

République Algérienne Démocratique et Populaire
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA - JIJEL
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de Génie Mécanique

Projet de Fin d'Études

*Pour l'obtention du diplôme de Master
En Génie Mécanique
Option (Construction Mécanique)*

Thème

**Evaluation des propriétés mécaniques
de céramiques réfractaires à base silice**

Les membres du jury :

M. BOUNIB Hamou
M. ATAMNIA Kamal
M. LAOUIR Ahmed

Président
Examineur
Encadrant

Présenté par :

BELLOUT smail
DJENNAS Hemza

Promotion 2021

*Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel
Soutenue le 28/09/2021*

Remerciements

Nous remercions tout d'abord Dieu, le Tout Puissant de nous avoir donné la santé, la volonté, la patience et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à notre encadrant M. Ahmed LAOUIR, pour son soutien, ses conseils constructifs et ses instructions. Nous le remercions vivement pour sa rigueur scientifique, le temps et l'énergie qu'il nous a consacrés lors de la réalisation de cette étude.

Nos remerciements s'adressent aux membres de jury M. Hamou BOUNIB et M. Kamel ATAMINIA d'avoir bien voulu accepter d'évaluer de notre travail.

Nous remercions tous les enseignants de l'université de Mohamed Seddik Benyahia, plus particulièrement du département de Génie Mécanique.

Ce travail expérimental n'a été possible que grâce au soutien que nous avons eu au niveau de hall de technologie. Nous remercions M. Abdenour KHADIMALLAH pour l'immense aide qu'il nous a apporté et d'être resté à notre côté à toutes les étapes de notre travail. Et nous remercions bien sûr tous les travailleurs au niveau du hall de technologie de même que tous ceux qui nous ont aidés au niveau du laboratoire de génie civil.

Nous exprimons notre reconnaissance aux responsables de AFRICAVER d'avoir bien voulu nous accorder la visite de l'usine et d'avoir accepté de réaliser les analyses chimiques nécessaires à notre travail. Nous avons énormément appris auprès des travailleurs autour du four de fusion, nous leurs adressons nos profonds remerciements.

Dédicaces

Louange à Allah qui m'a donné la force, la patience et le courage pour achever ce travail.

A mes parents

Pour les conseils et l'encouragement qu'ils n'ont jamais arrêté de me partager, depuis mon enfance jusqu'à ce jour, la solidarité est toujours présente.

A mes frères et sœurs

Pour l'amour, le respect, la patience et l'encouragement. Votre joie me fait toujours plaisir et dans tous les cas vous êtes mes plus proches amis.

A mes collègues

Pour l'encouragement, la disponibilité et l'assistance, je vous remercie pour tous les moments que nous avons passés et je vous souhaite la réussite dans votre vie.

A tous mes amis sans exception

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Introduction aux produits réfractaires

I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition d'un produit réfractaire	3
I.3 Classification des produits réfractaires.....	3
I.3.1 Classification suivant la composition chimique	3
I.3.2 Autres classifications des réfractaires	6
I.4 Les propriétés technologiques des céramiques réfractaires	7
I.5 Fabrication des réfractaires.....	8
I.6 Utilisation des réfractaires dans les fours de verrerie	9
I.6.1 Présentation de l'entreprise AFRICAVER.....	9
I.6.2 Structure du four.....	9
I.6.3 Vue intérieur du four	11
I.6.4 Réfractaires utilisés	13
I.7 Conclusion	14

Chapitre II : Préparation des éprouvettes de réfractaires à base de silice à partir de produits locaux

II.1. Introduction.....	16
II.2. Réalisation de l'outillage de moulage	16
II.3. Utilisation de l'outillage.....	18
II.4. Matières premières	20
II.4.1. Matières riches en silice.....	20
II.4.2. Additifs.....	24

II.5. Choix de la matière première qui sera utilisée.....	24
II.6. Préparation des mélanges	25
II.6.1. Dosage	25
II.6.2. Malaxage	28
II.6.3. Détermination de la masse de la charge à mouler en fonction de la pression de compactage.....	28
II.7. Moulage	32
II.8. Séchage	33
II.9. La cuisson des éprouvettes	34
II.10. Examen des échantillons cuits.....	39
II.10.1. Perte massique.....	40
II.10.2. Dilations volumique et linéaire.....	41
II.11. Conclusion	42

Chapitre III : Résultats des essais mécaniques

III.1. Introduction	46
III.2. Essais mécaniques	46
III.2.1. Essai d'écrasement.....	46
III.2.1.1. Présentation de l'essai d'écrasement	46
III.2.1.2 Résultats de l'essai d'écrasement	46
III.2.2. Essai brésilien (de traction)	51
III.2.2.1. Présentation de l'essai brésilien	51
III.2.2.2. Résultats de l'essai brésilien	52
III.3. Conclusion.....	57
Conclusion générale.....	58

Liste des figures :

Figure I.1: Diagramme de phases $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	5
Figure I.2 : Réfractaire façonné	6
Figure I.3 : Réfractaire façonné non- façonnés ..	6
Figure I.4 : Réfractaire dense	7
Figure I.5 : Réfractaire isolant ..	7
Figure I.6 : Etapes principales de fabrication des réfractaires.	8
Figure I.7 : Four de fusion de verre	10
Figure I.8 : Schéma du four de verrerie ; Vue de dessus.....	11
Figure I.9 : Vu écôté du brûleur.....	12
Figure I.10 : Vue côté opposé aux bruleurs.....	12
Figure I.11 : Utilisations des réfractaires AZS et de silice.....	13
Figure II.1 : Outillage de moulage.....	17
Figure II.2 : Opération d'usinage du cylindre, du fond et du piston sur tour.	18
Figure II.3 : Différentes pièces usinées.	18
Figure II.4 : Production d'une éprouvette crue.....	19
Figure II.5 : Machine de compression Zwick Z250.	20
Figure II.6 : Etuve électrique de séchage.....	21
Figure II.7 : Dispositif de tamisage du sable avec 15 tamis	22
Figure II.8 : Distribution de la taille des grains suivant la masse des différents types de sable.....	23
Figure II.9 : Malaxeur.	30
Figure II.10 : Diagramme de compactage du mélange KJMA.	31

Figure II.11 : Diagramme de compactage du mélange CJMA.....	32
Figure II.12 : Opération de moulage.....	34
Figure II.13 : Démoulage de l'éprouvette.....	34
Figure II.14 : Dilatation du matériau de silice pendant la cuisson et le refroidissement.	36
Figure II.15 : Diagramme de cuisson de la première éprouvette de mélange KSR + kaolin (éprouvette préliminaire).....	37
Figure II.16 : Eprouvette KSR avant et après cuisson.....	37
Figure II.17 : Diagrammes de cuisson des éprouvettes a mélange KJMA.	38
Figure II.18 : Eprouvettes de mélange KJMA après cuisson.	39
Figure II.19 : Diagramme de cuisson des éprouvettes de mélange CMJA.	39
Figure II.20 : Eprouvettes après cuisson du mélange CJMA.	40
Figure III.1 : Essai de l'écrasement	46
Figure III.2 : Modeécrasement des éprouvettes.....	47
Figure III.3 : Résultats de test d'écrasement des éprouvettes (K41, K61, K81).....	47
Figure III.4 : Résultats de test d'écrasement des éprouvettes (C41, C61, C81).	49
Figure III.5 : Principe de l'essai brésilien.....	52
Figure III.6 : Mode de traction (essai brésilien)	52
Figure III.7 : Résultats de l'essai brésilien des éprouvettes (K42, K62, K82).	53
Figure III.8 : Résultats de l'essai brésilien des éprouvettes (C42, C62, C82).	55

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : Classification normalisée des réfractaires	4
Tableau II.1 : Résultats de tamisage. Masse de sable traitée, 100 g.....	22
Tableau II.2 : Valeurs masse volumique des apparentes des différents sables.....	23
Tableau II.3 : Résultats des analyses chimiques.....	24
Tableau II.4 : Composition chimique du kaolin DD3.	25
Tableau II.5 : Dosage de Mélange sable KSR et Kaolin.....	27
Tableau II.6 : Dosage de Mélange sable JMA et Kaolin (KJMA).....	28
Tableau II.7 : Dosage de Mélange JMA et de la Chaux (CJMA).....	29
Tableau II.8 : Dimensions avant cuisson K.	41
Tableau II.9 : Dimensions après cuisson K.	41
Tableau II.10 : Dimensions avant cuisson C.	41
Tableau II.11 : Dimensions après cuisson C.	41
Tableau II.12 : pertes massiques pour les éprouvettes K	42
Tableau II.13 : pertes massiques pour les éprouvettes C	42
Tableau II.14 : Masse volumique apparente des éprouvettes K.....	43
Tableau II.14 : Masse volumique apparente des éprouvettes C.....	43
Tableau II.16 : Résultats de dilatations volumique et linéaire des éprouvettes K.	44
Tableau II.17 : Résultats de dilatations volumique et linéaire des éprouvettes C.	44
Tableau III.1 : Lecture des données de la courbe graphique (K41, K61, K81).....	47
Tableau III.2 : Lecture des données de la courbe graphique (C41, C61, C81).....	49
Tableau III.3 : Lecture des données de la courbe graphique (K42, K62, K82).....	52
Tableau III.4 : Lecture des données de la courbe graphique (C42, C62, C82).....	54

Nomenclature :

Grandeur	Désignation	Unité
ρ_{ap}	Densité apparente	Kg/l
ρ_{vr}	Densité vrai	Kg/l
v_t	Volume totale	ml
v_l	Volume d'eau	ml
\emptyset	La porosité	%
M_0	Masse de l'éprouvette avant cuisson	g
M	Masse de l'éprouvette après cuisson	g
H_0	Hauteur de l'éprouvette avant cuisson	mm
H	Hauteur de l'éprouvette après cuisson	mm
D_0	Diamètre de l'éprouvette avant cuisson	mm
D	Diamètre de l'éprouvette après cuisson	mm
V_0	Volume de l'éprouvette avant cuisson	cm ³
V	Volume de l'éprouvette après cuisson	cm ³
P	pression	Kg/cm ²
D_v	Dilatation volumique	-
D_L	Dilatation linéaire	-
R_r	Résistance à la rupture	Mpa
R_t	Résistance à la traction	N

σ	Contrainte	N/mm ²
F	Force	N
L	Longueur de l'éprouvette	mm

Tableau des Abréviations

OZR	Sable d'Oued Zhour
KSR	Sable de Kissir
BBD	Sable de la plage de bordj Blida
JMA	Sable de Djamaa
BSD	Sable de Bou Saada
KKSR	Kaolin + Sable de Kissir
K	Kaolin
C	La chaux
DD3	Kaolin de Djebel Debagh

Introduction générale :

Le développement des matériaux réfractaires a atteint un niveau très avancé dans les pays industrialisés ou des produits toujours plus performants sont produits. La production d'un produit réfractaire répondant aux exigences des industrielles nécessite une grande maîtrise de toutes les étapes de production depuis la sélection des matières premières jusqu'aux essais ultimes pour le contrôle de la qualité du produit final.

En Algérie, l'industrie des produits réfractaires reste peu développée. Le pays comporte des gisements intéressants de matières riches en silice et de kaolin.

Notre travail consiste à élaborer des réfractaires à forte teneur en silice (SiO_2), une catégorie de réfractaire très utilisée dans l'industrie. Les moyens disponibles au niveau du hall de technologie, le laboratoire de génie civil ainsi que le laboratoire de génie procédé nous permettent d'accomplir ce travail dans de bonnes conditions.

La démarche est comme suit :

- Sélectionner une matière première la plus riche possible en silice.
- Fabriquer l'outillage de moulage pour produire des éprouvettes de 50 mm de diamètre et 50 mm de hauteur.
- Produire 2 séries d'éprouvettes avec le kaolin comme liant pour l'une et la chaux pour l'autre.
- Mener des essais mécaniques d'écrasement (compression) et de traction, ce dernier et aussi appelé essai brésilien.

Le premier chapitre présente les généralités sur les produits réfractaires.

Le deuxième chapitre détaille tout le processus de production des éprouvettes.

Dans le dernier chapitre, sont présentés les résultats obtenus à partir des essais mécaniques.

CHAPITRE I

Introduction aux produits réfractaires

I.1 Introduction

Ce chapitre est une introduction aux céramiques réfractaires. Il porte sur ce type de produits, leurs classifications, leurs propriétés technologiques, leur fabrication. De plus on essaie de donner une idée générale sur l'utilisation des céramiques réfractaires dans les fours de verrerie dans l'entreprise AFRICAVER que nous avons en l'occasion de visiter à l'occasions de notre travail de projet de fin d'étude.

I.2 Définition d'un produit réfractaire [1]

La norme AFNOR NF B40-001 un matériau réfractaire résiste au moins 1500 °C sans ramollissement et sans affaissement et généralement remplit son rôle à ces niveaux de température sans défaillance.

Les réfractaires sont des mélanges de produits naturels ou de matériaux synthétiques qui peuvent être utilisés de façon continue à des températures élevées tout en préservant leurs formes physiques et leur identité chimique. Ils sont utilisés dans de nombreuses industries telles que la métallurgie, la sidérurgie, l'industrie chimique etc.

Ainsi, on peut les rencontrer dans des équipements comme par exemple les fours de verrerie, de céramique, en d'autres termes partout où il y a des hautes températures ou des conditions sévères.

I.3 Classification des produits réfractaires

I.3.1 Classification suivant la composition chimique

Il existe une grande diversité de matériaux réfractaires, ils peuvent être classés de différentes manières. Selon la composition chimique, ils sont classés en trois systèmes comme indiqué dans le Tableau I.1 donné par la norme ISO/R1109.

Système	Désignation	Teneur de constituant principal
Produits Silico-Alumineux Al_2O_3 SiO_2	Extra-alumineux	$Al_2O_3 > 56\%$
	Alumineux	$45\% \leq Al_2O_3 < 56\%$
	Argileux	$30\% \leq Al_2O_3 < 45\%$
		$30\% \leq Al_2O_3 < 33\%$
		$33\% \leq Al_2O_3 < 37\%$
		$37\% \leq Al_2O_3 < 40\%$
		$40\% \leq Al_2O_3 < 42\%$
		$42\% \leq Al_2O_3 < 45\%$
	Silico argileux	$10\% < Al_2O_3 \leq 30\%$ Avec $SiO_2 < 85\%$
	Siliceux	$85\% \leq SiO_2 < 93\%$
Silice	$SiO_2 \geq 93\%$	
Produits basiques	Magnésie	$MgO \geq 80\%$
	Magnésie-chrome Produits de dolomie	$55\% \leq MgO < 80\%$
	Chrome-magnésie	$25\% \leq MgO < 55\%$
	Chromite	$Cr_2O_3 \geq 25\%$
	Forstérite	$MgO \leq 25\%$
Produits spéciaux	Carbone, Graphite, Zircone	SiC, ZrO_2

Tableau I.1 Classification normalisée des réfractaires [2].

❖ **Le système silice-alumine** : concerne les produits contenant principalement Al_2O_3 et SiO_2 . Dans la réalité, ils comportent toujours des impuretés. Pour un mélange pur d' Al_2O_3/SiO_2 , la figure I.1 représente le diagramme de phases correspondant.

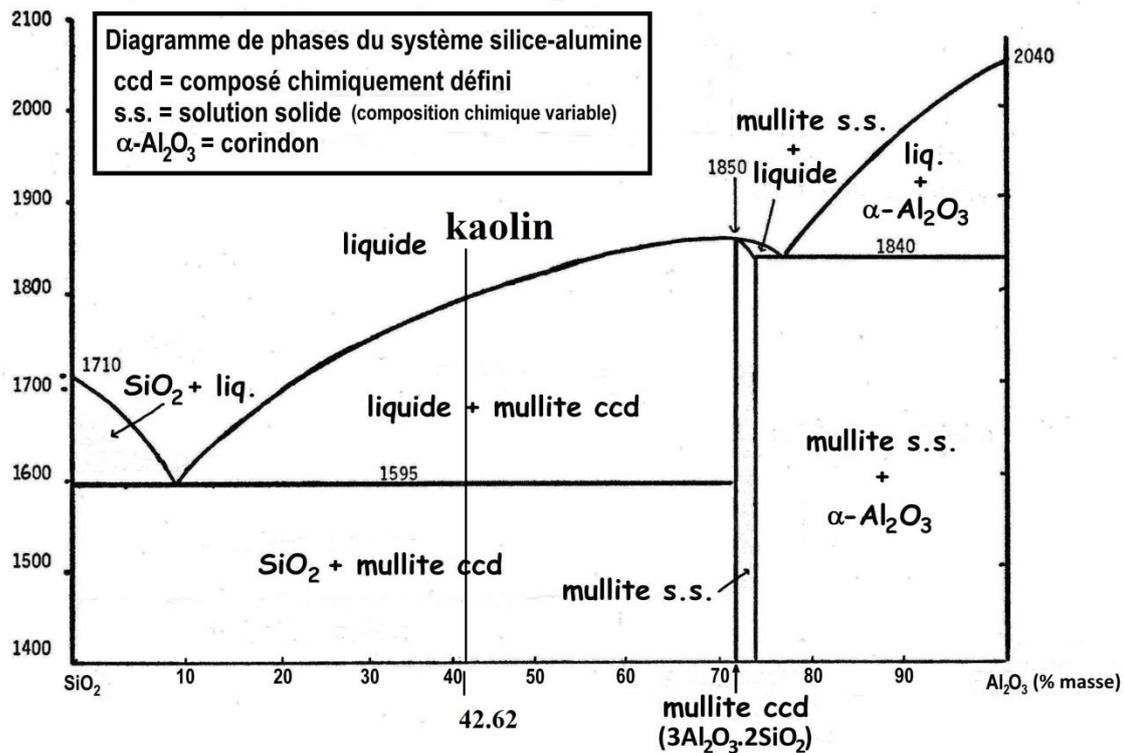


Figure I.1 Diagramme de phases SiO₂-Al₂O₃ [3].

- ❖ **Le système des réfractaires basiques** : Ce système est constitué d'oxydes basiques, simples ou combinés, comme par exemple la magnésie (MgO) ou encore l'oxyde de chrome (Cr₂O₃).
- ❖ **Les réfractaires spéciaux** : ce sont d'autres produits réfractaires qui sont utilisés dans des applications spécifiques grâce à leurs qualités supérieures. Ces produits spéciaux comprennent des oxydes et des silicates tels que le zircon (ZrSiO₄), la zircone (ZrO₂) et les oxydes purs.

Le travail qui fait l'objet de notre mémoire concerne l'étude de réfractaires appartenant au premier système à forte teneur en silice SiO₂.

La silice est l'oxyde le plus répandu sur la croûte terrestre à l'état naturel. Il se retrouve principalement sous la forme cristalline de quartz. C'est aussi un composant essentiel des matériaux naturels qui sont transformés par cuisson pour obtenir des matériaux réfractaires. Grâce à ses propriétés, la silice permet de produire des réfractaires adaptés à être utilisés dans les fours à coke ou de verrerie par exemple [4].

I.3.2 Autres classifications des réfractaires

❖ Façonnés/non-façonnés

Les réfractaires façonnés se présentent comme des pièces formées ; par exemple des briques de différentes formes ou des blocs. Ils servent à construire les différentes parties des fours. Les réfractaires non-façonnés se présentent sous forme de mélanges utilisés comme par exemple des produits de jointement entre les briques ou encore comme béton réfractaire [5].



Figure I.2 Réfractaire façonné [6].



Figure I.3 Réfractaires non-façonnés [7].

❖ Denses/isolants

Les réfractaires denses sont des matériaux qui présentent une densité élevée et une faible porosité. Ils ont une bonne résistance mécanique pour former la structure des fours. La faible porosité participe à ralentir les attaques chimiques et la corrosion à l'intérieur des fours.

Les isolants sont quant à eux très poreux et ont une faible masse volumique, ce qui leur donne une conductivité thermique très faible.



Figure I.4 Réfractaire dense [8].



Figure I.5 Réfractaire isolant [9].

I.4 Les propriétés technologiques des céramiques réfractaires [10]

❖ Propriétés physiques :

- Masse volumique apparente.
- Masse volumique vraie.
- Porosité ouverte.
- Porosité fermée.

❖ Propriétés thermomécaniques :

- Résistance mécanique à froid.
- Résistance mécanique à chaud.
- Résistance à l'usure.
- Conductivité thermique.
- Dilatation thermique.
- Résistance aux chocs thermiques.

❖ Propriétés chimiques :

- Résistance aux attaques chimiques.

Les céramiques réfractaires doivent résister aux sollicitations thermiques et mécaniques sans risque de déformation et de fissure. Pour cela ils sont soumis à différents tests pour s'assurer de leurs qualités. Dans notre travail, nous nous intéressons à l'évolution de la résistance mécanique à température ambiante des matériaux céramiques produits à partir de matière première riche en silice.

I.5 Fabrication des réfractaires [4]

La fabrication commence par la sélection des matières premières. Ces dernières sont mélangées avec d'autres substances comme additifs qui facilitent le processus de fabrication.

❖ Réfractaires agglomérés

Les particules de la matière première principale se lient entre elles sous l'effet de la haute température. La cuisson est une étape très importante dans la fabrication. La quantité d'eau ajoutée au mélange est un paramètre important ainsi que la cohésion de la pièce moulée avant de subir la cuisson. Ce type de réfractaire présente toujours une porosité.

❖ Réfractaires électro fondus

Le mélange préparé est fondu dans un four à arc électrique à très haute température. Comme en fonderie, le liquide est coulé dans des moules pour produire les pièces voulues. Ces réfractaires ont une porosité minimale et une masse volumique élevée.

Cette qualité leur permet d'avoir une résistance mécanique élevée, une grande résistance aux attaques chimiques et une conductivité thermique également élevée.

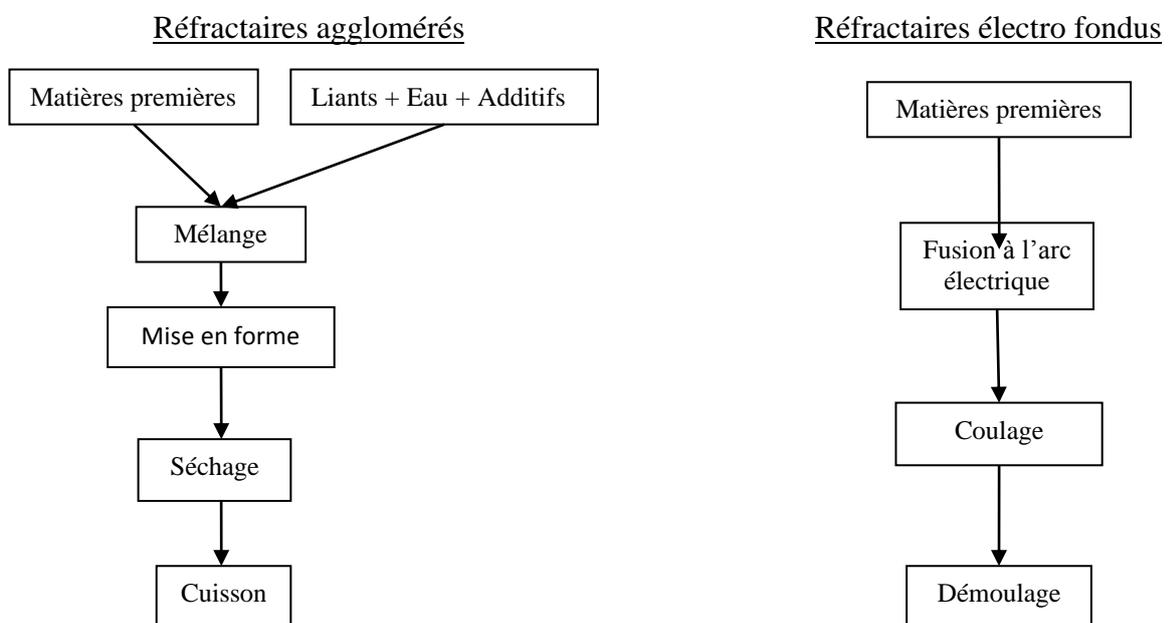


Figure I.6 Etapes principales de fabrication des réfractaires.

I.6 Utilisation des réfractaires dans les fours de verrerie

I.6.1 Présentation de l'entreprise AFRICAVER

Dans le cadre de notre travail de PFE, nous avons eu l'occasion de faire une visite d'une semaine au sein de l'entreprise AFRICAVER qui est spécialisée dans l'industrie du verre. Le but principal était de connaître les applications des réfractaires dans le cas de l'industrie verrière.

La société africaine du verre « AFRICAVER » dont le siège social se situe au niveau de la zone industrielle d'Ouled Salah dans la commune de Taher, est une entreprise publique économique et filiale de la société mère ENAVA (Enterprise nationale des verres et abrasifs). Le projet de la verrerie a été lancé en 1983. Les travaux de construction achevés en 1985. L'usine est entrée en production le 1^{er} août 1987, les effectifs s'élevaient à environ 700 personnes. Durant les années 90, l'usine a connu un arrêt prolongé et la production n'a repris que vers 1997. Il faut noter que l'entreprise s'appelait initialement Complexe Verre de Jijel (CVJ). AFRICAVER produit principalement le verre imprimé, le silicate de sodium et le verre de sécurité. Elle emploie actuellement environ 280 personnes.

Notre visite a coïncidé avec une période d'arrêt du four qui devait être rénové. Nous avons eu la chance de visiter l'intérieur du four et de constater les dégradations subies par les parois au contact du verre en fusion ainsi que des substances volatiles.

I.6.2 Structure du four

La Figure I.7 représente un four de fusion de verre tridimensionnel similaire à celui utilisé par AFRICAVER. Le four est constitué de différentes parties comme représenté ci-dessous :

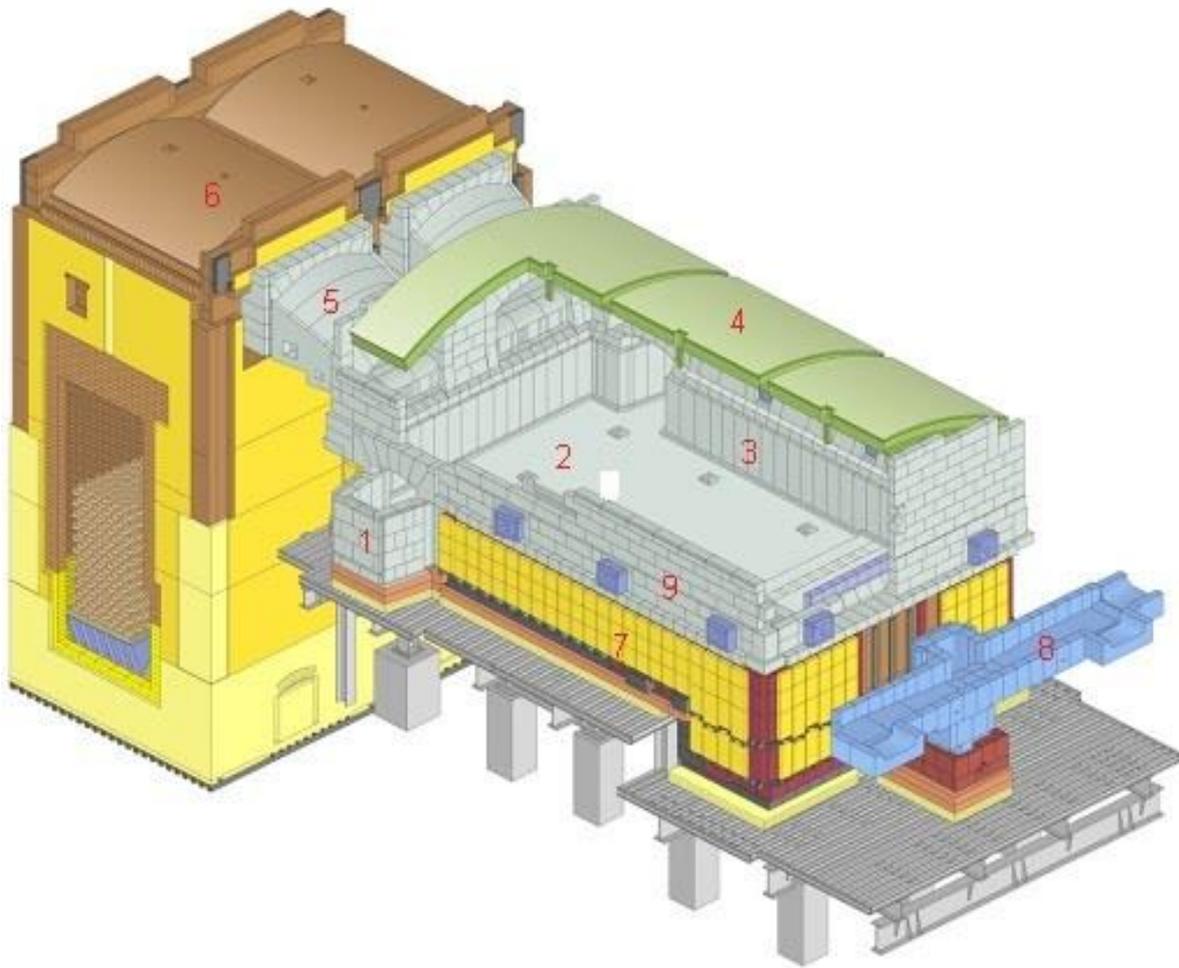


Figure I.7 Four de fusion de verre [11].

- | | |
|--------------------------|-------------------------------------|
| 1- Niche d'enfournement. | 6- Chambres de régénérations. |
| 2- Bassin de fusion. | 7- Isolation. |
| 3- Bloc de cuve. | 8- Canal de coulée (vers machines). |
| 4- Voûte. | 9- Murs latéraux de superstructure. |
| 5- Conduit de fumée. | |

La Figure I.8 représente schématiquement une vue de dessus du four montrant l'arrangement des différents éléments. Elle montre en particulier le sens de circulation de la charge en fusion et des gaz.

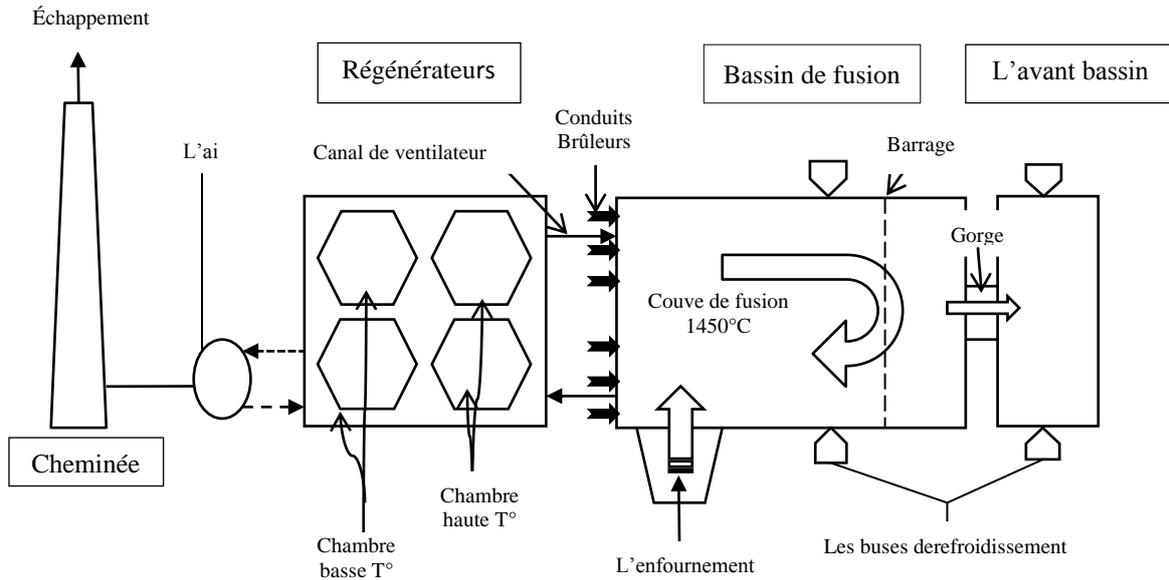


Figure I.8 Schéma du four de verrerie ; Vue de dessus.

I.6.3 Vue intérieur du four

La Figure I.9 montre une vue intérieure du four coté brûleurs. On voit clairement comment les parois et la voûte du four sont affectées par le verre en fusion et les gaz émis, cela après une durée d'exploitation (compagne) de 7 ans. C'est pour cette raison qu'il a été mis à l'arrêt pour rénovation.

- Les brûleurs travaillent par intermittence 3 par 3 sur une durée de 20 min.
- Le four est chargé par l'ouverture d'enfournement avec un mélange de sable siliceux, de calcins et d'additifs.
- La récupération d'énergie sur les gaz brûlés se fait au niveau des régénérateurs qui doivent fonctionner de façon alternée.

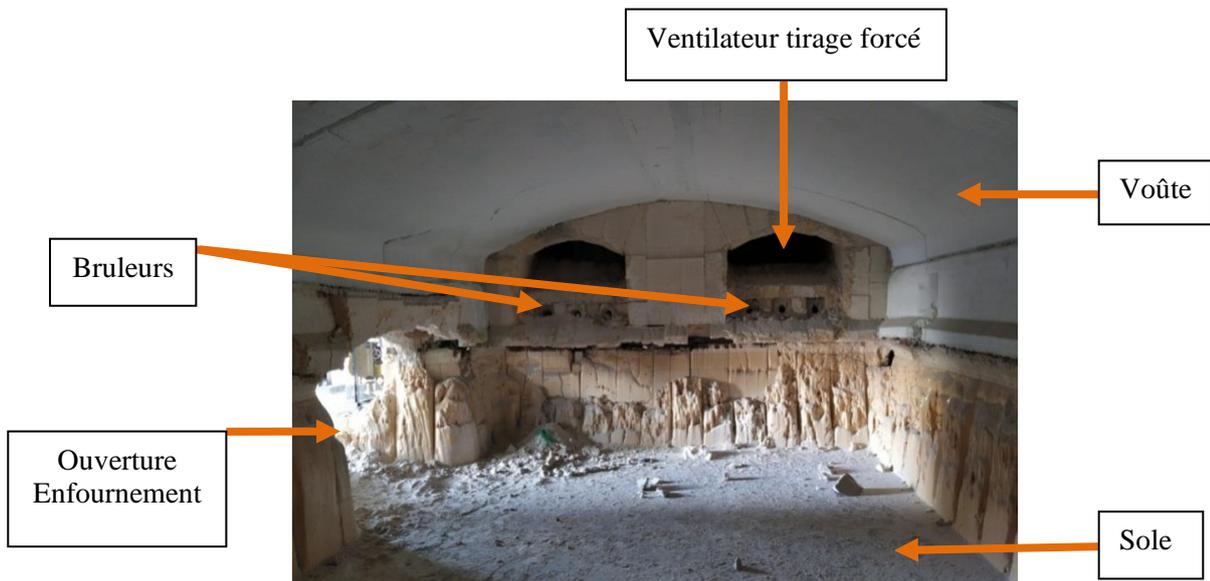


Figure I.9 Vue côté brûleurs.

Figure I.10 représente le côté du four opposé aux brûleurs.

- Le barrage, presque complètement détruit sur la photographie, est un obstacle en réfractaire électro fondu AZS qui sert à séparer la matière solide du verre en fusion.
- Le regard de contrôle est une fenêtre externe pour le contrôle visuel dans le four.
- La gorge est le canal par lequel passe le verre en fusion de la cuve vers le bassin de travail.



Figure I.10 Vue côté opposé aux brûleurs

I.6.4 Réfractaires utilisés

Dans le four utilisé par AFRICAVER, il y a principalement deux types de réfractaires :

❖ Réfractaires AZS

Le réfractaire AZS est constitué de trois composants : alumine Al_2O_3 , zircon ZrO_2 et silice SiO_2 . C'est un réfractaire électro-fondu à porosité presque nulle. Sa masse volumique est élevée et sa conductivité thermique importante. La qualité la plus importante de ce type de réfractaire est qu'il résiste aux attaques chimiques au contact du verre en fusion.

C'est pour cela qu'il est utilisé au niveau du bassin de fusion et l'avant bassin ; au niveau du sol et des parois latérales comme sur la figure I.11.



Figure I.11 Utilisations des réfractaires AZS et de silice.

❖ Réfractaires de silice

Un réfractaire de silice d'après la classification doit comporter au moins 93% de SiO_2 mais les briques de meilleure qualité doivent avoir la plus forte teneur possible en silice et des teneurs minimales en Al_2O_3 et Fe_2O_3 .

Les briques de silice sont très réfractaires et présentent une bonne rigidité à chaud. Elles sont connues pour avoir une dilatation importante. Dans le cas de la voûte, la dilatation permet de la rendre plus solide sans risque de dégradation à cause de sa forme en arc. Comme le montre la figure I.7, les briques de silice sont utilisées au

niveau de la voûte mais aussi au niveau des parois supérieures qui ne sont pas au contact du verre en fusion.

Les réfractaires de silice sont aussi utilisés dans les régénérateurs pour récupérer l'énergie calorifique des gaz de combustion avant leur rejet dans l'atmosphère.

Les briques de silice sont aussi utilisées pour l'isolation thermique. Dans ce cas, elles se présentent avec une masse volumique plus faible et une grande porosité.

I.7 Conclusion

Les produits réfractaires sont utilisés dans de nombreux domaines. Leur comportement à haut température en fait un sujet d'étude important pour répondre à différentes applications. Les matériaux réfractaires ont été développés pour disposer de matériaux adaptés aux sollicitations thermiques, mécaniques et chimiques à très haute température. Pour ces raisons, ils ont une importance stratégique. Ces matériaux se distinguent par leur composition chimique et la manière dont ils sont formés. L'élaboration d'un matériau réfractaire nécessite une méthode très rigoureuse afin de garantir des propriétés adéquates.

CHAPITRE II

Préparation d'éprouvettes de réfractaires à base de Silice à partir de produits locaux

II.1. Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter le processus et les différentes étapes de la production des éprouvettes à base de silice.

Nous allons tout d'abord exposer la réalisation de l'outillage et la méthode d'utilisation de ce moule. Puis nous détaillerons comment sont choisies les matières premières, ainsi que les différentes étapes de formulation des mélanges.

Enfin, nous présenterons et conclurons sur les résultats obtenus pour la caractérisation de ces éprouvettes.

II.2. Réalisation de l'outillage de moulage

Nous avons conçu un outillage de moulage pour produire des éprouvettes de forme cylindrique de 50 mm de diamètre et 50 mm de hauteur. L'ensemble, constitué de quatre pièces est représenté sur la figure II.1. Les pressions nécessaires à la formation des échantillons sont de plusieurs centaines de kg /cm². L'ensemble doit permettre de travailler à ces fortes pressions en toute sécurité. Cela est permis grâce à la paroi du cylindre de 25 mm et la hauteur minimale du fond de 30 mm.

La figure II.1.A montre la vue en coupe transversale de l'outillage de moulage en plus ses démentions. D'autre part, la figure II.1.B représente une vue tridimensionnelle.

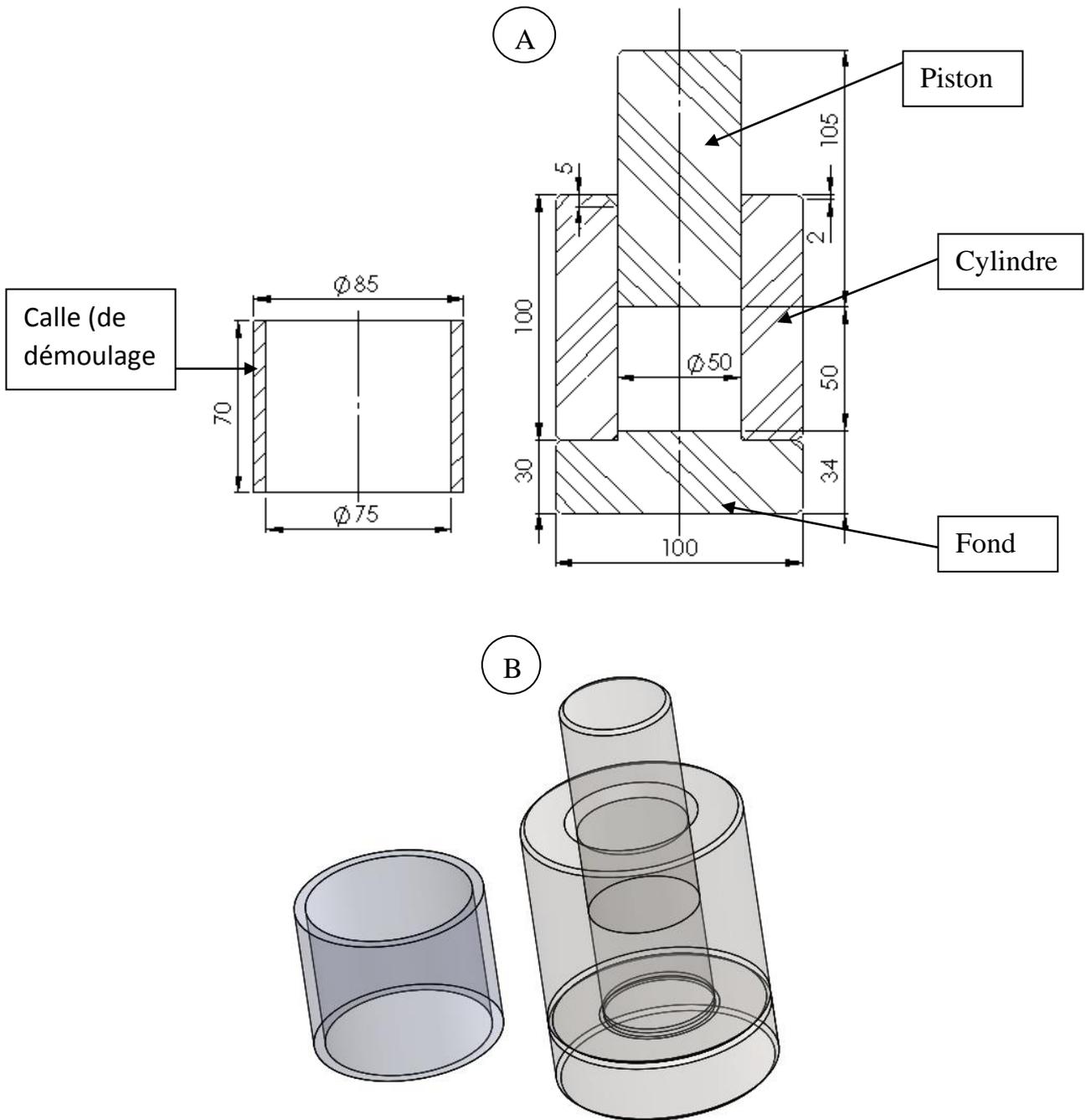


Figure II.1: Outillage de moulage.

L'usinage des pièces a été effectué au niveau du hall de technologie, sur tour parallèle. La matière utilisée a été fournie par le magasin. Le cylindre et le fond sont en acier XC48, le piston quant à lui est en acier XC38. La cale a été usinée à partir d'une pièce récupérée. La figure II.2 montre différentes opérations d'usinage. La figure II.3 montre l'ensemble des pièces usinées.

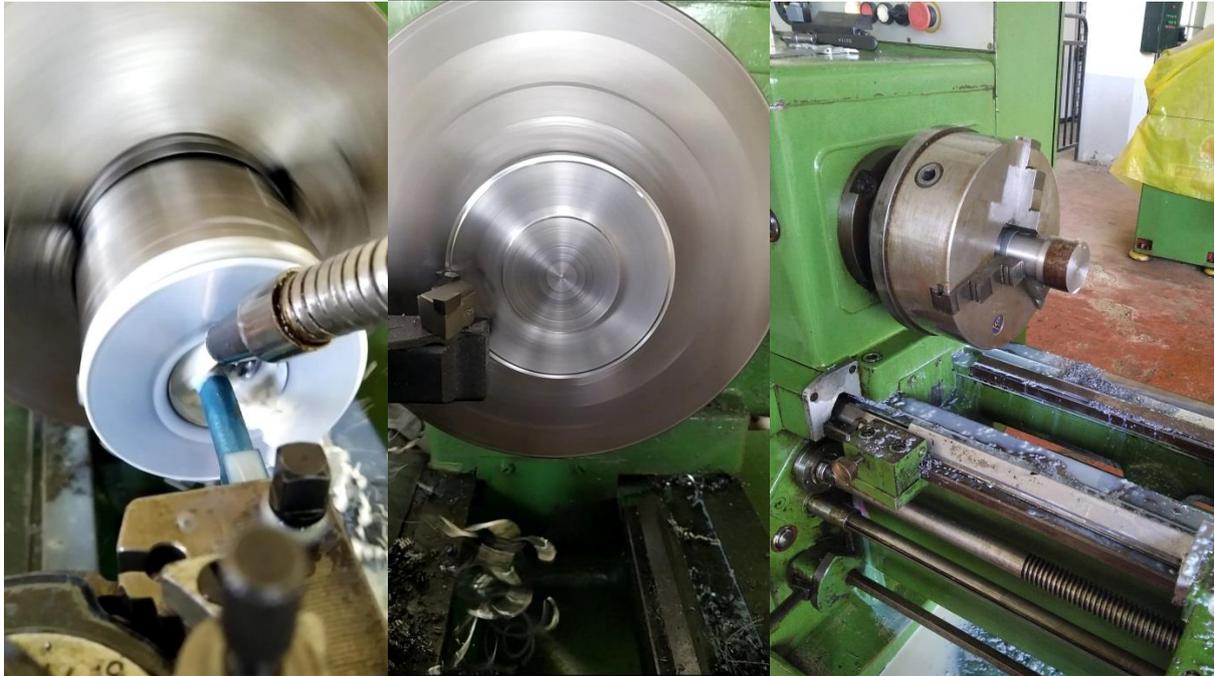


Figure II.2 : Opération d'usinage du cylindre, du fond et du piston sur tour.



Figure II.3 : Différentes pièces usinées.

II.3. Utilisation de l'outillage

La figure II.4 montre les étapes conduisant à produire une éprouvette à partir d'un mélange de matières introduit dans le cylindre. L'éprouvette est récupérée crue, et doit par la suite subir une opération de séchage et une cuisson à haute température.

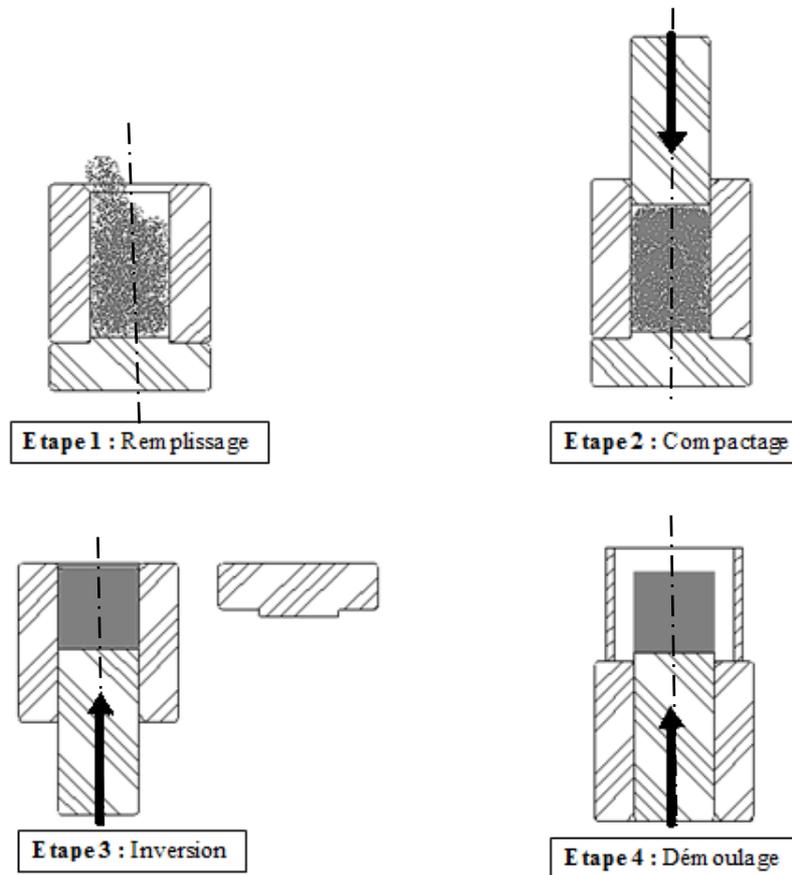


Figure II.4 : Production d'une éprouvette crue.

Le laboratoire des essais mécaniques est équipé d'une machine de type Zwick Z250 de 250 kN soit environ 25 tonnes. La première utilisation de cette machine est de s'en servir comme presse de compactage ; le montage chargé avec une certaine masse de mélange sera placé entre les plateaux de la machine comme montré sur la figure II.5.

La machine s'arrête à la pression de compactage voulue. Elle permet aussi de connaître le comportement du mélange à la compression et de définir la caractéristique force-déplacement.



Figure II.5 : Machine de compression Zwick Z250.

II.4. Matières premières

II.4.1. Matières riches en silice

La production d'un réfractaire nécessite une matière première qui soit la plus riche possible en SiO_2 .

Pour notre étude, nous avons réuni cinq variétés de sable de différentes régions, qui sont les suivantes :

- Sable d'Oued Zhour, wilaya de Jijel (code OZR).
- Sable de Kissar, wilaya de Jijel (code KSR).
- Sable de la plage de Bordj Blida, wilaya de Jijel (code BBD).
- Sable de Djamaa, wilaya d'El Oued (code JMA).
- Sable de Bou Saada, wilaya de M'Sila (code BSD).

❖ Lavage et séchage

Une quantité d'environ 1,5 kg de chaque sable est bien lavée à l'eau de robinet afin d'éliminer les impuretés jusqu'à ce que l'eau devient claire.

Après le lavage, nous avons réalisé l'étape de séchage dans une étuve chauffée électriquement à une température de 110 °C pendant plusieurs heures.



Figure II.6 : Etuve électrique de séchage.

❖ Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique qui permet de connaître la distribution et la répartition des tailles des grains.

Une masse de 1 Kg de sable est mise en haut d'un empilement de tamis d'ouvertures normalisées. Il y a en tout 15 tamis dont les ouvertures sont comprises entre 2 mm et 0.08 mm (voir figure II.7). L'empilement vibre électriquement sur son support. Une fois le tamisage terminé, le sable retenu dans chaque tamis est pesé. Ce travail nous a permis de tracer les graphiques de la figure II.8.



Figure II.7 : Dispositif de tamisage du sable avec 15 tamis.

Le tableau II.1 représente la masse mesurée des particules de sable qui restent dans chaque tamis selon ses ouvertures :

Tamis N°	Ouverture (mm)	KSR	BBD	OZR	JMA	BSD
34	2.00	0	0	0	0	25
33	1.60	0	0	0	0	9
32	1.25	0	0	0	0	37
31	1.00	0	0	0	0	20
30	0.800	0	0	8	0	84
29	0.630	0	0	17	0	68
28	0.500	0	0	53	0	118
27	0.400	0	0	94	7	130
26	0.315	29	7	560	65	249
25	0.250	412	279	151	96	89
24	0.200	440	542	73	282	72
23	0.160	107	156	31	345	48
22	0.125	9	16	6	159	31
21	0.100	0	0	0	31	10
20	0.080	0	0	0	7	6
	Total (g)	997	993	993	992	996

Tableau II.1 : Résultats de tamisage. Masse de sable traitée, 1000 g.

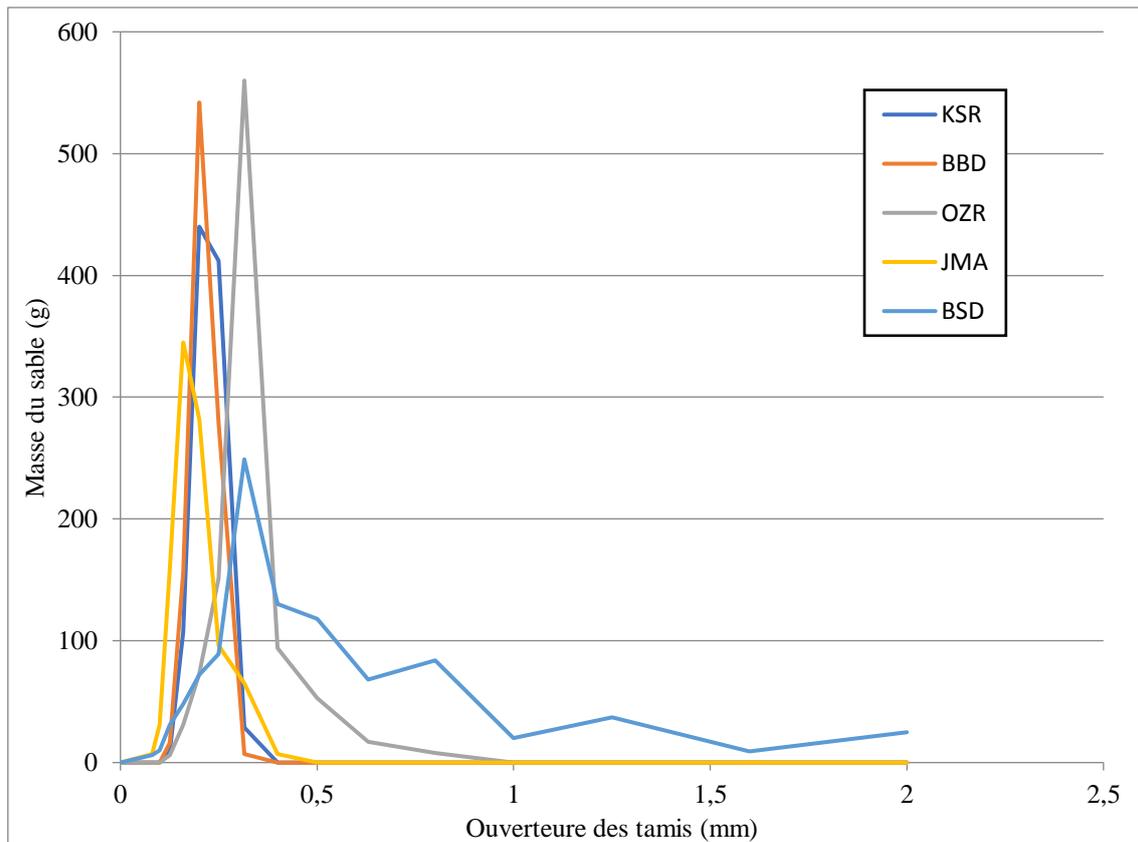


Figure II.8 : Distribution de la taille des grains suivant la masse des différents types de sable.

Le graphique représente les changements de masse de sable en termes d'ouvertures de tamis. Nous remarquons que le sable de JMA est le plus fin par rapport aux autres sables. Il s'avère également que le sable BSD est le plus grossier.

En plus de la granulométrie, nous avons mesuré les masses volumiques apparentes ρ_{ap} c'est-à-dire la masse d'un litre de sable comme indiqué dans le tableau II.2.

sable	KSR	BBD	OZR	JMA	BSD
Masse volumique apparente ρ_{ap} (kg/l)	1.472	1.469	1.472	1.486	1.645

Tableau II.2 : Valeurs des masses volumique apparentes des différents sables.

❖ Analyse chimique

Un aspect important de notre travail est de connaître la composition chimique des matières premières. La méthode la plus développée est celle basée sur la fluorescence des rayons X.

Faute de pouvoir appliquer cette méthode, nous avons sollicité le laboratoire de L'ENAVA qui est compétent dans la méthode d'attaque chimique. Les composés chimiques concernés par analyse sont ceux qui permettent de juger de la qualité des matières premières pour la fabrication d'un réfractaire à base de silice : la silice (SiO_2) l'alumine (Al_2O_3) et l'oxyde de fer (Fe_2O_3). Les résultats des analyses sont présentés dans le tableau (II.3).

Echantillons	SiO_2 %	Al_2O_3 %	Fe_2O_3 %	P.A.F (à 1000°C)
KSR	86.95	0.39	0.13	3.4
BSD	92.41	0.15	0.77	0.70
JMA	96.78	0.17	0.43	0.85

PAF : Pertes au feu à 1000°C.

Tableau II.3 : Résultats des analyses chimiques.

Les sables OZR et BBD n'ont pas été analysés. La source du sable BBD est proche de celle de sable KSR (sables similaires). Le sable OZR a été écarté car il a nécessité un effort de lavage important du fait qu'il soit très chargé en matière terreuse.

II.4.2. Additifs

Pour la fabrication de nos éprouvettes de réfractaires à base de sable riche en silice, il faut ajouter des additifs qui vont donner la cohésion aux réfractaires une fois cuits à haute température.

❖ Le Kaolin

Le premier est le kaolin qui est une argile. Le kaolin pur (kaolinite) est de formule chimique $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2(\text{OH})_4$ mais dans les gisements naturels le kaolin comporte des

impuretés. Nous avons utilisé le kaolin de Djebel Debagh situé dans la wilaya de Guelma de qualité DD3. La composition chimique de ce produit se trouve dans le tableau II.4 comme donnée par le producteur SOALKA.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	MnO	PAF
Kaolin DD3	41,97	38,00	0,12	0,20	0,07	0,75	1,34	16,80

Tableau II.4 : Composition chimique du kaolin DD3.

❖ La chaux

Le deuxième liant que nous avons utilisé est la chaux de formule chimique Ca(OH)₂. Cette matière nous a été fournie par le laboratoire de génie des procédés de l'université de Jijel. L'avantage de la chaux est de ne pas augmenter la teneur en Al₂O₃ dans le réfractaire contrairement au kaolin.

❖ Mélasse

Lors du moulage l'éprouvette démoulée doit avoir une cohésion suffisante pour être manipulée sans l'endommager. Avec l'argile le problème ne se pose pas à condition de respecter la quantité d'eau à ajouter. Par contre, avec la chaux la cohésion est très faible et l'éprouvette démoulée est fragile, c'est pour cela qu'il faut ajouter une matière organique qui améliore la cohésion. Dans l'industrie c'est la mélasse qui est utilisée. Il s'agit d'un résidu de l'industrie sucrière, sa composition est d'environ 75 % de sucre et de 25 % d'eau. Nous avons préparé une solution équivalente à partir du sucre alimentaire. Il faut noter que la mélasse disparaît complètement lors de la cuisson et ne modifie pas la composition chimique du produit final ; le sucre est constitué d'atomes de carbone et d'hydrogène et d'oxygène.

II.5. Choix de la matière première qui sera utilisée

Les propriétés des matières premières sont très importantes dans cette étude. La connaissance de ces propriétés qu'elles soient physiques ou chimiques, joue un rôle majeur dans le choix des matières premières appropriées.

Après avoir obtenu les analyses chimiques des différents échantillons, il a été constaté que le sable JMA est le meilleur en raison de sa forte teneur en silice qui est de 96,78 %.

Pour ce sable, nous avons également mesuré la masse volumique vraie qui est le rapport entre la masse du sable et le volume des grains. Le volume propre des grains est mesuré à l'aide d'une burette qui contient un certain volume d'eau et dans laquelle est versé le sable,

- Masse de sable : $M = 500$ g.
- Volume d'eau dans la burette : $V_1 = 500$ ml.
- Volume avec sable : $V_t = 690$ ml.

Volume propre du sable : $V_t - V_1 = 690 - 500 = 190$ ml..... (II.1).

La masse volumique vraie : $\rho_{vr} = \frac{0,5}{0,19} = 2,63$ kg/l.....(II.2).

Cette valeur est très proche de celle du quartz qui a une densité par rapport à l'eau de 2,65 kg/l. Nous pouvons aussi calculer sa porosité \emptyset qui est le pourcentage de vide dans le sable :

$$\emptyset = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_{vr}} = 43,5\% \dots\dots (II.3).$$

Avec $\rho_{ap} = 1.485$ kg/l.

II.6. Préparation des mélanges

II.6.1. Dosage [12], [13]

Le rapport des dosages est un aspect important dans la fabrication de la céramique réfractaire, et sur la base des études menées précédemment, le pourcentage de kaolin DD3 ajouté dans la fabrication varie généralement entre 5 % et 8 %, comme pour la chaux, il varie entre 2 % et 4 %. L'eau ajoutée est estimée à environ 7 %.

❖ Epreuve préliminaire

- 200 g du sable KSR.
- 7,5 % Kaolin (15 g).
- 5,5 % d'eau (11 g).

Dans cette expérience nous avons mélangé une masse de 200 g de sable (KSR) avec 15 g de kaolin (DD3) puis nous avons ajouté de l'eau goutte à goutte tout en agitant.

Nous avons effectué notre essai d'éprouvette KSR sur la machine de compression de Laboratoire des essais mécaniques.

❖ Tableaux de Dosage des Mélanges

• KSR + Kaolin DD3

Code mélange : KKSR.

Dans le mélange constitué de sable KSR avec le kaolin DD3 le pourcentage de kaolin dans le mélange était de 6 % avec une quantité d'eau ajoutée est de 5,5 % comme indiqué dans le tableau suivant :

Matières >>>	Sable KSR	Kaolin DD3	Ca(OH) ₂	Eau ajoutée	Total mélange	Produit cuit
Masses (g) mélangées	1486	89	0	82	1657	XXXX
% Base sable	100	6	0	5,5	111,5	XXXX
% Base mélange	89,67	5,38	0	4,93	100	XXXX
SiO ₂	86,95	41,97	/	/	80,21	88,03
Al ₂ O ₃	0,39	38,00	/	/	2,39	2,62
Fe ₂ O ₃	0,13	0,12	/	/	0,12	0,13
Humidité	00 (sec)	00 (sec)	00 (sec)	100	4.93	0
PAF	3,40	16,80	24,32	XXXX	3,95	0

Tableau II.5 : Dosage de Mélange sable KSR et Kaolin.

D'après les résultats des analyses, ce dosage a été éliminé parce que le pourcentage de silice du produit crut est seulement de 88,03 %. Donc selon le tableau de classification normalisée des réfractaires le produit est siliceux car le pourcentage est compris entre 85 % < SiO₂ < 93 %.

- **JMA + Kaolin DD3** : Code mélange KJMA

En ce qui concerne du mélange (JMA + DD3) on ajoute 6 % de kaolin avec 5,5 % d'eau avec une masse de 1500 g de sable JMA. Le tableau II.6 donne le détail des calculs.

Matières >>>	Sable JMA	Kaolin DD3	Ca(OH)₂	Eau ajoutée	Total mélange	Produit cuit
Masses (g) mélangées	1500	90	0	82,5	1672,5	XXXX
% Base sable	100	6	0	5,5	111,5	XXXX
% Base mélange	89,67	5,38	0	4,93	100	XXXX
SiO₂	96,78	41,97	/	/	89,04	95,30
Al₂O₃	0,17	38,00	/	/	2,19	2,34
Fe₂O₃	0,43	0,12	/	/	0,39	0,41
Humidité	00 (sec)	00 (sec)	00 (sec)	100	4.93	0
PAF	0,85	16,80	24,32	XXXX	1,66	0

Tableau II.6 : Dosage de Mélange sable JMA et Kaolin (KJMA).

Le produit cuit est à 95,30 % de silice.

• **JMA + Chaux Ca(OH)₂ : Code mélange CJMA**

Concernant les doses ajoutées dans ce mélange, nous avons ajouté 3 % de chaux Ca(OH)₂ avec une quantité d'eau à raison de 8 % avec une masse de 1200 g de sable. Le tableau II.7 donne le détail des calculs.

Matières >>>	Sable JMA	Kaolin DD3	Ca(OH) ₂	Eau ajoutée	Total mélange	Produit cuit
Masses (g) mélangées	1200	0	36	96	1332	XXXX
% Base sable	100	0	3	8	111	XXXX
% Base mélange	90	0	2,70	7,20	100	XXXX
SiO ₂	96,78	/	0	/	87,10	95,44
Al ₂ O ₃	0,17	/	0	/	0,15	0,16
Fe ₂ O ₃	0,43	/	0	/	0,38	0,41
Autres	1,77	/	75,68	/	3,63	3,98
Humidité	00 (sec)	00 (sec)	00 (sec)	100	7,20	0
PAF	0,85	16,80	24,32	XXXX	1,42	0

Tableau II.7 : Dosage de Mélange JMA et de la Chaux (CJMA).
Le produit cuit à 95,44 % de silice.

II.6.2. Malaxage

Nous avons fait ce processus à l'aide d'un malaxeur. Le processus a duré environ 20 min, au cours desquelles une quantité spécifique d'eau a été ajoutée afin d'obtenir

un mélange homogène. Après avoir terminé le processus de mélange, nous avons mis le mélange dans un récipient en plastique hermétique pour conserver l'humidité.

La figure II.9 représente le malaxeur que nous avons utilisé dans le processus de malaxage.



Figure II.9 : Malaxeur.

II.6.3. Détermination de la masse de la charge à mouler en fonction de la pression de compactage.

❖ Mélange (JMA + kaolin) : KJMA

Nous avons compressé une charge $M_0 = 200$ g de mélange à 850 kg/cm² avec la machine de compression comme représenté sur la figure II.5. Nous avons obtenu une éprouvette avec une hauteur $H_0 = 54$ mm. Le diagramme de la figure II.10 montre le comportement mécanique de la charge de 200 g sous l'effet de la force compression. Cette courbe caractéristique nous permet de calculer la masse que doit avoir la charge pour avoir une hauteur de 50 mm pour une pression de compactage inférieur à 850 kg/cm².

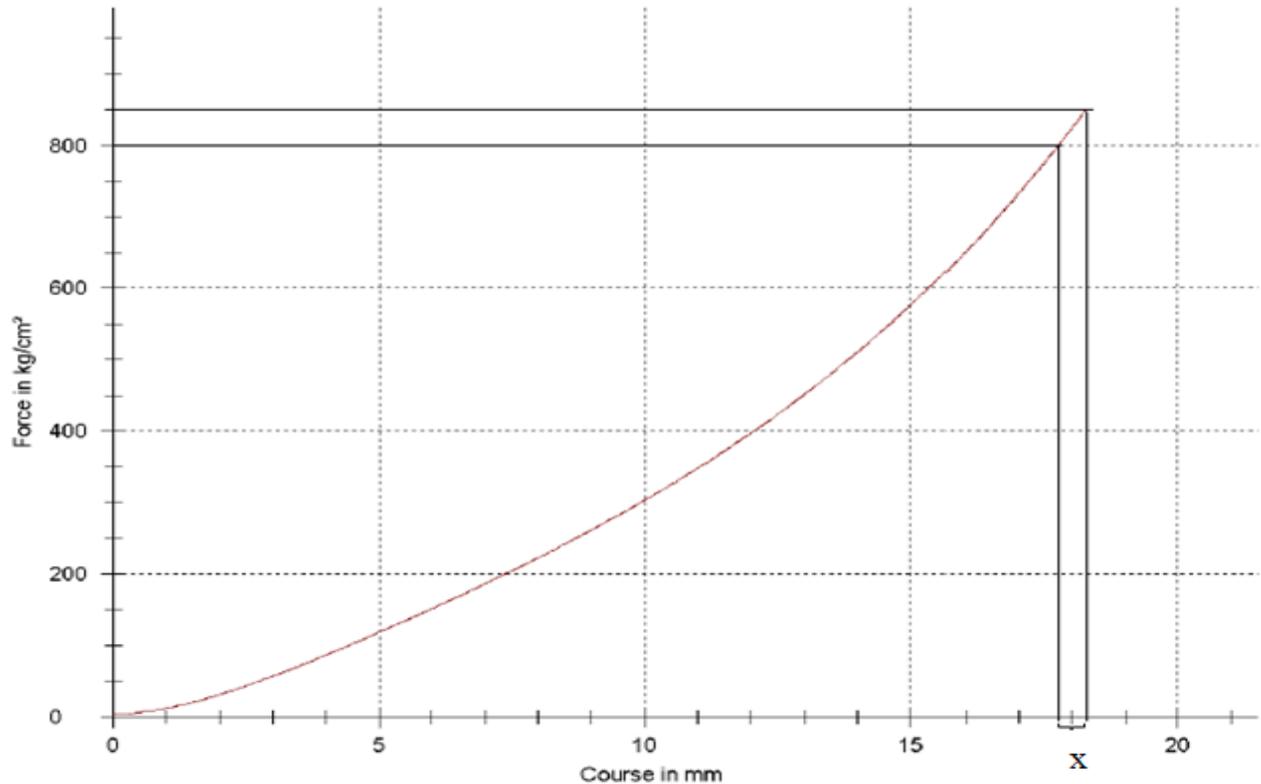


Figure II.10 : Diagramme de compactage du mélange KJMA.

Soit X la différence entre la valeur de la course maximale enregistrée à 850 kg/cm^2 et la valeur qui correspond sur le diagramme à la force que l'on veut appliquer pour la pression de compactage voulue.

Pour déterminer les masses nécessaires à chaque niveau de compactage nous avons fait les calculs suivants (figure10) :

$$\text{Echelle} = \frac{X}{\Delta h} = 1,11 \frac{\text{cm}}{\text{mm}} \dots\dots\dots (\text{II.4}).$$

- Pour $P = 800 \text{ kg/cm}^2$: la masse est $M = 184 \text{ g}$.

$$\Delta h = \frac{X}{1,11} = 0,45 \text{ mm} \dots\dots\dots (\text{II.5}).$$

$$H = H_0 + \Delta h = 54 + 0,45 = 54,45 \text{ mm} \dots\dots\dots (\text{II.6}).$$

$$M = M_0 \times \frac{50}{H} = 200 \times \frac{50}{54,45} \text{ mm} \dots\dots\dots (\text{II.7}).$$

- Pour $P = 600 \text{ kg/cm}^2$: la masse est $M = 177 \text{ g}$.

$$\Delta h = \frac{2,8}{1,11} = 2,52 \text{ mm} \dots\dots\dots(\text{II.8}).$$

$$H = H_0 + \Delta h = 54 + 2.52 = 56.52 \text{ mm} \dots\dots\dots(\text{II.9}).$$

$$M = M_0 \times \frac{50}{H} = 200 \times \frac{50}{56,52} = 176,92 \text{ g} \dots\dots\dots (\text{II.10}).$$

- Pour $P = 400 \text{ kg/cm}^2$: la masse est $M = 169 \text{ g}$.

$$\Delta h = \frac{5,6}{1,11} = 5,04 \text{ mm} \dots\dots\dots (\text{II.11}).$$

$$H = H_0 + \Delta h = 54 + 5,04 = 59,04 \text{ mm} \dots\dots\dots (\text{II.12}).$$

$$M = M_0 \times \frac{50}{H} = 200 \times \frac{50}{59,04} = 169,36 \text{ g} \dots\dots\dots (\text{II.13}).$$

❖ **Mélange (JMA +la chaux) : CJMA**

Nous avons compressé $M_0 = 185 \text{ g}$ du mélange à 800 kg/cm^2 dans la machine de compression comme représenté sur la figure II.5. Nous avons obtenu à cette pression une éprouvette avec une hauteur de $H_0 = 48.1 \text{ mm}$.

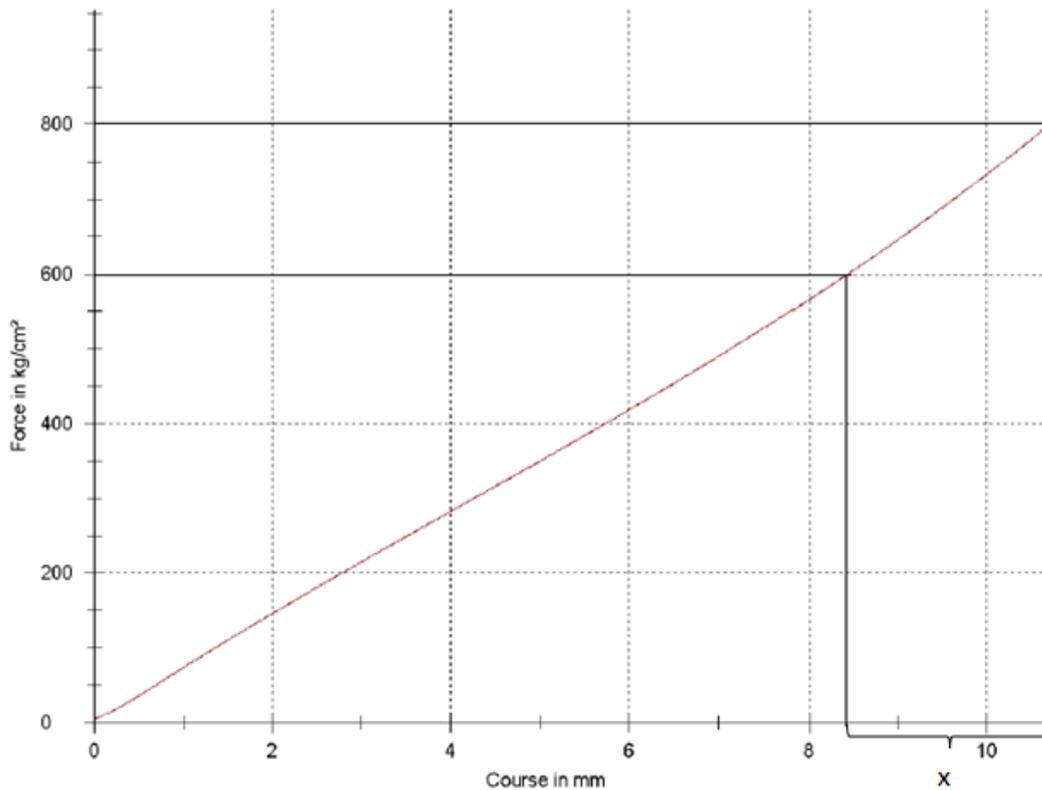


Figure II.11 : Diagramme de compactage du mélange CJMA.

Pour déterminer les masses nécessaires à chaque niveau de compactage nous avons fait les calculs suivants en exploitant la caractéristique de la figure II.11 :

$$\text{Echelle} = \frac{X}{\Delta h} = 0,83 \frac{\text{cm}}{\text{mm}} \dots\dots\dots (\text{II.14}).$$

- Pour $P = 800 \text{ kg/cm}^2$: la masse est $M = 192 \text{ g}$.

$$H = H_0 = 48,1 \text{ mm}.$$

$$M = M_0 \times \frac{50}{48,1} = 185 \times \frac{50}{48,1} = 192,30 \text{ g} \dots\dots\dots (\text{II.15}).$$

- Pour $P = 600 \text{ kg/cm}^2$: la masse est $M = 180 \text{ g}$.

$$\Delta h = \frac{X}{0,83} = \frac{2,7}{0,83} = 3,25 \text{ mm} \dots\dots\dots (\text{II.16}).$$

$$H = H_0 + \Delta h = 48,1 + 3,25 = 51,35 \text{ mm} \dots\dots\dots (\text{II.17}).$$

$$M = M_0 \times \frac{50}{H} = 185 \times \frac{50}{51,35} = 180,13 \text{ g} \dots\dots\dots (\text{II.18}).$$

- Pour $P = 400 \text{ kg/cm}^2$: la masse est $M = 168 \text{ g}$.

$$\Delta h = \frac{X}{0,83} = \frac{5,8}{0,83} = 6,98 \text{ mm} \dots\dots\dots (\text{II.19}).$$

$$H = H_0 + \Delta h = 48,1 + 6,98 = 55,08 \text{ mm} \dots\dots\dots (\text{II.20}).$$

$$M = M_0 \times \frac{50}{H} = 185 \times \frac{50}{55,08} = 167,93 \text{ mm} \dots\dots\dots (\text{II.21}).$$

II.7. Moulage

Ce procédé vise à obtenir des échantillons de forme géométrique bien précise à l'aide d'un moule ayant un corps cylindrique. Pour le test de fabrication que nous avons effectué, il s'agit d'obtenir des éprouvettes dont le diamètre et la hauteur sont de 50 mm.

La machine des essais mécaniques ZWICK Z250 a été utilisée comme presse pour réaliser le compactage dans le moule. Le compactage à haute pression permet de réaliser la cohésion au sein de la masse moulée ainsi que de réduire la porosité.

Nous avons produits des échantillons à trois niveaux de pressions : 400 kg/cm², 600 kg/cm² et 800 kg/cm². Une fois la pression requise atteinte, la machine de compression s'arrête automatiquement. Après cela nous avons sorti le moule et nous avons inversé la pression afin de libérer l'éprouvette. Comme montré sur la figure II.4. Pour chaque pression de compactage nous avons produit deux éprouvettes, au total six (06) avec le mélange KJMA et six (06) autres avec le mélange CJMA. La figure II.12 et II.13 montre la procédure de moulage et de démoulage.

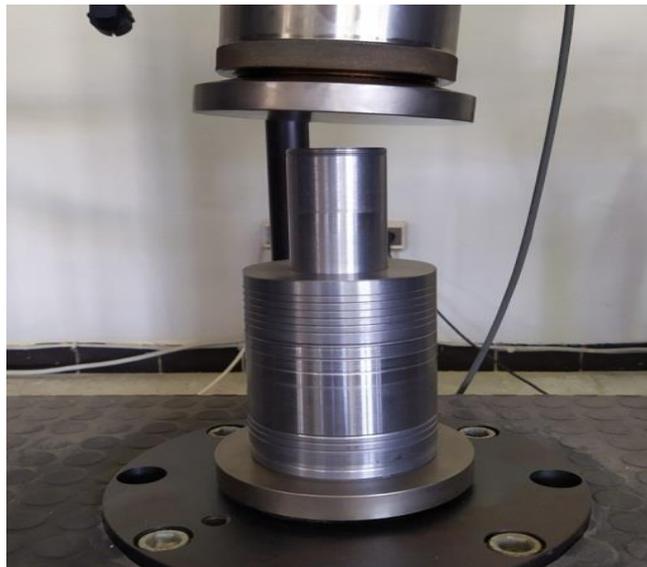


Figure II.12 : Opération de moulage.

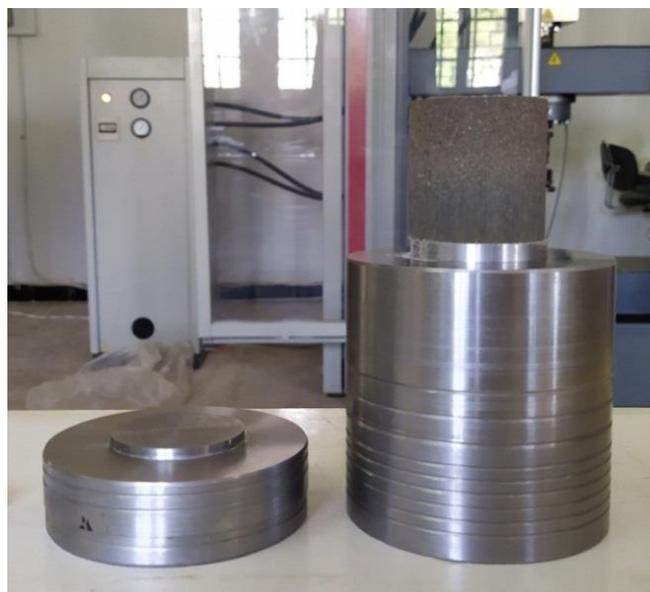


Figure II.13 : Démoulage de l'éprouvette.

II.8. Séchage

Ce procédé vise à éliminer l'eau présente dans les éprouvettes de manière naturelle. Nous avons séché les éprouvettes obtenues avec les mélanges KJMA et CJMA à l'air et l'abri du soleil pour une durée estimée à environ 60 heures. Il est à rappeler que l'eau ajoutée était nécessaire pour assurer la cohésion en présence des liants lors du moulage

II.9. La cuisson des éprouvettes [14]

C'est le processus final de fabrication de céramiques réfractaires. La cuisson doit être bien étudiée pour obtenir un produit de haute qualité.

Il est nécessaire de contrôler la vitesse de cuisson, car en cas de défaut de cuisson, cela peut entraîner la destruction ou l'apparition de fissures et des déformations.

La température de maturation de la silice dépend de la composition de matières premières du mélange, la température appropriée pour la cuisson des briques réfractaires se situe entre 1450 °C et 1500 °C.

Sous l'influence de l'opération de cuisson, il y a une variation des dimensions comme le montre la figure II.14. Il y a aussi une perte de masse appelée pertes aux feux.

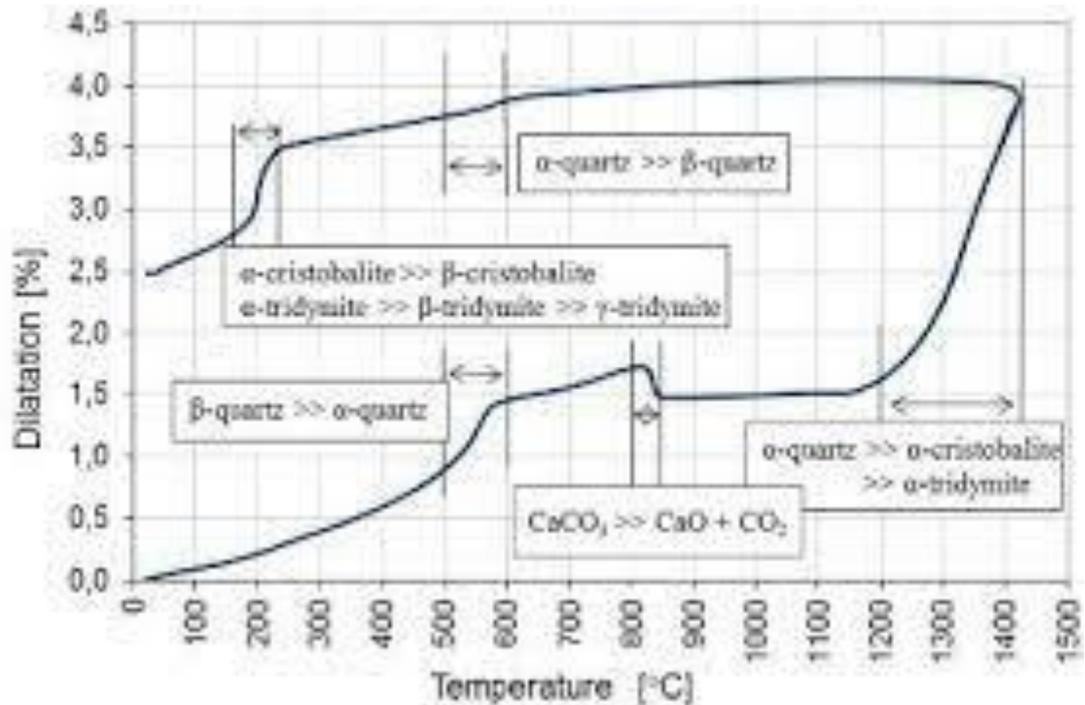


Figure II.14 : Dilatation du matériau de silice pendant la cuisson et le refroidissement [15].

A partir de cette figure on note qu'il existe des zones dangereuses qui peuvent entraîner des fissures ou destruction dans le matériau pendant les deux processus de cuisson et de refroidissement.

Dans l'opération de cuisson on note la présence principalement de deux zones dangereuses :

Zone 1 : à partir 500 °C jusqu'à 600 °C

Zone 2 : à partir de 1200 °C jusqu'à d'environ 1420 °C. Dans cette zone, la valeur (pourcentage) de dilatation maximale est estimée à environ 4 %.

Dans l'opération de refroidissement on note une partie dangereuse à moins de 250 °C.

❖ Cuisson de l'éprouvette préliminaire

Le processus de cuisson dans un four électrique Type NABERTHERM LHT08 /18. La première éprouvette a été cuite à 1500 °C selon la courbe de cuisson de la figure II.15.

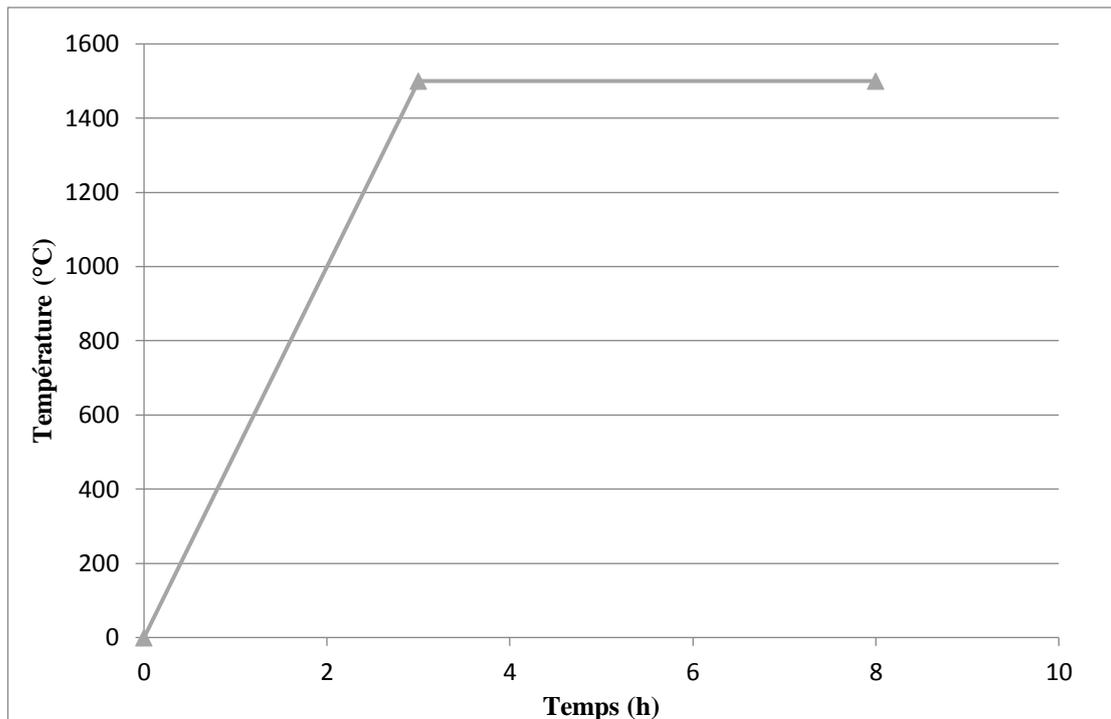


Figure II.15 : Diagramme de cuisson de la première éprouvette de mélange KSR + kaolin (éprouvette préliminaire).

Le diagramme de cuisson du KSR est divisé en deux étapes :

Etape 1 (0-3 h) : Augmentation de la température de l'ambiante jusqu'à 1500 °C.

Etape 2 (3 h-8 h) : La température est constante à 1500 °C (palier).

Le refroidissement se fait à four éteint.



Figure II.16 : Eprouvette KSR avant et après cuisson.

La figure II.16 montre l'aspect de l'éprouvette initiale KSR. Nous pouvons constater la présence de quelques fissures avec apparition de fragmentation de l'échantillon en plus de la présence de pores. Il y a également une bande de rouille sur le dessus de l'éprouvette. Ceci est dû au fait que le moule n'est pas traité en terme de dureté.

L'éprouvette que nous avons obtenue n'est pas réussie. Cela provient du non-respect des conditions nécessaires à la cuisson. Le chauffage et le refroidissement doivent être plus lents de même le palier isotherme doit être maintenu plus long temps.

❖ **Les éprouvettes K (Kaolin + JMA) a ont cuit ces jusqu'à 1500 °C**

La figure II.17 montre les étapes de cuisson de notre éprouvette. La courbe de cuisson a été choisie pour donner des éprouvettes sans défauts.

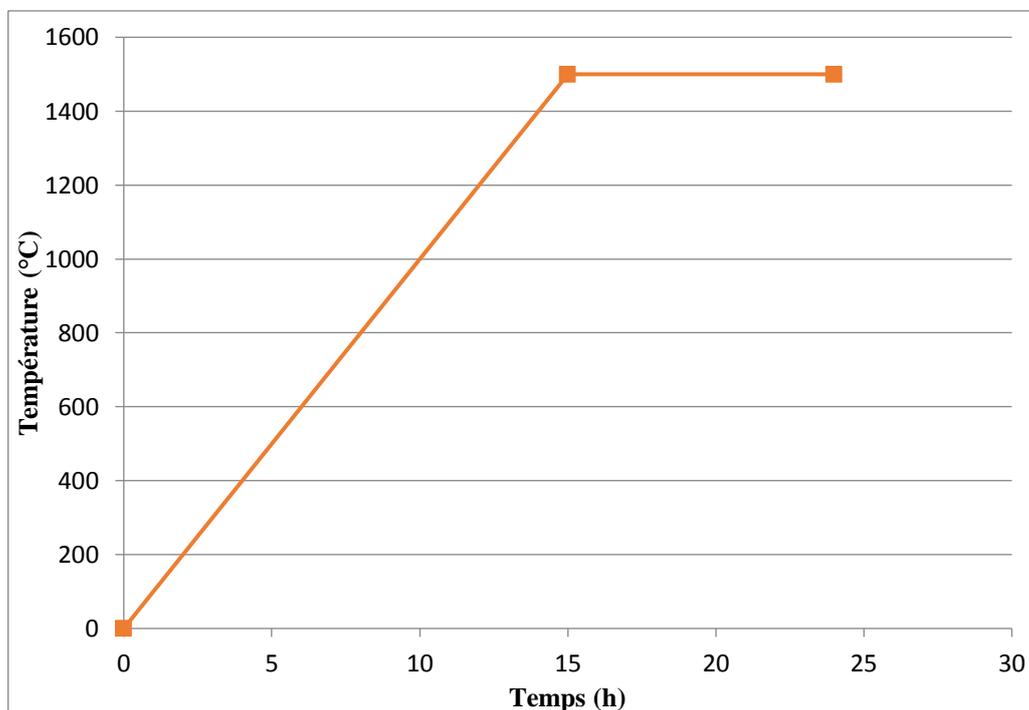


Figure II.17 : Diagrammes de cuisson des éprouvettes a mélange KJMA.

La courbe comporte une montée en température de l'ambiante jusqu'à 1500 °C sur une durée de 15 h, puis un palier à 1500 °C sur une durée 12 h, le refroidissement se fait à four éteint.

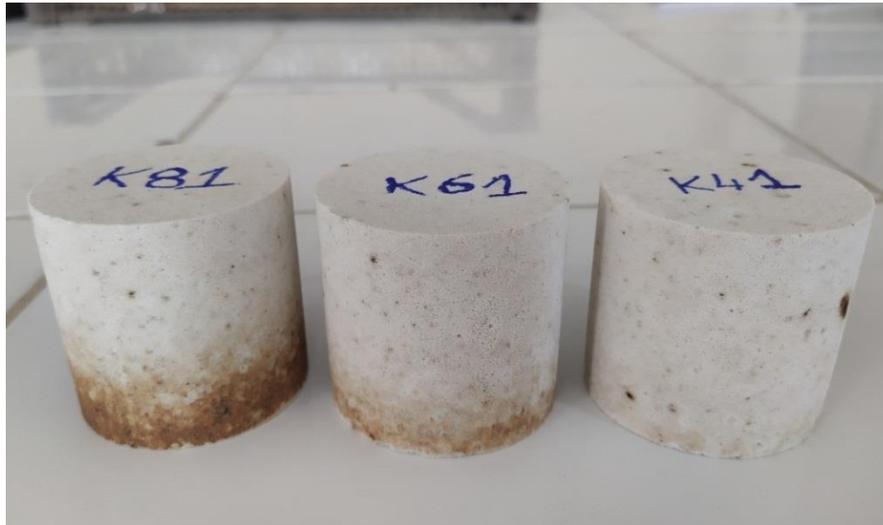


Figure II.18 Eprouvettes de mélange KJMA après cuisson.

Sur la figure II.18 nous avons les deux éprouvettes K81 et K61 présentant une bande de rouille due à la force de compactage plus élevée.

❖ **Les éprouvettes C (la chaux + JMA) ont été cuits jusqu' à 1600 °C**

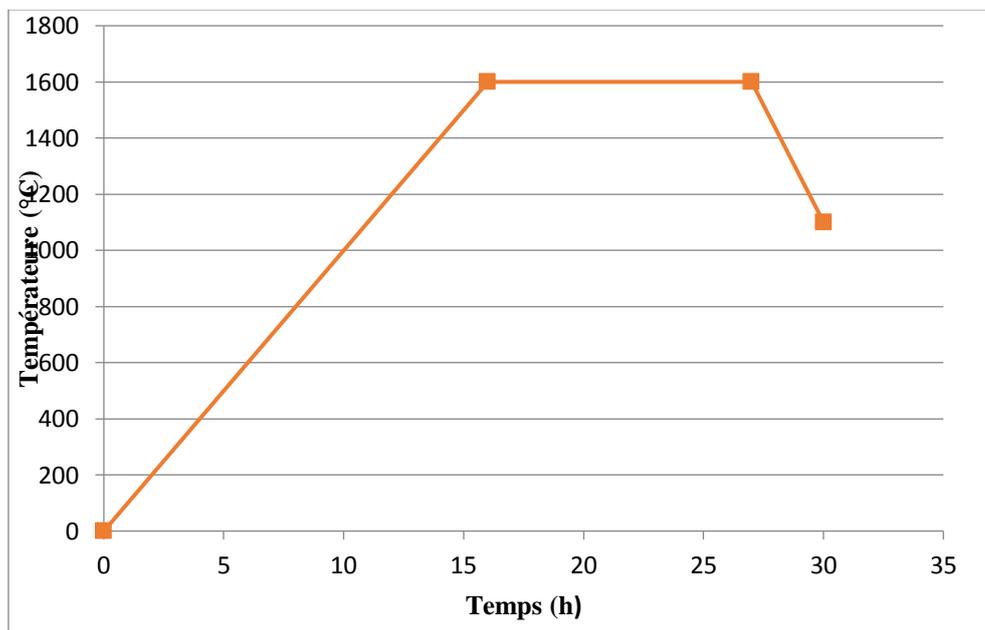


Figure II.19 : Diagramme de cuisson des éprouvettes de mélange CJMA.

La courbe de cuisson des éprouvettes à mélange CJMA (figure II.19) est divisée en trois étapes :

Étapes 1 (0-16 h) : Augmentation de la température de l'ambiante jusqu'à 1600 °C.

Étapes 2 (16 h-27 h) : Palier isotherme à 1600 °C.

Étapes 3 (27 h-30 h) : Refroidissement contrôlé de 1600 °C à 1100 °C.



Figure II.20 : Epreuves après cuisson du mélange CJMA.

La figure II.20 montre l'aspect des éprouvettes C. Nous pouvons constater de l'absence des fissures, les éprouvettes que nous avons obtenues sont réussies. Cela provient du respect des conditions nécessaires de la cuisson.

Remarque sur la désignation :

Les éprouvettes à mélange KJMA et CJMA sont désignées simplement par les lettres K et C respectivement. Le premier chiffre qui suit indique la pression de compactage (en centaine de kg/cm) le deuxième chiffre donne le numéro de l'exemplaire de l'éprouvette (1 ou 2).

II.10. Examen des échantillons cuits

La cuisson fait subir des transformations profondes à la matière céramique. En particulier il y a une importante variation de dimension comme le montre la figure II.14. Il y a aussi une perte de la masse importante appelée pertes au feu.

❖ **Mélange KJMA**

Le tableau II.8 représente les dimensions des éprouvettes K avant la cuisson. Nous avons mesuré la hauteur et le diamètre de l'échantillon avec le pied à coulisse et nous avons obtenu les résultats suivants :

	K41	K42	K61	K62	K81	K82
D ₀ (mm)	50.2	50.2	50.2	50.2	50.2	50.2
H ₀ (mm)	48.2	48.2	48.8	48.8	49.4	49.4

Tableau II.8 : Dimensions avant cuisson (KJMA).

Le tableau II.9 représente les dimensions des éprouvettes K après la cuisson.

	K41	K42	K61	K62	K81	K82
D (mm)	53,6	53,6	53,6	53,7	53,8	53,7
H (mm)	51,0	51,2	51,6	51,5	52,2	52,2

Tableau II.9 Dimensions après cuisson (KJMA).

❖ **Mélange CJMA**

Le tableau II.10 représente les dimensions des éprouvettes C avant la cuisson :

	C41	C42	C61	C62	C81	C82
D ₀ (mm)	50.4	50,4	50,4	50,4	50,4	50,4
H ₀ (mm)	46,4	46,2	48,5	48,0	48,0	49,8

Tableau II.10 : Dimensions avant cuisson (CJMA).

Le tableau II.11 représente les dimensions des éprouvettes C après la cuisson :

	C41	C42	C61	C62	C81	C82
D (mm)	54,4	54,4	54,3	54,2	54,2	54,1
H (mm)	49,7	49,7	51,8	52,4	51,4	53,4

Tableau II.11 : Dimensions après cuisson (CJMA).

A travers ces tableaux, on note qu'il y a une augmentation des dimensions des éprouvettes pour les deux séries, et on note qu'il y a une plus forte augmentation pour les éprouvettes qui ont été fabriquées à la chaux par rapport à ceux au kaolin.

Nous expliquons ce résultat par le temps de cuisson plus important et à une température plus forte pour les éprouvettes à mélange CJMA donnant lieu à des transformations plus poussées.

II.10.1. Pertes massiques

La perte de masse après cuisson des éprouvettes est déterminée en pesant à l'aide d'une balance, la masse avant cuisson noté M_0 et la masse après cuisson noté M .

Le tableau II.12 représente les résultats des pertes massiques des éprouvettes K:

	K41	K42	K61	K62	K81	K82
M_0 (g)	169	169	177	177	184	184
M (g)	158	158	166	166	172	172
PM(g)	11	11	11	11	12	12
PM(%)	6,5	6,5	6,21	6,21	6,52	6,52

Tableau II. 12 : Pertes massiques pour les éprouvettes K.

Le tableau II.13 représente les résultats des pertes massiques des éprouvettes C :

	C41	C42	C61	C62	C81	C82
M_0 (g)	167	167	180	180	192	192
M (g)	150	150	162	162	166	166
PM(g)	17	17	18	18	26	26
PM(%)	10,17	10,17	10	10	13,54	13,54

Tableau II.13 : Pertes massiques pour les éprouvettes C.

A partir de ces tableaux, on constate que le pourcentage de perte massique pour les éprouvettes à base de chaux est élevé comparé à celui des éprouvettes à liant argileux.

Cette diminution de masse dans les deux séries est due principalement à la perte d'eau lors de la cuisson.

❖ **Densité des éprouvettes**

La masse volumique est une propriété important des propriétés réfractaires, les tableaux II.14 et II.15 donne les valeurs calculés pour les éprouvettes réalisées.

Les valeurs obtenues se situent entre les produits de silice denses (masse volumique supérieure 1,70 g/cm³) et les produits de silice isolants (masse volumique autour 1,00 g/cm³).

	K41	K42	K61	K62	K81	K82
Masse volumique apparente (kg/cm ³)	1.37	1.37	1.43	1.42	1.45	1.45

Tableau II.14 : Masse volumique apparente des éprouvettes K.

	C41	C42	C61	C62	C81	C82
Masse volumique apparente (kg/cm ³)	1.30	1.30	1.30	1.35	1.40	1.35

Tableau II.15 : Masse volumique apparente des éprouvettes C.

II.10.2. Dilations volumique et linéaire [16]

Pour déterminer la dilatation volumique et linéaire on utilise les équations suivantes :

- Dilatation volumique : $D_v = \frac{V-V_0}{V_0} \dots\dots\dots$ (II.22).

- Dilation linéaire : $D_L = \sqrt[3]{D_v} \dots\dots\dots$ (II.23).

Les mesures des dilatations linéaire et volumique sous l’effet de la cuisson sont effectuées à l’aide d’un pied à coulisse sur les éprouvettes. Ces mesures sont très importantes car elles permettent de calculer les dimensions du moule à utiliser pour l’obtention de produits finaux selon les dimensions que nous avons déterminées.

Le tableau II.14 représente les résultats de dilations volumique et linéaire des éprouvettes de K :

	K41	K42	K61	K62	K81	K82
V_0 (cm ³)	95,40	95,40	96,50	96,50	97,70	97,70
V (cm ³)	115,10	115,50	116,40	116,60	118,50	118,20
D_v (%)	20,64	21,06	20,62	20,82	21,28	20,98
D_L (%)	2,74	2,76	2,74	2,75	2,77	2,76

Tableau II.16 : Résultats de dilatations volumique et linéaire des éprouvettes K.

Le tableau II.15 représente les résultats de dilations volumique et linéaire des éprouvettes de C :

	C41	C42	C61	C62	C81	C82
V_0 (cm ³)	92,52	92,12	96,71	95,71	95,71	99,30
V (cm ³)	115,45	115,45	119,90	120,83	118,53	122,68
D_v (%)	24,78	25,32	23,97	26,24	23,84	23,54
D_L (%)	2,92	2,94	2,88	2,97	2,88	2,87

Tableau II.17 : Résultats de dilatations volumique et linéaire des éprouvettes C.

Suite aux résultats obtenus, nous pouvons dire que cette expansion peut être due à la nature des grains fins de sable qui accélère la transformation du quartz en cristobalite et tridymite, et provoque ainsi une augmentation de la porosité apparente.

II.11. Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude expérimentale pour obtenir des éprouvettes de 50 mm de hauteur et de 50 mm de diamètre, basée sur la sélection de matières premières appropriées que sont la silice, le kaolin et la chaux en suivant la méthode du moulage par pression. Un problème important en fabrication des produits céramiques est la maîtrise des dimensions du produit final dans des tolérances spécifiées. C'est pour cela que beaucoup de tests doivent être faits pour trouver la bonne correction à apporter aux moules.

CHAPITRE III

Résultats des essais mécaniques

III.1. Introduction

Ce chapitre concerne les résultats obtenus et donne une présentation générale de l'essai d'écrasement et de l'essai brésilien.

III.2. Essais mécaniques

L'objectif des essais mécaniques est d'identifier le comportement mécanique des matériaux et leur capacité à résister pour l'utiliser dans son domaine prévu. Il existe plusieurs types d'essais mécaniques.

III.2.1. Essai d'écrasement

III.2.1.1. Présentation de l'essai d'écrasement [17]

Le test de résistance à l'écrasement consiste à mesurer la charge de compression nécessaire à provoquer la déformation, la fracturation ou l'éclatement des éprouvettes testées des matériaux. Ce test permet de limiter la charge maximale à appliquer aux éprouvettes et de déterminer si besoin est, la charge à la rupture.

La figure III.1 présente une idée générale sur l'essai d'écrasement.

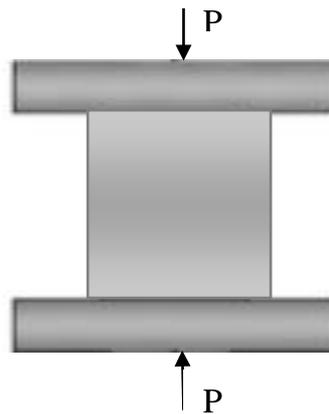


Figure III.1 : Essai de l'écrasement.

III.2.1.2 Résultats de l'essai d'écrasement

La figure III.1 montre les exemples de compression en essai d'écrasement des éprouvettes K et C.



Figure III.2 : Mode écrasement des éprouvettes.

Cette fracture se caractérise par la présence de déformations en plus de la présence de fissures au niveau de la surface et des côtés des éprouvettes, et la fracture se développe parallèlement à l'axe de compression.

Les essais de compression que nous avons effectués ont été réalisés sur la machine Zwick Z250 et les graphes obtenus pour l'essai d'écrasement jusqu'à rupture des trois éprouvettes d'essai (K41, K61, K81) précédentes, sont montrés sur la figure (III.1).

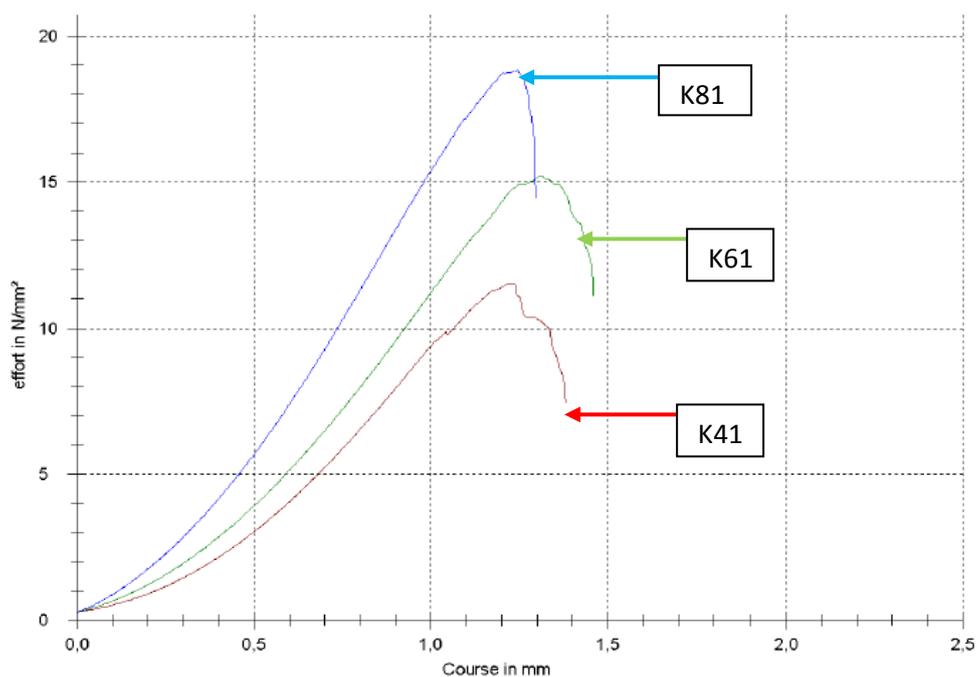


Figure III.3 : Résultats de test d'écrasement des éprouvettes (K41, K61, K81).

Le tableau ci-dessous résume les valeurs maximales des efforts obtenus en MPa pour les trois éprouvettes ainsi que les courses (en mm) correspondantes pour chaque éprouvette.

	K41	K61	K81
F_{Rr} (MPa)	11,20	15,10	18,80
La course (mm)	1,20	1,30	1,20

Tableau III.1 : Lecture des données de la courbe graphique (K41, K61, K81).

❖ Description de la figure III.3

La figure III.1 représente la variation de l'effort de l'écrasement de chaque éprouvette (K41, K61, K81) respectivement en fonction de la course de compression, réunies dans un même graphe.

Les trois courbes présentent presque la même allure. On remarque sur les trois courbes une partie parabolique concave jusqu'à une charge de 4 MPa, ensuite une partie linéaire jusqu'à environs 2 MPa avant l'effort maximal de rupture et en fin une partie parabolique convexe qui comprend le point de rupture.

❖ Concernant le tableau III.1

Il est clair que l'effort maximal à la rupture augmente en fonction de la charge de compactage des éprouvettes. La valeur maximale (presque 19 MPa) est enregistrée pour l'éprouvette K81 et la valeur minimale (11,2 MPa) pour l'éprouvette K41. Une valeur intermédiaire (15 MPa) pour l'éprouvette K61.

En revanche, les courses correspondantes aux valeurs extrêmes de l'effort maximal pour K41 et K81 sont presque les mêmes (1,2 mm) et diffèrent légèrement de l'éprouvette K61 (1,3 mm).

❖ Interprétation des résultats

Dans les trois cas l'allure est presque la même et présente les trois parties décrites précédemment. Quel que soit le degré (effort) de compactage, l'allure reste la même ;

moyennement les efforts enregistrés pour chaque cas. Pour une même course cet effort croît presque linéairement.

La partie inférieure (concave) (<4 MPa) peut être expliquée par la présence de pores dans les éprouvettes qui après application constituée de la charge disparaissent petit à petit. Ensuite les couches compactées s'impliquent entre elles et la variation linéaire de l'effort en fonction de la course témoigne de présence d'une zone presque élastique (course environ 1 mm). Enfin, l'augmentation de l'effort de compression provoque une dislocation progressive (courbe convexe) jusqu'à la rupture et une diminution de la charge, suite à la rupture augmentée.

Donc l'éprouvette K81 est la plus résistante que les deux autres éprouvettes parce que sa densité est très élevée.

Les résultats obtenus permettent de dire que la pression de compactage de l'éprouvette est plus importante, ce qui permet de donner l'éprouvette une grande résistance.

Les résultats de l'écrasement pour les éprouvettes C41, C61 et C81 sont présentés dans la figure III.4.

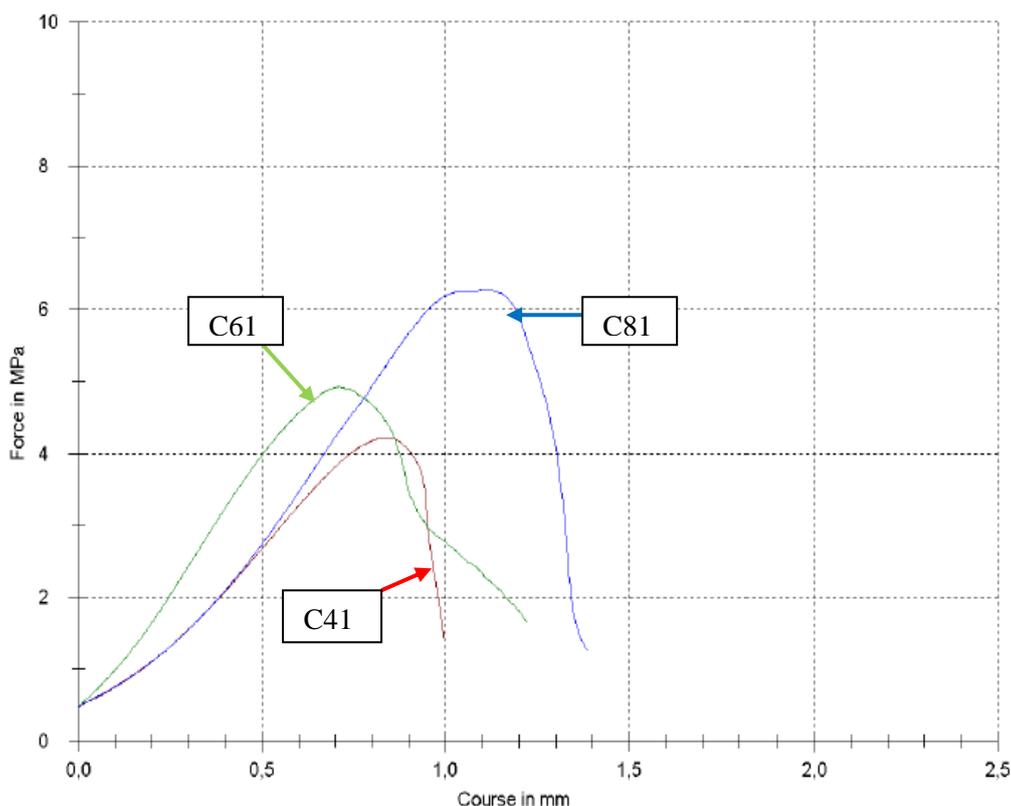


Figure III.4 : Résultats de test d'écrasement des éprouvettes (C41, C61, C81).

Le tableau ci-dessous résume les valeurs maximales des efforts obtenus en MPa pour les trois éprouvettes (C41, C61, C81). Ainsi que les courses (en mm) correspondantes pour chaque éprouvette.

	C41	C61	C81
F_{Rr} (MPa)	4,20	4,90	6,20
La course (mm)	0,80	0,60	1,00

Tableau III.2 : Lecture des données de la courbe graphique (C41, C61, C81).

❖ Description de la figure III.4

La figure III.4 représente la variation de l'effort de l'écrasement de chaque éprouvette (C41, C61, C81) respectivement en fonction de la course de compression, réunies dans un même graphe.

Les trois courbes présentent presque la même allure. On remarque sur les deux courbes C41 et C61 une partie parabolique concave jusqu'à une charge de 2.5 MPa et pour la courbe C81 une partie parabolique concave jusqu'à une charge de 4MPa. Ensuite une partie presque linéaire jusqu'à 4 MPa, 4,7 MPa, 6 MPa pour les courbes C41, C61, C81 respectivement avant l'effort maximal de rupture et enfin une partie parabolique convexe qui comprend le point de rupture.

❖ Concernant le tableau III.2

Il est clair que l'effort maximal à la rupture augmente en fonction de la charge de compactage des éprouvettes. La valeur maximale (environ 19 MPa) est enregistrée pour l'éprouvette C81 et pour l'éprouvette C61 une valeur de (4,9 MPa) et pour la courbe C41 une valeur minimal (4,2 MPa).

En ce qui concerne les courses correspondantes aux valeurs extrêmes de l'effort maximal, on remarque une différence : nous avons enregistré la plus grande valeur pour l'éprouvette C81 (1 mm) ; concernant l'éprouvette C41 la valeur enregistrée est égale 0,8 mm ; et la valeur minimale est enregistrée pour C61.

❖ Interprétation des résultats

L'allure des trois courbes sont presque la même pour les trois éprouvettes. Au début l'allure concave (<2 MPa) peut être justifié par la présence de porosité dans chaque éprouvette. Ensuite il y a une variation linéaire de l'effort en fonction de la course. Ceci est dû à la fermeture des pores et à l'interférence des grains entre eux à l'intérieur des éprouvettes (zone presque élastique). Finalement, l'augmentation de l'effort mène à une rupture, après cela la force diminue.

Grâce à l'analyse de courbe nous pouvons en déduire que l'éprouvette C81 est la plus résistante. La pression de compactage joue un rôle très important pour la dureté et la densité de l'éprouvette.

D'après les résultats obtenus sur les deux figures, nous pouvons conclure que les éprouvettes en kaolin sont plus solides que leurs homologues en chaux, ceci en raison de la composition chimique des deux liants en plus des transformations chimiques survenues au cours de la cuisson de l'éprouvette.

III.2.2. Essai brésilien (de traction)

III.2.2.1. Présentation de l'essai brésilien [18]

L'essai brésilien est appelé aussi essai de traction indirect, il est utilisé dans l'étude pour identifier les propriétés mécaniques des matériaux. Pour déterminer la résistance à la traction, l'essai brésilien est utilisé. La rupture de l'éprouvette est le résultat de l'effet de tension latérale pour porter la pression exercée par la machine d'essai sur l'éprouvette. Ce dernier est cylindrique et est placé entre les deux plateaux d'une presse de compression en position horizontale.

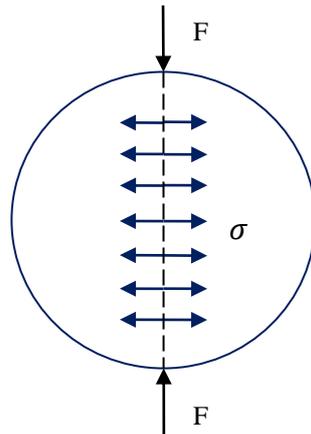


Figure III.5 : Principe de l'essai brésilien

La résistance à la traction est calculée à partir de l'équation : $\sigma = \frac{2F}{\pi DL}$ (III.1)

Avec :

F : La force appliquée sur l'éprouvette.

L : La longueur de l'éprouvette.

D : Le diamètre de l'éprouvette.

III.2.2.2. Résultats de l'essai brésilien

La figure III.1 montre les exemples de traction en essai brésilien des éprouvettes K et C.

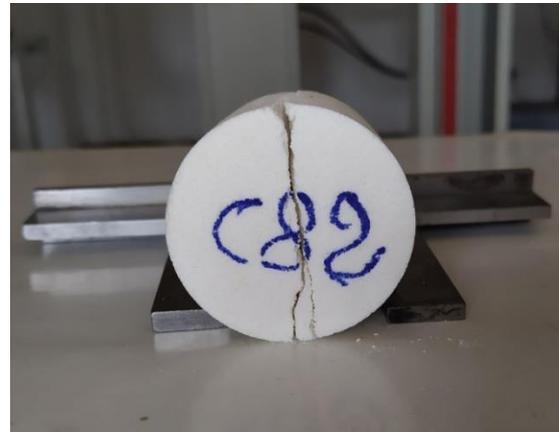


Figure III.6 : Mode de traction (essai brésilien).

Les essais de traction que nous avons effectués ont été réalisés aussi sur la même machine (Zwick Z250) et les résultats obtenus pour les éprouvettes (K42, K62 et K82) sont représentés sur la figure III.7

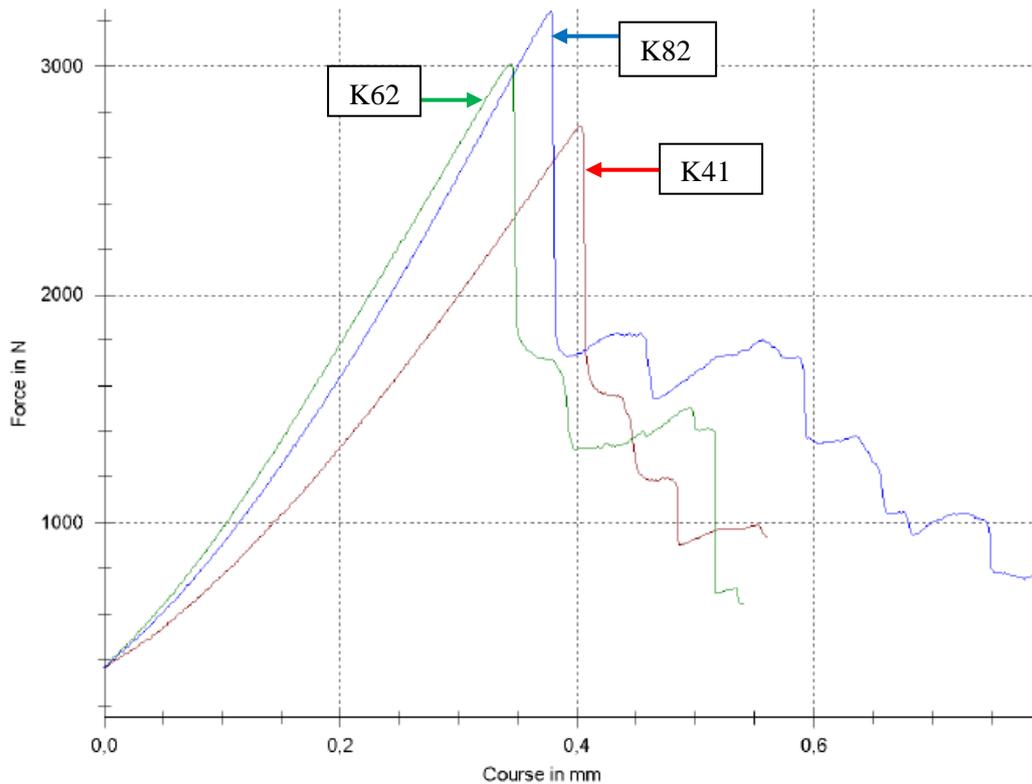


Figure III.7 : Résultats de l'essai brésilien des éprouvettes (K42, K62, K82).

Les valeurs maximales des efforts obtenues en (MPa) après avoir effectué l'essai brésilien (traction) ainsi que les courses en (mm) pour les trois éprouvettes (K42, K62, K82) sont résumé dans le ci-dessous :

	K42	K62	K82
F_{Rt} (N)	2700	3000	3250
La course (mm)	0,41	0,35	0,88

Tableau III.3 : Lecture des données de la courbe graphique (K42, K62, K82).

De (III.1) : σ (K42) = 0,63 MPa.

σ (K62) = 0,69 MPa.

σ (K82) = 0,74 MPa.

❖ Description de la figure III.7

La figure III.7 représente la variation de la force de traction pour les trois éprouvettes (K42, K62, K82) par rapport sa course.

D'après cette figure des courbes ont la même allure, elles se composent d'une partie parabolique concave jusqu'à une force de 750 N. Il y a ensuite une partie presque linéaire jusqu'à 2700 N, 3000 N et 3250 N avant la force maximale de rupture.

❖ D'après le tableau III.3

Nous pouvons conclure que la valeur maximale à la rupture dépend de la charge de compactage c'est-à-dire que plus la pression de compactage est élevée, plus la valeur maximale de rupture est grande. La valeur maximale (presque 3250 N) est enregistrée pour l'éprouvette K82 et la valeur minimale (2700 N) pour l'éprouvette K42. La valeur est intermédiaire (3000 N) pour l'éprouvette K62.

En ce qui concerne les courses correspondantes aux valeurs extrêmes de la force maximale pour K42, K62 et K82 elles sont de 0,41 mm, 0,35 mm et 0,88 mm respectivement.

❖ Interprétation des résultats

L'allure des trois courbes sont presque la même pour les trois éprouvettes. Au début l'allure est concave (<750 N), ce qui peut être expliqué par la présence d'espace vide entre les grains à l'intérieur des éprouvettes. Ensuite il y a une variation presque linéaire due à la présence d'une zone élastique et les particules des éprouvettes ont une cohésion entre elles, jusqu'à la fin de rupture de ces éprouvettes où la force diminue.

Donc l'éprouvette K82 possède une bonne résistance à la traction par rapport aux éprouvettes K42 et K62.

Nous pouvons conclure que lorsque la pression de compactage de l'éprouvette est grande elle possède une résistance à la traction très élevée.

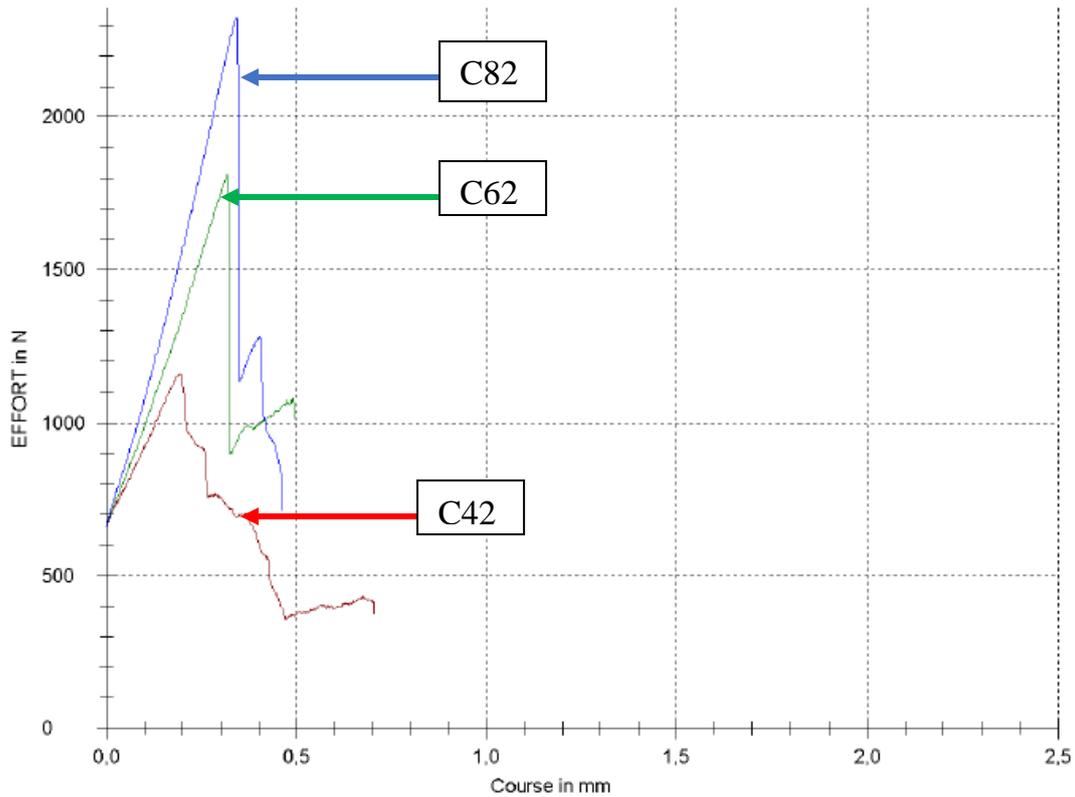


Figure III.8 : Résultats de l'essai brésilien des éprouvettes (C42, C62, C82).

Les valeurs maximales des efforts obtenues en (MPa) après avoir effectué l'essai brésilien (traction) ainsi que les courses en (mm) pour les trois éprouvettes (C42, C62, C82) sont résumés dans le tableau suivant :

	C42	C62	C82
F_{Rt} (N)	1150	1800	2300
La course (mm)	0,15	0,32	0,35

Tableau III.4 : Lecture des données de la courbe graphique (C42, C62, C82).

De (III.1) : σ (C42) = 0,27 MPa.

σ (C62) = 0,41 MPa.

σ (C82) = 0,51 MPa.

❖ Description de la figure III.8

La figure III.8 montre la variation de la force des éprouvettes C42, C62, C82 lors de l'essai brésilien avec les pressions 400 kg/cm², 600 kg/cm² et 800 kg/cm², en fonction de la course.

D'après cette figure, les courbes ont la même tendance, elles se composent d'une partie parabolique concave jusqu'à une force de 700 N, ensuite une partie presque linéaire jusqu'à 1150 N, 1800 N, 2300 N avant la force maximale de rupture direct.

❖ D'après le tableau III.4

Nous pouvons conclure que la valeur maximale à la rupture dépend de la charge de compactage. La valeur maximale (presque 2300 N) est enregistrée pour l'éprouvette C82 et une valeur de (1800 N) pour l'éprouvette C62 et la valeur minimale de (2300 N) est enregistrée pour l'éprouvette C42.

Par contre les courses correspondantes aux valeurs extrêmes de la force maximale pour les éprouvettes C42, C62 et C82 sont 0,15 mm, 0,32 mm et 0,35 mm respectivement.

❖ Interprétation des résultats

L'allure des trois courbes est aussi presque la même pour les trois éprouvettes. Pour la partie inférieure (concave) (<700 N) ce phénomène est dû à la présence du vide entre les particules des éprouvettes. Il y a ensuite une partie presque linéaire, dû au fait que les éprouvettes se sont progressivement compactées jusqu'à ce que les pores disparaissent. Enfin les éprouvettes se sont cassés aux valeurs maximale correspondantes et la force diminue.

Nous pouvons en déduire que l'éprouvette C82 est la plus résistante que l'éprouvette C62 et l'éprouvette C42. Donc le pressage est un facteur majeur qui influe dans la porosité de les éprouvettes; plus l'éprouvettes est bien pressé, plus elle devient très compacte et ses particules ont une grande cohésion et plus sa densité est grande.

Sur la base de l'analyse des résultats des courbes de l'essai brésilien sur les éprouvettes, il a été constaté que les éprouvettes qui ont été fabriquées à base de kaolin sont plus durables que celles fabriquées à partir de la chaux. Cela est dû à la différence de leur composition chimique et aux différents changements de phases de transformations lors de la cuisson

III.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté et décrit le comportement mécanique des éprouvettes préparées avec kaolin (K) et de la chaux (C). D'une façon générale les premiers présentent une plus grande résistance mécanique, ce qui montre qu'ils ont une meilleure cohésion.

Conclusion générale

Cette étude nous a permis de travailler sur l'élaboration des céramiques réfractaires. C'est un domaine très vaste et d'une grande importance sur les plans scientifique et industriel.

La visite effectuée à l'usine AFRICAVÉR nous a permis de prendre connaissance des défis auxquels fait face l'industrie verrière et l'extrême importance que revêt le bon choix aussi qu'une bonne mise œuvre des matériaux réfractaires adaptés à cette branche industrielle.

Le travail pratique que nous avons mené a consisté en la formulation de réfractaire à base de silice. Ce type de réfractaire présente de nombreux avantages, qu'ils soient techniques ou économiques ; la matière première est relativement abondante dans le milieu naturel.

Nous avons sélectionné une matière qui soit la plus avantageuse parmi cinq ; c'est-à-dire celle qui a le taux de silice le plus élevé. Comme liant, nous avons utilisé le kaolin et la chaux. Avec le kaolin, la préparation des éprouvettes était plus aisée et la cohésion des échantillons plus élevée. Le défaut de ce liant est qu'il apporte de l'alumine qui réduit la réfractérite. Avec la chaux, la préparation des éprouvettes est plus délicate à cause d'une plus grande fragilité du mélange moulé avant cuisson. Mais le grand avantage de la chaux utilisée en faible quantité est qu'elle n'affaiblit pas la réfractérite. C'est pour cela que la température de cuisson a été poussée à 1600 °C.

Les essais mécaniques à froid ont montré que le liant argileux (kaolin) donne une grande résistance mécanique.

Comme perspectives un aspect important à développer est celui de la maîtrise de la densité du produit final afin de réaliser des produits denses ou bien isolants.

Références bibliographiques

- [1] Norme AFNOR, B40-001, Classification des produits réfractaires façonnés denses Partie 1 produits de la série silice-alumine, 1998. Cité dans : **SOLTANI. H**, Etude du problème d'usure des briques réfractaires en MgO- C mémoire de master, université BADJI Mokhtar-Annaba, 2018.
- [2] **RABEHI. B**, Evaluation des propriétés réfractaire et cimentaires du kaolin de Djebel Debbagh thèse de doctorat, université M'HAMED Bougara-Boumerdes, 2013.
- [3] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Diagramme-phases-sio2-al2o3.jpg>.
- [4] **POIRIER. J**, Les céramiques réfractaires de l'élaboration aux propriétés d'emploi. Verres céramique & composites, vol.1, N°2 (2011) 28-42.
- [5] **SOLTANI. H**, Etude du problème d'usure des briques réfractaires en MgO- C mémoire de master, université BADJI Mokhtar-Annaba, 2018.
- [6] <http://www.refra.com/fr/ciment-produit-réfractaires-façonnées>.
- [7] <http://www.europages.fr/produits-refractaires-nonfacones/fontes-refractories/cpied-5616550.html>.
- [8] <http://www.prosiref.com/briques/briques-refractaires-dense.html>.
- [9] fr.yufengrefractory.com/brique-r%C3%A9fractaire-isolante-%28IFB-2800%29-pd46230016.html.
- [10] **COLLIGNON. B**, Séchage de bétons réfractaires : expérimentation, modalisation et influence d'un ajout de fibre polymère thèse de doctorat, Université Lorraine, 2009.
- [11] <http://www.pd-refractories.cz/en/glass>.
- [12] **BRUNK. F**, Silica briks for modern coke oven batteries, Sonderdruck aus "cokemaking international", seite 37-40, Hefth 2/2000.

[13] **ALMARAHLÉ GAZZÉ**, Production of silica-refractory bricks from white sand, American journal of applied science 2(1) 465-468, 2005.

[14] **RAKOTOSON. N. H.**, Elaboration et caractérisation de brique réfractaire a base de liant geopolymere et de bauxite calcine mémoire de master, Université D'Antananarivo, 2015.

[15] **Kotouček. M, Kovář. P, Lang. K, Vašica. L, Nevřivová. L**, Dense Silica – Properties, Production and Perspectives, refractories WORLDFORUM 5, (2013) [2].

[16] **BELAID. A.**, Modélisation du comportement thermomécanique des céramiques par la mécanique de l'endommagement : cas des réfractaires silico-alumineux façonnées thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2012.

[17] **<http://www.ametektest.fr>**.

[18] **HABIB. P, MORLIER. P, et RADENKOVIC. D.**, L'application de l'essai brésilien dans la mécanique des roches, rhéologie et mécanique des sols, Springer, Berlin, Heidelberg, 1966.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire de fin d'étude comprend la production de deux types de matériaux réfractaires à base de silice à partir de matériaux locaux. représentés dans l'argile de DJBAL EL-DABAHG (DD3) et la chaux et l'étude de leur comportement mécanique. Pour cela, nous avons effectué plusieurs essais sur des éprouvettes cylindriques de diamètre et de hauteur égaux à 50mm, qui ont été réalisés au niveau du hall à l'aide d'un outil de moulage spécialement fabriqué à cet effet. Les éprouvettes ont été réalisées avec une compaction à différentes pressions (400 kg/cm², 600bar, 800bar) et cuisson à deux températures différentes (1500C°, 1600C°). Les résultats que nous avons obtenus, ont prouvé que les éprouvettes en kaolin ont la capacité de résister à des pressions élevées, contrairement à ceux en chaux, mais les deux peuvent être utilisés comme isolants réfractaires.

Mots clés : Matériaux réfractaires, kaolin, chaux, éprouvettes, cuit

ملخص

يتضمن الهدف من العمل المقدم في أطروحة نهاية الدراسة، إنتاج نوعين من المواد المقاومة للصهر القائمة على السيليكات انطلاقاً من المواد المحلية المتمثلة في طين جبال الدباغ (DD3) والجير ودراسة سلوكهم الميكانيكي. للقيام بذلك، أجرينا العديد من الاختبارات على عينات أسطوانية بقطر وارتفاع يساوي 50 مم، والتي تم إجراؤها على مستوى البهو التكنولوجي باستخدام أداة قولبة مصنوعة خصيصاً لهذا الغرض. تم تصنيع العينات بضغط مختلفة (400 بار، 600 بار، 800 بار) وطبخها في درجتي حرارة مختلفتين (1500 درجة مئوية، 1600 درجة مئوية). أثبتت النتائج التي حصلنا عليها أن عينات الكاولين لديها القدرة على تحمل الضغوط العالية، على عكس الجير، ويمكن استخدام كلاهما كعوازل حرارية.

كلمات مفتاحية: مواد مقاومة للصهر، الكاولين، الجير، العينات، طبخ

Abstract

The aim of the work presented in this essay includes the production of two types of silica-based refractory materials from local materials present in the clay of DJBAL EL-DABAHG (DD3) and lime, and the study of their mechanical behavior. To do this,

we carried out several tests on cylindrical specimens of diameter and height equal to 50mm, which were performed in the hall of Technology using a molding tool specially manufactured for this purpose. The test pieces were made by compaction at different pressures (400bar, 600bar, 800bar) and by cooking at two different temperatures (1500C °, 1600C °). The results we obtained proved that kaolin specimens can withstand high pressures, unlike lime ones, but they both can be used as refractory insulators.

Key words: materials refractory, kaolin, lime, specimens, cooked