3 Résultats de la deuxième campagne expérimentale	59
IV.3.1 Conditions de cuisson	59
IV.3.2 Résistance à la compression	59
IV.3.3 Comportement des échantillons contenant le laitier	61
IV.3.4 Absorption d'eau des échantillons de la deuxième campagne	62
IV.3.5 Porosité ouverte des échantillons de la deuxième campagne	63
IV.4 Effet de la température de cuisson	65
IV.5 Comparaison générale entre les deux campagnes	66
IV.6 Discussion générale	67
IV.7 Conclusion du chapitre	69

Liste des symboles

Symbole	Signification
Al_2O_3	Oxyde d'aluminium (Alumine)
SiO_2	Dioxyde de silicium (Silice)
Fe_2O_3	Oxyde de fer
CaO	Oxyde de calcium
MgO	Oxyde de magnésium
K_2O	Oxyde de potassium
Na_2O	Oxyde de sodium
TiO_2	Dioxyde de titane
MPa	Mégapascal
Pa	Pascal
°C	Degré Celsius
g	Gramme
kg	Kilogramme
mm	Millimètre
cm	Centimètre
m	Mètre
cm^3	Centimètre cube
g/cm^3	Gramme par centimètre cube
%	Pourcentage
h	Heure
min	Minute
Rc	Résistance à la compression
Ea	Absorption d'eau
P	Porosité
ρ	Masse volumique
λ	Conductivité thermique
α	Coefficient de dilatation thermique
ΔL	Variation de longueur
L_0	Longueur initiale
ΔT	Variation de température
FR	Chamotte française
CA	Chiffre d'affaires
PR	Produit réfractaire
ASTM	American Society for Testing and Materials
ISO	International Organization for Standardization
XRD	Diffraction des rayons X
SEM	Microscopie électronique à balayage
E1–E7	Échantillons de la première campagne expérimentale
F1–F6	Échantillons de la deuxième campagne expérimentale

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : Exemple de four ancien utilisé dans les premières applications des matériaux réfractaires	3
Figure I.2 : Structure macroscopique d'un matériau réfractaire (agrégats, phase liante et porosité)	4
Figure I.3 : Microstructure d'un matériau réfractaire observée au microscope	5
Figure I.4 : Diagramme de phases du système $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$	5
Figure I.5 : Brique réfractaire façonnée	6
Figure I.6 : Différents types de matériaux réfractaires non façonnés	7
Figure I.7 : Exemples de matériaux réfractaires fibreux utilisés pour l'isolation thermique	7
Figure I.8 : Réfractaire dense	8
Figure I.9 : Réfractaire isolant	8
Figure I.10 : Influence de la porosité sur la résistance mécanique des matériaux réfractaires	10
Figure I.11 : Influence de la porosité sur la conductivité thermique	11
Figure I.12 : Variation de la dilatation thermique en fonction de la température	13
Figure I.13 : Schéma du transfert de chaleur par conduction dans un matériau réfractaire	15
Figure I.14 : Dégradation d'un revêtement réfractaire sous l'effet des contraintes thermiques et chimiques	16

Chapitre II

Figure II.1 : Brique réfractaire utilisée dans les installations industrielles.....	21
Figure II.2 : Différents types de briques réfractaires selon la composition chimique	23
Figure II.3 : Matières premières utilisées dans la fabrication de la brique réfractaire	25
Figure II.4 : Kaolin naturel utilisé comme matière première	26
Figure II.5 : Sable siliceux (SiO_2)	28
Figure II.6 : Chamotte obtenue après cuisson et broyage de l'argile	29

Chapitre III

Figure III.1 : Kaolin KT2 provenant du complexe SOALKA d'El Milia	34
Figure III.2 : Four électrique utilisé pour la calcination du kaolin à 750°C	34
Figure III.3 : Préparation de la chamotte recyclée à partir de déchets de briques réfractaires	35
Figure III.4 : Sable siliceux utilisé dans les formulations expérimentales	36
Figure III.5 : Séchage du kaolin	37
Figure III.6 : Machine Los Angeles utilisée pour le broyage des matériaux	38
Figure III.7 : Tamisage	39
Figure III.8 : Préparation et homogénéisation des mélanges expérimentaux avant compactage	41
Figure III.9 : Moule métallique utilisé pour la fabrication des éprouvettes cylindriques	42
Figure III.10 : Remplissage du moule et préparation des éprouvettes avant compactage	42
Figure III.11 : Presse hydraulique utilisée pour le compactage des éprouvettes	43
Figure III.12 : Cuisson des éprouvettes	44
Figure III.13 : Matières premières françaises utilisées (kaolin français et chamotte française)	45

Figure III.14 : Préparation des mélanges	47
Figure III.15 : Mise en forme des éprouvettes cylindriques par compactage uniaxial et opération de démoulage	48
Figure III.16 : Essai de compression réalisé sur les éprouvettes réfractaires	49
Figure III.17 : Dispositif expérimental utilisé pour la mesure de la masse immergée dans l'eau lors de l'essai de porosité ouverte et d'absorption d'eau	51

Chapitre IV

Figure IV.1 : Éprouvettes avant cuisson dans le four de laboratoire	52
Figure IV.2 : Machine d'essai de compression utilisée pour la détermination de la résistance mécanique	54
Figure IV.3 : Résistance à la compression des échantillons de la première campagne (1100 °C)	54
Figure IV.4 : Affichage de la force maximale et de la contrainte maximale enregistrées lors de l'essai	55
Figure IV.5 : Éprouvettes immergées dans l'eau pendant 24 h pour l'essai d'absorption d'eau	56
Figure IV.6 : Absorption d'eau des échantillons E1–E7	57
Figure IV.7 : Variation de la porosité ouverte des échantillons E1–E7 après cuisson à 1100 °C	58
Figure IV.8 : Résistance à la compression des échantillons de la deuxième campagne (1300 °C)	60
Figure IV.9 : Fusion complète de l'échantillon F6 après cuisson à 1300 °C	61
Figure IV.10 : Absorption d'eau des échantillons F1–F5	63
Figure IV.11 : Variation de la porosité ouverte des échantillons F1–F5 après cuisson à 1300 °C	64
Figure IV.12 : Aspect général des éprouvettes après cuisson à 1300 °C	68

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1 : Classification des matériaux réfractaires selon la nature chimique et leurs principales applications9

Tableau I.2 : Principales propriétés physiques, mécaniques, thermiques et chimiques des matériaux réfractaires12

Tableau I.3 : Comparaison entre la brique ordinaire et la brique réfractaire18

Chapitre II

Tableau II.1 : Composition des mélanges utilisés31

Chapitre III

Tableau III.1 : Compositions détaillées des formulations expérimentales de la première campagne40

Tableau III.2 : Compositions des formulations de la deuxième campagne expérimentale utilisant des matières premières algériennes et françaises46

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Résistance à la compression des échantillons de la première campagne53

Tableau IV.2 : Comparaison entre les formulations à base de chamotte et de sable siliceux ..55

Tableau IV.3 : Absorption d'eau des échantillons de la première campagne56

Tableau IV.4 : Porosité ouverte des échantillons E1–E7 après cuisson à 1100 °C57

Tableau IV.5 : Résistance à la compression des échantillons de la deuxième campagne59

Tableau IV.6 : Absorption d'eau des échantillons de la deuxième campagne62

Tableau IV.7 : Porosité ouverte des échantillons F1–F5 après cuisson à 1300 °C63

Tableau IV.8 : Comparaison de l'effet de la température de cuisson sur les formulations similaires65

Tableau IV.9 : Comparaison des meilleures performances des deux campagnes66

Introduction générale

Les matériaux réfractaires sont des matériaux spécialement conçus pour résister aux hautes températures et aux conditions sévères rencontrées dans de nombreux secteurs industriels tels que la sidérurgie, les cimenteries, les verreries et les fours industriels. Grâce à leurs propriétés thermiques, mécaniques et chimiques, ils jouent un rôle essentiel dans la protection des installations et l'amélioration de leur durée de vie.

Parmi les différents produits réfractaires, les briques réfractaires occupent une place importante en raison de leur large utilisation dans les équipements fonctionnant à haute température. Les performances de ces briques dépendent principalement de la nature des matières premières utilisées ainsi que des conditions de fabrication et de cuisson.

Dans un contexte marqué par la valorisation des ressources locales et le recyclage des déchets industriels, l'utilisation de matières premières disponibles localement ainsi que de matériaux recyclés représente une solution intéressante pour réduire les coûts de production et limiter l'impact environnemental.

L'objectif de ce travail est d'élaborer des briques réfractaires à partir de différentes matières premières, puis d'évaluer leurs propriétés physiques et mécaniques à travers plusieurs essais expérimentaux. Une attention particulière a été portée à l'influence de la composition des mélanges, de la nature des constituants et de la température de cuisson sur les performances finales des matériaux obtenus.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre présente des généralités sur les matériaux réfractaires. Le deuxième chapitre est consacré à la brique réfractaire ainsi qu'aux matières premières utilisées dans cette étude. Le troisième chapitre décrit les matériaux, les méthodes expérimentales et les différentes étapes de fabrication des éprouvettes. Enfin, le quatrième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus ainsi que leur analyse et leur discussion.

Cette étude vise ainsi à contribuer au développement de matériaux réfractaires performants tout en mettant en valeur les ressources disponibles et les possibilités de recyclage dans ce domaine.

مقدمة عامة

المواد المقاومة للحرارة هي مواد مصممة خصيصًا لتحمل درجات الحرارة المرتفعة والظروف القاسية السائدة في العديد من القطاعات الصناعية، مثل صناعة الصلب ومصانع الأسمنت ومصانع الزجاج والأفران الصناعية. وبفضل خصائصها الحرارية والميكانيكية والكيميائية، تلعب هذه المواد دورًا أساسيًا في حماية المنشآت وإطالة عمرها التشغيلي.

من بين المنتجات المقاومة للحرارة المختلفة، تحتل الطوب المقاوم للحرارة مكانة مهمة بسبب استخدامها على نطاق واسع في المعدات التي تعمل في درجات حرارة عالية. تعتمد أداء هذه الطوب بشكل أساسي على طبيعة المواد الخام المستخدمة وكذلك على ظروف التصنيع والخبز.

في سياق يتميز بتقييم الموارد المحلية وإعادة تدوير النفايات الصناعية، يمثل استخدام المواد الخام المتوفرة محليًا والمواد المعاد تدويرها حلاً مثيّرًا للاهتمام لخفض تكاليف الإنتاج والحد من الأثر البيئي.

يهدف هذا العمل إلى تصنيع طوب حراري من مواد خام مختلفة، ثم تقييم خصائصه الفيزيائية والميكانيكية من خلال عدة تجارب. وقد تم إيلاء اهتمام خاص لتأثير تركيبة الخلطات وطبيعة المكونات ودرجة حرارة الحرق على الأداء النهائي للمواد الناتجة.

تتألف هذه الأطروحة من أربعة فصول. يعرض الفصل الأول معلومات عامة عن المواد المقاومة للحرارة. ويخصص الفصل الثاني للطوب المقاوم للحرارة وكذلك للمواد الخام المستخدمة في هذه الدراسة. ويصف الفصل الثالث المواد والطرق التجريبية والمراحل المختلفة لتصنيع العينات. وأخيرًا، يعرض الفصل الرابع النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها بالإضافة إلى تحليلها ومناقشتها.

وتهدف هذه الدراسة بالتالي إلى المساهمة في تطوير مواد مقاومة للحرارة عالية الأداء مع تسليط الضوء على الموارد المتاحة وإمكانية إعادة التدوير في هذا المجال.

Chapitre I

Généralités sur les matériaux réfractaires



Introduction

Les matériaux réfractaires occupent une place essentielle dans les secteurs industriels où les procédés de transformation sont réalisés à haute température. Ils sont destinés à constituer les revêtements internes des fours, des chaudières, des réacteurs, des incinérateurs ainsi que de nombreux équipements thermiques utilisés dans les domaines de la sidérurgie, de la verrerie, de la cimenterie, de la pétrochimie et de la production d'énergie [4][6]. Leur importance réside dans leur aptitude à conserver leur stabilité dimensionnelle, leur résistance mécanique et leur intégrité physico-chimique dans des conditions sévères de température, de pression et d'agression chimique [2][7].

À la différence des matériaux de construction classiques, les matériaux réfractaires doivent fonctionner dans des milieux caractérisés par de forts gradients thermiques, des cycles de chauffage et de refroidissement répétés, des contraintes mécaniques, ainsi que la présence de gaz, de liquides ou de scories corrosifs. Ils ne se limitent donc pas à une simple résistance à la chaleur, mais doivent répondre à un ensemble d'exigences fonctionnelles telles que la tenue au fluage, la résistance au choc thermique, la résistance à l'oxydation, à la corrosion et à l'abrasion [5][9].

Dans ce contexte, l'étude des matériaux réfractaires constitue une étape fondamentale pour comprendre le comportement de la brique réfractaire, objet principal du présent travail. Ce chapitre a pour objectif de présenter les notions générales relatives aux matériaux réfractaires, notamment leur définition, leur historique, leur composition, leur classification, leurs propriétés et leurs principaux domaines d'utilisation. Il permet ainsi d'établir une base théorique solide pour l'étude détaillée de la brique réfractaire dans les chapitres suivants.

I.1 Définition des matériaux réfractaires

Le terme « réfractaire » provient du latin *refractarius*, qui signifie « résistant », « difficile à soumettre » ou encore « qui supporte sans céder » [1]. Dans le domaine des matériaux, ce terme désigne les produits capables de résister à des températures élevées sans subir de transformation importante de leur structure, de leur forme ou de leurs propriétés [2].

Selon la norme AFNOR NF B40-001, un produit est considéré comme réfractaire lorsque sa résistance pyroscopique est équivalente ou supérieure à 1500 °C [1]. Cette définition met en évidence la notion de tenue au feu, qui constitue un critère fondamental dans la caractérisation de ces matériaux. La norme ISO 1927 précise également que les matériaux réfractaires sont des

matériaux non métalliques pouvant contenir certains constituants métalliques, et dont la résistance pyroscopique minimale doit être équivalente à 1500 °C [2].

Toutefois, la réfractarité ne se limite pas uniquement à la capacité de résister à la fusion. En pratique, un matériau réfractaire doit aussi conserver son rôle fonctionnel sous l'effet des sollicitations thermiques et chimiques imposées par le milieu de service. Ainsi, il doit présenter une bonne stabilité dimensionnelle, une résistance suffisante à l'usure mécanique, une compatibilité chimique avec les milieux environnants et, selon les cas, une bonne capacité d'isolation thermique [3][5].

Les matériaux réfractaires appartiennent à la grande famille des céramiques industrielles. Ils sont généralement constitués d'oxydes, de silicates, de carbures, de nitrures ou de composés carbonés. Leur structure est hétérogène et polyphasée, ce qui leur confère des propriétés adaptées à des usages variés [4][8].

I.2 Historique des matériaux réfractaires

L'utilisation des matériaux réfractaires remonte à l'Antiquité. Les premières civilisations ont utilisé l'argile façonnée et cuite pour la fabrication de briques destinées aussi bien à la construction qu'à la réalisation de fours artisanaux. Dès environ 1500 avant J.-C., des briques d'argile étaient employées dans les fours de transformation du verre, du cuivre et d'autres métaux [6].

Pendant de nombreux siècles, les températures atteintes dans les fours demeuraient relativement limitées, ce qui permettait l'utilisation de matériaux simples à base d'argiles naturelles. Cependant, avec le développement de la métallurgie, de la verrerie et plus tard de la révolution industrielle, les besoins en matériaux capables de supporter des températures plus élevées sont devenus plus importants [6][10].

À partir du XVIIIe siècle, l'essor industriel a entraîné une évolution significative des procédés thermiques. Les fours sont devenus plus performants, plus grands, et plus exigeants. Il a alors fallu développer des matériaux réfractaires plus résistants, capables de répondre à de nouvelles contraintes mécaniques, chimiques et thermiques [6].

Au XXe siècle, les progrès scientifiques dans le domaine de la science des matériaux ont permis une meilleure compréhension des phénomènes liés au comportement des réfractaires. Les travaux portant sur les systèmes alumine-silice, magnésie-chrome ou encore zircone-alumine-silice ont contribué à l'élaboration de matériaux de plus en plus spécialisés [7]. L'introduction des techniques d'analyse minéralogique et cristallographique, notamment la diffraction des

rayons X, a permis d'identifier les phases présentes dans les matériaux et de relier leur microstructure à leurs performances [4][7].

Aujourd'hui, les matériaux réfractaires constituent un domaine stratégique. Leur développement accompagne celui des procédés industriels avancés, notamment dans les centrales thermiques, la valorisation énergétique des déchets, la pétrochimie, les industries verrières modernes et les applications de haute technologie [6][10].



Figure I.1 : Exemple de four ancien utilisé dans les premières applications des matériaux réfractaires

I.3 Composition et structure des matériaux réfractaires

Les matériaux réfractaires sont des matériaux complexes, hétérogènes et généralement polyphasés. Leur comportement dépend étroitement de leur composition chimique, de leur structure macroscopique et microscopique, ainsi que de la nature de leurs constituants [4][5].

I.3.1 Les constituants principaux

De manière générale, un matériau réfractaire est constitué de trois éléments principaux : les agrégats, la phase liante et la porosité [4][5].

Les **agrégats** représentent le squelette du matériau. Ils constituent la fraction la plus grossière et la plus importante du point de vue volumique. Ils déterminent dans une large mesure les propriétés mécaniques, thermiques et chimiques du produit fini. Leur nature minéralogique joue un rôle essentiel dans la réfractarité et la stabilité du matériau [5].

La **phase liante** est constituée de particules plus fines assurant la cohésion entre les agrégats. Elle relie les grains entre eux et participe à la consolidation du matériau. Selon le type de produit, cette liaison peut être céramique, hydraulique, chimique ou organique [4][5].

La **porosité** constitue une phase structurale fondamentale. Elle peut être ouverte ou fermée, fine ou grossière, distribuée de manière homogène ou non. Elle influence fortement la conductivité thermique, la résistance mécanique, la perméabilité ainsi que la résistance aux attaques chimiques [5][9].

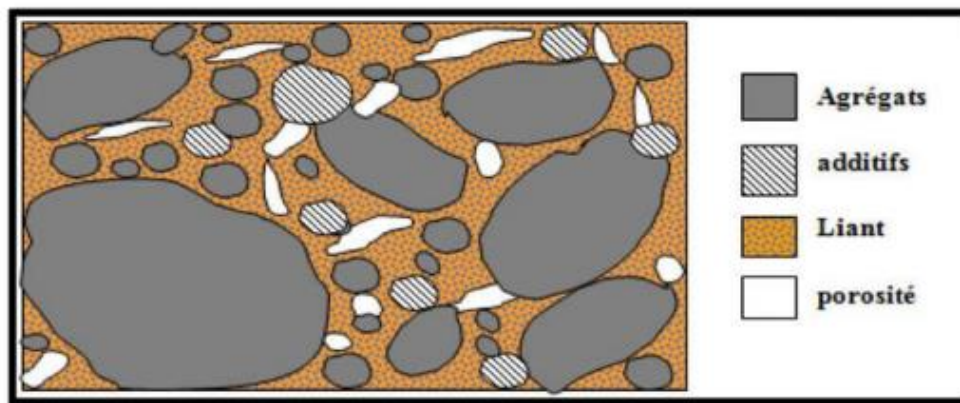


Figure I.2 : Structure macroscopique d'un matériau réfractaire (agrégats, phase liante et porosité)

I.3.2 Les matières premières

Les matières premières entrant dans la fabrication des matériaux réfractaires peuvent être naturelles ou synthétiques. Parmi les matières naturelles les plus utilisées, on trouve les argiles réfractaires, la bauxite, le quartz, la chromite, la dolomie et l'olivine. Les matières synthétiques comprennent notamment l'alumine calcinée, l'alumine électrofondue, la mullite, le carbure de silicium, la zircone et les spinelles [4][5].

Le choix des matières premières dépend de l'application visée. Les produits riches en silice sont recherchés pour certaines applications verrières, tandis que les réfractaires à haute teneur en alumine offrent de meilleures performances mécaniques et chimiques dans des environnements plus agressifs. Les matériaux à base de magnésie sont privilégiés dans les milieux basiques, notamment en sidérurgie [6][10]

I.3.3 La microstructure

La microstructure désigne l'organisation interne du matériau à l'échelle microscopique. Elle comprend la taille et la forme des grains, la nature et la distribution de la phase liante, la morphologie des pores et la présence éventuelle de défauts tels que des microfissures [8][9].

Une microstructure bien maîtrisée permet d'améliorer considérablement les performances du matériau. En effet, des grains bien répartis et une matrice homogène favorisent une meilleure tenue mécanique. De même, une porosité fine et contrôlée permet d'obtenir un bon compromis entre isolation thermique et résistance mécanique [5][9].

Les matériaux réfractaires denses présentent en général une porosité relativement faible, de l'ordre de 10 à 20 %, ce qui leur confère une meilleure résistance mécanique et une plus grande résistance à la corrosion. En revanche, les matériaux réfractaires isolants possèdent souvent une porosité supérieure à 45 %, parfois même supérieure à 50 %, afin de réduire leur conductivité thermique [5][9].

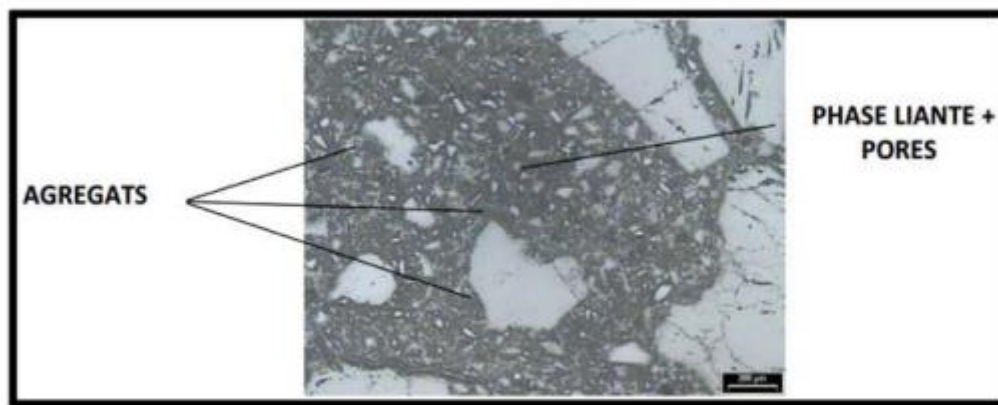


Figure I.3 : Microstructure d'un matériau réfractaire observée au microscope

I.4 Classification des matériaux réfractaires

En raison de leur grande diversité, les matériaux réfractaires peuvent être classés selon plusieurs critères : la nature chimique, la forme de présentation, la masse volumique, la compacité ou encore le mode de fabrication [2][5].

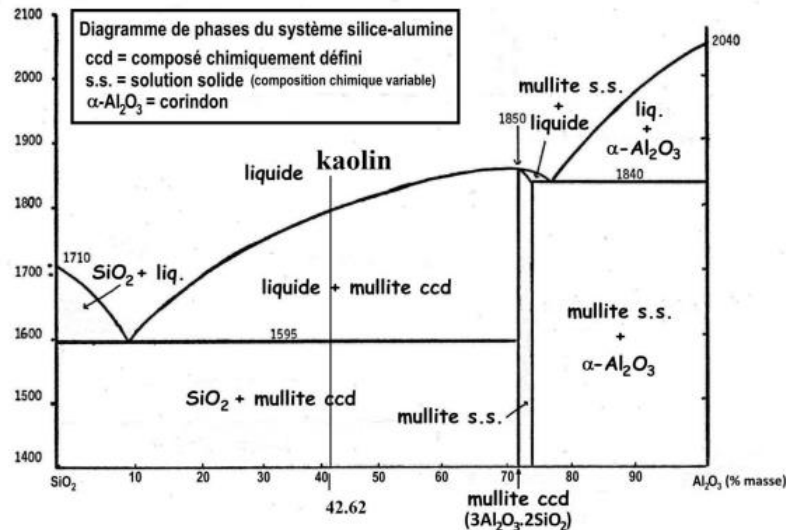


Figure I.4 : Diagramme de phases du système $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$

Analyse

Le diagramme de phases du système $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ montre les différentes phases stables en fonction de la température et de la composition chimique. Il met en évidence la formation de la mullite, considérée comme la phase réfractaire la plus importante dans les matériaux aluminosilicatés. Cette phase confère aux briques réfractaires une excellente résistance aux hautes températures, une bonne stabilité thermique et de bonnes propriétés mécaniques. Ainsi, les matières premières riches en silice et en alumine, comme le kaolin, sont particulièrement adaptées à la fabrication des briques réfractaires.

I.4.1 Classification selon la nature chimique

Selon la classification normalisée ISO/R1109, les matériaux réfractaires sont répartis en trois grandes familles : les réfractaires acides, les réfractaires basiques et les réfractaires spéciaux ou neutres [2].

Les **réfractaires acides** comprennent principalement les produits silico-alumineux. Ils sont riches en silice (SiO_2) et en alumine (Al_2O_3). Cette famille regroupe les produits argileux, silico-argileux, alumineux, siliceux et de silice. Ces matériaux sont largement utilisés dans de nombreuses applications thermiques en raison de leur disponibilité et de leurs propriétés satisfaisantes [2][6].

Les **réfractaires basiques** sont essentiellement constitués de magnésie (MgO), de dolomie (CaO-MgO), de chromite ou de composés apparentés. Ils présentent une bonne résistance aux laitiers basiques et sont utilisés notamment dans l'industrie sidérurgique [5][10].

Les **réfractaires spéciaux** regroupent les produits à base de carbone, de graphite, de zircon, de carbure de silicium, de nitrures, de borures ou encore de matériaux hautement purs. Ces produits sont destinés à des applications spécifiques exigeant des performances élevées [4][5].

I.4.2 Classification selon la forme de présentation

Selon leur présentation, les matériaux réfractaires se divisent en matériaux façonnés, non façonnés et fibreux [5][6].

Les **matériaux façonnés** sont livrés sous forme de briques, de tuiles, de blocs ou de pièces spéciales. Ils sont fabriqués à l'avance selon des formes et dimensions déterminées. Ce sont les produits les plus couramment utilisés dans la construction des fours [5].



Figure I.5 : Brique réfractaire façonnée

Les **matériaux non façonnés**, ou monolithiques, sont livrés en vrac sous forme de mortiers, bétons, ciments réfractaires, masses plastiques ou produits de jointement. Ils sont mis en forme sur site et permettent d'obtenir des revêtements continus, avec moins de joints et une meilleure adaptabilité aux géométries complexes [5][10].



Figure I.6 : Différents types de matériaux réfractaires non façonnés

Les **matériaux fibreux** sont constitués de fibres céramiques ou minérales utilisées principalement pour l'isolation thermique. Ils se présentent sous forme de nappes, de panneaux, de plaques ou de cordons [5].



Figure I.7 : Exemples de matériaux réfractaires fibreux utilisés pour l'isolation thermique

I.4.3 Classification selon la densité et la compacité

On distingue généralement les réfractaires denses et les réfractaires isolants [5][9].

Les **réfractaires denses** présentent une faible porosité et une masse volumique apparente élevée. Ils sont caractérisés par une bonne résistance mécanique et une meilleure résistance à la corrosion et à l'érosion. Ils sont utilisés dans les zones fortement sollicitées [5].



Figure I.8: Réfractaire dense

Les **réfractaires isolants** possèdent une porosité importante et une faible masse volumique. Ils sont choisis lorsqu'on cherche à réduire les pertes thermiques. Leur conductivité thermique est nettement plus faible, mais leur résistance mécanique est généralement inférieure à celle des produits denses [9].

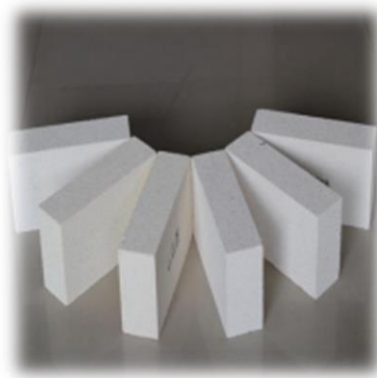


Figure I.9 : Réfractaire isolant

I.4.4 Classification selon le mode de fabrication

Les matériaux réfractaires peuvent également être classés selon leur procédé de fabrication [5][10].

Les produits **frittés** ou agglomérés sont obtenus par mise en forme d'un mélange pulvérulent suivie d'un séchage et d'une cuisson. La cohésion finale est assurée par le frittage ou par des réactions chimiques [5].

Les produits **électro-fondus** sont obtenus par fusion complète des matières premières dans un four électrique, suivie d'un coulage dans des moules. Ils présentent généralement une très grande compacité, une porosité très faible, une excellente résistance à la corrosion et une forte densité [5][10].

Tableau I.1 : Classification des matériaux réfractaires selon la nature chimique et leurs principales applications.

Type	Composition	Utilisation
Acide	SiO ₂ , Al ₂ O ₃	Verrerie
Basique	MgO, CaO	Sidérurgie
Spécial	SiC, ZrO ₂	Applications avancées

I.5 Propriétés des matériaux réfractaires

Les performances des matériaux réfractaires sont directement liées à leurs propriétés physiques, mécaniques, thermiques et chimiques. Le choix d'un produit réfractaire pour une application donnée repose sur l'évaluation de l'ensemble de ces propriétés [4][7][9].

I.5.1 Propriétés physiques

Parmi les propriétés physiques les plus importantes figurent la masse volumique, la densité et la porosité [8][9].

La **masse volumique apparente** correspond au rapport entre la masse du matériau et son volume total, incluant les pores ouverts et fermés. Elle permet d'apprécier la compacité générale du matériau [9].

La **densité vraie** est déterminée en excluant les pores. Elle dépend principalement de la nature minéralogique des constituants [9].

La **porosité** représente la proportion de vides présents dans le matériau. Elle peut avoir un effet favorable ou défavorable selon l'application. Une porosité élevée améliore l'isolation thermique, mais réduit généralement la résistance mécanique. À l'inverse, une faible porosité améliore la résistance mécanique et la résistance à la corrosion, mais augmente la conductivité thermique [5][9].

I.5.2 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques déterminent l'aptitude du matériau à supporter les charges et les sollicitations subies en service [6][8].

La **résistance à la compression** est l'une des propriétés les plus importantes. Elle traduit la capacité du matériau à résister à des charges de compression sans rupture ni écrasement [6].

La **résistance à la flexion** caractérise le comportement du matériau lorsqu'il est soumis à des efforts de flexion. Elle est importante pour certaines pièces de forme et dans les structures soumises à des contraintes complexes [8].

La **résistance à l'usure et à l'abrasion** est essentielle dans les environnements où les particules solides en mouvement peuvent provoquer une détérioration progressive du revêtement [6].

La **ténacité** traduit la capacité du matériau à résister à la propagation des fissures. Cette propriété demeure limitée dans les céramiques, qui restent des matériaux globalement fragiles [8].

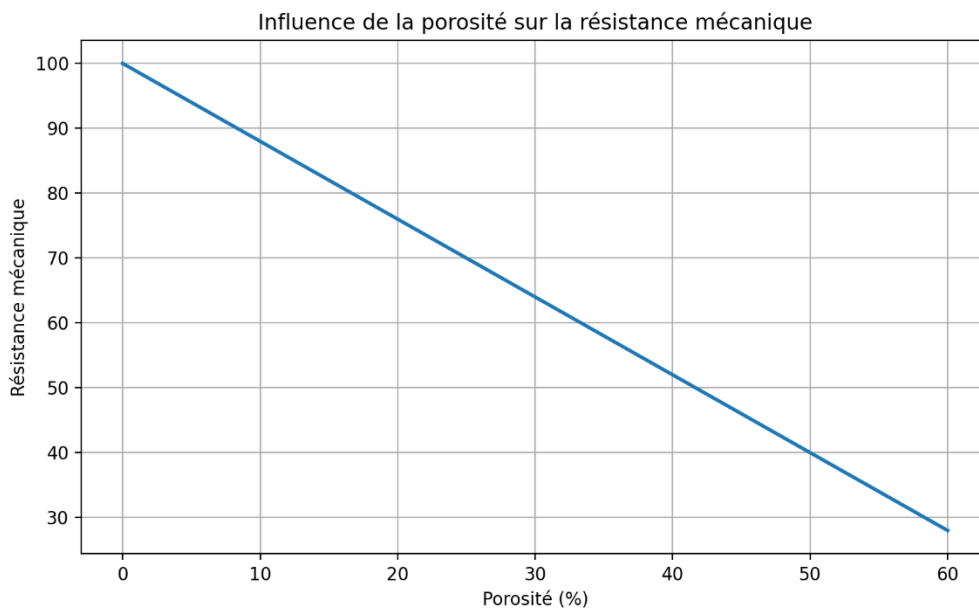


Figure I.10 : Influence de la porosité sur la résistance mécanique des matériaux réfractaires

Analyse simple :

La figure montre que la résistance mécanique diminue lorsque la porosité augmente. En effet, la présence d'un grand nombre de pores affaiblit la structure du matériau et réduit sa capacité à supporter les charges. Ainsi, les matériaux réfractaires à faible porosité présentent généralement une meilleure résistance mécanique que ceux ayant une porosité élevée.

I.5.3 Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques jouent un rôle central dans la conception et l'utilisation des réfractaires [7][9].

La **réfractarité** désigne la capacité du matériau à supporter des températures élevées sans déformation excessive. Elle constitue un critère de base dans la sélection du matériau [1][2].

La **conductivité thermique** exprime l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Une faible conductivité est recherchée pour les matériaux isolants, tandis que certains réfractaires denses présentent une conductivité plus élevée [9].

La **dilatation thermique** traduit la variation dimensionnelle sous l'effet d'une élévation de température. Une dilatation excessive peut générer des contraintes internes et provoquer des fissures [8].

La **résistance au choc thermique** correspond à la capacité du matériau à supporter des variations brusques de température sans se fissurer ni s'écailler. Elle est particulièrement importante dans les installations soumises à des cycles thermiques fréquents [9].

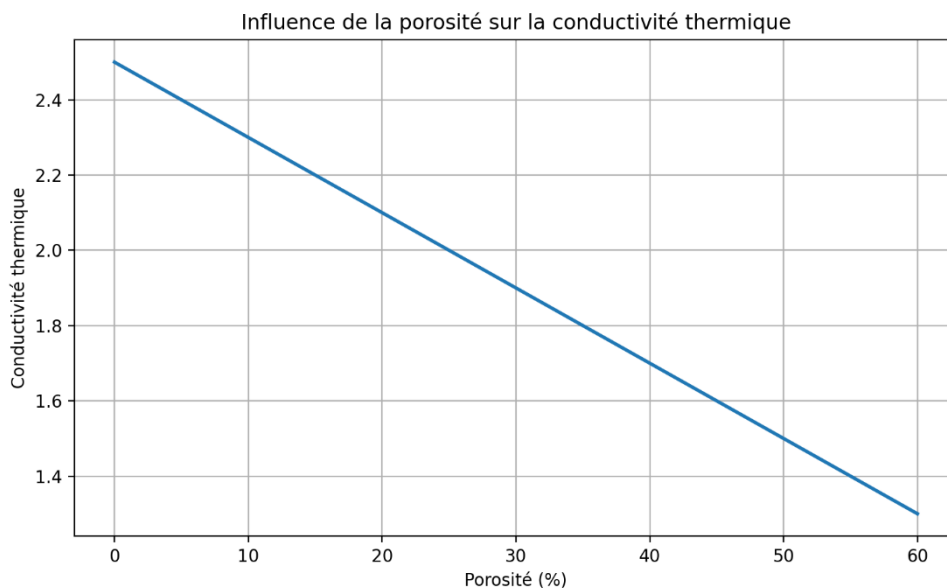


Figure I.11 : Influence de la porosité sur la conductivité thermique

Analyse simple :

La figure montre que la conductivité thermique diminue lorsque la porosité augmente. En effet, les pores contiennent de l'air, qui est un mauvais conducteur de chaleur. Ainsi, plus le matériau réfractaire est poreux, plus sa capacité à transmettre la chaleur est faible. Une porosité élevée améliore donc l'isolation thermique du matériau.

I.5.4 Propriétés chimiques

Les matériaux réfractaires doivent également résister aux agressions chimiques provenant des gaz, des liquides fondus, des laitiers, des cendres ou des scories [7].

La **résistance à la corrosion** est l'aptitude du matériau à supporter les attaques chimiques sans dégradation excessive. Elle dépend de la compatibilité entre la composition chimique du réfractaire et celle du milieu de service [5][7].

La **résistance à l'oxydation** concerne surtout les matériaux contenant du carbone ou des composés susceptibles de réagir avec l'oxygène à haute température [7].

Tableau I.2 : Principales propriétés physiques, mécaniques, thermiques et chimiques des matériaux réfractaires.

Propriété	Description	Importance
Masse volumique	Rapport masse/volume	Influence la densité
Porosité	Volume des vides	Affecte isolation et résistance
Résistance mécanique	Capacité à supporter les charges	Très importante
Conductivité thermique	Capacité à transmettre la chaleur	Important pour isolation
Résistance chimique	Résistance à la corrosion	Essentiel en industrie

I.6 Comportement des matériaux réfractaires à haute température

Le comportement des matériaux réfractaires à haute température ne dépend pas seulement de leur température de fusion. Il résulte d'un ensemble de phénomènes complexes qui se manifestent en service, notamment le fluage, la dilatation thermique, la fatigue thermique et les interactions physico-chimiques avec l'environnement [4][7].

I.6.1 Le fluage

Le **fluage** est une déformation lente, progressive et irréversible qui apparaît lorsqu'un matériau est soumis pendant une longue durée à une contrainte mécanique à haute température [6]. Ce

phénomène est particulièrement important dans les voûtes, les parois porteuses et les zones où les réfractaires supportent des charges permanentes.

La sensibilité au fluage dépend de la température de service, de la charge appliquée, de la microstructure du matériau, de la porosité et de la nature de la phase liante [6][8]. Une mauvaise résistance au fluage peut entraîner une déformation des structures, une perte d'alignement des revêtements et, dans certains cas, un effondrement partiel.

I.6.2 Les chocs thermiques

Les matériaux réfractaires sont souvent soumis à des cycles de chauffage et de refroidissement. Ces variations de température induisent des contraintes internes dues à la dilatation et à la contraction différentielles des différentes zones du matériau [9].

Lorsque ces contraintes dépassent la résistance du matériau, des fissures apparaissent. La résistance au choc thermique dépend donc de plusieurs paramètres : la conductivité thermique, le coefficient de dilatation, la résistance mécanique, la ténacité et la microstructure [8][9].

I.6.3 La dilatation thermique

Sous l'effet de la chaleur, les matériaux réfractaires subissent une augmentation de leurs dimensions. Ce phénomène est décrit par la relation suivante [8] :

$$\Delta L = \alpha \times L_0 \times \Delta T$$

où :

ΔL : représente la variation de longueur,

α : le coefficient de dilatation thermique,

L_0 : la longueur initiale,

ΔT : la variation de température.

La prise en compte de cette dilatation est essentielle lors de la conception des revêtements réfractaires, afin d'éviter l'apparition de contraintes excessives et de désordres structuraux.

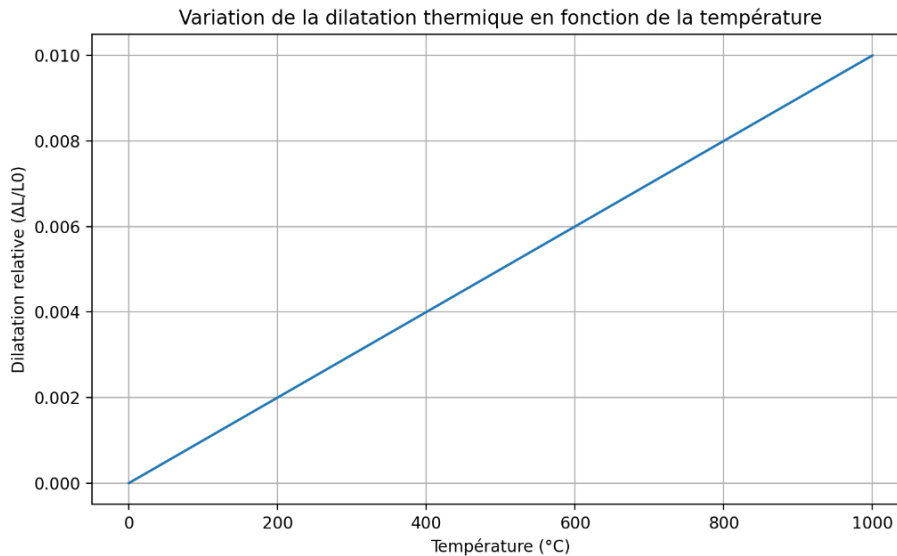


Figure I.12 : Variation de la dilatation thermique en fonction de la température

Analyse simple :

La figure montre que la dilatation thermique augmente progressivement avec l'augmentation de la température. Lorsque le matériau est chauffé, ses dimensions augmentent en raison de l'écartement des particules qui le composent. Cette relation est presque linéaire, ce qui indique que la dilatation est proportionnelle à la température dans l'intervalle étudié. Cette propriété doit être prise en compte lors de la conception des structures réfractaires afin d'éviter les fissures et les déformations.

I.7 Transfert thermique dans les matériaux réfractaires

Le transfert de chaleur dans les matériaux réfractaires joue un rôle majeur dans la performance énergétique des installations thermiques [9]. Le comportement thermique d'un réfractaire conditionne à la fois la température à l'intérieur du four, les pertes thermiques à travers les parois et l'efficacité énergétique globale.

Le transfert thermique s'effectue selon trois mécanismes fondamentaux : la conduction, la convection et le rayonnement [4].

La **conduction** correspond au transfert de chaleur à travers la matière solide. Elle est particulièrement importante dans les briques et les revêtements denses. Ce phénomène est régi par la loi de Fourier [8] :

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$

où :

q : est le flux thermique

λ : la conductivité thermique du matériau

$\frac{dT}{dx}$: le gradient de température.

La **convection** intervient lorsque le transfert se produit entre une surface et un fluide, par exemple entre le gaz chaud du four et la paroi réfractaire. Le **rayonnement** devient particulièrement important à très haute température, notamment dans les fours industriels.

Les matériaux réfractaires isolants sont conçus pour réduire la conduction thermique grâce à leur forte porosité. Les pores remplis d'air constituent des obstacles au passage de la chaleur. En revanche, les matériaux très denses conduisent davantage la chaleur mais offrent souvent une meilleure résistance mécanique [9].

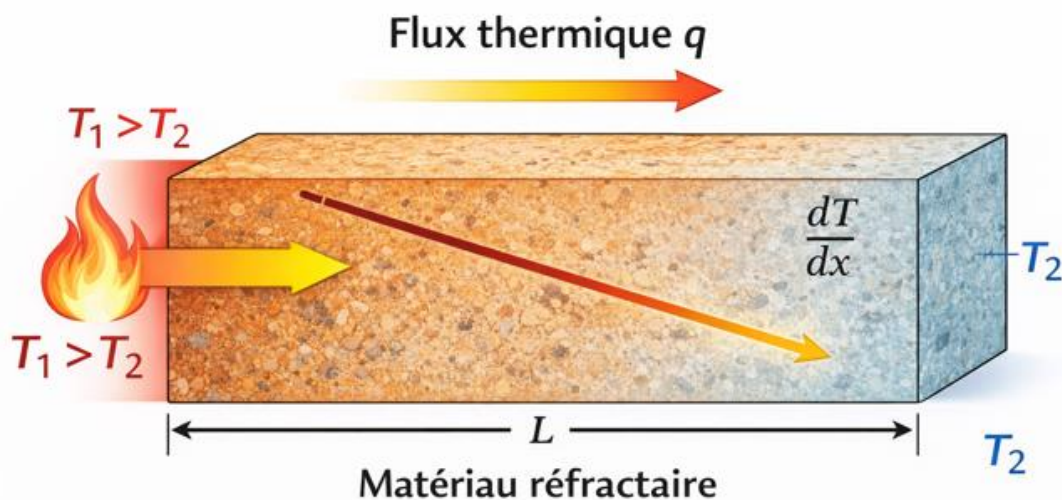


Figure I.13 : Schéma du transfert de chaleur par conduction dans un matériau réfractaire

I.8 Influence de la porosité sur les performances

La porosité constitue l'un des paramètres les plus influents dans le comportement des matériaux réfractaires [5][9]. Elle affecte simultanément les propriétés thermiques, mécaniques et chimiques.

Une **porosité élevée** diminue la masse volumique et améliore l'isolation thermique, car l'air emprisonné dans les pores possède une faible conductivité thermique. Toutefois, cette même porosité favorise aussi la baisse de la résistance mécanique et peut faciliter la pénétration de gaz ou de liquides corrosifs [9].

Une **faible porosité**, au contraire, permet d'augmenter la résistance mécanique, de réduire la perméabilité et d'améliorer la résistance à la corrosion. C'est pourquoi les zones directement exposées aux liquides fondus ou aux milieux agressifs sont généralement revêtues de produits denses [5].

Ainsi, le choix du niveau de porosité dépend du compromis recherché entre isolation thermique, résistance mécanique et durabilité en service.

I.9 Dégradation et durabilité des matériaux réfractaires

La durabilité d'un matériau réfractaire correspond à sa capacité à maintenir ses performances pendant une durée de service donnée. Elle dépend de nombreux mécanismes de dégradation qui peuvent agir séparément ou simultanément [6][7].

La **corrosion chimique** résulte de la réaction entre le réfractaire et le milieu environnant, notamment les scories, les laitiers, les verres fondus ou les gaz agressifs. Cette corrosion entraîne une modification de la composition du matériau, une dissolution partielle de certaines phases et une perte de matière [7].

L'**abrasion** et l'**érosion** correspondent à l'usure provoquée par les particules solides en mouvement, les chocs mécaniques ou l'écoulement des fluides [6].

L'**oxydation** concerne surtout les réfractaires contenant du carbone ou des liants organiques. À haute température, l'oxygène peut provoquer leur dégradation, ce qui altère la texture et réduit la résistance du matériau [7].

La **fatigue thermique** résulte de la répétition des cycles thermiques, qui génèrent progressivement des fissures et un affaiblissement du matériau [9].

Par conséquent, la durée de vie d'un réfractaire dépend à la fois de ses propriétés intrinsèques, de son mode de mise en œuvre et des conditions réelles d'exploitation.



Figure I.14 : Dégradation d'un revêtement réfractaire sous l'effet des contraintes thermiques et chimiques

I.10 Critères de choix d'un matériau réfractaire

Le choix d'un matériau réfractaire ne peut être effectué sur la seule base de sa température de service maximale. Il doit résulter d'une analyse globale des conditions d'utilisation [6].

Parmi les principaux critères de choix, on peut citer :

- la température de fonctionnement de l'installation,
- la nature du milieu chimique,
- la présence éventuelle de gaz, de liquides fondus ou de scories,
- les contraintes mécaniques supportées par le revêtement,
- la fréquence des cycles thermiques,
- la nécessité d'une isolation thermique,
- la facilité de mise en œuvre,
- et enfin le coût global incluant l'achat, l'installation et la maintenance [6][10].

Un matériau peut être très performant thermiquement, mais inadapté chimiquement à son milieu de service. De même, un produit très dense et résistant peut être inapproprié lorsqu'une forte isolation thermique est recherchée. Le choix optimal repose donc sur un compromis entre plusieurs exigences.

I.11 Domaines d'utilisation des matériaux réfractaires

Les matériaux réfractaires sont utilisés dans tous les secteurs où des procédés à haute température sont mis en œuvre [6][10].

Dans la **sidérurgie**, ils sont employés dans les hauts fourneaux, les convertisseurs, les poches de coulée, les fours électriques et les régénérateurs. Ils doivent résister à de fortes contraintes thermiques et chimiques, notamment aux laitiers et aux métaux en fusion [10].

Dans l'**industrie verrière**, ils entrent dans la construction des bassins de fusion, des voûtes, des parois latérales et des régénérateurs. Les produits électro-fondus, notamment ceux de type AZS, sont particulièrement utilisés dans les zones au contact du verre fondu en raison de leur excellente résistance à la corrosion [6].

Dans les **cimenteries** et les **fours à chaux**, les réfractaires sont utilisés dans les fours rotatifs, les zones de préchauffage, de calcination et de refroidissement [10].

Dans la **pétrochimie** et les **industries chimiques**, ils servent au revêtement des réacteurs, des fours de reformage, des unités de craquage et d'autres installations soumises à des atmosphères agressives [10].

Ils sont également utilisés dans les **chaudières**, les **incinérateurs**, les **centrales thermiques**, les installations de **production d'énergie**, ainsi que dans certains ouvrages du **génie civil** nécessitant une protection contre le feu ou une isolation thermique renforcée [10].

I.12 Importance des matériaux réfractaires dans le génie civil

Bien que les matériaux réfractaires soient traditionnellement associés aux industries du feu, leur importance dans le domaine du génie civil ne doit pas être négligée. En effet, ils interviennent dans la construction d'ouvrages industriels, de cheminées, de canaux de fumées, de tunnels thermiquement sollicités, de centrales thermiques et de structures soumises à des risques d'incendie [10].

Dans ces applications, leur rôle principal consiste à assurer une protection thermique des éléments porteurs, à limiter les transferts de chaleur et à préserver l'intégrité des structures. Ils contribuent également à l'amélioration de l'efficacité énergétique des installations grâce à leur pouvoir isolant [9][10].

Ainsi, l'étude des matériaux réfractaires présente un intérêt réel pour l'ingénieur civil, notamment dans la conception des structures industrielles durables et sécurisées.

Tableau I.3 : Comparaison entre la brique ordinaire et la brique réfractaire

Critère	Brique ordinaire	Brique réfractaire
Température	< 800°C	> 1100°C
Résistance thermique	Faible	Élevée
Conductivité	Moyenne	Faible
Durabilité	Moyenne	Très élevée
Usage	Construction	Industrie

Conclusion

Les matériaux réfractaires constituent une famille de matériaux céramiques techniques indispensables dans les procédés industriels à haute température. Leur spécificité réside dans leur capacité à conserver leurs propriétés fonctionnelles sous l'effet simultané de sollicitations thermiques, mécaniques et chimiques sévères [4][7].

À travers ce chapitre, il a été montré que les matériaux réfractaires se distinguent par leur composition complexe, leur structure hétérogène, la diversité de leurs classifications et la variété de leurs propriétés. La porosité, la densité, la résistance mécanique, la conductivité thermique, la résistance au choc thermique et la stabilité chimique apparaissent comme des paramètres essentiels dans leur comportement et leur durabilité [5][9].

Leur domaine d'utilisation couvre un large éventail d'industries, allant de la sidérurgie à la verrerie, en passant par la cimenterie, la pétrochimie et la production d'énergie. Leur rôle dans le génie civil, notamment pour la protection thermique et la construction des installations industrielles, confirme leur importance stratégique

Ce cadre théorique général constitue une base nécessaire pour aborder, dans le chapitre suivant, l'étude plus spécifique de la brique réfractaire, de sa fabrication, de ses caractéristiques et de ses applications.

Chapitre II

La brique réfractaire et les matières premières utilisées



Introduction

La brique réfractaire constitue l'un des matériaux les plus importants dans les applications industrielles à haute température. Elle est utilisée dans les fours, les cheminées, les chaudières, les incinérateurs et d'autres installations thermiques nécessitant des matériaux capables de résister à des conditions sévères d'utilisation [4][6]. Contrairement aux briques ordinaires, la brique réfractaire doit conserver sa stabilité dimensionnelle, sa résistance mécanique et sa cohésion interne lorsqu'elle est exposée à des températures élevées pendant de longues durées [7].

Le comportement de la brique réfractaire dépend essentiellement de la nature des matières premières utilisées dans sa fabrication, de leurs proportions, ainsi que des conditions de préparation, de moulage, de séchage et de cuisson [5][9]. Ainsi, le choix des matières premières représente une étape fondamentale dans l'élaboration d'un produit réfractaire performant [6]. Ce choix doit être fondé sur des critères scientifiques et techniques, parmi lesquels la composition chimique, la stabilité thermique, la disponibilité locale, le coût de production et l'aptitude des matériaux à développer une structure stable après cuisson [4][8].

Dans le cadre de ce travail, l'objectif principal est la fabrication d'une brique réfractaire à partir de matières premières locales disponibles en Algérie. Les matériaux retenus sont le kaolin, le sable siliceux et la chamotte. Le choix de ces matières n'est pas arbitraire ; il repose sur leur complémentarité du point de vue minéralogique, chimique et technologique [5][9]. Le kaolin apporte les éléments argileux et alumineux nécessaires à la cohésion et à la formation de phases réfractaires stables. Le sable siliceux joue un rôle dans la rigidité et la résistance à haute température. Quant à la chamotte, elle intervient comme correcteur granulométrique et stabilisateur dimensionnel, tout en réduisant le retrait et les fissurations [6][8].

Ce chapitre a pour objectif de présenter la brique réfractaire, ses principales caractéristiques, ses différents types, ainsi que les matières premières utilisées dans cette étude. Une attention particulière est accordée au rôle de chaque constituant et à la justification de son utilisation dans la formulation de la brique réfractaire étudiée.

II.1 Généralités sur la brique réfractaire

II.1.1 Définition de la brique réfractaire

La brique réfractaire est un produit céramique façonné, élaboré à partir de matières minérales naturelles ou synthétiques, destiné à fonctionner à haute température sans subir de déformation excessive, de fusion prématurée ou de dégradation importante de ses propriétés [2][4]. Elle est généralement utilisée pour former les revêtements internes des équipements thermiques, où elle joue à la fois un rôle de protection, d'isolation et de résistance mécanique [6]. (Voir Figure II.1)

La particularité de la brique réfractaire réside dans sa capacité à maintenir ses performances dans des conditions sévères. Elle doit, en effet, résister non seulement à la chaleur, mais aussi aux variations brusques de température, aux agressions chimiques des gaz et liquides fondus, ainsi qu'aux sollicitations mécaniques [7][9]. Par conséquent, la conception d'une brique réfractaire exige une maîtrise de sa composition et de sa structure interne.

D'un point de vue technologique, la brique réfractaire peut être considérée comme un matériau céramique à structure complexe, composé de grains, de liants et de pores. L'interaction entre ces différents constituants détermine ses performances finales [5]. Une brique trop dense peut présenter une bonne résistance mécanique mais une faible résistance aux chocs thermiques, tandis qu'une brique trop poreuse peut offrir une meilleure isolation thermique mais une résistance mécanique plus faible. C'est pourquoi l'optimisation de sa formulation constitue un enjeu central dans les travaux de recherche portant sur les matériaux réfractaires



Figure II.1 : Brique réfractaire utilisée dans les installations industrielles

II.1.2 Caractéristiques générales de la brique réfractaire

Les briques réfractaires se distinguent par un ensemble de caractéristiques qui justifient leur large utilisation dans les industries thermiques. Parmi les plus importantes, on peut citer :

- la résistance aux hautes températures [1]
- la stabilité dimensionnelle après cuisson [5]
- la résistance mécanique à froid et à chaud [6]
- la résistance aux chocs thermiques [9]
- la résistance à la corrosion chimique [7]
- la faible conductivité thermique dans le cas des briques isolantes [9]
- la durabilité en service [6]

La résistance aux hautes températures constitue la propriété fondamentale de ce matériau. Elle traduit sa capacité à conserver sa forme et sa cohésion sans ramollissement excessif. Toutefois, cette propriété n'est pas suffisante à elle seule pour qualifier une bonne brique réfractaire. Il est également nécessaire que celle-ci présente une bonne tenue mécanique, car les revêtements de fours subissent souvent des charges dues au poids des éléments supérieurs, aux chocs liés au chargement, ou aux pressions exercées par les matières en fusion [6].

La résistance aux chocs thermiques est également d'une grande importance. En pratique, les briques réfractaires ne sont pas toujours soumises à un chauffage lent et uniforme. Elles peuvent connaître des hausses ou baisses rapides de température, ce qui génère des contraintes internes dues à la dilatation différentielle [9]. Une brique mal adaptée peut alors se fissurer ou s'écailler. Enfin, la brique réfractaire doit posséder une structure compatible avec l'usage visé. Une porosité modérée peut améliorer l'isolation thermique, mais si elle devient excessive, elle diminue la résistance mécanique. Inversement, une structure trop compacte améliore la résistance mais peut favoriser les contraintes thermiques [5][9]. Ainsi, le comportement d'une brique réfractaire est toujours le résultat d'un équilibre entre plusieurs propriétés.

II.1.3 Types de briques réfractaires

Les briques réfractaires peuvent être classées selon plusieurs critères. Les classifications les plus utilisées sont basées sur la composition chimique, la densité et l'usage [2][5].

a) Selon la composition chimique

Selon leur composition chimique, on distingue principalement : (voir Figure II.2)

Les briques siliceuses

Ces briques sont riches en silice (SiO_2). Elles présentent une bonne résistance aux températures élevées et sont utilisées dans certaines applications spécifiques, notamment dans l'industrie verrière et certains types de fours [2][6]. Toutefois, elles peuvent être sensibles à certains environnements chimiques et à des cycles thermiques sévères [7].

Les briques alumineuses

Elles contiennent une proportion importante d'alumine (Al_2O_3). Ce type de brique est très apprécié en raison de sa bonne résistance thermique, de sa stabilité et de sa meilleure tenue mécanique [4][8]. Les briques alumineuses sont utilisées dans de nombreuses installations industrielles, notamment lorsque les conditions de température sont sévères [6].

Les briques basiques

Ces briques sont élaborées à partir de matériaux riches en magnésie (MgO) ou en dolomie. Elles sont principalement utilisées dans l'industrie sidérurgique, notamment dans les milieux basiques [5][10]. Leur emploi dépend fortement de la nature chimique du milieu de service [7].



Figure II.2 : Différents types de briques réfractaires selon la composition chimique

b) Selon la densité

On distingue :

Les briques denses

Elles ont une faible porosité et une masse volumique relativement élevée. Elles sont caractérisées par une bonne résistance mécanique et une meilleure résistance à la corrosion [5]. Elles sont généralement utilisées dans les zones fortement sollicitées [6].

Les briques isolantes

Elles possèdent une porosité plus importante et une masse volumique plus faible. Leur principal avantage est leur faible conductivité thermique, ce qui permet de réduire les pertes de chaleur [9]. En revanche, leur résistance mécanique est généralement plus faible que celle des briques denses [5].

c) Selon l'utilisation

Les briques réfractaires peuvent également être distinguées selon leur domaine d'utilisation :

- briques pour fours de fusion ;
- briques pour chaudières ;
- briques pour cheminées ;
- briques pour régénérateurs ;
- briques pour revêtements industriels spécifiques.

Cette classification montre qu'il n'existe pas une seule brique réfractaire universelle. Chaque type de brique est conçu pour répondre à un besoin particulier, selon les conditions thermiques, chimiques et mécaniques de l'installation [6][10].

II.1.4 Importance de la brique réfractaire

La brique réfractaire joue un rôle essentiel dans les installations industrielles. Elle constitue la première barrière de protection contre les températures élevées et les agressions du milieu intérieur du four [10]. Son rôle ne se limite pas à contenir la chaleur; elle participe également à l'amélioration du rendement énergétique, à la sécurité de l'installation et à la durabilité de l'équipement [9][10].

Sur le plan énergétique, une brique bien conçue permet de limiter les pertes thermiques à travers les parois du four, ce qui réduit la consommation énergétique globale [9]. Sur le plan mécanique, elle assure la stabilité du revêtement et évite les défaillances prématurées [6]. Sur

le plan économique, une bonne brique réfractaire permet de réduire les coûts de maintenance et d'augmenter la durée de vie de l'équipement [6][10].

Dans le cadre de cette étude, la brique réfractaire revêt également une importance particulière du point de vue local. La mise au point d'un produit élaboré à partir de ressources algériennes représente une contribution potentielle à la valorisation des matières premières nationales et à la réduction de la dépendance aux matériaux importés.

II.2 Choix des matières premières

Le choix des matières premières est une étape décisive dans l'élaboration d'une brique réfractaire [6]. En effet, les performances finales du produit dépendent directement de la nature minéralogique, de la pureté chimique, de la granulométrie et du comportement thermique des constituants utilisés [5][9].

Dans cette étude, le choix des matières premières s'est porté sur trois matériaux : le kaolin, le sable siliceux et la chamotte (voir Figure II.3). Ce choix a été guidé par plusieurs considérations. D'abord, ces matériaux sont disponibles localement, ce qui représente un avantage économique et stratégique. Ensuite, chacun d'eux possède des caractéristiques particulières qui contribuent, de manière complémentaire, à la qualité finale de la brique [6].

Le kaolin constitue la base argileuse du mélange. Il apporte les oxydes essentiels à la formation de phases réfractaires stables après cuisson, notamment les composés alumino-silicatés [4][8]. Le sable siliceux contribue à la rigidité de la structure et à la résistance thermique [8]. Quant à la chamotte, elle agit comme un matériau déjà stabilisé thermiquement, capable de réduire les retraits et de limiter les fissurations [5][9].

Le recours à des matières premières locales répond également à une logique de valorisation des ressources naturelles algériennes. Il s'agit d'une orientation particulièrement pertinente dans le contexte du développement de matériaux de construction adaptés au marché national. De plus, l'utilisation de ressources locales ouvre la voie à une éventuelle industrialisation à moindre coût, à condition que les propriétés obtenues soient satisfaisantes [10].



Figure II.3 : Matières premières utilisées dans la fabrication de la brique réfractaire

II.3 Le kaolin

II.3.1 Définition et nature du kaolin

Le kaolin est une argile blanche ou blanchâtre (voir Figure II.4), essentiellement constituée de kaolinite, un silicate hydraté d'alumine. Il appartient à la famille des argiles réfractaires et est largement utilisé dans les industries céramiques, papetières, pharmaceutiques et réfractaires [4][8].

La composition du kaolin est généralement dominée par la silice et l'alumine, avec des proportions variables selon le gisement d'origine. Cette richesse en alumino-silicates lui confère une bonne aptitude à la transformation céramique. Lorsqu'il est soumis à une cuisson appropriée, le kaolin subit des transformations minéralogiques qui conduisent à la formation de phases stables, notamment la mullite, connue pour ses excellentes propriétés réfractaires [8][9].



Figure II.4 : Kaolin naturel utilisé comme matière première

II.3.2 Rôle du kaolin dans la brique réfractaire

Dans la formulation d'une brique réfractaire, le kaolin joue plusieurs rôles à la fois. D'abord, il constitue une matrice argileuse capable d'assurer la cohésion du mélange avant cuisson. Grâce à sa plasticité, il facilite la mise en forme et le moulage des éprouvettes ou des briques [5].

Ensuite, lors du séchage et surtout de la cuisson, le kaolin évolue progressivement vers une structure plus stable. Il participe à la formation du réseau céramique qui assure la cohésion définitive du matériau [8]. Cette évolution thermique est capitale, car elle transforme un matériau argileux plastique en un solide céramique rigide et réfractaire [8][9].

Enfin, le kaolin représente une source importante d'alumine. Or, la présence d'alumine est particulièrement intéressante dans les matériaux réfractaires, car elle améliore la tenue à haute température, la stabilité et, dans certains cas, la résistance mécanique [8].

II.3.3 Importance du kaolin dans l'étude

Le choix du kaolin dans cette étude est pleinement justifié. Il s'agit d'un matériau naturel disponible localement, relativement accessible et technologiquement adapté à l'élaboration de produits céramiques [4][8]. Son intérêt principal réside dans sa capacité à servir de base à la formulation, tout en apportant les éléments chimiques nécessaires à la formation de phases réfractaires [8][9].

Toutefois, le kaolin seul ne suffit pas toujours à produire une brique réfractaire équilibrée. Sa cuisson peut entraîner un certain retrait, et sa structure finale dépend fortement de la température atteinte [5]. C'est pourquoi son association avec la chamotte et le sable siliceux est essentielle. En d'autres termes, le kaolin joue un rôle central, mais il doit être intégré dans une formulation cohérente [5][9].

II.4 Le sable siliceux

II.4.1 Définition et composition

Le sable siliceux est un matériau granulaire composé principalement de dioxyde de silicium (SiO_2) [2] (voir Figure II.5) . Selon sa pureté, il peut contenir de faibles quantités d'impuretés telles que les oxydes de fer, l'alumine ou les matières organiques. Dans le domaine des matériaux réfractaires, un sable siliceux relativement pur est généralement préféré afin d'éviter les effets indésirables des impuretés sur le comportement thermique du produit [8].



Figure II.5 : Sable siliceux (SiO_2)

II.4.2 Rôle du sable siliceux dans la formulation

Le sable siliceux remplit plusieurs fonctions dans la brique réfractaire. Sur le plan structurel, il agit comme une charge minérale rigide qui participe à l'ossature granulaire du matériau. Il contribue à améliorer la tenue à chaud et à réduire, dans une certaine mesure, le retrait lié à la phase argileuse [5].

Sur le plan chimique, la silice est un constituant essentiel dans les systèmes alumino-silicatés. Elle intervient dans la formation des phases céramiques après cuisson [8][9]. Dans une formulation à base de kaolin, l'ajout de sable siliceux permet de corriger et d'ajuster le rapport silice/alumine du mélange [8].

Sur le plan technologique, le sable siliceux peut aussi influencer la granulométrie globale du mélange. Une distribution granulométrique adaptée améliore l'empilement des grains, réduit les vides excessifs et favorise une structure plus homogène [5][9].

II.4.3 Importance et limites du sable siliceux

L'intérêt du sable siliceux dans cette étude réside dans sa contribution à la résistance thermique et à la rigidité du matériau [8]. Il peut améliorer certaines propriétés, notamment lorsque la formulation de base est trop plastique ou trop sujette au retrait [5].

Cependant, une quantité excessive de silice peut rendre le matériau plus fragile, surtout si la structure obtenue devient trop rigide ou si l'équilibre entre les constituants n'est pas respecté [9]. Ainsi, l'ajout de sable siliceux doit être raisonné. Il ne s'agit pas seulement d'ajouter un matériau réfractaire, mais d'optimiser la formulation pour atteindre un équilibre entre cohésion, stabilité thermique et résistance mécanique [5][9].

II.5 La chamotte

II.5.1 Définition de la chamotte

La chamotte est un matériau obtenu par cuisson préalable d'une argile (voir Figure II.6), suivie d'un broyage et d'un calibrage granulométrique [5]. Autrement dit, il s'agit d'une matière argileuse déjà transformée thermiquement, donc partiellement ou totalement stabilisée. Ce matériau est très utilisé dans les formulations réfractaires et céramiques [6].

La chamotte est particulièrement intéressante car elle a déjà subi les transformations minéralogiques liées à la cuisson. Elle présente donc une meilleure stabilité dimensionnelle que les argiles crues [9].



Figure II.6 : Chamotte obtenue après cuisson et broyage de l'argile

II.5.2 Rôle de la chamotte dans la brique réfractaire

La chamotte joue un rôle fondamental dans l'amélioration du comportement technologique et thermique de la brique. Son premier effet est la réduction du retrait [5]. En effet, comme elle a déjà été cuite, elle ne subit plus les mêmes variations dimensionnelles qu'une argile brute. Son incorporation dans le mélange limite donc les déformations pendant le séchage et la cuisson [6].

Elle joue également un rôle important dans la limitation des fissures. Les matériaux argileux seuls ont tendance à se contracter au séchage, ce qui favorise l'apparition de fissurations. La présence de chamotte réduit cette sensibilité en stabilisant la structure [9].

De plus, la chamotte améliore souvent la résistance mécanique du produit fini, en jouant le rôle d'agrégat céramique [5]. Elle peut aussi contribuer à la résistance au choc thermique, grâce à sa stabilité et à sa faible sensibilité aux transformations ultérieures [9].

II.5.3 Importance de la chamotte dans cette étude

Dans le cadre de la présente étude, la chamotte constitue un constituant particulièrement important. Étant donné que l'objectif est de produire une brique réfractaire à base de matières locales, il est essentiel de maîtriser les défauts technologiques tels que le retrait, le gauchissement et les fissurations [6]. L'ajout de chamotte répond directement à ce besoin.

Elle permet également de rapprocher la formulation d'un matériau réfractaire plus réaliste sur le plan industriel. En pratique, de nombreuses formulations réfractaires utilisent une fraction chamottée précisément pour stabiliser la structure et améliorer les performances du produit [5][9]. Son utilisation dans cette étude est donc non seulement justifiée, mais fortement recommandée.

II.6 Complémentarité entre le kaolin, le sable siliceux et la chamotte

L'intérêt de la formulation choisie réside dans la complémentarité fonctionnelle de ses trois constituants. Le kaolin, le sable siliceux et la chamotte ne remplissent pas le même rôle, mais agissent ensemble pour produire un matériau équilibré [5][9].

Le kaolin constitue la base plastique et réactive du mélange. Il assure la cohésion avant cuisson et participe à la formation du réseau céramique après cuisson [8]. Le sable siliceux agit comme correcteur de composition et charge rigide, contribuant à la tenue thermique et à la stabilité de la structure [8]. La chamotte joue le rôle d'agrégat déjà stabilisé, qui réduit les retraits et améliore la résistance aux fissures [5][9].

Cette complémentarité est particulièrement importante. Une formulation à base de kaolin seul pourrait être trop sensible au retrait et à la fissuration. Une formulation trop riche en sable pourrait manquer de cohésion. Une formulation sans chamotte pourrait présenter une moins bonne stabilité dimensionnelle. L'association des trois matériaux permet donc de mieux équilibrer les propriétés [5][9].

Ainsi, le choix de ces matières premières ne repose pas uniquement sur leur disponibilité, mais également sur leur logique technologique dans la formulation d'un matériau réfractaire [6].

II.7 Formulation des mélanges

Afin d'évaluer l'influence des proportions des matières premières sur les propriétés finales de la brique réfractaire, plusieurs mélanges peuvent être préparés [6]. Le principe consiste à faire varier les teneurs en kaolin, en sable siliceux et en chamotte, tout en maintenant une cohérence globale de la formulation [5][9].

À titre indicatif, les formulations suivantes peuvent être envisagées :

Tableau II.1 : Composition des mélanges utilisés

Mélange	Kaolin (%)	Chamotte (%)	Sable siliceux (%)
M1	50	30	20
M2	40	40	20
M3	60	25	15

L'objectif de cette variation est de déterminer l'effet de chaque constituant sur les propriétés telles que la résistance mécanique, la porosité, la masse volumique et le comportement thermique [6][9]. Une formulation riche en kaolin peut favoriser la cohésion, tandis qu'une augmentation de la chamotte peut améliorer la stabilité dimensionnelle [5]. De même, l'ajout contrôlé de sable siliceux peut influencer la rigidité et la résistance à haute température [8].

Cette approche comparative est essentielle dans toute étude expérimentale [6]. Elle permet non seulement d'identifier la formulation la plus performante, mais aussi de mieux comprendre le rôle joué par chaque matière première [5][9].

II.8 Intérêt de l'utilisation de matières premières locales

L'utilisation de matières premières locales présente plusieurs avantages. Sur le plan économique, elle permet de réduire les coûts liés au transport et à l'importation des matériaux [10]. Sur le plan technique, elle encourage l'étude et la valorisation des ressources nationales. Sur le plan stratégique, elle contribue au développement de solutions locales adaptées aux besoins industriels du pays [10].

Dans le cas de l'Algérie, la présence de gisements de kaolin, de sable siliceux et d'autres matériaux argileux représente une opportunité réelle pour le développement de matériaux réfractaires à usage industriel [4][8]. Cette démarche s'inscrit également dans une logique de développement durable, car elle favorise une meilleure exploitation des ressources disponibles et peut encourager, à terme, une production locale de matériaux à haute valeur ajoutée [10].

Ainsi, au-delà de l'intérêt purement scientifique, cette étude possède également une dimension économique et industrielle importante.

Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté la brique réfractaire ainsi que les principales matières premières utilisées dans sa fabrication. Il a été montré que la brique réfractaire constitue un matériau essentiel dans les environnements à haute température, grâce à ses propriétés thermiques, mécaniques et chimiques [6][9].

L'étude détaillée des matières premières retenues, à savoir le kaolin, le sable siliceux et la chamotte, a permis de mettre en évidence le rôle spécifique de chacune d'elles dans la formulation du produit final [5][8]. Le kaolin assure la base argileuse et la cohésion du matériau; le sable siliceux contribue à la rigidité et à la résistance thermique; la chamotte améliore la stabilité dimensionnelle et limite les fissurations [5][9].

Le choix de ces matériaux est justifié non seulement par leurs propriétés complémentaires, mais également par leur disponibilité locale, ce qui confère à cette étude une dimension appliquée importante [10]. Le chapitre suivant sera consacré à la méthodologie expérimentale, à la préparation des mélanges, à la fabrication des briques et à l'évaluation de leurs propriétés.

CHAPITRE III

MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES



III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes matières premières utilisées ainsi que les méthodes expérimentales adoptées pour l'élaboration des matériaux réfractaires étudiés. L'objectif principal de ce travail consiste à développer des briques réfractaires à base de matières premières locales et de déchets recyclés, tout en évaluant leurs propriétés mécaniques après traitement thermique.

Les travaux expérimentaux réalisés comprennent plusieurs étapes, notamment :

- la préparation des matières premières ;
- le broyage et le tamisage ;
- la calcination du kaolin ;
- la préparation de la chamotte recyclée ;
- l'élaboration des formulations ;
- le compactage ;
- la cuisson ;
- ainsi que les essais mécaniques de compression.

Cette approche expérimentale s'inscrit dans une démarche de valorisation des ressources locales et des déchets industriels, dans le but de réduire les coûts de fabrication des matériaux réfractaires et de limiter l'impact environnemental des déchets solides industriels.

III.2 Matières premières utilisées

III.2.1 Kaolin algérien

Le kaolin utilisé dans cette étude provient du complexe SOALKA d'El Milia (Algérie). Il s'agit d'une argile aluminosilicatée principalement composée de kaolinite, largement utilisée dans les industries céramiques et réfractaires en raison de sa stabilité thermique et de sa richesse en alumine et en silice.

Selon Sabir . [11], le kaolin constitue une matière première importante dans les matériaux céramiques grâce à ses propriétés physico-chimiques et à sa capacité à développer des structures thermiquement stables après cuisson.

Avant son utilisation, le kaolin brut a été soumis à une opération de séchage afin d'éliminer l'humidité résiduelle susceptible d'influencer la reproductibilité des formulations et les propriétés finales des éprouvettes.

Le séchage a été réalisé dans une étuve pendant une durée de 24 heures.



Figure III.1 : Kaolin KT2 provenant du complexe SOALKA d'El Milia.

III.2.2 Métakaolin (MK)

Une partie du kaolin préparé a été soumise à une calcination à une température de 750°C afin d'obtenir du métakaolin (MK).

La calcination du kaolin entraîne la déshydroxylation de la kaolinite et la formation d'une phase amorphe appelée métakaolin. Cette transformation améliore la réactivité du matériau et influence positivement certaines propriétés mécaniques et thermiques [11].

Le traitement thermique a été effectué dans un four électrique de type Nabertherm.

Selon Sabir. [11], le métakaolin présente une structure désordonnée capable d'améliorer les interactions entre les particules dans les matériaux céramiques et réfractaires



Figure III.2 : Four électrique utilisé pour la calcination du kaolin à 750°C.

III.2.3 Chamotte recyclée

En raison de l'absence de chamotte commerciale disponible localement, une chamotte recyclée a été préparée à partir de déchets de briques réfractaires récupérées d'une ancienne boulangerie industrielle.

Les briques usagées ont été :

- concassées manuellement ;
- broyées à l'aide d'une machine de type Los Angeles ;
- puis tamisées à 100 μm .

Deux fractions granulométriques ont été obtenues :

- une fraction fine inférieure à 100 μm ;
- une fraction grossière supérieure à 100 μm .

Les deux fractions ont été utilisées dans les formulations afin d'améliorer l'empilement granulaire et la compacité des éprouvettes.

Selon Lee et Zhang [12], le recyclage des déchets réfractaires représente une solution efficace pour réduire les coûts de production et limiter les impacts environnementaux liés aux déchets industriels.

La chamotte joue également un rôle important dans la réduction du retrait thermique et dans l'amélioration de la stabilité dimensionnelle des matériaux réfractaires [12].



Figure III.3 : Préparation de la chamotte recyclée à partir de déchets de briques réfractaires.

III.2.4 Sable siliceux

Le sable siliceux utilisé dans cette étude a été préalablement tamisé afin d'obtenir une granulométrie homogène et d'éliminer les particules grossières.

Le sable utilisé présente une texture relativement fine et sèche, favorable à une bonne dispersion dans les formulations expérimentales.

La silice constitue l'un des principaux composants des matériaux réfractaires silico-alumineux. Elle contribue à la résistance thermique et à la rigidité des structures céramiques [8].

Selon Callister [8], les matériaux riches en silice possèdent une bonne stabilité thermique mais peuvent présenter une faible cohésion mécanique lorsqu'ils ne sont pas correctement liés à une matrice céramique stable.



Figure III.4 : Sable siliceux utilisé dans les formulations expérimentales.

III.2.5 Laitier

Le laitier utilisé dans cette étude représente un sous-produit industriel valorisé comme ajout minéral dans certaines formulations.

L'incorporation du laitier vise à :

- améliorer certaines propriétés mécaniques ;
- réduire les coûts de production ;
- favoriser la valorisation des déchets industriels.

Selon Kumar et Kumar [13], l'utilisation des sous-produits industriels dans les matériaux réfractaires constitue une approche durable permettant de limiter la consommation des matières premières naturelles tout en valorisant les déchets industriels.

III.3 Préparation des poudres

III.3.1 Séchage du kaolin

Le kaolin brut a été séché pendant 24 heures afin d'éliminer l'humidité résiduelle présente dans le matériau.

Cette étape permet :

- d'obtenir une masse plus stable ;
- d'améliorer les opérations de broyage ;
- d'assurer une meilleure reproductibilité expérimentale.

L'humidité résiduelle peut influencer la compacité des formulations ainsi que les propriétés finales des matériaux obtenus.



Figure III.5 : Séchage du kaolin

III.3.2 Broyage

Le broyage du kaolin ainsi que de la chamotte recyclée a été réalisé à l'aide d'une machine de type Los Angeles.

Dix billes métalliques ont été introduites dans l'appareil afin d'améliorer l'efficacité du broyage et de favoriser la réduction de la taille des particules.

Le broyage permet :

- d'augmenter la finesse des poudres ;
- d'améliorer l'homogénéité des formulations ;
- de favoriser une meilleure compacité lors du compactage.

Selon Kingery . [4], la réduction granulométrique des poudres joue un rôle essentiel dans les propriétés finales des matériaux céramiques.



Figure III.6 : Machine Los Angeles utilisée pour le broyage des matériaux.

III.3.3 Tamisage :

Après broyage, les poudres ont été tamisées afin d'obtenir des particules plus homogènes.

- Le kaolin a été tamisé à 80 μm .
- La chamotte recyclée a été tamisée à 100 μm .

Le tamisage permet :

- d'améliorer la répartition granulométrique ;
- de réduire les défauts internes ;
- d'optimiser la densification des éprouvettes.

Selon Reed [14], le contrôle de la granulométrie constitue un facteur essentiel dans l'élaboration des matériaux céramiques et réfractaires.



Figure III.7 : Tamisage

III.4 Élaboration des formulations

Sept formulations expérimentales ont été élaborées afin d'étudier l'influence des différentes matières premières sur les propriétés mécaniques des matériaux obtenus.

Les formulations ont été préparées à partir de :

- métakaolin (MK) ;
- kaolin brut ;
- chamotte recyclée ;
- sable siliceux ;
- laitier.

Les compositions ont été choisies dans le but d'évaluer :

- l'effet de la chamotte recyclée ;
- l'influence du sable siliceux ;
- le rôle du laitier ;
- l'impact du traitement thermique du kaolin.

III.4.1 Composition des formulations

Tableau III.1 : Compositions détaillées des formulations expérimentales de la première campagne.

Échantillon	Composition détaillée
E1	50 g MK + 25 g chamotte fine + 60 g chamotte grossière + 21 g d'eau
E2	50 g MK + 85 g sable siliceux + 21 g d'eau
E3	50 g kaolin + 25 g chamotte fine + 60 g chamotte grossière + 21 g d'eau
E4	50 g kaolin + 85 g sable siliceux + 21 g d'eau
E5	50 g laitier + 25 g chamotte fine + 60 g chamotte grossière + 21 g d'eau
E6	50 g laitier + 85 g sable siliceux + 21 g d'eau
E7	50 g MK + 25 g chamotte fine + 58 g chamotte grossière + 2 g AL + 21 g d'eau

Les formulations expérimentales ont été élaborées à partir de différentes combinaisons de métakaolin, de kaolin brut, de laitier, de chamotte recyclée et de sable siliceux.

La chamotte recyclée a été utilisée sous deux fractions granulométriques :

- une fraction fine ;
- une fraction grossière.

L'association des deux fractions permet d'améliorer l'empilement granulaire, de réduire les vides internes et d'augmenter la compacité des éprouvettes après compactage et cuisson [14].

Une quantité constante de 21 g d'eau a été ajoutée à chaque formulation afin d'assurer une humidification homogène des mélanges et de faciliter les opérations de moulage et de compactage.

Selon Reed [14], la teneur en eau influence directement la plasticité des mélanges, la densification des éprouvettes ainsi que les propriétés finales des matériaux céramiques.

Les formulations contenant du sable siliceux ont été préparées afin de comparer leur comportement avec celui des formulations à base de chamotte recyclée.

L'ajout du laitier a pour objectif d'évaluer l'influence d'un sous-produit industriel sur les propriétés mécaniques des matériaux élaborés [13].

III.4.2 Préparation et homogénéisation des mélanges

Après la pesée des différentes matières premières, chaque constituant a été introduit dans un récipient propre afin de préparer les formulations expérimentales.

Les poudres ont ensuite été mélangées manuellement afin d'obtenir une répartition homogène des particules dans l'ensemble du mélange. Après homogénéisation à sec, une quantité de 21 g d'eau a été ajoutée progressivement à chaque formulation.

Le mélange a ensuite été poursuivi jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène présentant une consistance favorable au moulage et au compactage.

Cette étape est particulièrement importante car une mauvaise homogénéisation peut provoquer :

- des défauts structuraux ;
- une mauvaise compacité ;
- des fissurations après cuisson ;
- ainsi qu'une dispersion des propriétés mécaniques.

Selon Reed [14], l'homogénéisation des mélanges constitue une étape essentielle dans les procédés de fabrication des matériaux céramiques et réfractaires, car elle influence directement la microstructure et les propriétés finales du matériau.



Figure III.8 : Préparation et homogénéisation des mélanges expérimentaux avant compactage.

III.5 Préparation des éprouvettes

Les mélanges préparés ont été introduits dans un moule cylindrique métallique spécialement conçu pour l'élaboration des éprouvettes.

Le dispositif expérimental est constitué :

- d'un cylindre métallique ;
- d'un fond amovible ;
- d'un piston de compactage.

Ce type de moule permet d'obtenir des éprouvettes cylindriques homogènes et de dimensions régulières.



Figure III.9 : Moule métallique utilisé pour la fabrication des éprouvettes cylindriques.



Figure III.10 : Remplissage du moule et préparation des éprouvettes avant compactage

III.6 Compactage des éprouvettes

Le compactage des formulations a été réalisé à l'aide d'une presse hydraulique.

Une pression de : 35 MPa

a été appliquée afin d'obtenir des éprouvettes denses et homogènes.

Le compactage permet :

- de réduire la porosité ;
- d'améliorer la cohésion interne ;
- d'augmenter la densité apparente ;
- d'améliorer les propriétés mécaniques finales.

Selon Rahaman [9], la pression de compactage influence directement la densification et les propriétés mécaniques des matériaux céramiques.

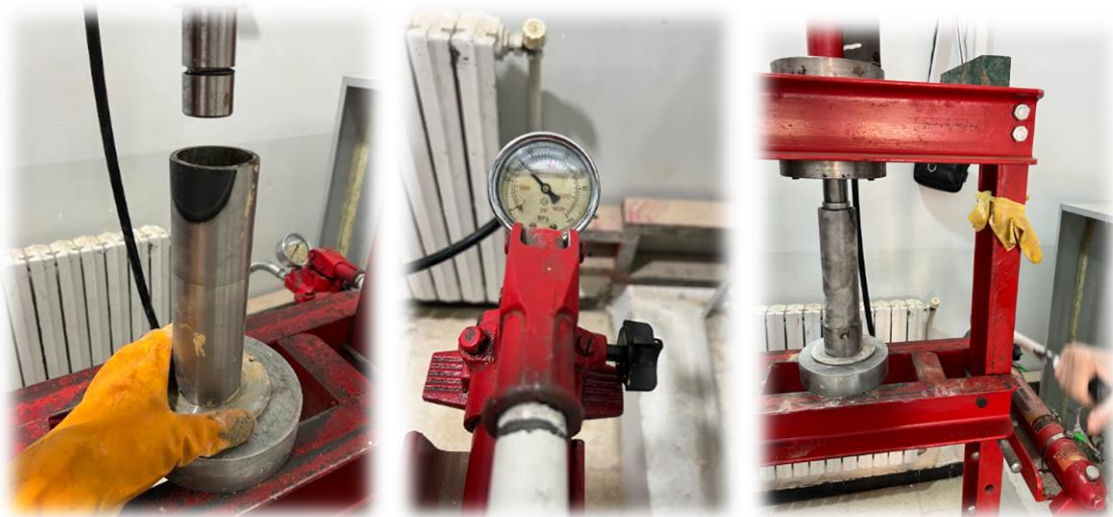


Figure III.11 : Presse hydraulique utilisée pour le compactage des éprouvettes.

III.7 Cuisson des éprouvettes

Après compactage, les éprouvettes ont été soumises à une cuisson dans un four électrique.

La température de cuisson a été fixée à : **1100°C**

avec un maintien thermique de : **3 heures**.

Cette étape permet :

- l'élimination complète de l'humidité ;
- la consolidation de la structure ;
- le développement des liaisons céramiques ;
- l'amélioration des propriétés mécaniques.

Selon Kingery. [4], le traitement thermique favorise les phénomènes de frittage responsables de la densification des matériaux céramiques.



Figure III.12 : Cuisson des éprouvettes

III.8 Deuxième campagne expérimentale :

Élaboration de formulations à base de matières premières algériennes et françaises

III.8.1 Matières premières françaises

Les matières premières françaises utilisées dans cette seconde campagne expérimentale sont constituées d'un kaolin français et d'une chamotte française fournis sous forme de poudres fines. Ces matériaux ont été sélectionnés afin de comparer leur comportement avec celui des matières premières algériennes utilisées lors de la première campagne expérimentale.



Figure III.13 : Matières premières françaises utilisées (kaolin français et chamotte française).

III.8.2 Objectif de la deuxième campagne expérimentale

Après l'étude des formulations élaborées lors de la première campagne expérimentale, une deuxième campagne a été réalisée afin d'évaluer l'influence de l'origine des matières premières sur les propriétés des matériaux réfractaires obtenus.

Pour cela, plusieurs formulations ont été préparées en associant des matières premières algériennes et françaises. L'objectif principal était d'étudier le comportement du kaolin algérien lorsqu'il est utilisé avec une chamotte française, afin de déterminer si le kaolin local possède des caractéristiques adaptées à l'élaboration de matériaux réfractaires.

Par ailleurs, les formulations E3 et E5 de la première campagne expérimentale ont été reproduites dans les mêmes conditions de préparation et de cuisson. Cette démarche a pour objectif de vérifier si les matières premières algériennes, notamment la chamotte recyclée locale, permettent d'obtenir des propriétés mécaniques satisfaisantes sans avoir recours à la chamotte française.

Enfin, les formulations E3 et E5 ont également été soumises à une cuisson à 1300°C afin d'étudier l'influence de l'augmentation de la température sur les phénomènes de frittage, la densification des éprouvettes et l'amélioration de leurs propriétés mécaniques.

L'ensemble de ces essais permet ainsi de comparer les performances des matières premières algériennes et françaises et d'évaluer le potentiel d'utilisation de la chamotte recyclée locale dans la fabrication de matériaux réfractaires.

Selon Kingery et al. [4], l'augmentation de la température de cuisson favorise la diffusion de matière, la réduction de la porosité et l'amélioration des propriétés mécaniques des matériaux céramiques.

III.8.3 Formulations étudiées

Six formulations ont été préparées dans cette deuxième campagne expérimentale. Les quatre premières (**F1** à **F4**) ont été élaborées à partir de différentes combinaisons de kaolin et de chamotte d'origines algérienne et française. Les deux dernières correspondent aux formulations **E3** et **E5** reproduites puis cuites à **1300°C** pour étudier l'effet de la température de cuisson sur les propriétés finales des matériaux.

Tableau III.2 : Compositions des formulations de la deuxième campagne expérimentale utilisant des matières premières algériennes et françaises.

Échantillon	Composition
F1	50 g kaolin algérien + 85 g chamotte française + 21 g eau
F2	50 g kaolin français + 85 g chamotte algérien (25g fine + 60 g grossière) + 21 g eau
F3	50 g kaolin français + 85 g chamotte française + 21 g eau
F4	50 g laitier + 85 g chamotte française + 21 g eau
E3-1300	50 g kaolin algérien + 85 g chamotte algérien (25g fine + 60 g grossière) + 21 g eau
E5-1300	50 g laitier + 85 g chamotte algérien (25g fine + 60 g grossière) + 21 g eau

III.8.4 Préparation des mélanges

Les matières premières ont été préalablement pesées à l'aide d'une balance électronique de précision conformément aux formulations définies dans le Tableau III.2.

Les poudres ont ensuite été introduites dans un récipient de mélange et homogénéisées à sec afin d'assurer une répartition uniforme des constituants dans l'ensemble de la matrice.

Après homogénéisation, une quantité constante de 21 g d'eau a été ajoutée progressivement à chaque formulation. Le mélange a été malaxé manuellement jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène présentant une bonne plasticité et une répartition uniforme de l'humidité.

Cette étape est essentielle pour garantir une bonne cohésion des particules et faciliter l'opération de compactage.

Selon Kingery, [4], l'homogénéité du mélange influence directement la densité verte et les propriétés finales des matériaux céramiques.



Figure III.14 : Préparation des mélanges

III.8.5 Mise en forme et compactage

Les mélanges préparés ont été introduits dans un moule cylindrique métallique afin de réaliser des éprouvettes de géométrie identique.

La mise en forme a été effectuée par compactage uniaxial à l'aide d'une presse hydraulique sous une pression de 35 MPa.

L'application de cette pression permet de réduire les vides intergranulaires, d'augmenter la densité verte des éprouvettes et d'améliorer le contact entre les particules solides.

Selon German [15], l'augmentation de la densité initiale favorise les mécanismes de frittage et améliore les propriétés mécaniques après cuisson.



Figure III.15 : Mise en forme des éprouvettes cylindriques par compactage uniaxial et opération de démoulage.

III.8.6 Cuisson des éprouvettes à 1300°C

Après compactage, les éprouvettes ont été séchées puis introduites dans un four électrique.

La température de cuisson a été fixée à : **1300°C**

avec un maintien thermique de : **3 heures**

Cette température a été choisie afin de favoriser davantage les phénomènes de frittage, la densification de la structure et la formation de phases réfractaires stables.

L'élévation de la température de cuisson augmente la diffusion atomique au sein du matériau, ce qui conduit à une diminution de la porosité ouverte et à une amélioration de la cohésion interne de la matrice céramique.

Dans les systèmes alumino-silicatés contenant du kaolin et de la chamotte, une cuisson à 1300°C favorise également la formation de mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), phase reconnue pour ses excellentes propriétés mécaniques et sa grande stabilité thermique [16].

Selon Schneider et Komarneni [17], la mullite constitue l'une des phases les plus recherchées dans les matériaux réfractaires en raison de sa faible dilatation thermique, de sa résistance au fluage et de sa stabilité à haute température.

III.9 Essai de compression

Après refroidissement, les éprouvettes ont été soumises à des essais de compression afin d'évaluer leur résistance mécanique.

Les essais ont été réalisés à l'aide d'une machine de compression de type Cyber-Plus Evolution. L'essai consiste à appliquer une charge progressive jusqu'à rupture de l'éprouvette.

La résistance à la compression représente la capacité du matériau à supporter des contraintes mécaniques sans fissuration ni écrasement.

Selon Callister [8], les essais mécaniques constituent une méthode essentielle pour évaluer les performances des matériaux céramiques et réfractaires.

La résistance à la compression a été calculée à partir de la charge maximale appliquée selon la relation suivante :

Selon la norme ASTM C133 relative aux matériaux réfractaires [ASTM C133]

$$R_c = \frac{F}{S}$$

Avec :

- R_c : résistance à la compression (MPa)
- F : charge maximale appliquée (N)
- S : surface de l'éprouvette (mm^2)



Figure III.16 : Essai de compression réalisé sur les éprouvettes réfractaires.

III.10. Essai d'absorption d'eau et porosité ouverte

L'essai d'absorption d'eau et de porosité ouverte a été réalisé afin d'évaluer la quantité de pores accessibles à l'eau dans les échantillons après cuisson. Ces paramètres permettent d'apprécier le degré de densification du matériau et son comportement vis-à-vis de l'humidité.

Pour cet essai, les éprouvettes ont d'abord été séchées puis pesées afin de déterminer leur masse sèche (**Ms**). Elles ont ensuite été immergées dans l'eau pendant 24 heures jusqu'à saturation complète, puis pesées à nouveau pour obtenir la masse saturée (**Mh**). Enfin, la masse immergée dans l'eau (**Mi**) a été mesurée.

L'absorption d'eau a été calculée à l'aide de la relation suivante :

$$\text{Absorption}(\%) = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

La porosité ouverte a été déterminée selon l'expression suivante :

$$P(\%) = \frac{M_h - M_s}{M_h - M_i} \times 100$$

Avec :

- **Ms** : masse sèche (g)
- **Mh** : masse saturée après immersion (g)
- **Mi** : masse immergée dans l'eau (g)

Ces essais sont couramment utilisés pour caractériser les matériaux céramiques et réfractaires. En général, une faible absorption d'eau et une faible porosité ouverte traduisent une meilleure densification du matériau et un frittage plus efficace après cuisson. Les résultats obtenus seront présentés et discutés dans le chapitre IV.

La figure III.17 présente le dispositif expérimental utilisé pour la détermination de la masse immergée (**Mi**) des éprouvettes. L'échantillon est placé dans un panier métallique suspendu et immergé dans l'eau, tandis que la masse est mesurée à l'aide d'une balance électronique. Cette mesure est nécessaire pour le calcul de la porosité ouverte selon la norme ASTM C20 [18]



Figure III.17 : Dispositif expérimental utilisé pour la mesure de la masse immergée dans l'eau lors de l'essai de porosité ouverte et d'absorption d'eau.

III.10 Conclusion du chapitre

La méthodologie adoptée a comporté la préparation des matières premières, le broyage et le tamisage des poudres, la calcination du kaolin pour l'obtention du métakaolin, la préparation de la chamotte recyclée, l'élaboration des formulations, le compactage sous une pression de 35 MPa ainsi que la cuisson des éprouvettes à 1100°C et 1300°C.

Cette démarche expérimentale a également permis d'étudier l'influence de la nature des matières premières, de l'origine de la chamotte ainsi que de la température de cuisson sur les propriétés des matériaux élaborés.

Les essais de résistance à la compression, d'absorption d'eau et de porosité ouverte ont été retenus afin d'évaluer les performances mécaniques et physiques des différentes formulations. L'ensemble des résultats obtenus à partir de cette méthodologie sera présenté, analysé et discuté dans le chapitre suivant afin d'identifier les formulations les plus performantes pour une éventuelle utilisation dans le domaine des matériaux réfractaires.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS ET DISCUSSION



IV.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus lors de l'élaboration de briques réfractaires à partir de différentes formulations. L'objectif principal est d'étudier l'influence de la nature des matières premières, de la composition des mélanges et de la température de cuisson sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux élaborés.

Deux campagnes expérimentales ont été réalisées. La première campagne a porté sur sept formulations élaborées à partir de matières premières locales, cuites à une température de **1100°C** pendant 3 heures. Ces formulations avaient pour objectif d'évaluer le comportement initial des mélanges à base de métakaolin, de kaolin algérien, de chamotte recyclée, de sable siliceux et de laitier.

La deuxième campagne a été réalisée à une température plus élevée, soit **1300°C** pendant 3 heures. Elle a porté sur six formulations élaborées à partir de matières premières algériennes et françaises. Cette deuxième campagne avait pour but d'évaluer l'effet de l'augmentation de la température de cuisson ainsi que l'influence de la qualité des matières premières sur la résistance mécanique des briques réfractaires.

Les propriétés étudiées concernent principalement la résistance à la compression, l'absorption d'eau et le comportement des échantillons après cuisson. L'analyse des résultats permet de mettre en évidence les formulations les plus performantes et d'identifier les facteurs responsables de l'amélioration ou de la diminution des performances mécaniques.

IV.2 Résultats de la première campagne expérimentale

IV.2.1 Conditions de cuisson

La première campagne expérimentale a été réalisée sur sept échantillons notés **E1** à **E7**. Ces échantillons ont été élaborés principalement à partir de matières premières locales, puis cuits à une température de **1100°C** pendant 3 heures.

Cette température a été choisie afin d'évaluer le comportement des formulations à une température intermédiaire, avant de passer à une température plus élevée dans la deuxième campagne.



Figure IV.1 : Éprouvettes avant cuisson dans le four de laboratoire

IV.2.2 Résistance à la compression

Les résultats de résistance à la compression obtenus pour les échantillons de la première campagne sont présentés dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Résistance à la compression des échantillons de la première campagne

Échantillon	Composition générale	Résistance à la compression (MPa)
E1	Métakaolin + chamotte	19,96
E2	Métakaolin + sable siliceux	7,32
E3	Kaolin algérien + chamotte	19,76
E4	Kaolin algérien + sable siliceux	5,36
E5	Laitier + chamotte	16,98
E6	Laitier + sable siliceux	3,92
E7	Métakaolin + chamotte + AL	19,45

Les résultats montrent que les formulations contenant de la chamotte présentent des résistances mécaniques nettement supérieures à celles contenant du sable siliceux. En effet, les échantillons **E1**, **E3**, **E5** et **E7** ont donné les meilleures résistances, avec des valeurs comprises entre **16,98 MPa** et **19,96 MPa**.

L'échantillon **E1** a présenté la résistance la plus élevée de cette campagne, avec une valeur de **19,96 MPa**. Il est suivi par l'échantillon **E3**, composé de kaolin algérien et de chamotte, avec une résistance de **19,76 MPa**. La différence entre ces deux valeurs est très faible, ce qui montre

que le remplacement du métakaolin par le kaolin algérien brut n'a pas entraîné une diminution importante de la résistance mécanique dans les conditions de cuisson étudiées.

En revanche, les formulations contenant du sable siliceux ont donné les résistances les plus faibles. L'échantillon **E6** a présenté la valeur minimale, soit **3,92 MPa**. Cette faible résistance peut être liée à une cohésion insuffisante entre les grains après cuisson et à une densification limitée de la structure.

La chamotte joue ici un rôle important dans l'amélioration du comportement mécanique. Elle agit comme un squelette granulaire stable, limite le retrait et améliore la stabilité dimensionnelle du matériau après cuisson [5][12].

Selon Kingery et al. [4], la répartition granulométrique et la nature des agrégats influencent fortement la compacité et la résistance finale des matériaux céramiques.



Figure IV.2 : Machine d'essai de compression utilisée pour la détermination de la résistance mécanique.

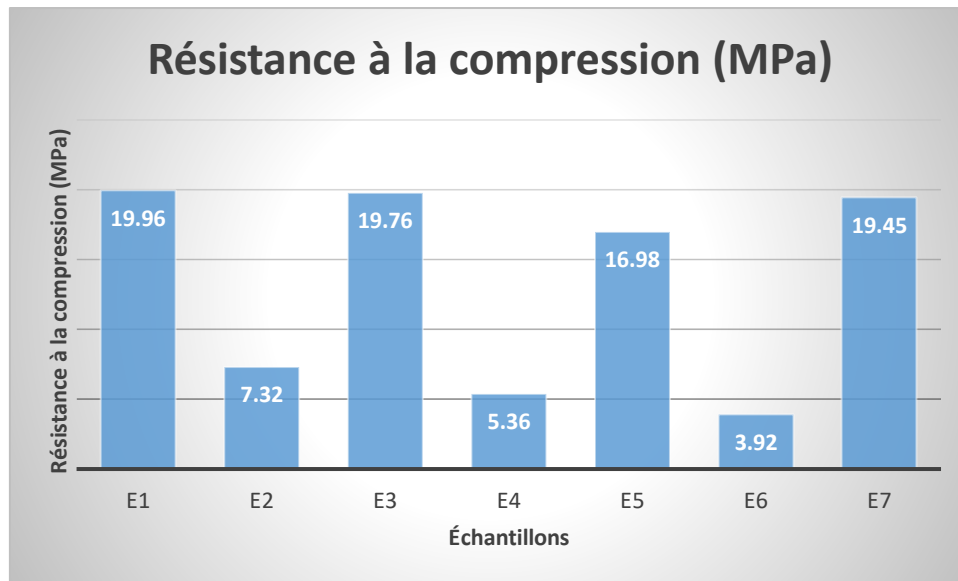


Figure IV.3 : Résistance à la compression des échantillons de la première campagne (1100 °C)

La Figure IV.3 montre les valeurs de résistance à la compression des échantillons de la première campagne après cuisson à 1100 °C. Les échantillons E1, E3 et E7 présentent les meilleures performances mécaniques avec des résistances proches de 20 MPa. En revanche, les échantillons E4 et E6 affichent les valeurs les plus faibles, respectivement 5,36 MPa et 3,92 MPa. Ces différences peuvent être attribuées à la nature des matières premières utilisées ainsi qu'au degré de densification obtenu après cuisson.



Figure IV.4 : Affichage de la force maximale et de la contrainte maximale enregistrées lors de l'essai

IV.2.3 Comparaison entre les formulations avec chamotte et sable siliceux

Afin de mieux comprendre l'influence de la chamotte, il est utile de comparer les couples de formulations ayant une matrice similaire.

Tableau IV.2 : Comparaison entre les formulations à base de chamotte et de sable siliceux

Matrice	Avec chamotte (MPa)	Avec sable siliceux (MPa)
Métakaolin	19,96	7,32
Kaolin algérien	19,76	5,36
Laitier	16,98	3,92

Cette comparaison montre clairement que la chamotte améliore considérablement la résistance à la compression. Pour la matrice à base de métakaolin, la résistance passe de **7,32 MPa** avec le sable siliceux à **19,96 MPa** avec la chamotte. Pour la matrice à base de kaolin algérien, elle passe de **5,36 MPa** à **19,76 MPa**. Enfin, pour la matrice à base de laitier, la résistance passe de **3,92 MPa** à **16,98 MPa**.

Ces résultats confirment que la chamotte est plus adaptée que le sable siliceux pour l'élaboration de briques réfractaires dans les conditions expérimentales étudiées. Ce comportement peut être attribué à sa stabilité thermique et à sa capacité à améliorer l'empilement granulaire du matériau [12][14].

IV.2.4 Absorption d'eau

L'absorption d'eau permet d'évaluer indirectement la porosité ouverte des matériaux. Une absorption élevée traduit généralement une porosité plus importante, tandis qu'une absorption plus faible indique une structure plus dense [9].

Les résultats d'absorption d'eau de la première campagne sont présentés dans le tableau IV.3.

Tableau IV.3 : Absorption d'eau des échantillons de la première campagne

Échantillon	Masse sèche (g)	Masse après immersion (g)	Absorption d'eau (%)
E1	39.57	46.67	17.94
E2	22.90	26.67	16.46
E3	15.30	17.80	16.34
E4	12.40	13.57	9.44
E5	20.53	24.47	19.19
E6	21.13	24.12	14.15
E7	29.33	35.77	21.96

Les valeurs d'absorption d'eau varient entre **9,44 %** et **21,96 %**. L'échantillon **E4** présente la plus faible absorption d'eau, avec une valeur de **9,44 %**. Cela peut indiquer une porosité ouverte relativement réduite. À l'inverse, l'échantillon **E7** présente la valeur la plus élevée, soit **21,96 %**, ce qui traduit une structure plus poreuse.

Cependant, une faible absorption d'eau ne signifie pas toujours une résistance mécanique élevée. En effet, l'échantillon **E4** présente une faible absorption, mais sa résistance mécanique reste faible avec seulement **5,36 MPa**. Cela montre que la résistance à la compression ne dépend pas uniquement de la porosité ouverte, mais également de la nature des phases formées, de la cohésion entre les grains et de la qualité du frittage [4][9].



Figure IV.5 : Éprouvettes immergées dans l'eau pendant 24 h pour l'essai d'absorption d'eau

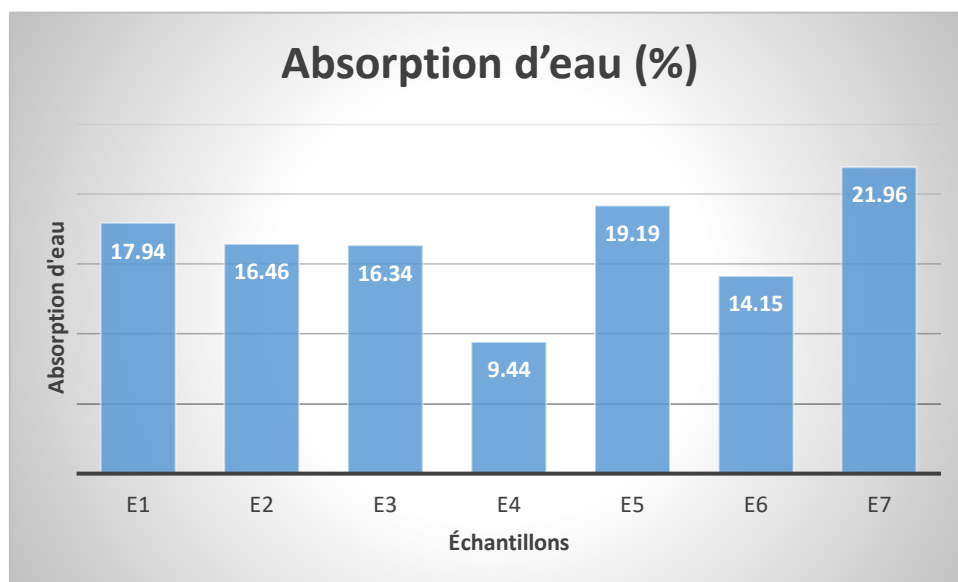


Figure IV.6 : Absorption d'eau des échantillons E1–E7

Analyse du graphique

Le graphique met en évidence les différences d'absorption d'eau entre les échantillons **E1** à **E7**. On observe clairement que l'échantillon **E7** présente l'absorption la plus élevée **21,96 %**, tandis que l'échantillon **E4** présente la valeur la plus faible **9,44 %**. Les autres échantillons affichent des valeurs intermédiaires comprises entre **14 %** et **19 %**, traduisant des niveaux de porosité variables selon la composition des mélanges. Cette représentation graphique confirme les résultats présentés dans le tableau précédent.

IV.2.5 Porosité ouverte des échantillons de la première campagne

La porosité ouverte est une propriété importante des matériaux réfractaires, car elle influence directement l'absorption d'eau, la résistance mécanique ainsi que le comportement thermique du matériau.

Les résultats obtenus pour les échantillons de la première campagne (1100 °C) sont présentés dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4 : Porosité ouverte des échantillons E1–E7 après cuisson à 1100 °C

Échantillon	Porosité (%)
E1	32,1
E2	29,07
E3	30,3
E4	17,28
E5	32,86
E6	26,18
E7	37,29

Analyse des résultats

Les valeurs de porosité ouverte varient entre **17,28 %** et **37,29 %**. L'échantillon **E4** présente la porosité la plus faible **17,28 %**, ce qui traduit une structure relativement dense avec une faible quantité de pores ouverts. À l'inverse, l'échantillon **E7** possède la porosité la plus élevée **37,29 %**, indiquant une structure plus poreuse.

Les échantillons **E1, E2, E3, E5 et E6** présentent des porosités intermédiaires comprises entre **26,18 %** et **32,86 %**. Cette variation est principalement liée à la composition des mélanges ainsi qu'au degré de frittage atteint lors de la cuisson à **1100 °C**.

Les résultats obtenus montrent également une bonne corrélation entre la porosité ouverte et l'absorption d'eau. En effet, les échantillons présentant une porosité élevée absorbent généralement une plus grande quantité d'eau, tandis que les échantillons plus denses présentent une absorption plus faible. Cette relation est largement rapportée dans la littérature scientifique consacrée aux matériaux céramiques et réfractaires [4][9].

D'une manière générale, une augmentation de la porosité tend à diminuer la résistance mécanique du matériau en raison de la présence de vides qui constituent des zones de faiblesse sous l'effet des contraintes mécaniques. Cependant, la résistance finale dépend également de la qualité du frittage, de la taille des grains et des phases minéralogiques développées lors du traitement thermique [8].

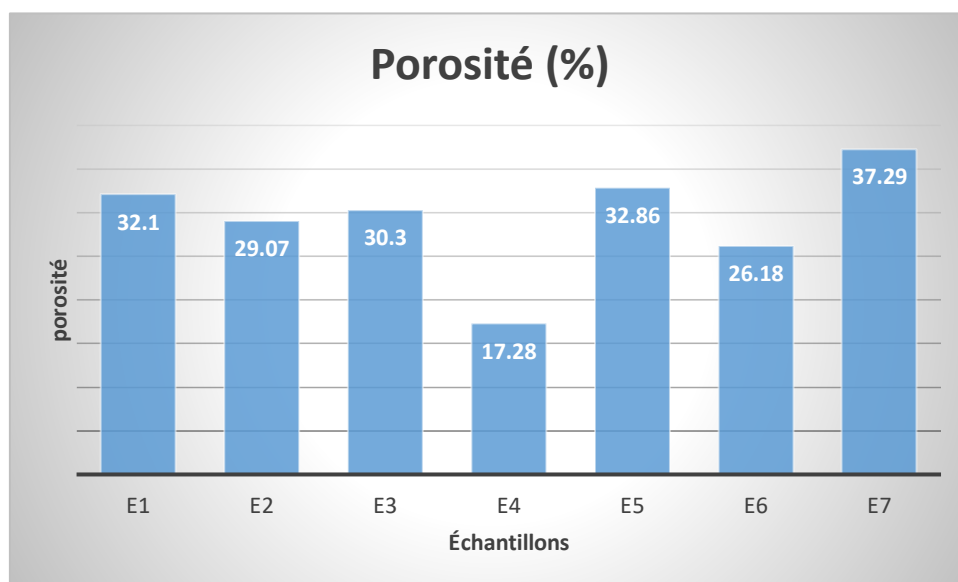


Figure IV.7: Variation de la porosité ouverte des échantillons E1–E7 après cuisson à 1100 °C.

Analyse du graphique

Le graphique met en évidence une dispersion notable des valeurs de porosité entre les différents échantillons. L'échantillon E4 présente la plus faible porosité, tandis que l'échantillon E7 affiche la valeur la plus élevée. Cette variation confirme l'influence de la composition des mélanges sur la structure interne des matériaux et sur leurs propriétés physiques après cuisson.

IV.3 Résultats de la deuxième campagne expérimentale

IV.3.1 Conditions de cuisson

La deuxième campagne expérimentale a été réalisée à une température de **1300°C** pendant 3 heures. Cette campagne a concerné six formulations à base de matières premières algériennes et françaises.

L'objectif principal était d'étudier l'effet de l'augmentation de la température de cuisson, ainsi que l'influence de la qualité des matières premières, notamment la chamotte française, sur la résistance mécanique des briques réfractaires.

IV.3.2 Résistance à la compression

Les résultats de résistance à la compression de la deuxième campagne sont présentés dans le tableau IV.4.

Tableau IV.5 : Résistance à la compression des échantillons de la deuxième campagne

Échantillon	Composition	Résistance à la compression (MPa)
F1	50 g kaolin ALG + 85 g chamotte FR	71,07
F2	50 g kaolin FR + 85 g chamotte ALG	41,96
F3	50 g kaolin FR + 85 g chamotte FR	59,88
F4	50 g laitier + 85 g chamotte FR	48,35
F5	Kaolin ALG + chamotte ALG	45,91
F6	Laitier + chamotte ALG	Fusion complète

Les résultats obtenus lors de la deuxième campagne montrent une amélioration très importante des performances mécaniques par rapport à la première campagne.

La meilleure résistance a été obtenue pour l'échantillon **F1**, composé de 50 g de kaolin algérien et de 85 g de chamotte française. Cette formulation a atteint une résistance à la compression de **71,07 MPa** après cuisson à **1300°C** pendant 3 heures.

Cette valeur est très significative, car elle montre que le kaolin algérien possède un potentiel important pour l'élaboration de briques réfractaires performantes lorsqu'il est associé à une chamotte de bonne qualité.

L'échantillon **F3**, composé de kaolin français et de chamotte française, a également donné une résistance élevée de **59,88 MPa**. Toutefois, cette valeur reste inférieure à celle obtenue avec le kaolin algérien et la chamotte française. Cela montre que, dans les conditions de cette étude, le kaolin algérien a donné un meilleur comportement mécanique que le kaolin français lorsqu'il est associé à la chamotte française.

L'échantillon **F2**, composé de kaolin français et de chamotte algérienne, a donné une résistance de **41,96 MPa**. Cette valeur est inférieure à celle de **F1** et **F3**, ce qui confirme l'influence importante de la qualité de la chamotte sur la résistance finale.

Selon Lee et Zhang [12], la chamotte améliore la stabilité dimensionnelle, réduit les retraits et limite l'apparition de fissures pendant la cuisson. Son rôle est donc essentiel dans les matériaux réfractaires façonnés.

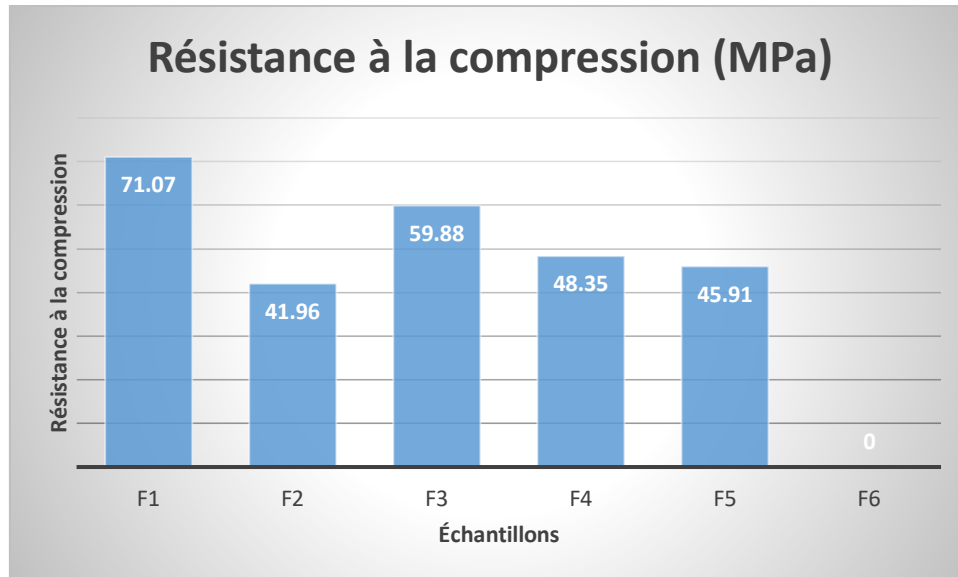


Figure IV.8: Résistance à la compression des échantillons de la deuxième campagne (1300 °C)

Analyse du graphique

Le graphique montre une amélioration significative de la résistance à la compression des échantillons après cuisson à **1300 °C**. L'échantillon **F1** présente la résistance la plus élevée avec **71,07 MPa**, suivi de **F3** avec **59,88 MPa**. Les échantillons **F2**, **F4** et **F5** affichent des résistances intermédiaires comprises entre **41,96 MPa** et **48,35 MPa**.

En revanche, l'échantillon **F6** présente une résistance nulle (**0 MPa**) en raison de sa fusion ou de sa dégradation pendant le traitement thermique, ce qui confirme son inadaptation à une utilisation réfractaire à **1300 °C**.

Globalement, les résultats montrent que certaines formulations possèdent une bonne stabilité thermique et des propriétés mécaniques élevées, en particulier l'échantillon **F1**, qui apparaît comme la composition la plus performante de cette campagne expérimentale.

IV.3.3 Comportement des échantillons contenant le laitier

Les formulations contenant du laitier ont présenté des comportements différents selon la nature de la chamotte utilisée.

L'échantillon **F4**, composé de laitier et de chamotte française, a donné une résistance de **48,35 MPa**. Cette valeur est relativement élevée et montre que le laitier peut contribuer à la formation d'une structure résistante lorsqu'il est associé à une chamotte de bonne qualité.

En revanche, l'échantillon **F6**, composé de laitier et de chamotte algérienne, a subi une fusion complète lors de la cuisson à **1300°C**. Aucun essai de compression n'a donc pu être réalisé sur cet échantillon.

Ce comportement peut être expliqué par la présence d'oxydes fondants dans le laitier, tels que CaO , Fe_2O_3 ou d'autres oxydes alcalins, qui peuvent favoriser la formation d'une phase liquide à haute température [13]. Lorsque cette phase liquide devient excessive, elle entraîne une perte de stabilité dimensionnelle, une déformation importante ou même une fusion complète de l'échantillon.

Ainsi, l'utilisation du laitier dans les briques réfractaires doit être contrôlée avec prudence, surtout lorsque la température de cuisson atteint **1300°C**.



Figure IV.9 : Fusion complète de l'échantillon F6 après cuisson à 1300°C

IV.3.4 Absorption d'eau des échantillons de la deuxième campagne

Les résultats d'absorption d'eau de deuxième campagne sont présentés dans le tableau IV.3.

Tableau IV.6 : Absorption d'eau des échantillons de la deuxième campagne

Échantillon	Masse sèche (g)	Masse après immersion (g)	Absorption (%)
F1	13.37	15.15	13.31
F2	23.00	27.00	17.39
F3	24.66	28.57	15.85
F4	17.00	18.25	7.35
F5	37.73	42.82	13.49

Les résultats présentés dans le tableau montrent que l'absorption d'eau des échantillons de la deuxième campagne varie entre **7,35 % et 17,39 %**. La plus faible valeur est observée pour l'échantillon **F4 7,35 %**, ce qui indique une structure plus dense et une porosité ouverte relativement faible. À l'inverse, l'échantillon **F2** présente l'absorption d'eau la plus élevée avec **17,39 %**, traduisant une porosité plus importante.

Les échantillons **F1, F3 et F5** présentent des valeurs intermédiaires comprises entre **13,31 % et 15,85 %**, indiquant une microstructure relativement homogène. Cette diminution générale de l'absorption d'eau par rapport à plusieurs formulations de la première campagne peut être attribuée à l'augmentation de la température de cuisson à **1300 °C**, favorisant le frittage des particules et la réduction des pores ouverts.

Par ailleurs, l'échantillon **F1**, composé de kaolin algérien et de chamotte algéro-française, présente à la fois une faible absorption d'eau **13,31 %** et la résistance à la compression la plus élevée **71,07 MPa**. Cette combinaison traduit une bonne densification de la structure après cuisson. En revanche, les échantillons présentant une absorption plus élevée montrent généralement des résistances mécaniques plus faibles, ce qui confirme l'influence importante de la porosité sur les performances mécaniques des matériaux réfractaires.

Globalement, les résultats obtenus montrent que les formulations contenant de la chamotte offrent les meilleures performances en termes de densification et de résistance mécanique après cuisson à haute température, ce qui les rend particulièrement adaptées à la fabrication de briques réfractaires destinées aux applications industrielles à haute température.

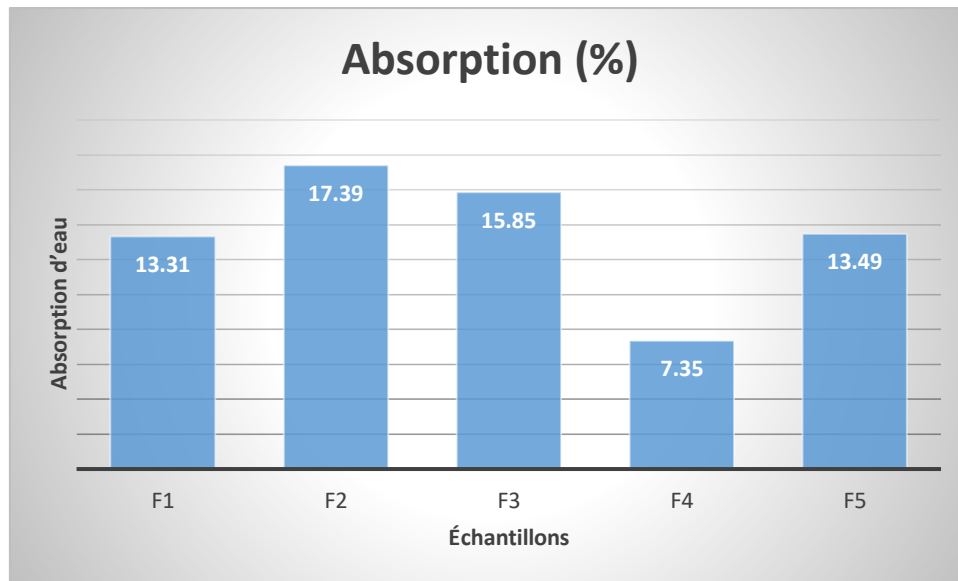


Figure IV.10 : Absorption d'eau des échantillons F1–F5

Analyse du graphique

Le graphique montre que les valeurs d'absorption d'eau des échantillons **F1 à F5** varient entre 7,35 % et 17,39 %. L'échantillon **F4** présente la plus faible absorption d'eau 7,35 %, ce qui indique une structure plus dense et une porosité ouverte réduite. À l'inverse, l'échantillon **F2** enregistre la valeur la plus élevée 17,39 %, traduisant une porosité plus importante.

Les échantillons **F1, F3 et F5** présentent des valeurs intermédiaires comprises entre 13,31 % et 15,85 %, révélant un comportement relativement homogène. Globalement, les résultats montrent que les formulations étudiées possèdent des niveaux de porosité différents, ce qui peut influencer leurs propriétés mécaniques et leur comportement en service à haute température.

IV.3.5 Porosité ouverte des échantillons de la deuxième campagne

Les résultats de la porosité ouverte pour la deuxième étape (F1–F5) obtenus à l'aide de la loi d'Archimède :

Tableau IV.7 : Porosité ouverte des échantillons F1–F5 après cuisson à 1300 °C

Échantillon	Porosité (%)
F1	25,23
F2	28,57
F3	26,63
F4	15,41
F5	26,34

Analyse des résultats

Les résultats montrent que la porosité ouverte des échantillons de la deuxième campagne varie entre **15,41 %** et **28,57 %**. L'échantillon **F4** présente la plus faible porosité **15,41 %**, ce qui indique une structure plus dense et un meilleur degré de frittage après cuisson à **1300 °C**. À l'inverse, l'échantillon **F2** possède la porosité la plus élevée **28,57 %**, traduisant une quantité plus importante de pores ouverts.

Les échantillons **F1**, **F3** et **F5** présentent des valeurs proches, comprises entre **25,23 %** et **26,63 %**, révélant un comportement relativement homogène. Globalement, les valeurs de porosité obtenues à **1300 °C** sont inférieures à celles observées pour plusieurs échantillons de la première campagne (**1100 °C**), ce qui confirme l'amélioration du frittage et de la densification du matériau avec l'augmentation de la température de cuisson.

Cette diminution de la porosité est cohérente avec les résultats de résistance à la compression obtenus, notamment pour l'échantillon **F1**, qui a atteint une résistance élevée de **71,07 MPa**.

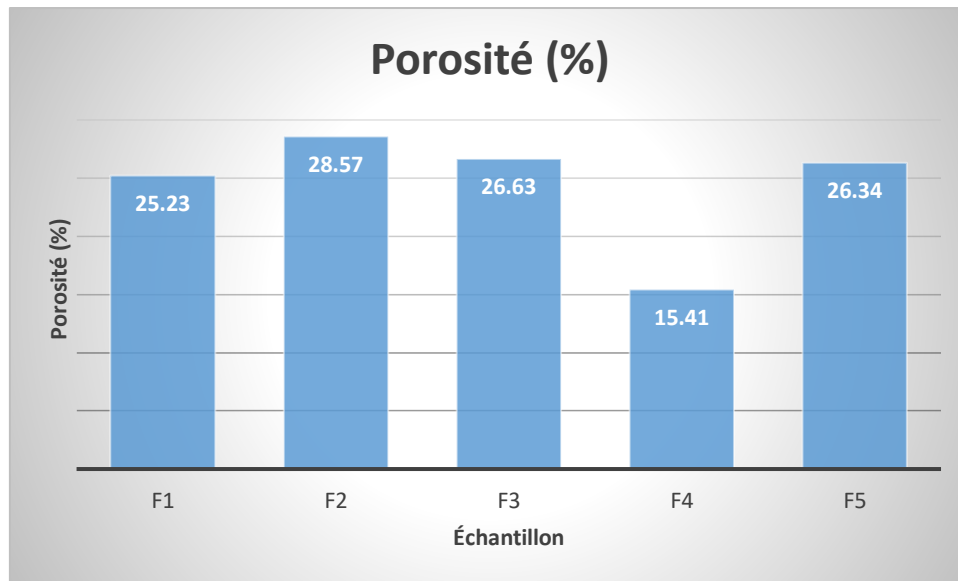


Figure IV.11 : Variation de la porosité ouverte des échantillons F1–F5 après cuisson à 1300 °C

Analyse du graphique

Le graphique met clairement en évidence les différences de porosité entre les échantillons F1–F5. On observe que l'échantillon **F2** présente la porosité la plus élevée 28,57 %, tandis que l'échantillon **F4** possède la valeur la plus faible **15,41** %. Les échantillons **F1**, **F3** et **F5** affichent des valeurs relativement proches, traduisant une répartition homogène de la porosité.

La diminution de la porosité pour certains échantillons indique une meilleure densification du matériau après cuisson à **1300 °C**. Cette tendance est cohérente avec l'amélioration des propriétés mécaniques observées lors de l'essai de compression.

IV.4 Effet de la température de cuisson

L'un des objectifs principaux de cette étude est d'évaluer l'influence de la température de cuisson sur les propriétés physiques et mécaniques des briques réfractaires élaborées à partir de matières premières locales. Pour cela, certaines formulations préparées lors de la première campagne expérimentale et cuites à **1100 °C** ont été reproduites dans une seconde campagne puis cuites à **1300 °C**. Cette démarche permet de comparer directement l'effet de l'augmentation de la température sur la résistance mécanique, la porosité ouverte et la stabilité des formulations étudiées.

D'après les résultats obtenus, l'échantillon **F5** de la deuxième campagne correspond à une formulation similaire à celle de l'échantillon **E3** de la première campagne, composée de **kaolin algérien et de chamotte**. De même, l'échantillon **F6** correspond à une formulation similaire à celle de l'échantillon **E5**, contenant un mélange de **laitier et de chamotte**.

Tableau IV.8 : Comparaison de l'effet de la température de cuisson sur les formulations similaires

Formulation	Résistance à 1100°C (MPa)	Résistance à 1300°C (MPa)	Porosité à 1100°C (%)	Porosité à 1300°C (%)
Kaolin ALG + chamotte ALG	19,76	45,91	30,3	26,34
Laitier + chamotte ALG	16,98	Fusion	32,86	Fusion

Analyse des résultats

Les résultats montrent que l'augmentation de la température de cuisson de **1100 °C à 1300 °C** a eu un effet très positif sur les performances de la formulation à base de kaolin algérien et de chamotte. En effet, la résistance à la compression est passée de **19,76 MPa** à **45,91 MPa**, soit une augmentation de :

$$\frac{45,91-19,76}{19,76} \times 100 = 132,3\%$$

Cette amélioration importante est attribuée à l'intensification du phénomène de frittage à haute température. Lors de la cuisson, les particules se rapprochent progressivement, les pores diminuent et les liaisons entre les grains deviennent plus fortes, ce qui conduit à une augmentation de la densité et de la résistance mécanique du matériau [7][8].

L'étude de la porosité ouverte confirme également cette tendance. Pour la formulation à base de kaolin algérien et de chamotte, la porosité est passée de **30,30 %** à **26,34 %** lorsque la température de cuisson a été portée de **1100 °C à 1300 °C**. Cette diminution correspond à une réduction de :

$$\frac{30,30-26,34}{30,30} \times 100 = 13,07\%$$

La diminution de la porosité traduit une meilleure densification de la structure interne du matériau. En effet, l'élévation de la température favorise la fermeture partielle des pores ouverts et améliore la cohésion entre les grains, ce qui contribue directement à l'augmentation de la résistance mécanique [4][9].

En revanche, la formulation à base de **laitier et de chamotte** a présenté un comportement différent. À **1100 °C**, cette formulation présentait une résistance à la compression de **16,98 MPa** et une porosité ouverte de **32,86 %**. Toutefois, après cuisson à **1300 °C**, l'échantillon a subi une **fusion complète**, empêchant toute mesure mécanique ou physique. Ce phénomène indique la présence de phases fusibles dans le laitier, susceptibles de réduire la stabilité thermique du matériau à haute température [5].

IV.5 Comparaison générale entre les deux campagnes

La comparaison entre les deux campagnes expérimentales permet de mieux comprendre l'influence combinée de la température de cuisson et de la nature des matières premières.

Tableau IV.9 : Comparaison des meilleures performances des deux campagnes

Paramètre	Première campagne	Deuxième campagne
Nombre d'échantillons	7	6
Nature des matériaux	Matériaux locaux	Matériaux algériens + français
Température de cuisson	1100°C	1300°C
Durée de palier	3 h	3 h
Meilleure résistance	19,96 MPa	71,07 MPa

La meilleure résistance de la première campagne est de **19,96 MPa**, obtenue avec l'échantillon E1. La meilleure résistance de la deuxième campagne est de **71,07 MPa**, obtenue avec l'échantillon F1 composé de kaolin algérien et de chamotte française.

L'amélioration globale est calculée comme suit :

$$\frac{71,72-19,96}{19,96} \times 100 = 256,06 \%$$

Cette augmentation très importante peut être attribuée à deux facteurs principaux :

- l'augmentation de la température de cuisson de **1100°C** à **1300°C** ;
- l'utilisation d'une chamotte française de meilleure qualité.

Ces deux facteurs ont favorisé une meilleure densification du matériau, une meilleure cohésion entre les grains et une amélioration importante de la résistance mécanique [4][5][9][12].

IV.6 Discussion générale

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que les propriétés des briques réfractaires élaborées dépendent principalement de la nature des matières premières utilisées, de la composition des formulations et de la température de cuisson.

Premièrement, l'influence de la nature de l'agrégat apparaît clairement à travers les résultats de résistance à la compression obtenus lors de la première campagne expérimentale. Les formulations contenant de la chamotte ont systématiquement présenté des résistances mécaniques supérieures à celles contenant du sable siliceux. Ce comportement peut être expliqué par la stabilité thermique de la chamotte ainsi que par son rôle dans l'amélioration de la cohésion interne et de la stabilité dimensionnelle des matériaux après cuisson. Ces observations sont en accord avec les travaux de Lee et Zhang [12] ainsi que ceux de Kingery et al. [4].

Deuxièmement, les résultats obtenus mettent en évidence le potentiel du kaolin algérien comme matière première pour la fabrication de matériaux réfractaires. En effet, la formulation composée de kaolin algérien et de chamotte française **F1** a présenté la meilleure résistance mécanique de toute l'étude avec une valeur de **71,07 MPa** après cuisson à **1300 °C**. Cette performance démontre que les matières premières locales peuvent être valorisées efficacement dans la production de briques réfractaires à haute performance lorsqu'elles sont associées à des agrégats adaptés.

Troisièmement, la température de cuisson a joué un rôle déterminant dans l'amélioration des propriétés mécaniques. Le passage de **1100 °C** à **1300 °C** a entraîné une augmentation importante de la résistance à la compression pour la formulation à base de kaolin algérien et de chamotte, passant de **19,76 MPa** à **45,91 MPa**. Cette amélioration est liée au phénomène de

frittage qui favorise la densification du matériau, la réduction des pores ouverts et le renforcement des liaisons entre les particules [4][9][14].

Quatrièmement, les résultats de porosité ouverte et d'absorption d'eau confirment l'influence directe de la microstructure sur les performances mécaniques des échantillons. De manière générale, les formulations présentant les valeurs les plus faibles de porosité et d'absorption d'eau ont montré les meilleures résistances mécaniques. À titre d'exemple, l'échantillon **F1** présente une porosité de **25,23 %** et une résistance de **71,07 MPa**, tandis que les échantillons les plus poreux présentent généralement des résistances plus faibles. Cette relation inverse entre la porosité et la résistance mécanique est largement rapportée dans la littérature consacrée aux matériaux céramiques et réfractaires [4][8].

Par ailleurs, l'augmentation de la température de cuisson a permis de réduire la porosité ouverte de certaines formulations. Pour le mélange à base de kaolin algérien et de chamotte, la porosité est passée de **30,30 %** à **26,34 %** lorsque la température a augmenté de **1100 °C** à **1300 °C**. Cette diminution traduit une meilleure densification de la structure interne du matériau et explique l'amélioration simultanée de la résistance mécanique observée après cuisson [14][8].

Cependant, l'effet de la température n'a pas été bénéfique pour toutes les formulations. La composition contenant du laitier et de la chamotte algérienne a subi une fusion complète à **1300 °C**, empêchant toute caractérisation mécanique. Ce comportement indique la présence de composés fondants dans le laitier susceptibles de former une phase liquide excessive à haute température. Ce phénomène limite l'utilisation de cette formulation dans les applications réfractaires nécessitant une bonne stabilité thermique [5].

D'une manière générale, les résultats obtenus montrent que la formulation la plus performante est celle composée de kaolin algérien et de chamotte française. Cette composition présente un équilibre favorable entre résistance mécanique élevée, absorption d'eau modérée et porosité relativement faible. Les résultats confirment également l'intérêt de valoriser les matières premières algériennes dans le domaine des matériaux réfractaires destinés aux applications industrielles à haute température.



Figure IV.12 : Aspect général des éprouvettes après cuisson à **1300°C**

IV.7 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis de présenter et d'analyser les résultats expérimentaux obtenus sur les différentes formulations de briques réfractaires élaborées à partir de matières premières locales et importées.

Les essais de résistance à la compression ont montré que les formulations contenant de la chamotte présentent les meilleures performances mécaniques. La résistance maximale enregistrée est de **71,07 MPa** pour l'échantillon F1 après cuisson à **1300 °C**.

Les résultats d'absorption d'eau et de porosité ouverte ont mis en évidence une relation étroite entre la structure interne du matériau et ses propriétés mécaniques. Une diminution de la porosité et de l'absorption d'eau s'accompagne généralement d'une amélioration de la résistance à la compression.

L'étude de l'effet de la température de cuisson a montré que l'augmentation de la température de **1100 °C à 1300 °C** favorise le frittage et la densification du matériau, ce qui améliore significativement les performances mécaniques. Cependant, certaines formulations contenant du laitier ont présenté une fusion à haute température, limitant leur utilisation dans les applications réfractaires.

Globalement, les résultats obtenus confirment la faisabilité de produire des briques réfractaires performantes à partir de matières premières disponibles localement, notamment le kaolin algérien associé à la chamotte. Ces résultats constituent une base intéressante pour le développement futur de matériaux réfractaires destinés aux applications industrielles à haute température.

Conclusion générale

Au terme de ce travail, il apparaît que les matériaux réfractaires occupent une place essentielle dans de nombreux secteurs industriels en raison de leur capacité à résister aux hautes températures et aux conditions sévères de fonctionnement. L'étude réalisée avait pour objectif principal la fabrication et l'évaluation de briques réfractaires à partir de matières premières locales, en particulier le kaolin algérien, associé à la chamotte recyclée et à la chamotte française dans certaines formulations expérimentales.

Dans un premier temps, une étude bibliographique a permis de présenter les matériaux réfractaires, leurs principales caractéristiques, leurs propriétés physiques, mécaniques et thermiques ainsi que leurs différents domaines d'application. Une attention particulière a été portée à la brique réfractaire et aux matières premières entrant dans sa composition. Cette étude a mis en évidence l'importance du choix des constituants dans l'obtention de matériaux capables de répondre aux exigences des applications à haute température.

La partie expérimentale a consisté à élaborer plusieurs formulations, à préparer les éprouvettes, puis à les soumettre à différentes opérations de séchage, de compactage et de cuisson. Les essais réalisés ont porté principalement sur la résistance à la compression, l'absorption d'eau et la porosité ouverte. Les résultats obtenus ont montré que les propriétés finales des briques réfractaires dépendent fortement de la composition des mélanges ainsi que de la température de cuisson.

Les essais ont également révélé que l'augmentation de la température de cuisson de 1100 °C à 1300 °C améliore considérablement les performances des matériaux élaborés. Cette amélioration est liée à une meilleure densification de la structure et à une évolution plus avancée des phénomènes de frittage, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance mécanique et une amélioration de la stabilité des échantillons.

L'un des résultats les plus importants de cette étude concerne la comparaison entre les matières premières locales et les matières premières françaises. Les résultats expérimentaux ont montré que les formulations élaborées à partir du kaolin algérien associé à la chamotte française ont présenté des performances mécaniques supérieures à celles obtenues avec le kaolin français associé à la même chamotte. Cette observation démontre que le kaolin algérien possède des caractéristiques favorables à la fabrication de briques réfractaires performantes et qu'il peut constituer une alternative efficace aux matières premières importées.

Par ailleurs, les essais ont confirmé l'intérêt de la valorisation des déchets réfractaires à travers l'utilisation de la chamotte recyclée. Cette approche permet non seulement de réduire les coûts liés aux matières premières, mais également de contribuer à la réduction des déchets industriels et à la protection de l'environnement. Elle s'inscrit ainsi dans une démarche de développement durable et de gestion rationnelle des ressources.

Les résultats obtenus au cours de cette étude démontrent donc la faisabilité de la fabrication de briques réfractaires performantes à partir de ressources disponibles localement. Ils mettent également en évidence le potentiel du kaolin algérien comme matière première stratégique pour le développement d'une industrie nationale des matériaux réfractaires. La valorisation

des ressources locales pourrait ainsi contribuer à réduire la dépendance vis-à-vis des produits importés tout en favorisant le développement économique et industriel du pays.

Enfin, comme perspectives, il serait intéressant d'approfondir cette étude par la réalisation d'essais complémentaires tels que la résistance aux chocs thermiques, la résistance à la corrosion chimique et le comportement à des températures plus élevées. Une optimisation plus poussée des formulations pourrait également permettre d'améliorer davantage les performances des briques élaborées et de favoriser leur utilisation à l'échelle industrielle.

En conclusion, cette étude a démontré que le kaolin algérien constitue une matière première de grande qualité pour la fabrication de briques réfractaires et que son utilisation, associée à la valorisation des déchets réfractaires, représente une voie prometteuse pour le développement d'une production nationale performante et compétitive dans le domaine des matériaux réfractaires.

Bibliographie

Les Références

- [1] AFNOR, **Norme NF B40-001**, Produits réfractaires – Définition et classification.
- [2] ISO 1927, **Matériaux réfractaires – Définitions et classification**, Organisation Internationale de Normalisation.
- [3] ASTM C71, **Standard Terminology Relating to Refractories**, American Society for Testing and Materials.
- [4] Kingery, W. D., Bowen, H. K., Uhlmann, D. R., **Introduction to Ceramics**, 2nd Edition, Wiley-Interscience, 1976.
- [5] Routschka, G., **Refractory Materials: Pocket Manual**, Vulkan-Verlag, 2008.
- [6] Chesters, J. H., **Refractories: Production and Properties**, Iron and Steel Institute, London, 1973.
- [7] Lee, W. E., Moore, R. E., **Evolution of in situ refractories in the 20th century**, *Journal of the American Ceramic Society*.
- [8] Callister, W. D., **Materials Science and Engineering: An Introduction**, Wiley, 2007.
- [9] Rahaman, M. N., **Ceramic Processing and Sintering**, CRC Press, 2003.
- [10] Norton, F. H., **Refractories**, McGraw-Hill, New York, 1968.
- [11] Sabir B.B., Wild S., Bai J., *Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review*, Cement and Concrete Composites, Vol. 23, 2001, pp. 441–454.
- [12] Lee W.E., Zhang S., *Recycling of waste refractory materials*, International Materials Reviews, Vol. 44, No. 3, 1999, pp. 77–104.

[13] Kumar S., Kumar R., "Utilization of Industrial Waste Materials in Refractory, Ceramic and Building Materials: A Review", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 52, No. 24, 2013, pp. 8157–8178.

[14] Reed J.S., *Principles of Ceramics Processing*, 2nd Edition, Wiley-Interscience, 1995.

[15] German, R.M., *Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing*, Metal Powder Industries Federation, Princeton, 2005.

[16] Lee, W.E., Vieira, W., Zhang, S., Ahari, K.G., Sarpoolaky, H., Parr, C., "Mullite-Based Refractories and Porous Ceramics", *International Materials Reviews*, Vol. 53, No. 6, 2008, pp. 349–373.

[17] Schneider, H., Komarneni, S., *Mullite*, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2005.

[18] ASTM C20. Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

LOGICIELS

- WORD 2013
- EXCEL 2013
- POWER 2024

ملخص

تتناول هذه الدراسة تصنيع الطوب الحراري باستعمال مواد أولية محلية جزائرية، بهدف تثمين الموارد المتوفرة محلياً وتطوير مادة حرارية قادرة على مقاومة درجات الحرارة المرتفعة. تم تحضير خلطات تعتمد على الكاولين الجزائري والشاموط المعاد تدويره، ثم إخضاعها لعدة اختبارات فيزيائية وميكانيكية، أهمها مقاومة الضغط وامتصاص الماء والمسامية. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الطوب المصنع يمتلك خصائص جيدة تؤهله للاستعمال في التطبيقات الحرارية. كما بينت المقارنة مع بعض المواد الأولية الفرنسية أن الكاولين الجزائري يمكن أن يحقق أداءً متميزاً، مما يؤكد إمكانية الاعتماد عليه في الإنتاج المحلي للطوب الحراري.

Résumé

Ce travail porte sur la fabrication de briques réfractaires à base de matières premières locales algériennes. L'objectif principal est de valoriser les ressources disponibles localement et de développer un matériau réfractaire capable de résister aux hautes températures. Des formulations à base de kaolin algérien et de chamotte recyclée ont été préparées puis soumises à différents essais physiques et mécaniques, notamment la résistance à la compression, l'absorption d'eau et la porosité. Les résultats obtenus ont montré que les briques fabriquées présentent des propriétés satisfaisantes. La comparaison avec certaines matières premières françaises a également révélé que le kaolin algérien peut offrir des performances très intéressantes, confirmant ainsi son potentiel pour la production locale de matériaux réfractaires.

Summary

This work focuses on the manufacture of refractory bricks using local Algerian raw materials. The main objective is to promote locally available resources and develop a refractory material capable of withstanding high temperatures. Formulations based on Algerian kaolin and recycled chamotte were prepared and subjected to several physical and mechanical tests, including compressive strength, water absorption, and porosity. The obtained results showed that the manufactured bricks possess satisfactory properties. A comparison with some French raw materials also demonstrated that Algerian kaolin can provide very promising performances, confirming its potential for local refractory brick production.