

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**

**Université Dr Moulay Tahar de Saida**



**Faculté des sciences et technologie**

**Département de chimie**

**Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de licence**

**Spécialité : Chimie**

**Option : Génie des matériaux**

**Thème**

**Valorisation des déchets en verre dans l'industrie des  
briques réfractaires**

**Présenté par :**

- **Mr Hakmi Mohamed Amine**
- **Mr Hamdani Mohamed Tarek**

**Soutenu le 02/07/2012 devant la commission de jury composée de :**

<b>M<sup>me</sup> N. Laouej</b>	<b>Président</b>
<b>Mr A. Elazouti</b>	<b>Examineur</b>
<b>M<sup>me</sup> M. Reguig</b>	<b>Examineur</b>
<b>M<sup>me</sup> O. Belarbi</b>	<b>Rapporteur</b>

**Promotion 2011 - 2012**

## Remerciements



Tout d'abord, nous remercions **Allah** tout puissant pour nous avoir donné le privilège d'étudier et de suivre le chemin de la science et pour sa bénédiction.

Nous remercions notre encadreur Mme **O.Belarbi** qui nous a consacré beaucoup de son temps, ainsi que pour ses précieux conseils et sa grande patience.

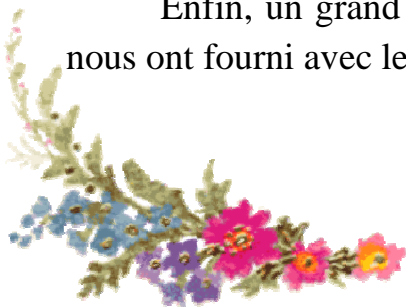
Nous remercions les membres du jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Il y a de nombreuses personnes que nous tenons sincèrement et chaleureusement à remercier. En premier lieu, tout le personnel d'ABRA-Saida-particulièrement le responsable du laboratoire de contrôle qualité Mr Aek. Aneur, qui n'ont ménagé aucun effort pour mener à bien notre travail au sein de l'entreprise.

En second lieu nous tenons à remercier le personnel de la cimenterie de Saida pour leur accueil et leur amabilité.

Ensuite, Nous remercions tout le personnel des laboratoires (Chimie, Environnement, Biologie) de l'université Dr. Moulay Tahar particulièrement Melle S. Medahi, Melle H. Saidi, Mr S. Mahmoudi, Melle F. Kourat...

Enfin, un grand merci pour les différents vitriers de la ville de Saida qui nous ont fourni avec le sourire le déchet en verre utilisé dans notre travail.



*Merci à tous.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste mémoire à :*

*\*Mon très cher père\**

*\* L'espoir de mon existence ma mère\**

*\* Ma très chère sœur\**

*\*Mes très chers frères\**

*\* toute la famille HAKMI\**

*\*Mon binôme Tarek \**

*\* Tous mes amis (es) que j'ai côtoyé durant ma vie*

*\**

*HAKMI Med Amine*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste mémoire à :*

*\*Mon très cher père\**

*\* L'espoir de mon existence ma mère\**

*\* Mes chers frères et mes chères sœurs\**

*\* toute la famille HAMDANI \**

*\*Mon binôme Med\**

*\* Tous mes amis (es) que j'ai côtoyé durant ma vie*

*\**

*HAMDANI Med Tarek*

# Sommaire

Liste des figures .....	1
Liste des tableaux .....	3
Introduction générale.....	5

## Chapitre I: Brique réfractaire

Introduction .....	7
Propriétés des briques réfractaires.....	7
Procédé de fabrication .....	8
Domaine d'utilisation des briques réfractaires .....	8

## Chapitre II: Matières premières dans l'industrie des briques réfractaires

II.1. Les argiles.....	10
II.1.1. Les minéraux argileux .....	10
II.1.2. La structure des minéraux argileux .....	11
II.1.2.1. Les illites.....	11
II.1.2.2. Les montmorillonites .....	11
II.1.2.3. Chlorite .....	11
II.2. Les argiles réfractaires .....	12
II.2.1. Le kaolin .....	13
II.2.1.1. La kaolinite .....	13
II.2.1.2. L'halloysite :.....	14
II.3. Matières dégraissantes :.....	14
II.3.1. Fonction de la matière dégraissante : .....	14
II.3.1.2. La chamotte .....	14

## Chapitre III : Le verre

III.1. Introduction: .....	16
III.2. Définition du verre .....	16
III.3. Les propriétés du verre .....	16
III.3.1. Propriétés physiques.....	16
III.3.2. Propriétés chimiques .....	17
III.3.3. Propriétés thermiques.....	17
III.3.4. Propriétés acoustiques .....	17
III.4. La composition du verre.....	18
III.4.1. Les oxydes formateurs (les vitrifiants).....	18
La silice : (dioxyde de silicium $\text{SiO}_2$ ) .....	18
L'anhydride borique (le bore ou borax anhydre $\text{B}_2\text{O}_3$ ) .....	18
L'anhydride phosphorique (le phosphore $\text{P}_2\text{O}_5$ ) .....	18
III.4.2. Les oxydes modificateurs.....	18

III.4.2.1. Les fondants (oxydes alcalins) .....	18
L'oxyde de sodium (la soude Na <sub>2</sub> O) .....	19
L'oxyde de potassium (K <sub>2</sub> O).....	19
L'oxyde de magnésium (MgO) .....	19
III.4.2.2. Les stabilisants: (oxydes alcalino-terreux) .....	19
L'oxyde de calcium (CaO).....	19
L'oxyde de zinc (ZnO) .....	19
L'oxyde de fer (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).....	19
L'oxyde de plomb (PbO).....	20
III.5. La structure du verre .....	20
III.6. Les différents types de verre .....	22
III.6.1. Les verres sodocalciques .....	22
III.6.2. Les verres borosilicates .....	23
III.6.3. Les verres au plomb .....	23
III.6.4. Le verre de silice .....	23
III.6.5. Les vitrocéramiques (ou vitro cristallins).....	24

## **Chapitre IV : Le recyclage du verre**

IV. Le recyclage du verre : .....	25
IV.1. Recyclage du verre en Algérie .....	26
IV.2. Recyclage du verre en Europe .....	26
IV.3. Recyclage du verre en Asie.....	27
IV.4. Recyclage du verre en Amérique.....	27
IV.5. Domaines de recyclage des déchets de verre .....	28

## **Chapitre V: Méthodes d'analyse**

V.1. Caractérisation des propriétés à froid .....	29
V.1.1. Détermination de la perte au feu PAF .....	29
V.1.2. Détermination du taux d'absorption d'eau ABS .....	29
V.1.3. Calcul de la densité d.....	30
V.1.4. Détermination de la porosité apparente $\pi_a$ .....	30
V.1.5. Détermination des retraits .....	31
V.1.5.1. Détermination du retrait de séchage R <sub>s</sub> .....	31
V.1.5.2. Détermination du retrait de cuisson R <sub>c</sub> .....	31
V.1.5.3. Détermination du retrait total R <sub>t</sub> .....	32
V.2. Caractérisation des propriétés à chaud .....	32
V.2.1. Détermination de la résistance pyroscopique .....	32
V.2.2. Détermination de la dilatation thermique $\alpha$ .....	32
V.3. Spectrométrie de fluorescence X.....	33

## **Chapitre VI: Caractérisation des matières premières**

VI.1. Présentation de l'unité des abrasifs (ABRAS) –Saida- : .....	34
VI.2. Matières premières utilisées : .....	34

VI.2.1. Les liants : .....	35
VI.2.3. Le Kaolin de Tamazert (KT) : .....	35
VI.2.3.1. Gisement : .....	35
VI.2.3.2 Structure : .....	35
VI.2.3.3 Composition chimique : .....	35
VI.2.4. Le Kaolin de Djebbel Debbagh N <sup>0</sup> 3 (Kaolin DD3) : .....	35
VI.2.4.1. Gisement : .....	35
VI.2.4.2. Structure : .....	35
VI.2.4.3. Composition chimique : .....	35
VI.3. LA matière dégraissante : .....	36
VI.3.1. La chamotte C : .....	36
VI.3.2. Composition chimique : .....	36
VI.4. Déchets de verre : .....	36
VI.4.1. Composition chimique du déchet de verre : .....	37
VI.4.2. Traitement du déchet de verre: .....	37
VI.5. Confection des briques: .....	38

## **Chapitre VII: Influence de la composition de la chamotte sur les propriétés des briques réfractaires**

VII. Influence de la composition de la chamotte sur les propriétés des briques réfractaires ...	40
VII.1. Composition chimique .....	40
VII.1.1. Caractérisation des propriétés à froid .....	41
VII.1.2. Détermination de la perte au feu PAF .....	41
VII.1.3. Détermination du taux d'absorption d'eau ABS .....	41
VII.1.4. Détermination de la densité d .....	42
VII.1.5. Détermination de la porosité apparente $\pi_a$ .....	43
VII.1.6. Détermination du retrait R .....	44
VII.1.7. Discussion .....	44
VII.1.8. Conclusion .....	45
VII.2. Caractérisation des propriétés à chaud : .....	45
VII.2.1. Détermination de la résistance pyroscopique : .....	45
VII.2.3. Détermination de la dilatation thermique $\alpha$ : .....	45
VII.2.4. Discussion .....	46
VII.1.5. Conclusion .....	46
VII.3. Aspect macroscopique des briques réfractaires confectionnées : .....	46

## **Chapitre VIII: Influence de la granulométrie de la chamotte sur les propriétés des briques réfractaires**

VIII.1. Influence de la granulométrie de la chamotte sur les propriétés des briques réfractaires .....	48
VIII.1.1. Caractérisation des propriétés à froid .....	48
VIII.1.1.1. Détermination de la perte au feu PAF .....	48
VIII.1.1.3. Détermination du taux d'absorption d'eau ABS .....	48
VIII.1.1.4. Détermination de la densité d .....	49

VIII.1.1.5. Détermination de la porosité apparente $\pi_a$ .....	50
VIII.1.1.6. Détermination du retrait R.....	51
VIII.1.1.7. Discussion .....	52
VIII.1.1.8. Conclusion.....	52
VIII.1.2. Caractérisation des propriétés à chaud .....	52
VIII.1.2.1 Détermination de la résistance pyroscopique.....	52
VIII.1.2.2. Détermination de la dilatation thermique $\alpha$ .....	52
VIII.1.2.3. Discussion .....	53
VIII.1.2.4. Conclusion.....	53
VIII.3. Aspect macroscopique des briques réfractaires comportant du verre de granulométrie ( $V_3+V_4$ ).....	53

## **Chapitre IX: Influence du taux de substitution de la chamotte par du déchet en verre sur les propriétés des briques réfractaires**

IX. Influence du taux de substitution de la chamotte par du déchet en verre sur les propriétés des briques réfractaires.....	56
IX.1. Caractérisation des propriétés à froid.....	56
IX.1.1. Détermination de la perte au feu PAF.....	56
IX.1.2. Détermination du taux d'absorption d'eau ABS.....	57
IX.1.3. Détermination de la porosité apparente $\pi_a$ : .....	58
IX.1.4. Détermination de la densité d.....	60
IX.1.5. Détermination du retrait R .....	62
IX.1.5. Discussion .....	64
IX.1.5. Conclusion .....	64
IX.2. Caractérisation des propriétés à chaud :.....	64
IX.2.1. Détermination de la résistance pyroscopique : .....	64
IX.2.2. Détermination de la dilatation thermique $\alpha$ : .....	65
IX.2.3. Discussion .....	66
IX.2.4. Conclusion .....	66
Conclusion générale .....	67
Résumé.....	69
Références bibliographiques .....	70



# Liste des figures

<b>Figure 01</b> : Composition des déchets solides en Algérie .....	6
<b>Figure 02</b> : La structure des couches octaédriques et tétraédriques .....	11
<b>Figure 03</b> : La structure des illites.....	11
<b>Figure 04</b> : La structure de chlorite .....	12
<b>Figure 05</b> : Cristaux de chlorite vus au microscope électronique à balayage .....	12
<b>Figure 06</b> : La structure d'un minéral de type 1 : cas de la kaolinite.....	13
<b>Figure 07</b> : Transformation lors de la cuisson d'une argile à haute température .....	15
<b>Figure 08</b> : Tétraèdre de $\text{SiO}_4$ .....	21
<b>Figure 09</b> : La structure de $\text{SiO}_2$ cristallisée d'après ZACHARIASEN .....	21
<b>Figure 10</b> : Structure d'un verre de silicate de soude d'après WARREN ET BISCOE.....	22
<b>Figure 11</b> : Recyclage du verre d'emballage (bouteilles) .....	25
<b>Figure 12</b> : Recyclage du verre en France.....	27
<b>Figure 13</b> : spectrometre de fluorescence X(cimenterie de Saida) .....	33
<b>Figure 14</b> : Déchet de verre collecté en vrac.....	37
<b>Figure 15</b> : Déchet de verre $V_1$ .....	38
<b>Figure 16</b> : Déchet de verre $V_2$ .....	38
<b>Figure 17</b> : Déchet de verre $V_3$ .....	38
<b>Figure 18</b> : Déchet de verre $V_4$ .....	38
<b>Figure 19</b> : Presse hydraulique dans l'atelier mécanique d'ABRAS. ....	39
<b>Figure 20</b> : Taux des principaux oxydes dans les différents composants de la matière dégraissante. ....	40
<b>Figure 21</b> : Influence de la composition de la chamotte sur le Taux d'absorption ABS. ....	42
<b>Figure 22</b> : Influence de la composition de la matière dégraissante sur la densité d. ....	44
<b>Figure 23</b> : Influence de la composition de la matière dégraissante sur la porosité apparente .....	44
<b>Figure 24</b> : brique refractaire avant cuisson.....	46
<b>Figure 25</b> : brique refractaire après cuisson .....	46
<b>Figure 26</b> : Brique de l'unité abrasifs-SAIDA- .....	47,54
<b>Figure 27</b> : Brique avec déchet de verre granulométrie grossière.....	47
<b>Figure 28</b> : Taux d'absorption ABS en fonction de la granulométrie du verre introduit.....	49
<b>Figure 29</b> : Taux de porosité $\pi_a$ en fonction de la granulométrie du verre introduit. ....	51

<b>Figure 30</b> : Brique avec déchet de verre granulométrie grossière.....	54
<b>Figure 31</b> : Taux d'absorption ABS en fonction du taux de substitution de la chamotte avec du verre ( $V_1+V_2$ ).....	57
<b>Figure 32</b> : Taux d'absorption ABS en fonction du taux de substitution de la chamotte avec du verre ( $V_3+V_4$ ). .....	58
<b>Figure 33</b> : Taux de porosité $\pi_a$ en fonction du taux de substitution de la chamotte avec du verre ( $V_1+V_2$ ). .....	59
<b>Figure 34</b> : Taux de porosité $\pi_a$ en fonction du taux de substitution de la chamotte avec du verre ( $V_3+V_4$ ). .....	60
<b>Figure 35</b> : Densité d en fonction du taux de substitution de la chamotte avec du verre ( $V_1+V_2$ ).....	61
<b>Figure 36</b> : Densité d en fonction du taux de substitution de la chamotte avec du verre ( $V_3+V_4$ ).....	61
<b>Figure 37</b> : Taux de retrait de séchage $R_s$ en fonction du taux de substitution ( $V_3+V_4$ ). .....	63
<b>Figure 38</b> : Taux de retrait de cuisson $R_c$ en fonction du taux de substitution ( $V_3+V_4$ ).....	63

# Liste des tableaux

<b>Tableau 01:</b> Composition chimique des principaux types de verres.....	20
<b>Tableau 02:</b> Capacité de recyclage.....	26
<b>Tableau 03 :</b> Taux de Matières recyclées selon le type, en 2008 au Canada .....	28
<b>Tableau 04:</b> Type de briques réfractaires commercialisées (année 2011) .....	34
<b>Tableau 05:</b> Composition chimique du Kaolin de Tamazert .....	35
<b>Tableau 06:</b> Composition chimique du Kaolin de Djebbel Debbagh .....	36
<b>Tableau 07:</b> Composition chimique de la chamotte.....	36
<b>Tableau 08:</b> Composition chimique du déchet de verre.....	37
<b>Tableau 09:</b> Composition des différents échantillons .....	39
<b>Tableau 10:</b> Composition chimique de la matière dégraissante.....	40
<b>Tableau 11:</b> la perte au feu PAF dans les briques comportant du verre ( $V_1+V_2$ ) .....	41
<b>Tableau 12:</b> Taux d'absorption d'eau ABS dans les briques comportant du verre ( $V_1+V_2$ ) ..	42
<b>Tableau 13:</b> la densité $d$ des briques comportant du verre ( $V_1+V_2$ ).....	42
<b>Tableau 14:</b> la porosité apparente $\pi_a$ dans les briques comportant du verre ( $V_1+V_2$ ).....	43
<b>Tableau 15:</b> les retraits dans les briques comportant du verre ( $V_1+V_2$ ).....	44
<b>Tableau 16:</b> la résistance pyroscopique dans les briques comportant du verre ( $V_1+V_2$ ) .....	45
<b>Tableau 17:</b> la dilatation thermique $\alpha$ dans les briques comportant du verre ( $V_1+V_2$ ) .....	45
<b>Tableau 18:</b> La perte au feu PAF dans les briques confectionnées.....	48
<b>Tableau 19:</b> Taux d'absorption d'eau ABS dans les briques confectionnées .....	49
<b>Tableau 20:</b> La densité $d$ des briques composées de verre à différentes granulométries.....	50
<b>Tableau 21:</b> La porosité apparente $\pi_a$ dans les briques composées de verre à différentes granulométries .....	50
<b>Tableau 22:</b> Les retraits $R$ dans les briques composées de verre à différentes granulométries .....	51
<b>Tableau 23:</b> La résistance pyroscopique dans les briques composées de verre à différentes granulométries.....	52
<b>Tableau 24:</b> La dilatation thermique $\alpha$ dans les briques composées de verre à différentes granulométries .....	53
<b>Tableau 25:</b> la perte au feu PAF dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_1+V_2$ ).....	56

<b>Tableau 26:</b> la perte au feu PAF dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_3+V_4$ ).....	56
<b>Tableau 27:</b> Le taux d'absorption d'eau ABS dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_1+V_2$ ).....	57
<b>Tableau 28:</b> Taux d'absorption d'eau ABS dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_3+V_4$ ).....	58
<b>Tableau 29:</b> La porosité apparente $\pi_a$ dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_1+V_2$ ).....	59
<b>Tableau 30:</b> la porosité apparente $\pi_a$ dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_3+V_4$ ).....	59
<b>Tableau 31:</b> la densité d des briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_1+V_2$ ) .....	60
<b>Tableau 32:</b> la densité d dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_3+V_4$ ) .....	61
<b>Tableau 33:</b> Les retraits R dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_1+V_2$ ) .....	62
<b>Tableau 34:</b> Les retraits R dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_3+V_4$ ) .....	62
<b>Tableau 35:</b> La résistance pyroscopique dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_1+V_2$ ).....	64
<b>Tableau 36:</b> La résistance pyroscopique dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_3+V_4$ ).....	65
<b>Tableau 37:</b> La dilatation thermique $\alpha$ dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_1+V_2$ ).....	65
<b>Tableau 38:</b> La dilatation thermique $\alpha$ dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_3+V_4$ ).....	66

# Introduction générale

## Introduction générale :

Un matériau réfractaire est un produit qui conserve ses caractéristiques physico-chimiques jusqu'à des valeurs élevées de température, la fusion du matériau n'apparaissant qu'au-delà des conditions d'emploi. Les normes internationales [1] stipulent que «les matériaux réfractaires sont des matières et produits autres que les métaux et alliages (sans que soient exclus ceux contenant un constituant métallique), dont la résistance pyroscopique est équivalente à 1500°C au minimum ».

En plus de cette résistance pyroscopique élevée, on exige souvent des réfractaires qu'ils aient :

- une bonne résistance aux chocs thermiques
- une faible conductivité thermique
- une bonne résistance à la corrosion (aciéries, four de verrerie...) et à l'érosion (centrales à lit fluidisé circulant LFC...) à hautes températures

Les réfractaires sont divisés en deux grandes familles. Les matériaux façonnés et les non façonnés (ou monolithiques). Les matériaux façonnés sont livrés sous forme de briques, tuiles et pièces de forme. Leur consolidation a lieu par frittage, réaction chimique ou par solidification. Les matériaux non façonnés sont livrés en vrac pour être moulés ou appliqués sur place comme les bétons réfractaires, les pisés ou les masses plastiques [2].

La wilaya de Saida par l'intermédiaire de l'entreprise Abra-Saida s'est engagée à satisfaire les besoins industriels locaux en briques réfractaires.

Or l'unité utilise des matières premières provenant de gisements situés en dehors de la wilaya provenant exactement de l'est algérien, qui comportent surtout des argiles réfractaires: l'argile de Djebel Debbagh n°3 (DD3) et le kaolin de Tamazert (KT).

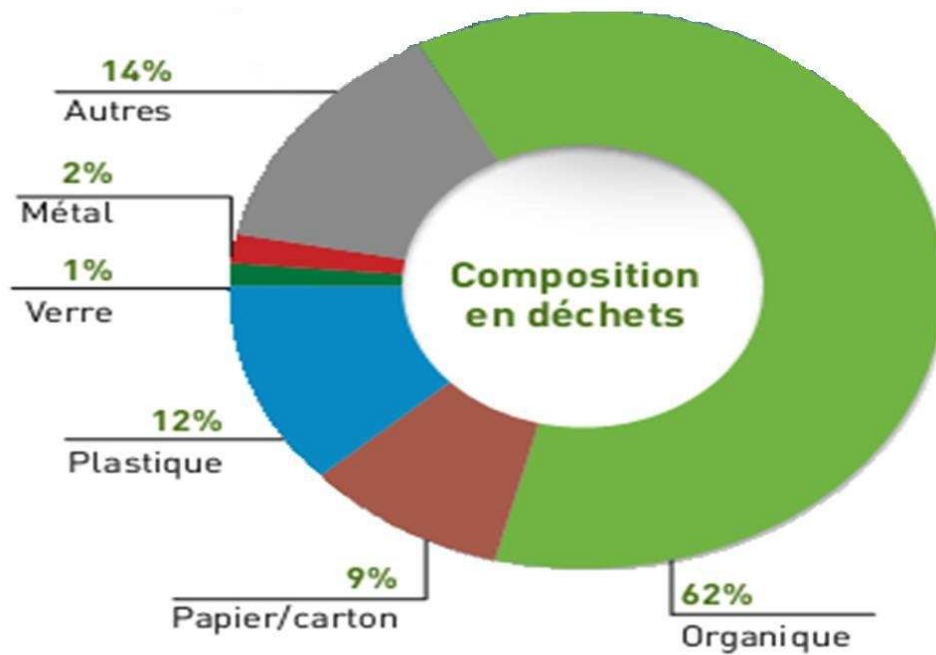
Aussi, Abra-Saida importe la chamotte de l'Autriche afin de pallier ses besoins en cette matière indispensable dans le processus de fabrication des réfractaires.

Cet état des lieux va se répercuter directement sur le prix de revient de la brique réfractaire.

Dans cet ordre d'idées, notre travail est une étude pour contribuer à la fabrication d'un réfractaire en remplaçant progressivement la chamotte par un produit à prix de revient nul.

Notre choix s'est porté sur le déchet en verre. Ce matériau riche en silice est malheureusement peu exploité en Algérie

Ce déchet non dégradable représente 1% de la composition des déchets solides dans notre pays [3].



**Figure 01** : Composition des déchets solides en Algérie [4].

Le déchet verre une fois collecté doit être traité et par la suite broyé.

Nous proposons dans notre travail l'incorporation de ce calcin à différentes granulométries par substitution graduelle de la chamotte.

Les produits obtenus par ce nouveau processus sont évalués en déterminant leurs propriétés à froid et d'autres à chaud.

Cette réalisation pratique nécessite tout d'abord la caractérisation des matières premières utilisées par l'Abra-Saida.

Cette dernière n'effectue aucune analyse sur ces produits de départ et se base seulement sur les fiches techniques accompagnant les matières premières.

Les résultats obtenus sont résumés dans la conclusion générale.

# Chapitre I:

## Brique réfractaire



## **I-Introduction:**

La fabrication de la brique remonte à environ 7 000 ans avant J.C. Les briques ont été utilisées pour la première fois par le peuple grec. Cette première production s'est faite manuellement à l'aide d'outils simples et a été réalisée dans les cités environnantes des deux plus grands fleuves de la région, l'Euphrate et le Tigre.

Les premières briques obtenues ont été fabriquées à partir de matières premières simples, comme la terre ou l'argile. Les briques en terre cuite ont été découvertes et utilisées pour la première fois vers 2500 avant J.C dans la vallée de l'Indus, un fleuve du Pakistan et en Mésopotamie [5]. Actuellement, avec l'évolution de la technologie, des recherches approfondies ont permis de mettre au point des briques plus résistantes, avec une utilisation et un mode de production plus spécifique. Il existe à cet effet plusieurs techniques pour la construction d'une poche ou d'un compartiment pouvant résister à une forte température. Tel est le cas de la mise en place d'un barbecue fixe, d'un four, d'une chaudière, d'une cheminée, d'un foyer ou d'une forge par exemple. La réalisation de ce genre de projet nécessite une étude minutieuse concernant l'emplacement, les ustensiles et les matériaux à utiliser. L'intérieur devant supporter une chaleur considérable, les spécialistes dans le domaine conseillent l'usage de briques réfractaires. Le matériau réfractaire offre l'avantage de pouvoir résister au flux calorifique, ainsi qu'aux effets induits par une température très élevée.

### **I.2. Propriétés des briques réfractaires:**

La brique réfractaire dispose d'une grande capacité de déviation de la chaleur. Ses composants possèdent des caractères qui obéissent à une contrainte des phases traversées ou des milieux physiques. L'utilisation de ces briques permet de garder une chaleur élevée à l'intérieur du compartiment et d'optimiser ainsi la rapidité de la cuisson des aliments, notamment pour le barbecue, mais aussi pour la forge. Ce principe obéit à la loi de la réflexion.

Il s'explique par des propriétés physiques où la chaleur reste dans le plan grâce à un éloignement identique entre l'angle normal de la surface et de l'angle d'incidence. La réfraction thermique agit sur le corps dont le gradient d'agitation moléculaire ou de température doit respecter certaines propriétés variant en fonction de la nature du corps concerné. L'usage spécifique de la brique réfractaire et de ses qualités d'isolant permet une meilleure concentration de la chaleur, offrant la possibilité d'obtenir et de maintenir une température très élevée. Ces matériaux possèdent des propriétés uniques, à savoir le fait de

posséder une inertie thermique élevée, pouvant dépasser les 1800°C [6]. L'inertie thermique permet un échange de la chaleur par rayonnement, convection et conduction pour maintenir une température fixe.

### **I.3. Procédé de fabrication :**

Généralement, la fabrication d'une brique réfractaire est effectuée à partir de vermiculite, de ciment fondu et de coulis réfractaire. Le mélange doit suivre une combinaison stricte, avec des proportionnalités spécifiques à respecter. La vermiculite est un minéral naturel qui possède des propriétés d'exfoliation, entraînant une expansion considérable lorsqu'elle est exposée à une haute température [7].

Formée par l'hydratation de minéraux issus d'une roche volcanique et obtenue suite à un refroidissement du magma, elle est dotée de certaines propriétés optiques avec un indice de réfraction élevé. Pour obtenir une brique réfractaire plus solide, il suffit de remplacer la vermiculite par de la chamotte. L'on obtient le coulis réfractaire grâce à un mélange de chamotte fine en quantité légère, de brique en poudre et d'argile primaire aux propriétés réfractaires spécifiques finement broyée. Il existe deux sortes d'argiles possédant ces caractères, à savoir le kaolin et les argiles réfractaires, également connues sous le nom de terres à feu. Le kaolin est obtenu suite à la décomposition du feldspath, un minéral à base de calcium, de sodium, de potassium et de silicate double d'aluminium. Il possède des caractéristiques rares lui permettant d'atteindre un point de fusion d'une température de 1800°C. Les terres à feu possèdent un point de fusion supérieur à 1500°C. Les qualités dont dispose cette matière permet une utilisation très variée. Elle sert aussi bien à la production de briques réfractaires qu'à la fabrication de la protection externe des véhicules spatiaux. Ce type d'argile possède la particularité d'avoir une composition dénuée de fer. Cependant, il est rarement de couleur blanche. Il existe deux sortes de briques, la brique droite pressée et la brique arrondie pressée. Sa composition varie en fonction du type et de la résistance thermique souhaités.

### **I.4. Domaine d'utilisation des briques réfractaires [8] :**

Les briques réfractaires sont utilisées dans plusieurs domaines :

- Dans la sidérurgie : poches de coulée et de répartition: Dans la production sidérurgique moderne, la poche de coulée à acier est passée au fil du temps de la simple cuve de transport au réacteur métallurgique. Parallèlement se sont accrues les exigences pesant sur

les garnissages et la céramique fonctionnelle. Certains utilisateurs emploient aujourd'hui des poches majoritairement garnies de briques de magnésite fondue haute de gamme

- Dans les cimenteries : On utilise les briques réfractaires dans le briquetage des fours

- Dans les fours de trempes tels que:

Les fours de production céramique, vaisselle et sanitaire.

Les fours de verre.

Les fours de briqueterie.

Les fours de boulangerie.

# Chapitre II:

Matières premières  
dans l'industrie des  
briques réfractaires

## II. Matières premières dans l'industrie des briques réfractaires :

### II.1. Les argiles :

Les matières premières naturelles du système silice-alumine sont très fréquentes dans la nature parmi elles, se trouvent les kaolins et argiles, les quartzites riches en silice et des matières premières riches en alumine telles la bauxite.

Les kaolins et les argiles sont constitués pour l'essentiel de kaolinite comme phase principale. A l'état naturel, la kaolinite pure n'existe pas, elle est souvent associée à d'autres minéraux.

La présence de quartz est fréquente selon le processus géologique de formation des argiles [9].

On rencontre souvent des impuretés mais à de faibles concentrations sous forme d'oxydes métalliques, des hydroxydes cristallines ou amorphes et des carbonates.

Les argiles peuvent être définies comme un mélange :

- de minéraux argileux, en général la kaolinite ( $\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ),
- de micas, en général la muscovite ( $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3, 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ),
- de quartz ( $\text{SiO}_2$ ),
- de minéraux associés contenant du fer, du titane, du magnésium.

#### II.1.1. Les minéraux argileux

Ce sont des phyllo silicates d'aluminium dont les feuillets sont constitués de couches d'octaèdres  $\text{Al}(\text{OH})_6$  et de couches de tétraèdres  $\text{SiO}_4$  reliées par les atomes O et OH mis en commun (fig. 02). La distance inter-réticulaire d sépare 2 feuillets successifs. Les substitutions d'atomes sont fréquentes dans les feuillets. L'édifice cristallin peut être désorganisé (la cristallinité est moins bonne). D'autre part, il y a des déséquilibres au niveau des charges ; ce déséquilibre est compensé par adsorption de cations dans l'espace interfoliaire (capacité d'échange des argiles).

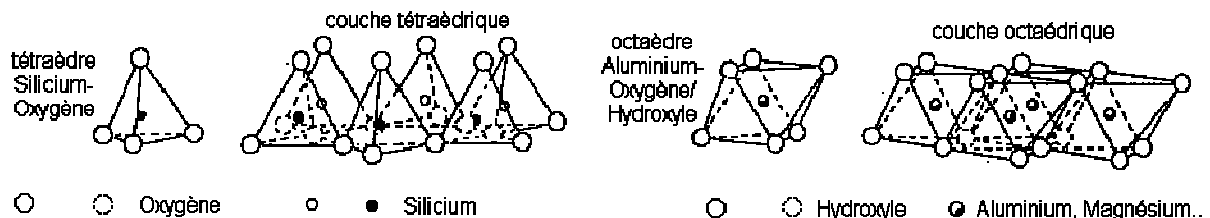


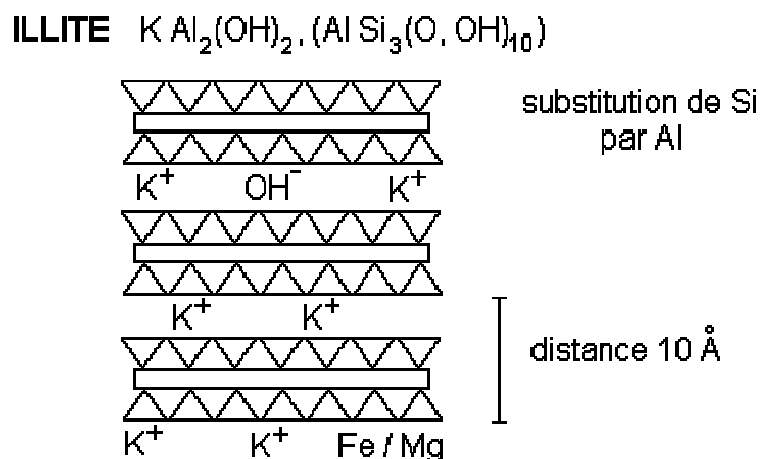
Figure 02 : La structure des couches octaédrique et tétraédrique.

## II.1.2. La structure des minéraux argileux

Les minéraux argileux sont en général en forme de feuilles, d'où leur nom de phyllites. Ils appartiennent, comme les micas, au groupe des phyllosilicates. Chaque cristal ou phyllite, dont l'épaisseur se mesure en micromètres, est composé de quelques centaines de feuillets empilés, qui se mesurent en nanomètres. Chaque feuillet est composé de deux, trois ou quatre couches planes associées. De ses variations viennent les différentes espèces de minéraux argileux, parmi elles :

### II.1.2.1. Les illites

Ce minéral est le plus répandu des minéraux argileux dans les sédiments et les sols. Il est construit sur le modèle du mica blanc, mais avec une structure plus désordonnée et moins de potassium dans les espaces inter foliaires (**fig. 03**). Il est très fréquent dans une foule de roches détritiques comme matrice ou comme ciment [10].



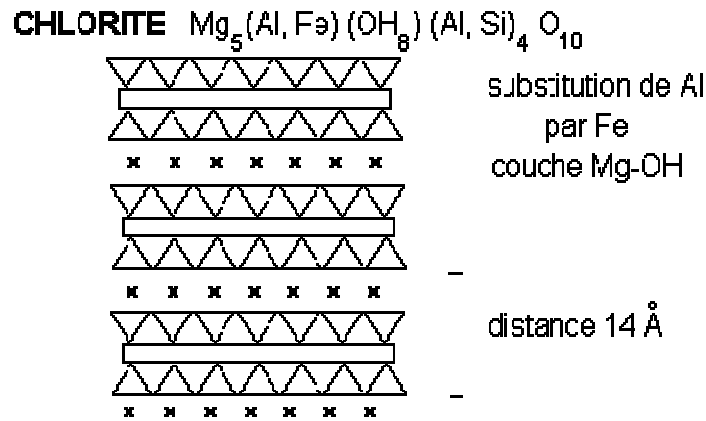
**Figure 03** : La structure des illites.

### II.1.2.2. Les montmorillonites

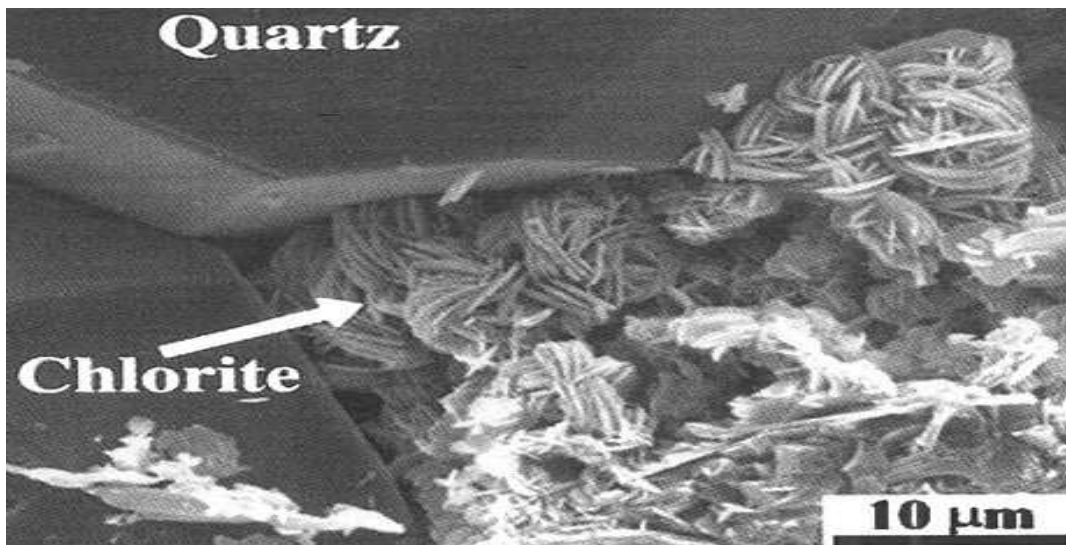
Les montmorillonites peuvent être détritiques, par héritage des sols ou des sédiments plus anciens qui les contiennent. Elles peuvent être néoformées en milieu alcalin à partir des autres silicates ou à partir des verres volcaniques. Elles ont une foule d'applications économiques, dans les industries chimiques, les boues de forage, etc. [10].

### II.1.2.3. Chlorite

L'espace interfoliaire est garni par une couche composée de Mg et OH. L'Aluminium Al est remplacé localement par le fer Fe (**fig. 04**). Les chlorites existent en plus grands cristaux (**fig. 05**) dans les roches magmatiques ; elles sont également formées pendant la diagénèse des roches sédimentaires. On les retrouve en éléments détritiques dans les sols sous climat peu agressif.



**Figure 04** : La structure de chlorite.



**Figure 05** : Cristaux de chlorite vus au microscope électronique à balayage [11].

## II.2. Les argiles réfractaires

L'argile est le produit de la décomposition de roche riche en feldspath comme le granit par exemple. Pendant des millions d'années, l'eau a participé à la dégradation chimique de la roche mère. L'argile a pu se constituer à l'emplacement même de la roche mère dans ce cas, elle est dite primaire avec une couleur plutôt blanche et des propriétés réfractaires (point de fusion élevé). L'argile issue de la sédimentation après avoir été transportée loin de son lieu d'origine est dite secondaire. Elle est plus fine et renferme souvent des minéraux (fer, manganèse...) ou autre matière organique qui en change la couleur, elle est brune, rouge... Ses composants sont l'oxyde d'aluminium (environ 40%), l'oxyde de silicium (environ 46%) et l'eau (environ 14%).

## II.2.1. Le kaolin

Les kaolins font partie de la famille des argiles. Ils appartiennent au groupe des silico-alumineux phyliteux, avec la montmorillonite, les illites et micas, les polygroslyte. La phase principale constituant le kaolin est la kaolinite  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ou l'hallowysite  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (avec  $n=4$ ).

### II.2.1.1. La kaolinite

La kaolinite possède une structure assez particulière de type feuillet : dans une poudre sèche, c'est le grain qui constitue la particule élémentaire de matière solide ; il peut être caractérisé par un procédé quelconque de séparation granulométrique. Le grain de kaolinite possède la particularité d'être constitué par un groupement ordonné de feuillets ou agrégats, plus ou moins régulièrement empilés dans les agrégats.

Le feuillet est la partie élémentaire de l'hydrosilicate d'alumine ou kaolinite d'où également l'appellation de phyllosilicate ou silicate lamellaire. Les groupements de feuillets dans des agrégats peuvent être isolés ou orientés dans le cas de dispersion idéale en milieu liquide.

La kaolinite à agrégats orientés possède des propriétés intéressantes. Elle a en particulier une influence sur la cristallisation des principales phases pendant l'élaboration des matériaux [12].

La kaolinite est constituée d'une couche tétraédrique et octaédrique. La couche tétraédrique est formée par la liaison de tétraèdre  $\text{SiO}_4$  dans un arrangement hexagonal.

La base des tétraèdres est approximativement coplanaire, et leurs sommets pointent dans la même direction. Les oxygènes apicaux sont liés à des ions  $(\text{OH}^-)$  localisé par-dessus le centre des hexagones pour former la couche octaédrique. La couche octaédrique est formée par des octaèdres de  $\text{AlO}_2(\text{OH})_4$  [5]. L'aluminium, est l'élément le plus courant en position octaédrique. Les couches successives tétraédrique et octaédrique sont superposées de façon à former la structure de la kaolinite (fig. 06).

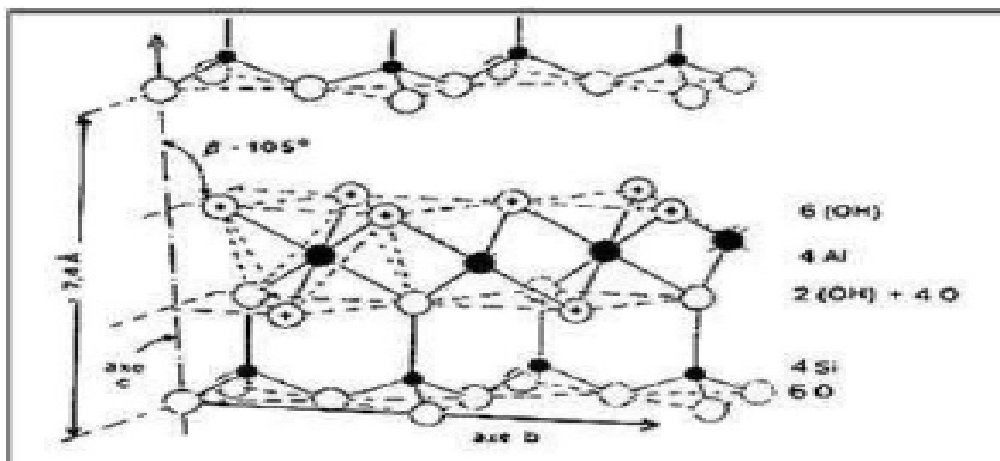


Figure 06 : la structure d'un minéral de type 1 : cas de la kaolinite.



### **II.2.1.2. L'halloysite :**

La halloysite est une phase principale constitutive des kaolins : elle ne diffère de la kaolinite que par la quantité d'eau zéolitique plus élevée qu'elle renferme et sa formule chimique est  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (avec  $n \geq 4$ ). Morphologiquement, elle se présente sous la forme de tubes enroulés. Cette morphologie la distingue des grains hexagonaux de la kaolinite. Elle est réputée pour ses propriétés réfractaires. Cependant elle est rarement présente seule dans un kaolin mais le plus souvent elle est accompagnée de kaolinite. Elle est réputée pour ses propriétés réfractaires.

L'eau zéolitique qui n'est pas solidement fixée s'évapore lentement dans une atmosphère sèche  $140^\circ\text{C}$ . Dès que le minéral a perdu son eau, les feuillets qui deviennent plus rapprochés, les tubes se déroulent puis s'aplatissent pour donner la forme à  $2\text{H}_2\text{O}$  qui est la métahalloysite. Cette dernière perd sa dernière trace d'eau par chauffage prolongé dès  $200^\circ\text{C}$ , donnant un écart très voisin de la kaolinite [13].

### **II.3. Matières dégraissantes :**

On appelle dégraissants, l'ensemble des matériaux non plastiques ajoutés à l'argile pour la rendre moins grasse ou inclus naturellement dans celle-ci.

#### **II.3.1. Fonction de la matière dégraissante :**

- diminue l'excès de plasticité
- aère la pâte,
- facilite le départ de l'eau de plasticité au séchage,
- facilite le départ de l'eau de constitution à la cuisson, ce qui évite les déformations,
- supporte le choc thermique de la cuisson d'un usage culinaire par exemple

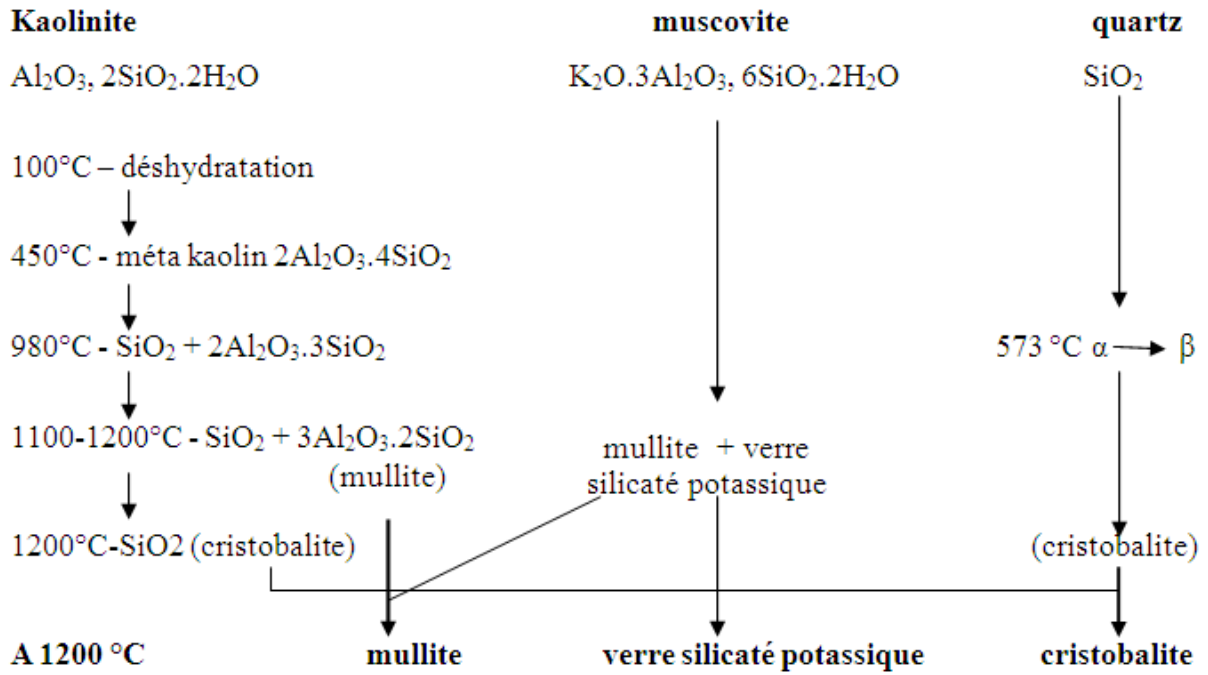
Le dégraissant fait office d'ossature, et facilite le façonnage de pièce. Le dégraissant améliore aussi les conditions de séchage de l'argile, que sans lui aurait tendance à se fendre suite à l'importance du retrait.

#### **II.3.1.2. La chamotte**

Les chamottes d'argiles sont obtenues par cuisson d'argiles à haute température.

En chauffant une argile, il se produit les réactions chimiques irréversibles données dans la figure 07:

La formation de la cristobalite est influencée par la présence d'impuretés : en effet, à partir de  $1300-1400^\circ\text{C}$ , sa teneur diminue rapidement à cause de son incorporation dans le verre. Si l'argile de départ est riche en alcalins, la cristobalite sera présente seulement en petite quantité.



**Figure 07** : transformation lors de la cuisson d'une argile à haute température

Dans les chamottes, deux formes de mullite 3/2 sont observées ; elles diffèrent par leur aspect morphologique. Pendant la cuisson, il se forme, par des réactions en phase liquide, des cristaux de mullite d'assez grandes dimensions et de formes irrégulières. Au refroidissement, il y a cristallisation d'une mullite aciculaire qui va se déposer aux abords des agrégats primaires de mullite. Au-dessus de 1400°C, la mullite et la cristobalite se solubilisent dans le verre riche en alcalins provoquant un gonflement du matériau et une diminution de sa densité.

Le développement des cristaux de mullite se fait dans les directions liées aux contours des lamelles de kaolinite. Les phases suivantes sont observées : mullite, verre et cristobalite.

# Chapitre III :

## Le verre

### **III.1. Introduction:**

Le verre est l'un des plus anciennes substances artificielles. L'homme commença à le produire et à l'utiliser à peu près en même temps que le bronze.

Aujourd'hui, il n'existe guère de matière qui, sous des formes extrêmement diverses, soit aussi présente dans notre vie quotidienne.

Les verres sont formés de silicates synthétiques résultant de réaction qui mettent en jeu essentiellement du sable et des carbonates. Ces réactions ne se produisent aisément qu'à très haute température. On obtient un liquide visqueux que l'on met en forme avant qu'il devienne progressivement solide homogène en se refroidissant [13].

### **III.2. Définition du verre [15] :**

Le dictionnaire indique que le mot verre vient du mot vitrum et désigne une substance minérale transparente et isotrope.

### **III.3. Les propriétés du verre :**

Le verre est la seule matière minérale solide que l'on puisse produire à des dimensions et sous des formes quelconques tout en conservant sa transparence [16]. Ses propriétés physiques, chimiques, thermiques et acoustiques sont les suivantes :

#### **III.3.1. Propriétés physiques :**

- La transparence : mais il peut être opaque ou opalescent.
- La dureté : seuls les diamants et le carbure de tungstène le rayent. Le verre le plus dur est le verre de Bohème et le cristal est le plus tendre.
- La densité : elle dépend des composants ; elle est d'environ 2,5.
- La résistance et l'élasticité : la cassure du verre est liée à sa flexion et à sa résistance au choc. Il casse là où le métal se tord. Contrairement, sa résistance à la compression est importante : il faut une pression de 10 tonnes pour briser un centimètre cube de verre.
- L'imputrescibilité : il ne se putréfie pas.
- L'imperméabilité : elle est extrêmement grande mais le verre reste poreux pour certains liquides comme le kérosène ; on dit « qu'il sue ».

### **III.3.2. Propriétés chimiques :**

- L'action de l'eau : l'eau agit sur les silicates qui, en se décomposant, forment un dépôt en surface qui devient peu à peu opaque ; le verre perd de sa transparence.
- L'action de l'air : les silicates alcalins se combinent avec l'acide carbonique contenu dans l'air ce qui donne un dépôt blanchâtre à la surface du verre.
- L'action de la lumière : exposés aux ultraviolets, certains verres se colorent ou se décolorent.
- L'action des acides : ils décomposent la silice, le plus rapide est l'acide fluorhydrique qui permet de graver en profondeur le verre plaqué. Le verre peut donc être dissout [17].

### **III.3.3. Propriétés thermiques :**

- La dilatation : c'est un très mauvais conducteur de chaleur. Il se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas en même temps. Son coefficient de dilatation est faible, ce qui lui confère de nombreuses applications : il sert d'isolant thermique (laine de verre). On retrouve presque les mêmes coefficients que certains métaux d'où l'exécution de soudures verre-métal. Ce coefficient varie selon la composition.
- La conductivité : il est mauvais conducteur (environ 500 fois moins que le cuivre); on l'utilise comme isolant électrique. C'est aussi un bon isolant acoustique suivant l'épaisseur de la feuille. Ceci n'est pas le cas à chaud car il devient conducteur à partir de 250°C.
- Il est ininflammable et incombustible.

### **III.3.4. Propriétés acoustiques :**

On demande de plus en plus aux vitrages d'être non seulement une barrière mais aussi un écran acoustique.

Un bruit est la superposition de sons élémentaires qui couvre un spectre de fréquence. L'atténuation sonore due à un vitrage est déterminée quantitativement par son indice d'affaiblissement acoustique que l'on obtient en mesurant, pour chaque bande de fréquence, la différence entre les niveaux de pression de part et d'autre du vitrage.

L'affaiblissement acoustique global croît lorsque la masse du vitrage augmente.

### III.4. La composition du verre:

Certains éléments comme le silicium et le bore peuvent former un verre par leur seule combinaison avec de l'oxygène (oxyde de ...) et par élévation à une très haute température. Ces oxydes sont appelés oxydes «formateurs» car ils forment le squelette du verre. On les combine avec d'autres éléments dits « modificateurs » qui sont [18]:

- **Les fondants** : qui abaissent la température de fusion des oxydes formateurs (silice = 1730°C).
- **Les stabilisants** : qui modifient les propriétés physiques du verre atténuées par l'adjonction du fondant.

#### III.4.1. Les oxydes formateurs (les vitrifiants) :

- **La silice (dioxyde de silicium  $\text{SiO}_2$ ) [19]**: C'est le composant principal du verre qui représente environ 70% de la masse. Elle est l'élément formateur de réseau. Si l'on augmente sa quantité, on augmente la dureté du verre. Son point de fusion est à 1730°C. Elle entre dans la fabrication sous forme de sable dont les plus purs en contiennent 99,5 % (les sables quartzeux). Plus le pourcentage de silice est élevé et plus le coefficient de dilatation est faible ; donc, plus le verre est résistant.
- **L'anhydride borique (le bore ou borax anhydre  $\text{B}_2\text{O}_3$ ) [20]**: Il diminue le coefficient de dilatation et améliore la résistance aux chocs thermiques ; il est aussi plus résistant à l'eau. Son point de fusion est à 2300°C. Il sert pour le travail de laboratoire (verre thermorésistant comme le Pyrex). Il possède aussi les propriétés d'un fondant.
- **L'anhydride phosphorique (le phosphore  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) [21]**: Employé dans le domaine de l'optique. La principale source au Moyen Age est les cendres de bois.

#### III.4.2. Les oxydes modificateurs :

**III.4.2.1. Les fondants (oxydes alcalins) [22]**: La silice permet d'obtenir un verre, mais son point de fusion est très élevé (1730°C). En ajoutant des fondants, on abaisse cette température à 1400°C (économie d'énergie) et on facilite les possibilités de travail. Les

fondants sodiques et potassiques ont été utilisés conjointement dès le moyen âge. Un même verre peut associer plusieurs fondants : soude et chaux (verre sodo-calcique), soude et plomb (cristal).

- **L'oxyde de sodium (la soude  $\text{Na}_2\text{O}$ ) [23]:** Il entrait autrefois dans la composition sous forme de cendres de plantes marines (ex : la salicorne) ou de nitre (grec = nitron). Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et sa résistance aux agents atmosphériques ainsi que le coefficient de dilatation. Il est plus utilisé pour le verre industriel que pour le verre soufflé car il doit être constamment réchauffé lors du façonnage.
- **L'oxyde de potassium ( $\text{K}_2\text{O}$ ) [24]:** Il entrait autrefois dans la composition sous forme de cendres de plantes terrestres comme la fougère ; aujourd'hui, on utilise du salpêtre (nitrate de potassium  $\text{KNO}_3$ ). Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et le rend doux à la taille, mais il diminue sa résistance chimique. Il avantage le soufflage du verre car il augmente le temps de travail lors du façonnage.
- **L'oxyde de magnésium ( $\text{MgO}$ ) [25]:** Il est utilisé sous forme de dolomite (calcium+magnésium). Il n'est pas indispensable pour tous les verres, sauf le verre flotté, le verre à vitre. Il abaisse la température de fusion et augmente la résistance aux agents chimiques.

#### **III.4.2.2. Les stabilisants: (oxydes alcalino-terreux) :**

L'introduction d'un oxyde alcalin (fondant) a provoqué la rupture d'une liaison Si - O et l'apparition d'un oxygène "non pontant". Ceci a pour effet de fragiliser le réseau et d'augmenter la solubilité à l'eau.

- **L'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ) [26]:** se trouve sous forme de chaux (qui est le stabilisant le plus employé) ou de dolomie (lorsque le verre doit contenir de la magnésie). Il augmente la résistance chimique du verre, son éclat et diminue sa solubilité, mais en excès il provoque une dévitrification. Il était utilisé au moyen âge pour les verres sodiques.
- **L'oxyde de zinc ( $\text{ZnO}$ ) :** Il augmente l'éclat et l'élasticité.
- **L'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) [27]:** (c'est un stabilisant et un colorant) souvent contenu dans les roches naturelles, il donne une teinte verdâtre. Il faut donc procéder à une

décoloration de cette teinte. Pour cela, on peut ajouter du bioxyde de manganèse ( $MnO_2$ ) (savon des verriers).

- **L'oxyde de plomb (PbO) [28]:** Entre dans la composition du cristal. Il abaisse également le point de fusion en stabilisant la composition. Il rend le verre plus éclatant tout en lui conférant une légère teinte jaunâtre, il est plus agréable à couper et à travailler.

Le tableau 1 présente la composition chimique des principaux types de verre.

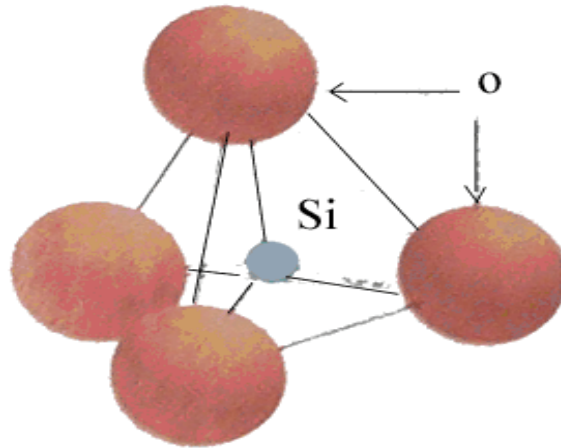
**Tableau 1** : composition chimique des principaux types de verres [29].

Types de verre	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NaO <sub>2</sub>	KO <sub>2</sub>	CaO	MgO	PbO
verre plat	72,5		1,5	13	0,3	9,3	3	
Verre à bouteilles	73		1	15		10		
"pyrex"	80,6	12,6	2,2	4,2		0,1	0,05	
fibre de verre	54,6	8,0	14,8	0,6		17,4	4,5	
"cristal"	55,5				11			33
verre de lampes	73		1	16	1	5	4	

### III.5. La structure du verre :

La structure du verre n'a été élucidée de façon satisfaisante que depuis une trentaine d'années. Des travaux exécutés à l'aide des rayons X ont montré que l'ordre moléculaire dans les verres est, d'une façon générale irrégulier analogue à celui d'un liquide [30]. On avait supposé que le verre, dans sa structure, n'était qu'un liquide figé ; c'est ce qui a été confirmé. Les travaux de W.L BRAGG [31] ont démontré l'existence de tétraèdre de SiO<sub>4</sub> (fig. 08) constituant l'élément constitutif universel des silicates.



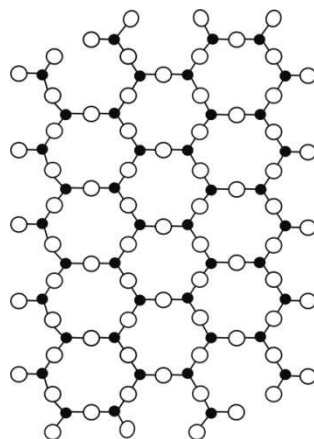


**Figure 08 :** Tétraèdre de  $\text{SiO}_4$ .

Les idées actuelles sur la structure des verres reposent notamment sur les travaux de ZACHARIASEN [32] et de WARREN qui voient dans le verre aussi bien fondu que solide, un ordre rapproché des tétraèdres de  $\text{SiO}_4$ , formateurs de verre, reliés par des ponts d'oxygène.

La différence essentielle entre les verres et les substances cristallines est que dans les cristaux, il existe un ordre plus général en plus de l'ordre rapproché des groupes coordonnés et des ions ; dans les cristaux, les groupes coordonnés forment un réseau régulier remplissant le volume.

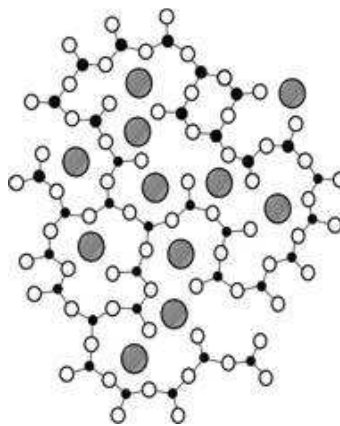
Dans les verres, cet ordre plus général n'existe pas, et les groupes coordonnés constituent un réseau irrégulier.



**Figure 09:** la structure de  $\text{SiO}_2$  cristallisée d'après ZACHARIASEN [32].

La disposition des formateurs de réseau est donc désordonnée comme dans les liquides, mais figée. Les quatre atomes d'oxygène d'un tétraèdre de  $\text{SiO}_4$ , trois seulement sont représentés, le quatrième se trouve au dessus ou au dessous du plan du dessin.

Lorsque le verre est constitué par plusieurs composants comme par exemple un verre sodocalcique et d'autres verres techniques, il s'y forme également un réseau de tétraèdres  $\text{SiO}_4$  dans les lacunes desquels s'insèrent des cations  $\text{Na}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$  (fig. 10). Ces cations ne sont pas à même de former un réseau par eux même, mais au plus de modifier un réseau existant, ce sont les modificateurs de réseau qui, par l'oxygène qu'ils apportent dénouent les liaisons Si-O et créent des points de séparation.



**Figure 10:** structure d'un verre de silicate de soude d'après WARREN ET BISCOE [33].

La formation des points de séparation entraîne un changement des propriétés du verre. Plus leur nombre est grand, plus faible est le verre à l'état de fusion; ce qui explique que la viscosité du verre de silice est abaissée après additions de soude.

## III.6. Les différents types de verre:

### III.6.1. Les verres sodocalciques :

Exemple de composition : Silice (72%) + soude (13%) + chaux (5%). C'est le plus commun des verres. Il a une bonne stabilité chimique, mais il est sensible aux chocs thermiques. Il est utilisé pour la fabrication des verres plats et creux, des ampoules électriques et en bouteille.

La température de ramollissement pour 70% de silice =  $700^\circ\text{C}$ . Son coefficient de dilatation est élevé :  $86 \times 10^{-7}$  (de 0 à  $300^\circ\text{C}$ ). [34]

### III.6.2. Les verres borosilicates :

Exemple de composition : Silice (80%) + anhydride borique (13%) + soude (4%) + alumine (3%).

Le plus connu est le Pyrex (1915) qui possède une bonne résistance aux chocs thermiques. On en fait des ustensiles de laboratoire et de cuisine (résistance à la chaleur et aux agents chimiques). Il sert aussi pour l'isolation (fibres de verre) et le stockage de déchets radioactifs.

La température de ramollissement pour 80% de silice = 820°C. Son coefficient de dilatation est très faible :  $32 \times 10^{-7}$  (de 0 à 300°C) [35].

### III.6.3. Les verres au plomb :

Exemple de composition : Silice (62%) + oxyde de plomb (21%) + potasse (7%).

On l'appelle cristal si la teneur en oxyde de plomb est supérieure à 24 %. Il sert en gobeletterie et en verrerie d'art, pour les téléviseurs et en électronique. Le cristal est limpide, très sonore, très résistant à la dévitrification. En élevant la teneur en plomb (60%), on obtient un verre dense utilisé pour la protection des rayons X.

Le verre contient du plomb s'il noircit lorsqu'on le chauffe au chalumeau.

La température de ramollissement pour 60% de silice et 25% d'oxyde de plomb = 630°C. Son coefficient de dilatation est très élevé :  $90 \times 10^{-7}$  (de 0 à 300°C) [36].

### III.6.4. Le verre de silice :

Il contient au moins 96% de silice. Il est très employé grâce à sa grande pureté (transparence optique) et pour sa résistance aux températures élevées, à la corrosion et aux chocs thermiques.

On l'utilise pour la fabrication de tubes de lampe à halogène, des éléments d'optique et des miroirs de télescope.

La température de ramollissement pour plus de 96% de silice = 1700°C. Son coefficient de dilatation est très faible :  $5,6 \times 10^{-7}$  (de 0 à 300°C) [37].

### **III.6.5. Les vitrocéramiques (ou vitro cristallins) :**

Exemple de composition : Silice (75%) + alumine (15%) + sel de titane (5%) + oxyde de lithium (3%). Ce sont des dérivés du verre dont la fabrication est basée sur le principe de dévitrification.

La transformation en céramique semi-cristalline s'obtient par un traitement thermique appelé "céramisation" qui permet d'obtenir un début de cristallisation. La température de cristallisation est à environ 800° et la cristallisation dure environ 2 heures.

Les vitrocéramiques peuvent posséder une grande résistance à la rupture et un coefficient de dilatation très faible, ce qui leur permet d'être très résistants aux chocs thermiques [38].

# Chapitre IV :

## Le recyclage du verre

## IV. Le recyclage du verre :

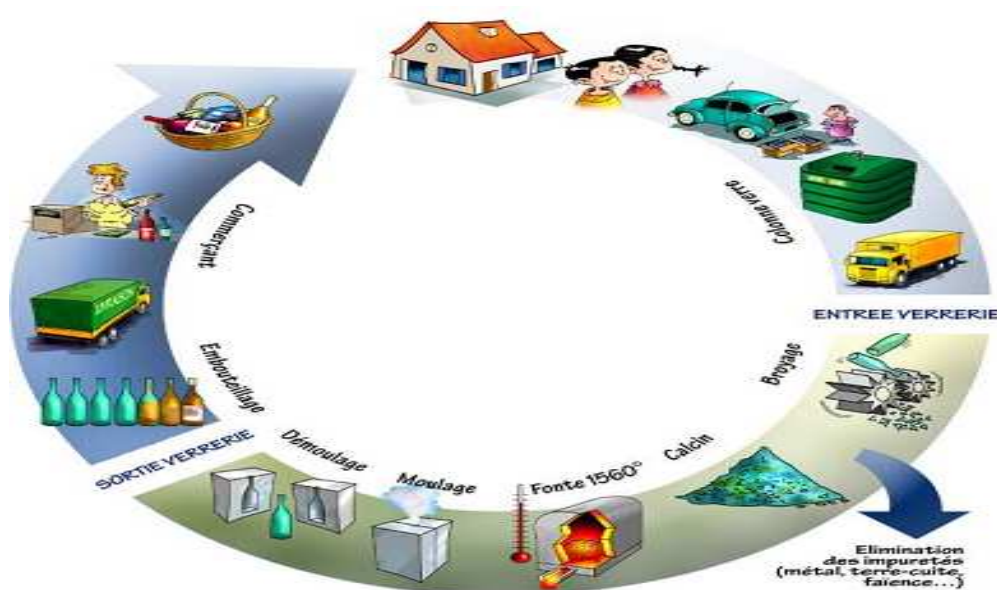
Le verre constitue une composante importante des ménages et des déchets industriels en raison de son poids et de sa densité.

La composante de verre dans les déchets municipaux est généralement constituée de bouteilles cassées, verrerie, des ampoules et autres articles. Aussi de nombreuses méthodes manuelles de création d'objets en verre ont un taux de défektivité de l'ordre de quarante pour cent [39].

Le recyclage du verre est le processus de transformation de déchets de verre en produits utilisables (fig. 11). Pour ce faire, les déchets de verre doivent être séparés par leur composition chimique (séparés en différentes couleurs) car le verre conserve sa couleur après le recyclage, et ensuite, en fonction de l'utilisation finale et les capacités locales de transformation.

Cette procédure permet d'utiliser moins d'énergie que la fabrication du verre à partir de sable, de chaux et de soude.

Chaque tonne de déchets de verre recyclé dans les nouveaux éléments permet d'économiser 315 kg de dioxyde de carbone d'être relâchés dans l'atmosphère lors de la création du nouveau verre.



**Figure 11** : recyclage du verre d'emballage (bouteilles) [40].

#### IV.1. Recyclage du verre en Algérie [41] :

La composition des déchets solides produits en Algérie se caractérise par une part très significative des produits organiques avec un taux moyen de 72%. Quant au plastique, il ne représente que 10% de ces déchets et 9,3 % pour le papier/carton, 4,14% pour le chiffon et autres, 3,2% pour les métaux et 1,36% pour le verre . La capacité de recyclage de ces déchets est donnée dans le (tableau 2).

**Tableau 2:** Capacité de recyclage [42].

Nature des déchets	Quantité en tonne/ an
Papier	385.000
Plastique	130.000
Métaux	100.000
Verre	50.000
Matières diverses	95.000
Total	760.000

#### IV.2. Recyclage du verre en Europe [43]:

En 2009, 1 960 000 tonnes de verre ont été collectées en France, avec un taux de recyclage de 63% (fig. 12). Ceci représente 1 234 800 tonnes de verre recyclé dans l'hexagone soit 39 kg de verre à chaque seconde.

Le verre n'est pas le matériau le plus simple à recycler. Il est repris en l'état par des sociétés de récupération mais parce qu'il est lourd, il nécessite beaucoup de carburant pour son transport. De plus, il doit être amené à une température très élevée pour pouvoir être recyclé : 1550°C. La Fédération européenne du verre emballage (FEVE) indique que "la quantité de verre ménager recyclé à travers l'Europe a atteint 67% en 2009, avec environ 25 milliards de bouteilles et de pots collectés."

Alors qu'en Autriche, Belgique, Hollande, Suède et en Suisse le taux de collecte atteint les 90%, il est d'à peine 63,23% pour la France.

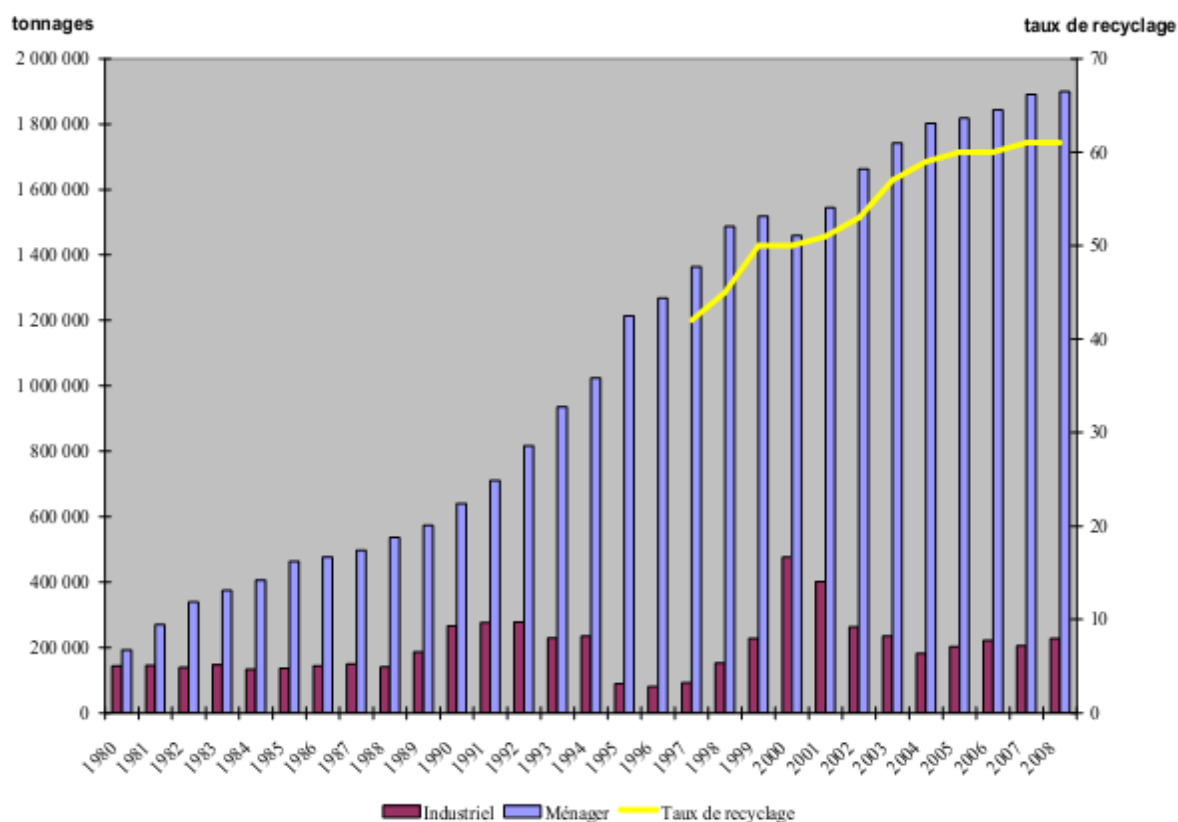


Figure 12 : Recyclage du verre en France.

### IV.3. Recyclage du verre en Asie [44] :

Le recyclage a permis d'économiser 55,4 milliards de yuans dans les domaines de l'énergie et des ressources dans les zones chinoises en développement selon un rapport informé par une compagnie nationale d'enquête CCID Consulting. Le chiffre atteindra 68,5 milliards de yuans cette année. Jusqu'à l'année 2002, la Chine a introduit l'économie de recyclage, et la protection environnementale a commencé à être prise en compte dans les régions en développement.

### IV.4. Recyclage du verre en Amérique [45] :

En 2008, le verre représentait la plus petite partie des matières recyclées au Canada. Au Québec, il représentait 4,2 % des matières recyclées. Les matières organiques arrivaient quant à elles au deuxième rang, avec une forte différence entre le Québec et l'Ontario, qui récupérait 36,6 % de ses matières organiques comparativement à 15,6 % au Québec (tableau 3).



**Tableau 3** : taux de Matières recyclées selon le type, en 2008 au Canada

Tous les types	Québec	Ontario	Canada
Papier (%)	46,4	40,0	40,9
Matières organiques (%)	15,6	36,6	28,8
Électroménagers et électronique (%)	11,2	0,6	4,0
Déchets de construction (%)	8,6	7,5	8,5
Métaux (%)	6,2	5,3	6,3
Plastique (%)	4,6	3,5	3,8
Verre (%)	4,2	5,1	5,0
Autres (%)	3,2	1,3	2,7
Total, tous les types (%)	100,0	100,0	100,0

#### **IV.5. Domaines de recyclage des déchets de verre [46] :**

Le recyclage du verre d'emballage possède de nombreux avantages, et celui notamment d'être utilisé à l'infini. Le verre après broyage peut être réutilisé sous plusieurs formes dans plusieurs secteurs d'activité :

- La construction : il remplace les gravillons qu'on peut trouver dans les parpaings, et possède des qualités d'acoustique et de légèreté.
- L'abrasion : les microbilles de verre pour traiter des surfaces sans les endommager ou la poudre de verre afin de préparer des surfaces à travailler, et les billes de verre pour le broyage
- Les pigments pour la peinture : dans les enduits pour un effet esthétique particulier ou dans la peinture pour la signalisation routière
- Les matériaux de décoration : dans les roches décoratives pour la mosaïque par exemple
- Le nettoyage : par la libération de soude et de potasse, ainsi que grâce à ses microparticules, qui possèdent des qualités de détergents.

# Chapitre V:

# Méthodes d'analyse

## V. Méthodes d'analyse :

Nous énumérons dans ce chapitre, les différents tests effectués afin de caractériser les produits de départ et les produits finis.

### V.1. Caractérisation des propriétés à froid :

#### V.1.1. Détermination de la perte au feu PAF :

##### Principe :

On pèse l'échantillon dans une balance de type «Clatronic - KW 3367» au niveau du laboratoire de chimie de l'environnement du département de chimie. On fait une cuisson dans le four à T=1000°C pendant 30 min. Après l'opération de cuisson, on pèse l'échantillon.

La perte au feu est déterminée par l'expression suivante :

$$\mathbf{PAF} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \%$$

Tel que :

\_p<sub>1</sub> : masse de l'échantillon (g).

\_p<sub>2</sub> : masse de l'échantillon (g) après l'opération de cuisson.

#### V.1.2. Détermination du taux d'absorption d'eau ABS :

##### Principe :

On plonge l'échantillon dans un bain marie d'eau ordinaire portée à ébullition pendant 1min. une fois séché dans l'étuve à T=100°C pendant 30min, l'échantillon est pesé.

On replonge l'échantillon dans un bain marie pendant 1minute et on essuie l'échantillon manuellement au moyen d'une serviette.

On pèse l'échantillon et on l'introduit dans le four à 1000°C pendant 30min.

L'échantillon une fois cuit est pesé.

La teneur en eau absorbée est déterminée par l'expression suivant :

$$\mathbf{ABS} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \%$$

Tel que :

\_p<sub>1</sub> : masse de l'échantillon (g) après le séchage.

\_p<sub>2</sub> : masse de l'échantillon (g) après la cuisson

### V.1.3. Calcul de la densité d :

Le plus souvent, l'eau est utilisée comme corps de référence pour la densité des liquides et des solides. Dans ce cas, la masse volumique de l'eau est prise égale à  $1000 \text{ kg/m}^3$  (ou  $1 \text{ g/cm}^3$ ). Il s'agit de la masse volumique de l'eau à  $3,98^\circ\text{C}$  et à pression atmosphérique. En effet, l'eau possède une particularité parmi les liquides : sa densité et sa masse volumique sont maximales, non pas à sa température de fusion ( $0^\circ\text{C}$ ) comme la plupart des liquides, mais à  $3,98^\circ\text{C}$ . Ainsi au voisinage de  $3,98^\circ\text{C}$ , une imprécision sur la détermination de la température exacte affecte très peu la masse volumique de l'eau et donc le résultat d'une mesure de densité.

La densité est déterminée par la relation suivante :

$$d = \frac{\rho_{\text{corps}}}{\rho_{\text{eau}}}$$

Tel que :

$\rho_{\text{corps}}$  : est la masse volumique du corps considéré (échantillon). tel que :

$$\rho_{\text{corps}} = \frac{m}{v}$$

m : la masse de l'échantillon.

V : le volume de l'échantillon avec:

$$V = A \times L$$

A : surface de la base de la brique considérée (échantillon):

$$A = ((B + b) \times h) / 2$$

V : volume de l'échantillon

L: longueur

B : largeur supérieure

b : largeur inférieure

h : épaisseur

$\rho_{\text{eau}}$  : est la masse volumique de l'eau ( $1000 \text{ kg/m}^3$ )

La densité n'est autre que le rapport de la masse volumique d'un corps à la masse volumique de l'eau.

### V.1.4. Détermination de la porosité apparente $\pi_a$ :

Propriété d'un corps qui présente des interstices entre ses molécules. La diminution du volume des corps par l'abaissement de la température n'est pas la seule preuve que nous ayons de leur porosité [47].

La porosité est déterminée par l'expression suivante :

$$\pi_a = d.\% \text{ABS}$$

Tel que :

\_d : densité

\_ %ABS: taux d'absorption d'eau

### **V.1.5. Détermination des retraits :**

Les différents retraits sont déterminés au moyen d'un pied à coulisse

#### **V.1.5.1. Détermination du retrait de séchage $R_s$ :**

Le retrait s'exprime en % (Exemple d'une barre d'argile de 100 mm qui perd 10 mm le retrait de séchage  $R_s=10\%$ ).

On mesure l'épaisseur initiale de la brique. Ensuite celle-ci est séchée dans l'étuve à 100°C pendant 30 min.

L'épaisseur de l'échantillon séché est mesurée.

Le retrait au séchage est déterminé par l'expression suivante :

$$R_s = \frac{L_0 - L_s}{L_0} \times 100 \%$$

Tel que :

\_  $L_0$  : l'épaisseur initiale

\_  $L_s$  : l'épaisseur après séchage

#### **V.1.5.2. Détermination du retrait de cuisson $R_c$ :**

La brique subit une cuisson dans un four à 1000°C pendant 1heure. Après cuisson, l'épaisseur de l'échantillon est mesurée.

Le retrait à la cuisson est déterminé par l'expression suivante :

$$R_c = \frac{L_s - L_c}{L_c} \times 100 \%$$

Tel que :

\_  $L_c$  : l'épaisseur avant cuisson.

\_  $L_s$  : l'épaisseur après cuisson.

### V.1.5.3. Détermination du retrait total $R_t$ :

Le retrait total est déterminé par l'expression suivante :

$$R_t = \frac{L_0 - L_c}{L_c} \times 100 \%$$

Tel que :

$L_c$  : l'épaisseur après cuisson

$L_0$  : l'épaisseur avant séchage

## V.2. Caractérisation des propriétés à chaud :

### V.2.1. Détermination de la résistance pyroscopique :

Les échantillons sont cuits dans un four à une température de 1200°C pendant 1 heure. Après refroidissement à l'air libre, au moyen d'une loupe, toute transformation ou anomalie doit être observée (fissures).

### V.2.2. Détermination de la dilatation thermique $\alpha$ :

Le fait de chauffer un matériau accroît son énergie interne, en raison de l'agitation thermique. L'accroissement des distances inter-atomique moyennes peut être corrélé avec la température par un facteur de proportionnalité qui est le coefficient de dilatation.

La mesure de la dilatation d'un matériau ne permet, en général, que de caractériser sa dilatation linéaire.

Pour chaque température on peut définir les coefficients de dilatation linéaire par :

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_c} \times \frac{1}{\Delta T} \times 10^{-3}$$

Tel que :

$$\Delta T = T_c - T_{Amb} \quad (T_{Amb} = 25^\circ C)$$

$T_c$  : température de cuisson.

$$\Delta L = L_0 - L_c$$

$L_c$  : épaisseur après cuisson.

$L_0$  : épaisseur avant séchage.

Le comportement thermique d'un matériau quelconque peut être, entre autre, caractérisé par les valeurs que prend le coefficient de dilatation entre deux températures données. De nombreux matériaux sont susceptibles d'évoluer structurellement [48].

### V.3. Spectrométrie de fluorescence X :

#### Principe :

Cette méthode sert à identifier et à doser tous les éléments chimiques dans leurs combinaisons les plus diverses.

L'échantillon à analyser est irradié par des rayons X de haute intensité.

De ce fait les éléments contenus dans la préparation sont excités et émettent un rayonnement de fluorescence spécifique à chacun d'eux par réflexion sur un cristal analyseur.

Ce rayonnement sera décomposé en raies spectrales dont l'intensité mesurée sera le reflet de l'identité et de la concentration des éléments analysés.

Dans notre travail, nous avons utilisé un spectromètre fluorescence X de type MDX 1000 au niveau du laboratoire contrôle qualité de la cimenterie de Saida (figure 13).



**Figure 13** : spectromètre de fluorescence X (cimenterie de Saida).

# Chapitre VI:

## Caractérisation des matières premières



La majorité des matières premières utilisées dans ce travail ont été ramenées de l'unité des abrasifs de Saida.

## VI.1. Présentation de l'unité des abrasifs (ABRAS) –Saida- :

ABRAS est une filiale du groupe ENAVA.C'est le seul producteur des produits abrasifs en ALGERIE. L'unité est créée en 1982. Cette entreprise est spécialisée dans la fabrication des meules à liant vitrifié et résinoïde, disques, papier et toile ainsi que d'autres abrasifs de même nature.

ABRAS a un autre créneau qui nous a intéressé soit la production d'un choix étendu de briques réfractaires (**tab.4**) avec une production annuelle estimée à 41,42 Tonnes.

**Tableau 4 :** Type de briques réfractaires commercialisées (année 2011) :

Type de brique	Dimension (mm <sup>3</sup> )	pièces
Brique Buse	120X110X47	6710
Brique réfractaire	250X123X30	1584
Brique réfractaire	250X123X50	3205
Brique réfractaire	230X115X65	2286
Brique réfractaire	250X124X32	470
Brique réfractaire légère	230X114X60	4
Brique réfractaire inclinée	230X110X65/55	50
Plaque réfractaire	500X340X60	39

L'entreprise est située dans la zone industrielle EREBAHIA, limitée au nord par l'entreprise PROMETAL et au Sud par : NAFTAL.

## VI.2. Matières premières utilisées :

La détermination de la composition chimique des matières premières utilisées a été effectuée au niveau de la cimenterie de Saida par spectrométrie de fluorescence X.

### **VI.2.1. Les liants :**

Ce sont différents types d'argiles utilisés dans la fabrication des briques réfractaires.

### **VI.2.3. Le Kaolin de Tamazert (KT) :**

#### **VI.2.3.1. Gisement :**

Le gisement de Kaolin de Tamazert est situé dans la région d'El-Mila (Est algérien).

#### **VI.2.3.2 Structure :**

La roche brute possède une concentration très élevée en quartz.

Une unité de traitement, de construction récente, implantée à proximité du gisement, réalise actuellement l'enrichissement du Kaolin de Tamazert.

Des résidus de quartz et de mica y persistent en proportion appréciable (entre 15 et 20% en poids), ainsi que des impuretés difficiles à éliminer, (en particulier l'oxyde de fer trivalent) qui provoquent la dégradation de la réfractivité des matériaux élaborés avec ce Kaolin.

#### **VI.2.3.3 Composition chimique :**

La composition chimique est présentée dans le tableau 5.

**Tableau 5:** composition chimique du Kaolin de Tamazert.

Composant	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PAF
Pourcentage(%)	43,39	34,85	0,297	0,57	0,00	0,00	2,162	2,60	1,52	14,30

### **VI.2.4. Le Kaolin de Djebbel Debbagh N°3 (Kaolin DD3) :**

#### **VI.2.4.1. Gisement :**

Le Kaolin de Djebbel Debbagh, ou Kaolin DD3 est un Kaolin naturel, extrait d'un gisement situé à Djebbel Debbagh dans la wilaya de Guelma (Est algérien).

#### **VI.2.4.2. Structure :**

Le Kaolin DD3 est un mélange de deux phases : la Kaolinite Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2SiO<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O qui est la proportion la plus élevée et l'halloysite Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O.

Ce type de Kaolin a une apparence très blanche. Les tailles des grains sont inférieures à 2µm.

#### **VI.2.4.3. Composition chimique :**

La composition chimique est donnée dans le tableau 6.

**Tableau 6** : composition chimique du Kaolin de Djebbel Debbagh.

Composant	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PAF
Pourcentage(%)	35,09	37,79	0,252	0,51	0,00	0,00	1,287	3,18	1,27	19,40

### **VI.3. LA matière dégraissante :**

C'est une matière anti plastique. Elle joue le rôle de charpente pour maintenir la forme en cours de cuisson.

#### **VI.3.1. La chamotte C :**

Au niveau de l'unité des abrasifs de Saida, on utilise si possible les déchets de briques réfractaires après broyage selon 4 différentes granulométries notées (C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>). L'unité utilise seulement les grains C<sub>1</sub> et C<sub>2</sub>. Mais à l'origine, cette matière provient de l'Autriche. Le produit importé est de l'argile cuite fragmentée grossièrement et qui est broyée au niveau de l'unité.

La chamotte utilisée possède deux granulométries désignées par C<sub>1</sub> et C<sub>2</sub>, tel que C<sub>1</sub>= 0,35 mm et C<sub>2</sub> = [0,35 – 0,70] mm.

#### **VI.3.2. Composition chimique :**

La composition chimique est exposée dans le tableau 7.

**Tableau 7**: composition chimique de la chamotte.

Composant	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PAF
Pourcentage(%)	33,72	41,92	0,280	0,54	0,29	0,00	1,426	3,55	2,54	2,10

### **VI.4. Déchets de verre :**

Le déchet de verre utilisé dans cette étude a été collecté au niveau de la ville de Saida chez différents vitriers en vrac (fig. 14). Nous avons choisi pour cette étude l'utilisation d'un verre transparent type verre sodocalcique.



**Figure 14 :** Déchet de verre collecté en vrac.

#### **VI.4.1. Composition chimique du déchet de verre :**

Le tableau 8 donne la composition chimique du déchet en verre collecté.

**Tableau 8:** Composition chimique du déchet de verre.

Composant	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PAF
Pourcentage(%)	84,55	2,03	4,605	2,92	0,00	0,00	1,378	8,67	0,48	1,30

#### **VI.4.2. Traitement du déchet de verre:**

Le déchet de verre collecté a subi un prétraitement avant son utilisation comme matière dégraissante dans la production des briques réfractaires.

Le calcin a été soigneusement lavé avec l'eau. Ensuite, il a été séché à l'étuve à 80°C pendant 24 heures au niveau de l'unité des abrasifs de SAIDA.

Une fois refroidi, on a procédé au broyage du calcin.

Celui-ci est concassé et fragmenté grossièrement manuellement.

La matière obtenue est passée au tamis afin d'obtenir une granulométrie de :

V<sub>2</sub> = [0, 35 - 0, 7] mm (fig. 16)

V<sub>3</sub> = [0, 7 - 1, 2] mm (fig. 17)

V<sub>4</sub> > 1,2mm (fig. 18)

La granulométrie  $V_1$  évaluée à 0,35 mm (**fig. 15**) est obtenue après broyage du calcin au moyen d'un broyeur planétaire à billes au niveau de l'unité des abrasifs de SAIDA.



**Figure 15** : déchet de verre  $V_1$ .



**Figure 16** : déchet de verre  $V_2$ .



**Figure 17** : déchet de verre  $V_3$ .



**Figure 18** : déchet de verre  $V_4$ .

### **VI.5. Confection des briques:**

On prépare des briques de dimension  $(103/94 \times 38 \times 180)$  mm<sup>3</sup> en remplaçant la chamotte de granulométrie  $C_1$  et  $C_2$ , graduellement par du déchet de verre de différentes granulométries  $V_1+V_2$ . ou  $V_3+V_4$

Les compositions des différentes argiles sont maintenues constantes.

Les briques sont préparées à partir du mélange des liants, de la chamotte avec une quantité d'eau. On obtient une pâte qui est pressée sous forme de briques de dimension mentionnée ci dessus sous une pression maximale de 300 bars au moyen d'une presse hydraulique (fig. 19).



**Figure 19** : presse hydraulique dans l'atelier mécanique d'ABRAS.

Ces briques sont séchées à l'air libre pendant 24 heures, puis placées dans une étuve à 160°C pendant 6 heures.

Ce travail a été effectué au niveau de l'unité des abrasifs de SAIDA.

Enfin, les briques confectionnées sont cuites dans un four à moufle type Linn : High therm VMK-1800 à 1200°C pendant 4 heures au niveau de la faculté des sciences et technologie. La vitesse de chauffe est maintenue à 0,1°C/mn. Les briques subissent un refroidissement libre jusqu'à la température ordinaire. Celles-ci sont retirées du four après une durée de 4heures.

**Tableau 9** : Composition des différents échantillons.

Echantillon	Caractéristiques	Composition Kg				
		KT	DD3	H <sub>2</sub> O	C <sub>1</sub> +C <sub>2</sub>	V <sub>1</sub> +V <sub>2</sub>
1	100% C	0,31185	0,10395	0,0726	0,8316	00,00
2	95% C + 5% V	0,31185	0,10395	0,0726	0,79002	0,04158
3	90% C + 10% V	0,31185	0,10395	0,0726	0,74844	0,08316
4	85% C + 15% V	0,31185	0,10395	0,0726	0,70686	0,12474

C : chamotte avec deux granulométries (C<sub>1</sub>+C<sub>2</sub>),  
(V<sub>1</sub>+V<sub>2</sub>) ou (V<sub>3</sub>+V<sub>4</sub>)

KT: Kaolin de Tamazert

V : déchet de verre avec différentes granulométries

DD3: Kaolin de Djebbel Debbagh N<sup>0</sup>3

# Chapitre VII:

Influence de la composition de  
la chamotte sur les propriétés  
des briques réfractaires

## VII. Influence de la composition de la chamotte sur les propriétés des briques réfractaires :

Nous étudions dans cette partie l'effet de la composition chimique de la matière dégraissante sur les propriétés des briques réfractaires.

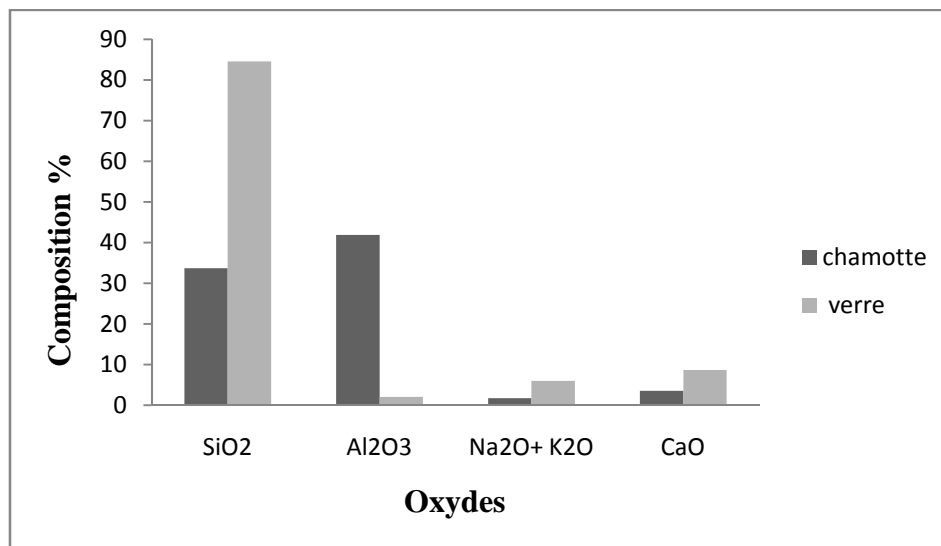
Nous allons comparer les propriétés des briques réfractaires obtenues avec chamotte enrichie en verre de granulométrie V1+V2 par substitution graduelle de la chamotte par du verre à la brique commercialisée.

### VII.1. Composition chimique :

Le tableau 10 présente la composition chimique de la matière dégraissante.

**Tableau 10** : composition chimique des composants de la matière dégraissante.

Nature de la matière dégraissante	Composition %			
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O+ K <sub>2</sub> O	CaO
Déchet de brique réfractaire	33,72	41,92	1,706	3,55
Déchet de verre	84,55	2,03	5,983	8,67



**Figure 20:** taux des principaux oxydes dans les différents composants de la matière dégraissante.

Nous remarquons (fig. 20) que la quantité de silice SiO<sub>2</sub> dans le déchet de verre est plus élevée par rapport à celle de la chamotte utilisée par l'entreprise.



Or le taux d'alumine  $Al_2O_3$  dans cette chamotte est considérable comparé à celui du déchet de verre.

La quantité des alcalis  $Na_2O+K_2O$  présents dans le verre est plus élevée par rapport au taux trouvé dans la chamotte de l'entreprise.

Le taux de CaO est élevé dans le déchet de verre.

### VII.1.1. Caractérisation des propriétés à froid :

Un certain nombre de tests à froid ont été effectués sur les briques cuites afin de déterminer leurs propriétés.

### VII.1.2. Détermination de la perte au feu PAF

Le tableau 11 présente la perte au feu PAF dans les briques confectionnées.

**Tableau 11** : la perte au feu PAF dans les briques comportant du verre ( $V_1+V_2$ ).

Echantillon	Caractéristiques (%)	masse de l'échantillon Kg		PAF (%)
		Avant cuisson	Après cuisson	
1	100% C+ 0% ( $V_1+V_2$ )	1,171	1,171	0
2	95% C + 5% ( $V_1+V_2$ )	1,139	1,137	0,175
3	85% C + 15% ( $V_1+V_2$ )	1,188	1,188	0

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ),

V : déchet de verre avec deux granulométries ( $V_1+V_2$ )

A partir du tableau 11, nous remarquons que la perte au feu est presque nulle.

Nous pouvons dire que les particules volatiles ainsi que les carbonates ont été éliminés lors du frittage.

L'introduction du verre en remplacement de la chamotte ne ramène pas à la composition du réfractaire des matières volatiles ou carbonatées.

### VII.1.3. Détermination du taux d'absorption d'eau ABS :

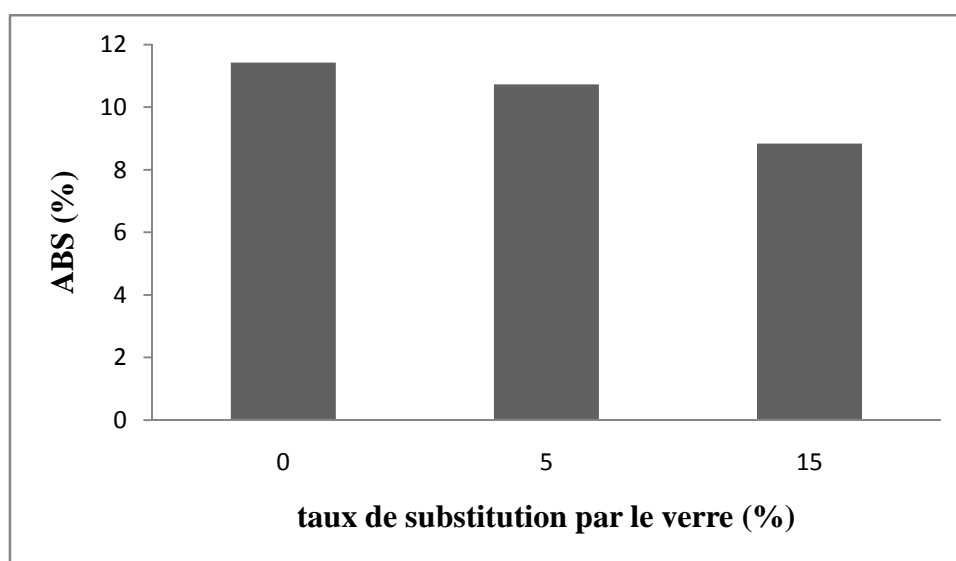
Le tableau 12 présente l'absorption d'eau ABS dans les briques confectionnées.

**Tableau 12** : taux d'absorption d'eau ABS dans les briques comportant du verre ( $V_1+V_2$ ).

Echantillon	Caractéristiques (%)	masse de l'échantillon Kg			ABS(%)
		Après séchage	Avant cuisson	Après cuisson	
1	100% C	1,322	1,344	1,171	11,4220
2	95% C + 5% ( $V_1+V_2$ )	1,277	1,294	1,140	10,7282
3	85% C + 15% ( $V_1+V_2$ )	1,301	1,325	1,186	8,8393

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ),

V : déchet de verre avec deux granulométries ( $V_1+V_2$ ).



**Figure 21** : Influence de la composition de la chamotte sur le Taux d'absorption ABS.

Nous observons sur la figure 21 que la teneur en eau absorbée diminue lorsque nous remplaçons la chamotte avec du verre.

#### VII.1.4. Détermination de la densité d :

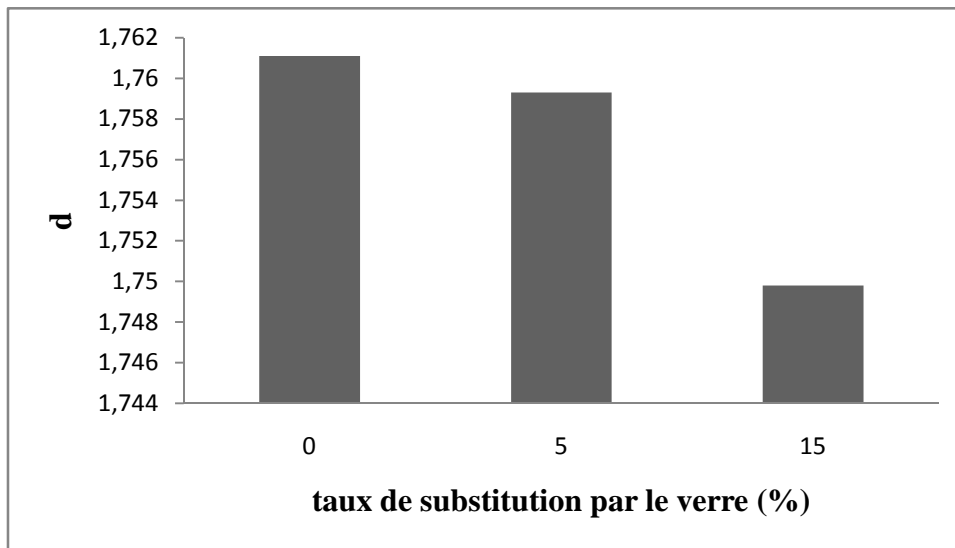
Le tableau 13 présente la densité d des briques confectionnées.

**Tableau 13** : la densité d des briques comportant du verre ( $V_1+V_2$ ).

Echantillon	Caractéristiques (%)	Densité d
1	100% C	1,7611
2	95% C + 5% ( $V_1+V_2$ )	1,7593
3	85% C + 15% ( $V_1+V_2$ )	1,7498

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ),

V : déchet de verre avec deux granulométries ( $V_1+V_2$ ).



**Figure 22 :** Influence de la composition de la matière dégraissante sur la densité  $\rho$ .

Nous constatons que les briques réfractaires renfermant du verre sont à peu près plus légères que celles dont la composition ne comporte que de la chamotte.

### VII.1.5. Détermination de la porosité apparente $\pi_a$ :

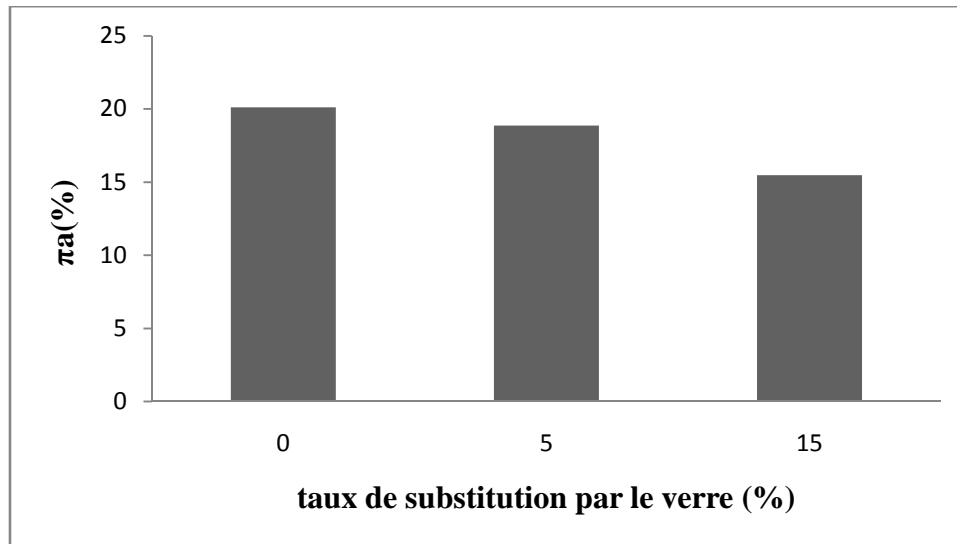
Le tableau 14 présente la porosité apparente  $\pi_a$  dans les briques confectionnées.

**Tableau 14 :** la porosité apparente  $\pi_a$  dans les briques comportant du verre ( $V_1+V_2$ ).

Echantillon	Caractéristiques (%)	Porosité $\pi_a$ (%)
1	100% C	20,1152
2	95% C + 5% ( $V_1+V_2$ )	18,8741
3	85% C + 15% ( $V_1+V_2$ )	15,4670

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ),

V : déchet de verre avec deux granulométries ( $V_1+V_2$ )



**Figure 23 :** Influence de la composition de la matière dégraissante sur la porosité apparente.

Nous constatons que la porosité diminue lorsque nous introduisons du verre dans la conception des briques.

### VII.1.6. Détermination du retrait R :

Le tableau 15 présente les retraits dans les briques confectionnées.

**Tableau 15 :** les retraits dans les briques comportant du verre ( $V_1+V_2$ ).

Echantillon	Caractéristiques (%)	$R_s$ (%)	$R_c$ (%)	$R_t$ (%)
1	100% C	0	0	0
2	95% C + 5% ( $V_1+V_2$ )	0	0	0
3	85% C + 15% ( $V_1+V_2$ )	0	0	0

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ), V : déchet de verre avec deux granulométries ( $V_1+V_2$ ).

D'après les résultats obtenus (tab. 15), nous remarquons que les briques réfractaires renfermant du déchet de verre présentent un retrait de séchage, de cuisson et ainsi total nuls.

Ce résultat montre que le déchet de verre n'influe pas sur le retrait si l'on compare notre brique à la brique commercialisée par l'entreprise.

### VII.1.7. Discussion :

A partir des observations effectuées, nous constatons que la composition de la matière dégraissante n'influe pas sur le processus de frittage.

### VII.1.8. Conclusion :

Le verre est un produit d'un traitement thermique sous haute température. Il ne contient aucune matière qui peut causer la détérioration de la brique réfractaire.

### VII.2. Caractérisation des propriétés à chaud :

Un certain nombre de tests à chaud ont été effectués afin de déterminer leurs propriétés.

#### VII.2.1. Détermination de la résistance pyroscopique :

Le tableau 16 présente la résistance pyroscopique dans les briques confectionnées.

**Tableau 16 :** la résistance pyroscopique dans les briques comportant du verre ( $V_1+V_2$ ).

Echantillon	Caractéristiques %	Les fissures	
		Les arêtes	Les surfaces
1	100% C	Pas des fissures	Pas des fissures
2	95% C + 5% ( $V_1+V_2$ )	Pas des fissures	Pas des fissures
3	85% C + 15% ( $V_1+V_2$ )	3	2

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ), V : déchet de verre avec deux granulométries ( $V_1+V_2$ ).

A partir du tableau 16, nous remarquons qu'il n'y a pas de ruptures, de coins sautés ni de fentes mais seulement des fissures lorsque nous introduisons du verre 15% ( $V_1+V_2$ ) dans la composition de la chamotte.

#### VII.2.3. Détermination de la dilatation thermique $\alpha$ :

Le tableau 17 présente la dilatation thermique  $\alpha$  dans les briques confectionnées.

**Tableau 17 :** la dilatation thermique  $\alpha$  dans les briques comportant du verre ( $V_1+V_2$ ).

Echantillon	Caractéristiques %	$\alpha$ (%)
1	100% C	0
2	95% C + 5% ( $V_1+V_2$ )	0
3	85% C + 15% ( $V_1+V_2$ )	0

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ), V : déchet de verre avec deux granulométries ( $V_1+V_2$ ).

Nous remarquons à partir des résultats obtenus (tab. 17), que le coefficient de dilatation est nulle quelque soit la composition de la chamotte en silice.

#### **VII.2.4. Discussion :**

Les échantillons confectionnés présentent une bonne résistance pyroscopique. A 15% de substitution de la chamotte par du verre, la brique possède une résistance pyroscopique acceptable car le nombre de fissures n'est pas élevé.

La brique réfractaire riche en silice n'a pas changé de forme. Ce qui prouve la bonne réfractarité des briques confectionnées avec des chamottes riches en silice.

Aussi, la dilatation de la brique due au traitement thermique est nulle. Ce qui prouve qu'elle est résistante aux chocs thermiques

#### **VII.2.5. Conclusion :**

Les résultats obtenus confirment la réfractarité des briques confectionnées.

#### **VII.3.Aspect macroscopique des briques réfractaires confectionnées :**

Nous avons remarqué que l'échantillon (brique réfractaire) avant la cuisson avait une couleur blanche (fig. 24), et après cuisson il a pris une couleur encore plus blanchâtre (fig. 25).



**Figure 24:** brique refractaire avant cuisson



**Figure 25 :** brique refractaire après cuisson

Nous constatons que notre brique comportant du verre a la même couleur que la brique commercialisée (fig. 26) seulement elle est plus brillante (fig. 27).



**Figure 26 :** brique de l'unité abrasifs-SAIDA-



**Figure 27 :** brique avec déchet de verre granulométrie grossière.

# Chapitre VIII:

Influence de la granulométrie  
de la chamotte sur les  
propriétés des briques  
réfractaires



## VIII.1. Influence de la granulométrie de la chamotte sur les propriétés des briques réfractaires :

Le facteur le plus important dans l'élaboration des céramiques est le broyage soit la granulométrie des matières premières. Pour cela nous allons étudier l'effet de la granulométrie du verre introduit dans la conception de la chamotte.

Ainsi nous avons choisi deux granulométries déjà utilisées dans l'entreprise ABRA-Saida  
 $V_1+V_2$ : [0, 35 - 0, 7] mm  
 $V_3+V_4$ :  $V_3$  [0, 7 - 1, 2] mm ;  $V_4 > 1,2$ mm

### VIII.1.1. Caractérisation des propriétés à froid :

Un certain nombre de tests à froid ont été effectués sur ces échantillons afin de déterminer leurs propriétés.

#### VIII.1.1.2. Détermination de la perte au feu PAF :

Le tableau 18 présente la perte au feu PAF dans les briques confectionnées.

**Tableau 18** : La perte au feu PAF dans les briques confectionnées.

Echantillon	Caractéristiques (%)	masse de l'échantillon Kg		PAF (%)
		Avant cuisson	Après cuisson	
1	95% C + 5% ( $V_1+V_2$ )	1,139	1,137	0,175
2	95% C + 5% ( $V_3+V_4$ )	1,146	1,146	0
3	85% C + 15% ( $V_1+V_2$ )	1,188	1,188	0
4	85% C + 15% ( $V_3+V_4$ )	1,170	1,170	0

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ), ( $V_1+V_2$ ) : déchet de verre avec deux granulométries  $V_1$  et  $V_2$ .  
 $(V_3+V_4)$  : déchet de verre avec deux granulométries  $V_3$  et  $V_4$ .

La teneur en perte au feu ne change pas lorsque nous utilisons différentes granulométries.

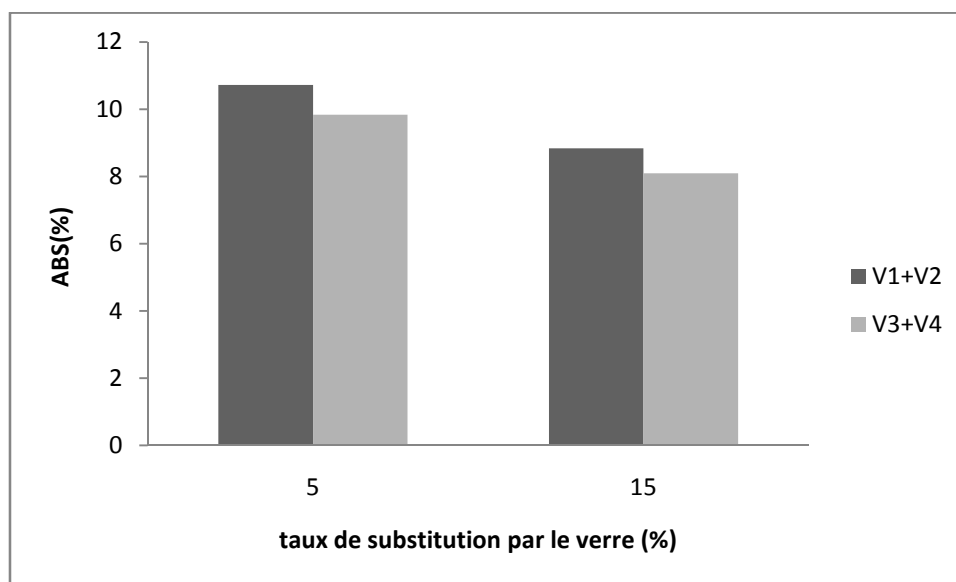
#### VIII.1.1.3. Détermination du taux d'absorption d'eau ABS :

Le tableau 19 présente le taux d'absorption d'eau ABS dans les briques confectionnées.

**Tableau 19** : taux d'absorption d'eau ABS dans les briques confectionnées.

Echantillon	Caractéristiques (%)	masse de l'échantillon Kg			ABS(%)
		Après séchage	Avant cuisson	Après cuisson	
1	95% C + 5% (V <sub>1</sub> +V <sub>2</sub> )	1,277	1,294	1,140	10,7282
2	95% C + 5% (V <sub>3</sub> +V <sub>4</sub> )	1,271	1,305	1,146	9,8347
3	85% C + 15% (V <sub>1</sub> +V <sub>2</sub> )	1,301	1,325	1,186	8,8393
4	85% C + 15% (V <sub>3</sub> +V <sub>4</sub> )	1,273	1,299	1,170	8,0911

C : chamotte avec deux granulométries (C<sub>1</sub>+C<sub>2</sub>), (V<sub>1</sub>+V<sub>2</sub>) : déchet de verre avec deux granulométries V<sub>1</sub> et V<sub>2</sub>.  
(V<sub>3</sub>+V<sub>4</sub>) : déchet de verre avec deux granulométries V<sub>3</sub> et V<sub>4</sub>.



**Figure 28** : Taux d'absorption ABS en fonction de la granulométrie du verre introduit.

La teneur en eau absorbée diminue lorsque nous augmentons la granulométrie du verre introduit.

#### VIII.1.1.4. Détermination de la densité d :

Le tableau 20 présente de la densité d des briques confectionnées.

**Tableau 20 :** La densité  $d$  des briques composées de verre à différentes granulométries.

Echantillon	Caractéristiques (%)	Densité $d$
1	95% C + 5% ( $V_1+V_2$ )	1,7593
2	95% C + 5% ( $V_3+V_4$ )	1,7235
3	85% C + 15% ( $V_1+V_2$ )	1,7498
4	85% C + 15% ( $V_3+V_4$ )	1,7596

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ), ( $V_1+V_2$ ) : déchet de verre avec deux granulométries  $V_1$  et  $V_2$ .  
 ( $V_3+V_4$ ) : déchet de verre avec deux granulométries  $V_3$  et  $V_4$ .

A partir des résultats, la densité varie faiblement en fonction de la granulométrie

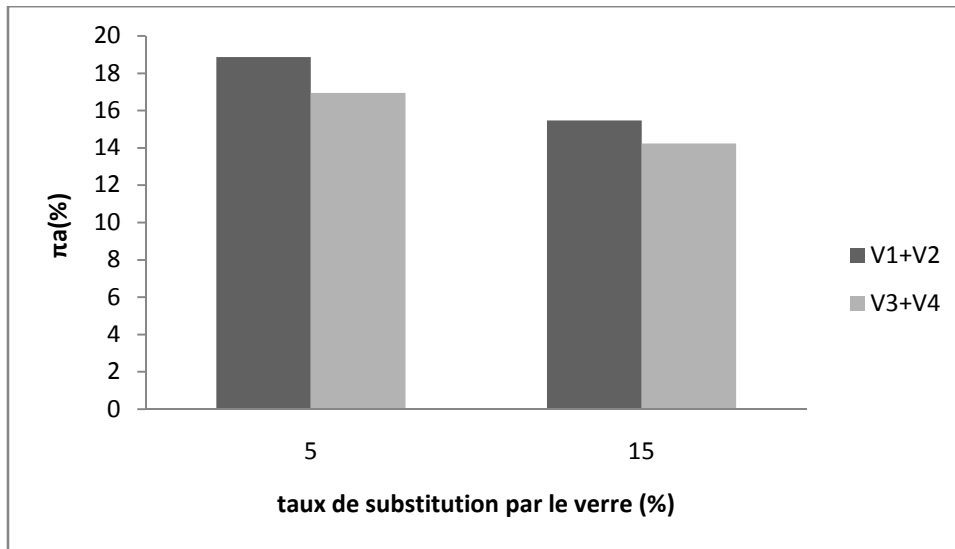
### VIII.1.1.5. Détermination de la porosité apparente $\pi_a$ :

Le tableau 21 présente la porosité apparente  $\pi_a$  dans les briques confectionnées.

**Tableau 21 :** La porosité apparente  $\pi_a$  dans les briques composées de verre à différentes granulométries.

Echantillon	Caractéristiques (%)	Porosité $\pi_a$ (%)
1	95% C + 5% ( $V_1+V_2$ )	18,8741
2	95% C + 5% ( $V_3+V_4$ )	16,9501
3	85% C + 15% ( $V_1+V_2$ )	15,4670
4	85% C + 15% ( $V_3+V_4$ )	14,2371

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ), ( $V_1+V_2$ ) : déchet de verre avec deux granulométries  $V_1$  et  $V_2$ .  
 ( $V_3+V_4$ ) : déchet de verre avec deux granulométries  $V_3$  et  $V_4$ .



**Figure 29 :** Taux de porosité  $\pi_a$  en fonction de la granulométrie du verre introduit.

Nous constatons d'après le tableau 21 dont les résultats sont schématisés dans la figure 29 que la porosité apparente diminue lorsque nous augmentons la taille des grains.

#### VIII.1.1.6. Détermination du retrait R:

Le tableau 22 présente les retraits R dans les briques confectionnées.

**Tableau 22 :** Les retraits R dans les briques composées de verre à différentes granulométries.

Echantillon	Caractéristiques %	$R_s$ (%)	$R_c$ (%)	$R_t$ (%)
1	95% C + 5%(V <sub>1</sub> +V <sub>2</sub> )	0	0	0
2	95% C + 5%(V <sub>3</sub> +V <sub>4</sub> )	1,3157	0	0
3	85% C + 15%(V <sub>1</sub> +V <sub>2</sub> )	0	0	0
4	85% C + 15%(V <sub>3</sub> +V <sub>4</sub> )	1,3157	1,3157	1,3157

C : chamotte avec deux granulométries (C<sub>1</sub>+C<sub>2</sub>), (V<sub>1</sub>+V<sub>2</sub>) : déchet de verre avec deux granulométries V<sub>1</sub> et V<sub>2</sub>. (V<sub>3</sub>+V<sub>4</sub>) : déchet de verre avec deux granulométries V<sub>3</sub> et V<sub>4</sub>.

Nous observons (tab. 22) que plus la granulométrie du déchet en verre est grossière, plus le retrait de séchage est élevé.

D'après les résultats, le retrait de cuisson est nul seulement pour des briques comportant du verre de granulométrie plus petite que V<sub>3</sub>+V<sub>4</sub>.

### VIII.1.1.7. Discussion :

A partir des observations effectuées, nous constatons que les briques comportant du verre grossier subit un processus de densification plus important que les briques comportant du verre fin et moyen.

### VIII.1.1.8. Conclusion

La granulométrie du verre influe sur les propriétés à froid des briques réfractaires

## VIII.1.2. Caractérisation des propriétés à chaud :

Un certain nombre de tests à chaud ont été effectué sur ces échantillons afin de déterminer leurs propriétés.

### VIII.1.2.1 Détermination de la résistance pyroscopique :

Le tableau 23 présente la résistance pyroscopique dans les briques confectionnées.

**Tableau 23 :** La résistance pyroscopique dans les briques composées de verre à différentes granulométries.

Echantillon	Caractéristiques %	Les fissures	
		Les arêtes	Les surfaces
1	95% C + 5% (V <sub>1</sub> +V <sub>2</sub> )	Pas des fissures	Pas des fissures
2	95% C + 5% (V <sub>3</sub> +V <sub>4</sub> )	4	1
3	85% C + 15% (V <sub>1</sub> +V <sub>2</sub> )	3	2
4	85% C + 15% (V <sub>3</sub> +V <sub>4</sub> )	4	5

C : chamotte avec deux granulométries (C<sub>1</sub>+C<sub>2</sub>), (V<sub>1</sub>+V<sub>2</sub>) : déchet de verre avec deux granulométries V<sub>1</sub> et V<sub>2</sub>.  
(V<sub>3</sub>+V<sub>4</sub>) : déchet de verre avec deux granulométries V<sub>3</sub> et V<sub>4</sub>.

Nous constatons que plus les grains de verre incorporés sont gros, plus le nombre de fissures observés sur les arêtes et les surfaces est élevé.

Mais nous avons constaté que la forme de la brique ne change pas quelque soit la granulométrie de la chamotte.

### VIII.1.2.2. Détermination de la dilatation thermique $\alpha$ :

Le tableau 24 présente la dilatation thermique  $\alpha$  dans les briques confectionnées.

**Tableau 24 :** La dilatation thermique  $\alpha$  dans les briques composées de verre à différentes granulométries.

Echantillon	Caractéristiques %	$\alpha$ (%)
1	95% C + 5% (V <sub>1</sub> +V <sub>2</sub> )	0
2	95% C + 5% (V <sub>3</sub> +V <sub>4</sub> )	0
3	85% C + 15% (V <sub>1</sub> +V <sub>2</sub> )	0
4	85% C + 15% (V <sub>3</sub> +V <sub>4</sub> )	0,1367.10 <sup>-9</sup>

C : chamotte avec deux granulométries (C<sub>1</sub>+C<sub>2</sub>), (V<sub>1</sub>+V<sub>2</sub>) : déchet de verre avec deux granulométries V<sub>1</sub> et V<sub>2</sub>. (V<sub>3</sub>+V<sub>4</sub>) : déchet de verre avec deux granulométries V<sub>3</sub> et V<sub>4</sub>.

Le tableau 24 montre que les briques ne subissent aucune dilatation sous l'effet de la cuisson excepté le dernier échantillon.

### VIII.1.2.3. Discussion :

La granulométrie du verre substitué à la chamotte influe sur la réfractarité de la brique, bien que les fissures se forment lorsque les grains de verre sont gros. Donc la taille des grains de verre influe sur la jonction des grains.

Nous avons la brique réfractaire comportant du verre de granulométrie V<sub>3</sub>+V<sub>4</sub> qui présente une dilatation thermique mais qui est très faible.

### VIII.1.2.4. Conclusion

Nos produits présentent des propriétés à chaud acceptables.

## VII.3.Aspect macroscopique des briques réfractaires comportant du verre de granulométrie (V<sub>3</sub>+V<sub>4</sub>):

Les briques réfractaires contenant du verre de granulométrie grossière ont une surface hétérogène (**figure 30**).



**Figure 26** : brique de l'unité abrasifs-SAIDA-



**Figure 30** : brique avec déchet de verre granulométrie grossière.

# Chapitre IX:

Influence du taux de  
substitution de la chamotte par  
du déchet en verre sur les  
propriétés des briques  
réfractaires



## IX. Influence du taux de substitution de la chamotte par du déchet eu verre sur les propriétés des briques réfractaires :

Dans ce qui suit, nous préparons une série de briques en remplaçant graduellement la chamotte avec du verre broyé afin d'étudier l'influence du taux de remplacement sur les propriétés à froid et à chaud des briques réfractaires

### IX.1. Caractérisation des propriétés à froid :

Un certain nombre de tests à froid ont été effectués sur ces échantillons afin de déterminer leurs propriétés.

#### IX.1.1. Détermination de la perte au feu PAF

Les tableaux 25 et 26 présentent la perte au feu PAF dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre.

**Tableau 25 :** la perte au feu PAF dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_1+V_2$ ).

Echantillon	Caractéristiques (%)	masse de l'échantillon Kg		PAF (%)
		Avant cuisson	Après cuisson	
1	100% C + 0% ( $V_1+V_2$ )	1,171	1,171	0
2	95% C + 5% ( $V_1+V_2$ )	1,139	1,137	0,175
3	85% C + 15% ( $V_1+V_2$ )	1,188	1,188	0

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ), ( $V_1+V_2$ ) : déchet de verre avec deux granulométries  $V_1$  et  $V_2$ .

**Tableau 26 :** la perte au feu PAF dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_3+V_4$ ).

Echantillon	Caractéristiques (%)	masse de l'échantillon Kg		PAF (%)
		Avant cuisson	Après cuisson	
1	100% C+ 0% ( $V_3+V_4$ )	1,171	1,171	0
2	95% C + 5% ( $V_3+V_4$ )	1,146	1,146	0
3	90% C + 10% ( $V_3+V_4$ )	1,163	1,163	0
4	85% C + 15% ( $V_3+V_4$ )	1,170	1,170	0

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ), ( $V_3+V_4$ ) : déchet de verre avec deux granulométries  $V_3$  et  $V_4$ .

Excepté l'échantillon à 5% ( $V_1+V_2$ ), nous constatons que la perte au feu est nulle dans tous les échantillons qui contiennent différents taux de verre (tab. 25 et 26).

Le produit obtenu à 5% ( $V_1+V_2$ ) présente quand même un taux de PAF négligeable (tab. 25).

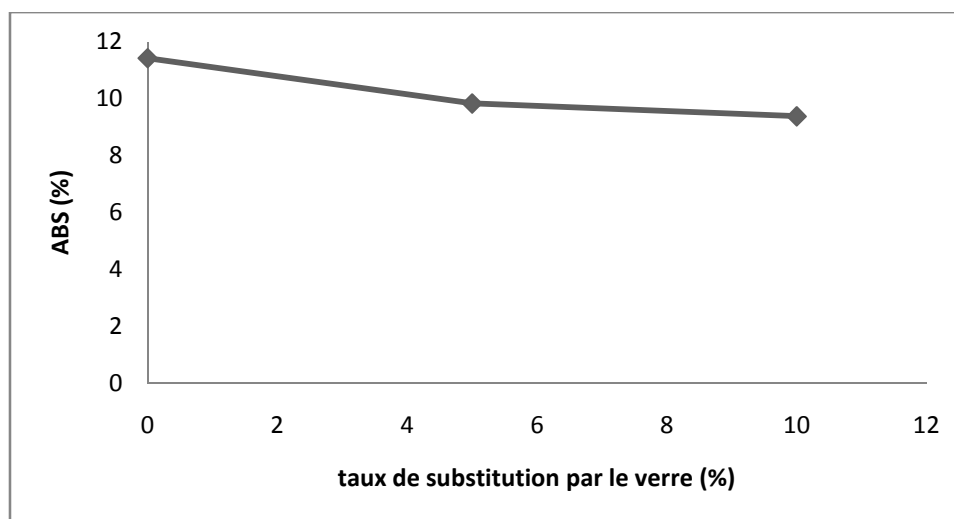
### IX.1.2. Détermination du taux d'absorption d'eau ABS :

Les tableaux 27 et 28 présentent l'absorption d'eau ABS dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre.

**Tableau 27 :** Le taux d'absorption d'eau ABS dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_1+V_2$ ).

Echantillon	Caractéristiques (%)	masse de l'échantillon Kg			ABS(%)
		Après séchage	Avant cuisson	Après cuisson	
1	100% C+ 0% ( $V_1+V_2$ )	1,322	1,344	1,171	11,4220
2	95% C + 5% ( $V_1+V_2$ )	1,277	1,294	1,140	10,7282
3	85% C + 15% ( $V_1+V_2$ )	1,301	1,325	1,186	8,8393

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ), ( $V_1+V_2$ ) : déchet de verre avec deux granulométries  $V_1$  et  $V_2$ .

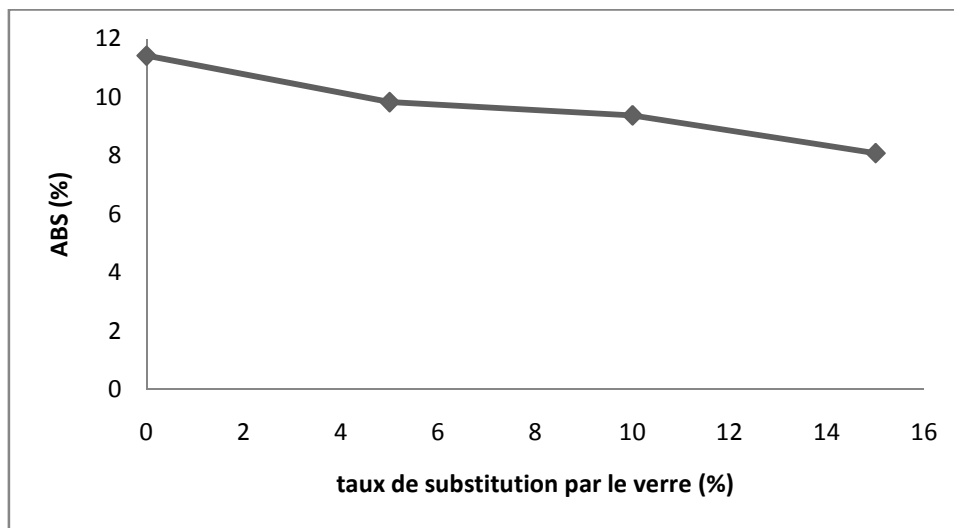


**Figure 31 :** Taux d'absorption ABS en fonction du taux de substitution de la chamotte avec du verre ( $V_1+V_2$ ).

**Tableau 28 :** taux d'absorption d'eau ABS dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_3+V_4$ ).

Echantillon	Caractéristiques (%)	masse de l'échantillon Kg			ABS(%)
		Après séchage	Avant cuisson	Après cuisson	
1	100% C+ 0% ( $V_3+V_4$ )	1,322	1,344	1,171	11,4220
2	95% C + 5% ( $V_3+V_4$ )	1,271	1,305	1,146	9,8347
3	90% C + 10% ( $V_3+V_4$ )	1,279	1,308	1,159	9,3823
4	85% C + 15% ( $V_3+V_4$ )	1,273	1,299	1,170	8,0911

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ), ( $V_3+V_4$ ) : déchet de verre avec deux granulométries  $V_3$  et  $V_4$ .



**Figure 32 :** Taux d'absorption ABS en fonction du taux de substitution de la chamotte avec du verre ( $V_3+V_4$ ).

Nous observons que la teneur en eau absorbée diminue au fur et à mesure que le taux de substitution de la chamotte par le verre augmente (fig.31 et 32).

Nous constatons que la teneur en eau absorbée de la brique commercialisée est plus élevée par rapport aux briques confectionnées avec du déchet de verre (tab. 27 et 28).

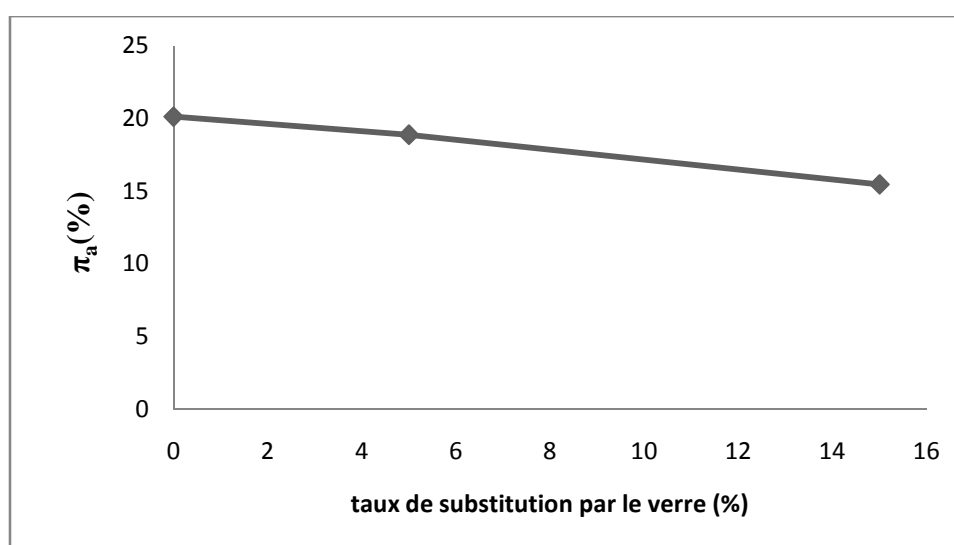
### IX.1.3. Détermination de la porosité apparente $\pi_a$ :

Les tableaux 29 et 30 présentent la porosité apparente  $\pi_a$  dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre.

**Tableau 29 :** La porosité apparente  $\pi_a$  dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_1+V_2$ ).

Echantillon	Caractéristiques (%)	Porosité $\pi_a$ (%)
1	100% C + 0% ( $V_1+V_2$ )	20,1152
2	95% C + 5% ( $V_1+V_2$ )	18,8741
3	85% C + 15% ( $V_1+V_2$ )	15,4670

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ),  
 $(V_1+V_2)$  : déchet de verre avec deux granulométries  $V_1$  et  $V_2$ .

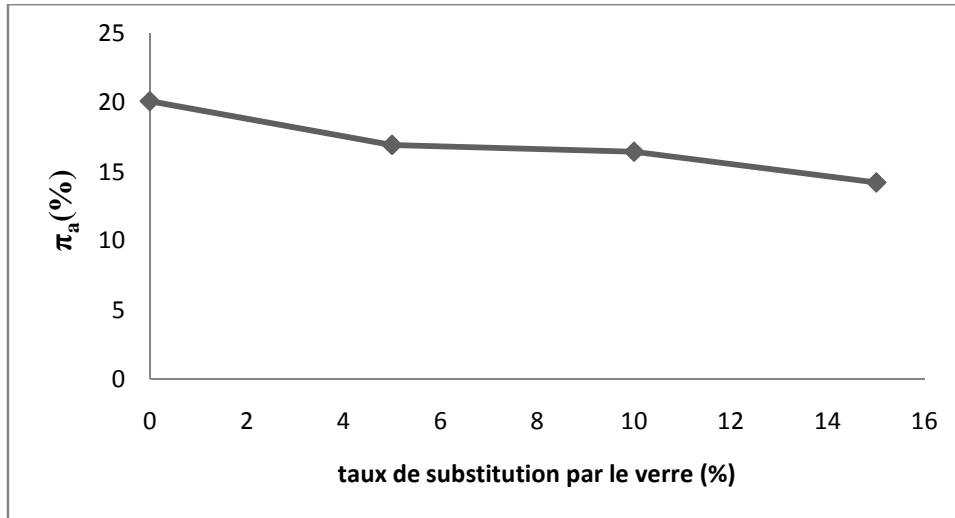


**Figure 33 :** Taux de porosité  $\pi_a$  en fonction du taux de substitution de la chamotte avec du verre ( $V_1+V_2$ ).

**Tableau 30 :** la porosité apparente  $\pi_a$  dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_3+V_4$ ).

Echantillon	Caractéristiques (%)	Porosité $\pi_a$ (%)
1	100% C + 0% ( $V_3+V_4$ )	20,1152
2	95% C + 5% ( $V_3+V_4$ )	16,9501
3	90% C + 10% ( $V_3+V_4$ )	16,4612
4	85% C + 15% ( $V_3+V_4$ )	14,2371

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ), ( $V_3+V_4$ ) : déchet de verre avec deux granulométries  $V_3$  et  $V_4$ .



**Figure 34 :** Taux de porosité  $\pi_a$  en fonction du taux de substitution de la chamotte avec du verre ( $V_3+V_4$ ).

Nous remarquons (fig. 33 et 34) que lorsque nous introduisons du déchet de verre dans la matière dégraissante, moins nous avons formation de pores.

Le taux de porosité apparente dans la brique commercialisée est le plus élevé (tab. 29 et 30)

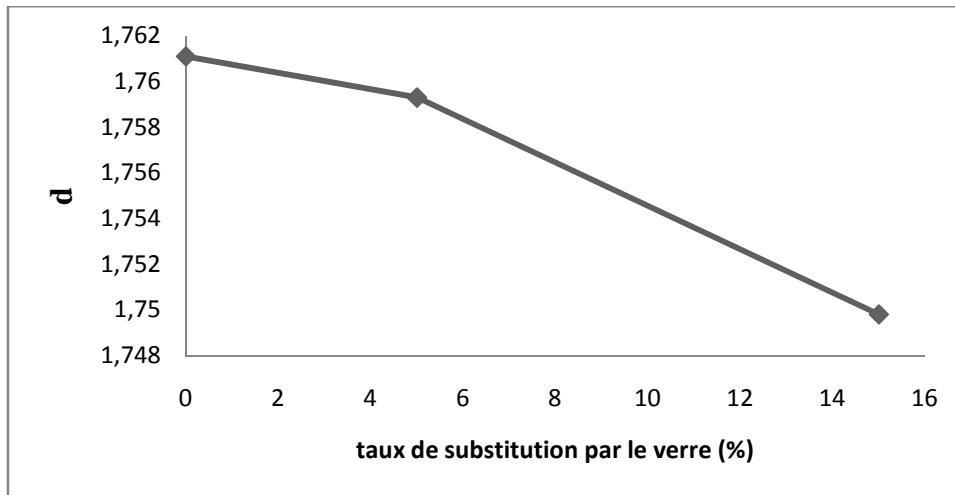
#### IX.1.4. Détermination de la densité d :

Les tableaux 31 et 32 présentent la densité d des briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre.

**Tableau 31 :** la densité d des briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_1+V_2$ ).

Echantillon	Caractéristiques (%)	Densité d
1	100% C	1,7611
2	95% C + 5% ( $V_1+V_2$ )	1,7593
3	85% C + 15% ( $V_1+V_2$ )	1,7498

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ), ( $V_1+V_2$ ) : déchet de verre avec deux granulométries  $V_1$  et  $V_2$ .

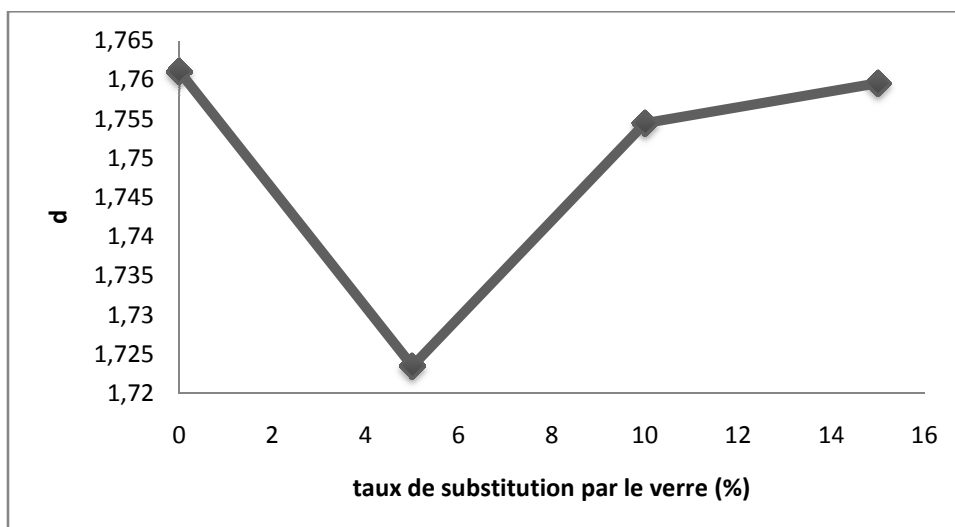


**Figure 35 :** Densité d en fonction du taux de substitution de la chamotte avec du verre ( $V_1+V_2$ ).

**Tableau 32 :** la densité d des briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_3+V_4$ ).

Echantillon	Caractéristiques (%)	Densité d
1	100% C	1,7611
2	95% C + 5% ( $V_3+V_4$ )	1,7235
3	90% C + 10% ( $V_3+V_4$ )	1,7545
4	85% C + 15% ( $V_3+V_4$ )	1,7596

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ), ( $V_3+V_4$ ) : déchet de verre avec deux granulométries  $V_3$  et  $V_4$ .



**Figure 36 :** Densité d en fonction du taux de substitution de la chamotte avec du verre ( $V_3+V_4$ ).

L'allure du graphe densité en fonction du taux de verre ( $V_1+V_2$ ) introduit (fig. 35) montre que la densité de la brique diminue avec l'augmentation de la teneur en verre ( $V_1+V_2$ ).

Or lorsque au fur et mesure que nous substituons la chamotte avec du taux de verre de granulométrie ( $V_3+V_4$ ), la densité des briques augmente (fig. 36).

Nous constatons que l'introduction progressive du déchet de verre grossier en remplacement à la chamotte tend à donner à la brique une densité comparable à celle de la brique commercialisée (tab. 32).

### IX.1.5. Détermination du retrait R :

Les tableaux 33 et 34 présentent les retraits R dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre.

**Tableau 33 :** Les retraits R dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_1+V_2$ ).

Echantillon	Caractéristiques %	$R_s$ (%)	$R_c$ (%)	$R_t$ (%)
1	100% C + 0%( $V_1+V_2$ )	0	0	0
2	95% C + 5%( $V_1+V_2$ )	0	0	0
3	85% C + 15%( $V_1+V_2$ )	0	0	0

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ), ( $V_1+V_2$ ) : déchet de verre avec deux granulométries  $V_1$  et  $V_2$ .

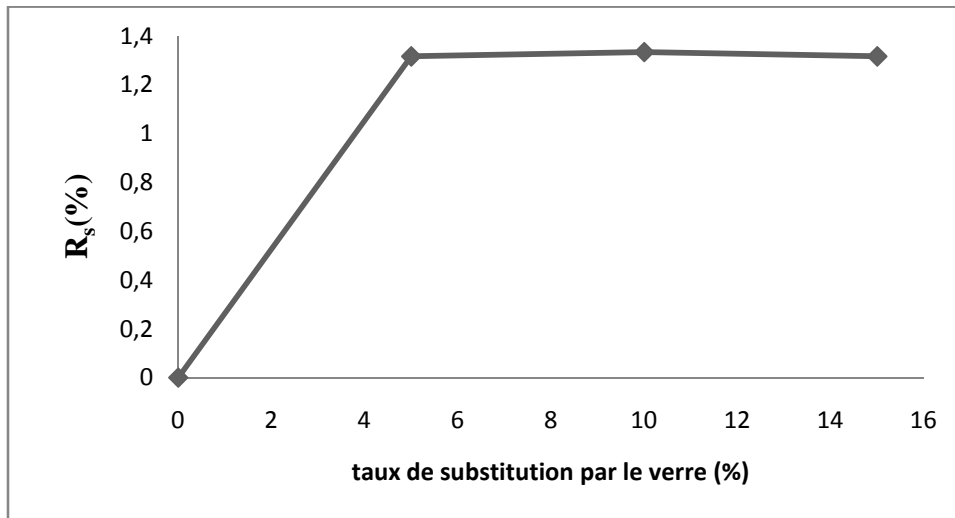
D'après les résultats obtenus (tab. 33), le retrait de séchage est inexistant dans les échantillons où la chamotte est substituée graduellement avec du déchet de verre ( $V_1+V_2$ ).

Le retrait de cuisson en fonction du taux de verre de granulométrie ( $V_1+V_2$ ) introduit à la place de la chamotte est nul.

**Tableau 34 :** Les retraits R dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_3+V_4$ ).

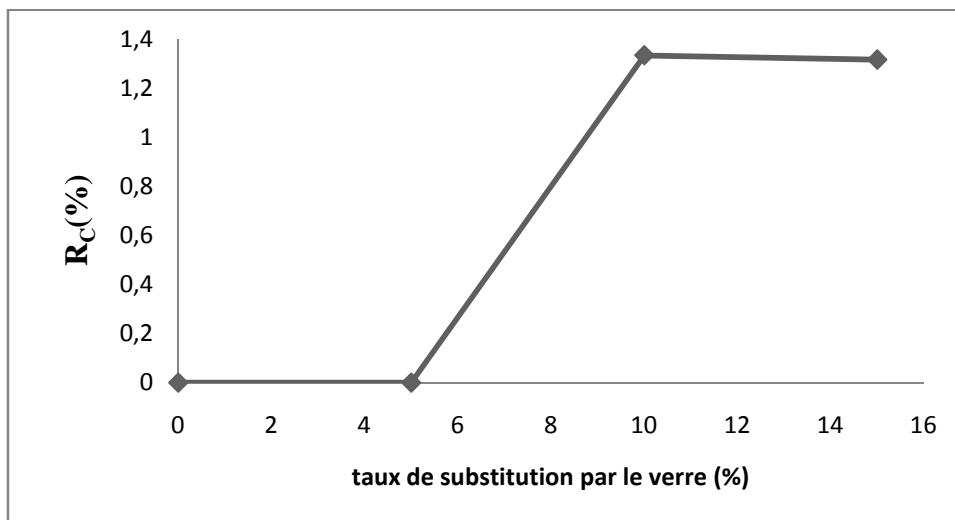
Echantillon	Caractéristiques %	$R_s$ (%)	$R_c$ (%)	$R_t$ (%)
1	100% C + 0%( $V_3+V_4$ )	0	0	0
2	95% C + 5%( $V_3+V_4$ )	1,3157	0	0
3	90% C + 10%( $V_3+V_4$ )	1,3333	1,3333	1,3513
4	85% C + 15%( $V_3+V_4$ )	1,3157	1,3157	1,3157

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ), ( $V_3+V_4$ ) : déchet de verre avec deux granulométries  $V_3$  et  $V_4$ .



**Figure 37 :** Taux de retrait de séchage  $R_s$  en fonction du taux de substitution ( $V_3+V_4$ ).

Le graphe du taux de retrait de séchage en fonction du taux de verre ( $V_3+V_4$ ) (fig. 37) montre que le retrait de séchage augmente au fur et à mesure que nous augmentons le taux de substitution de la chamotte avec du déchet de verre de granulométrie ( $V_3+V_4$ )



**Figure 38 :** Taux de retrait de cuisson  $R_c$  en fonction du taux de substitution ( $V_3+V_4$ ).

En analysant le graphe de la figure 38, nous observons que le retrait de cuisson reste le même après substitution de 5% de la chamotte avec du déchet de verre mais lorsque nous augmentons le taux de substitution par le verre ( $V_3+V_4$ ), le retrait de cuisson augmente.

Le retrait total est nul quelque soit le taux de substitution sauf pour l'échantillon à 15% ( $V_3+V_4$ ).



### IX.1.6. Discussion :

Lorsque la teneur en eau absorbée diminue, cela veut dire qu'il y a un plus grand rapprochement entre les particules de la structure. Cela crée un espace réduit d'où une diminution de la porosité.

Un retrait total engendre un taux d'eau absorbé plus faible car les grains sont plus rapprochés d'où diminution de la porosité.

### IX.1.7. Conclusion

La porosité évolue de la même manière que la teneur en eau absorbée.

## IX.2. Caractérisation des propriétés à chaud :

Un certain nombre de tests à chaud ont été effectués sur ces échantillons afin de déterminer leurs propriétés

### IX.2.1. Détermination de la résistance pyroscopique :

Les tableaux 35 et 36 présentent la résistance pyroscopique dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre.

**Tableau 35 :** La résistance pyroscopique dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_1+V_2$ ).

Echantillon	Caractéristiques %	Les fissures	
		Les arêtes	Les surfaces
1	100% C+ 0% ( $V_1+V_2$ )	0	0
2	95% C + 5% ( $V_1+V_2$ )	0	0
3	85% C + 15% ( $V_1+V_2$ )	3	2

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ), ( $V_1+V_2$ ) : déchet de verre avec deux granulométries  $V_1$  et  $V_2$ .

Le tableau 36 présente la résistance pyroscopique dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_3+V_4$ ).

**Tableau 36 :** La résistance pyroscopique dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_3+V_4$ ).

Echantillon	Caractéristiques %	Les fissures	
		Les arêtes	Les surfaces
1	100% C+ 0% ( $V_3+V_4$ )	0	0
2	95% C + 5% ( $V_3+V_4$ )	4	1
3	90% C + 10% ( $V_3+V_4$ )	3	4
4	85% C + 15% ( $V_3+V_4$ )	4	5

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ), ( $V_3+V_4$ ) : déchet de verre avec deux granulométries  $V_3$  et  $V_4$ .

Nous avons relevé aucune déformation lorsque nous substituons de la chamotte par du déchet de verre.

Mais lorsque nous substituons 5% de la chamotte par du déchet de verre, nous observons des fissures sur les arêtes et les surfaces de la brique.

Nous constatons (tab. 36) que plus nous remplaçons la chamotte par le déchet de verre de granulométrie ( $V_3+V_4$ ), plus le nombre de fissures augmente sur les arêtes et les surfaces.

### IX.2.2. Détermination du coefficient de la dilatation thermique $\alpha$ :

Les tableaux 37 et 38 présentent la dilatation thermique  $\alpha$  dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre.

**Tableau 37 :** La dilatation thermique  $\alpha$  dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_1+V_2$ ).

Echantillon	Caractéristiques %	$\alpha$ (%)
1	100% C + 0% ( $V_1+V_2$ )	0
2	95% C + 5% ( $V_1+V_2$ )	0
3	85% C + 15% ( $V_1+V_2$ )	0

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ), ( $V_1+V_2$ ) : déchet de verre avec deux granulométries  $V_1$  et  $V_2$ .

**Tableau 38 :** La dilatation thermique  $\alpha$  dans les briques confectionnées à différents taux de substitution par du verre ( $V_3+V_4$ ).

Echantillon	Caractéristiques %	$\alpha$ (%)
1	100% C + 0% ( $V_3+V_4$ )	0
2	95% C + 5% ( $V_3+V_4$ )	0
3	90% C + 10% ( $V_3+V_4$ )	0
4	85% C + 15% ( $V_3+V_4$ )	$0,1367.10^{-9}$

C : chamotte avec deux granulométries ( $C_1+C_2$ ), ( $V_3+V_4$ ) : déchet de verre avec deux granulométries  $V_3$  et  $V_4$ .

### IX.2.3. Discussion :

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que tous les échantillons présentent une dilatation thermique nulle (tab.37) donc une bonne résistance aux chocs thermiques sauf pour l'échantillon comportant 15% de verre ( $V_3+V_4$ ) (tab.38). Néanmoins, le coefficient de dilatation thermique obtenu est très faible.

Aucun affaissement n'a été observé. C'est la preuve que notre échantillon est réfractaire.

Celle-ci évolue donc de la même manière que le produit de l'unité.

### IX.2.4. Conclusion :

La résistance pyroscopique est acceptable car nous n'avons relevé aucune déformation seulement des fissures.

Le déchet de verre introduit dans les produits de départ influe sur le produit fini. Cet effet augmente avec une augmentation du taux de verre introduit dont la dimension des particules est grande.

# Conclusion générale

## Conclusion générale :

Les matières dégraissantes utilisées dans l'industrie des briques réfractaires diminuent la plasticité des argiles. Ces matières freinent les retraits tout en augmentant la porosité de la pâte. Il en résulte beaucoup plus de facilité pour obtenir des pièces moins sensibles aux déformations et aux fêlures dues au retrait.

La chamotte est considérée comme matière dégraissante. Ajoutée à l'argile, elle en augmente la résistance à la cuisson, ou en diminue le retrait au séchage.

D'un autre côté, le verre est un matériau recyclable à 100%. Il se recycle à l'infini, sans rien perdre de ses qualités. Son recyclage permet d'économiser les matières premières, et nous évite son incinération avec les ordures ménagères. La valorisation du verre contribue dans la protection de l'environnement.

L'objectif de notre étude consiste à obtenir des briques réfractaires contenant un pourcentage de déchet de verre en remplacement graduel de la matière dégraissante (chamotte).

Nous avons constaté que la porosité des briques obtenues est plus faible que celle du produit de l'unité Abrasif –SAIDA-

Les couleurs obtenues au moulage et après cuisson n'ont pas changé pour les briques comportant de la chamotte enrichie en silice et celle de nature silico-alumine.

Le maintien des couleurs depuis le moulage jusqu'à la cuisson montre que les matières premières sont exemptes d'impuretés.

Aucun affaissement n'a été observé. Les arêtes sont restées droites quelque soit le taux de substitution de la chamotte par du verre aux différentes granulométries.

Le déchet de verre est plus riche en silice que la chamotte, qui par contre est plus riche en alumine. Donc le verre contribue à confectionner des briques réfractaires à haute teneur en silice.

Les taux de pertes de masse constituent une preuve de l'absence de composés organiques et volatils dans les briques confectionnées par incorporation de verre.

La masse volumique des briques n'a pas beaucoup changé lorsque nous incorporons du verre dans la chamotte

Le taux de verre substitué à la chamotte influe sur la densité de la brique. Plus celui-ci augmente plus la densité diminue lorsque nous introduisons du verre de granulométrie moyenne. Or si nous incorporons du verre grossièrement broyé, la densité augmente.

Donc la granulométrie influe sur la masse volumique

La quantité d'eau absorbée diminue en ajoutant le déchet de verre dans la conception des briques.

La porosité dépend de la granulométrie du verre ajouté. Celle-ci diminue lorsque la granulométrie est élevée.

La chamotte riche en alumine engendre une porosité plus élevée que celle riche en silice.

Les briques produites avec un taux de verre dépassant 10% et ayant une granulométrie comprise entre 0,7 et 1,2mm présentent des retraits à la cuisson et total non négligeables. Leur conception est accompagnée de fissuration.

Pour améliorer la qualité des produits, il faut introduire le verre en granulométrie fine.

Nous avons relevé aucun retrait total ni dilatation thermique pour tous nos produits englobant du verre de granulométrie fine. Ceci nous pousse à dire que le verre renferme des phases expansibles.

L'introduction du déchet de verre dans la fabrication des briques réfractaires ne donne pas lieu à de nouvelles phases minéralogiques car le verre est amorphe.

Le déchet de verre peut jouer le rôle d'agglomérant entre les grains d'argile et augmenter ainsi la résistance de la brique.

Le remplacement de 5 et 15% de la chamotte avec du verre à granulométrie  $V_1+V_2$  a donné des résultats acceptables.

Un taux de plus en plus élevé de verre de granulométrie  $V_3+V_4$  dans la chamotte provoque des fissures qui ne sont pas profondes mais superficielles, néanmoins les caractéristiques de la brique produite sont acceptables.

Tous les aspects qui viennent d'être discutés prouvent qu'il est possible de fabriquer des réfractaires avec une chamotte riche en silice à partir de déchets locaux. La réalisation d'un tel objectif mettrait à la disposition des fabricants industriels, des matériaux qui permettront d'éviter les coûts liés aux importations actuelles et de contribuer à la préservation de l'environnement.

## Résumé:

La brique réfractaire est une brique qui conserve ses propriétés mécaniques à très haute température, et qui répond aux besoins des industries telles que: cimentière, céramique, sidérurgique. L'objectif de ce travail est l'incorporation du déchet de verre graduellement dans la conception de la brique réfractaire par substitution de la chamotte utilisée dans l'unité abrasif-SAIDA-. Les résultats démontrent qu'une substitution de la chamotte avec du verre finement broyé n'influe pas sur les propriétés à froid et à chaud de la brique confectionnée avec ce nouveau procédé. Or un taux de substitution dépassant 10% de la chamotte avec du verre grossièrement broyé influe sur les propriétés à chaud de la brique confectionnée.

**Mots-clés :** brique réfractaire, verre, chamotte, porosité, densité.

## ملخص:

الطوب الحراري هو الطوب الذي يحتفظ على خصائصه الميكانيكية في درجات حرارة عالية، والتي تلي احتياجات الصناعات مثل الاسمنت والسيراميك والصلب، والهدف من هذا العمل هو إدماج نفايات الزجاج تدريجيا في تصميم الطوب الحراري من خلال استبدال chamotte المستعمل في وحدة المواد الكاشطة-سعيدة-. النتائج تبين أن استبدال chamotte بالزجاج المطحون بدقة لا يأتري على خصائص الباردة و الساخنة للطوب المصنوع مع هذه العملية الجديدة. لكن معدل استبدال يزيد عن 10% من chamotte مع زجاج الخشن يؤثر على خصائص الحارة للطوب المصنوع.

**كلمات مفتاحية:** الطوب الحراري, زجاج, chamotte, المسامية, الكثافة.

# Références bibliographiques



## Référence bibliographique :

[1]- Norme ISO 1927, 1984.

[2]- **Frédéric THUMMEN** Propriétés mécaniques et durée de vie de bétons réfractaires, Thèse doctorat Université de Lyon, 2004

[3]- Source : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE) 2004.

[4]- **M. KEHILA Youcef, M. GOURINE Lazhari** "la gestion des déchets solides en Algérie" Réseau SWEEP-Net, Algérie, Juillet 2010.

[5]- **Jacques Lachnitt**, Les matériaux réfractaires, que sais-je? Presses universitaires de France, paris, 1983.

[6]- **Jean-Marc robin** Comportement Thermomécanique Des céramiques Réfractaires, Edition Laboratoire de mécanique et technologie, 1995.

[7]- **Jacques Poirier**, les céramiques réfractaires de l'élaboration aux propriétés d'emploi, Verres Céramiques & Composites, Vol. 1, N°2 28-42, 2011.

[8]- **Quai Marechal Joffre**, Kompass International. Société Produits Réfractaires de Bollène Valabrègue, France 2009.

[9]- **F.H. Norton**, Fine Ceramics, Technology and Applications, Robert E. Krieger, USA, 1978.

[10]- **Lucas.G, P. Cros, J. Lang**, Les roches sédimentaires, étude microscopique des roches meubles et consolidées, Tome 2, édition DOIN, P38, 1976.

[11]- **Morel.R.** Les sols cultivés. Lavoisier, Paris, 1996.

[12]- **Chen C.Y., G.S. Lan, W.H. Tuan** Ceram. Int, 26 715-720, 2000.

[13]- **ERuh, R.N. Wallace**, Am.Ceram.Soc.Bul 42(2) 52-56p, 1963.

[14]- **Claude guillemet**, Technique de l'ingénieur, AM2 matériaux non métallique, (A 2100-1-2100-9) édition 1993.

[15]- **Ayadi Azzedine**, Technologie du verre Edition OPU, 1994.

[16]- **Peter Rice; Hugh Dutton**, Le verre structurel, Editions du Moniteur Paris, 1990.

- [17]- **Louis Nicolas**, Encyclopédie Méthodique, P 362, 1815.
- [18]- **Bernhard Ilschner; Christian Janot**, Matériaux émergents, Éditeur : Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2001.
- [19]- **Jo Pérez** - Matériaux non cristallins, Éditeur : presses polytechniques P321, 2001
- [20]- **M. Falcy**, Bore et ses composés, encyclopédie toxicologie professionnelle, 2002.
- [21]- **Jean-Paul Bailon; Jean-Marie Dorlot**. Des matériaux, Édition Presses internationales Polytechnique, Montréal, 2000.
- [22]- [James Barton](#); [Claude Guillemet](#) Le verre, science et technologie Éditeur : Les Ulis : EDP sciences, 2005.
- [23]- [Jean-Claude Canonne](#), Emaux et glaçures céramiques, Édition Eyrolles, DL Paris 2010.
- [24]-[Charles Bray](#), Dictionary of glass: materials and techniques Edition A & C Black [u.a.] London, 2001.
- [25]- **Aurélié Tournié**, Analyse Raman sur site de verres et vitraux anciens : modélisation, procédure, lixiviation et caractérisation, thèse de doctorat, université pierre et marie curie Paris, 2009.
- [26]-[Jean-Marie Haussonne](#), Céramiques et verres, Édition Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2005.
- [27]- [Marie-Hélène Chopinet](#), La couleur du verre, en suivant Georges Bontemps, Journées organisées par l'USTV et le GDR Verres, Nancy 2010.
- [28]- [Charlotte Newton et Judy Logan](#), Le soin de la céramique et du verre. Notes de l'ICC Edition: institut de conservation du Canada, 2007
- [29]- **Wolf E Matthes; Alexandre Avon; Jean-Claude Canonne**, Emaux et glaçures céramiques : plus de 1100 formules. Édition Eyrolles Paris, 2010.

- [30]- **Claude guillemet**, Technique de l'ingénieur (A 2100-1-2100-9) édition 1993.
- [31]- **W.L BRAGG**, Fonda: fluorescence de la rhodamine. —Journal de physique, série VII, n° 8, août 1936.
- [32]- **Zachariasen, W. H.** “The atomic arrangement in glass”, Journal of the American chemical society, vol. 54, p.3841-3851, 1932.
- [33]- **B.E. Warren**, “X-ray determination of the structure of glass”. Journal of American Ceramic Society, vol. 17, no 8. 1934.
- [34]- **James Barton; Claude Guillemet**, Le verre, science et technologie, Éditeur : Les Ulis : EDP sciences, 2005.
- [35]- **W. Larbi.**, Cours Verre, Conservatoire National des Arts et Métiers, Matériaux de construction CCV014 ;
- [36]- **Anne-Françoise Cannella; Jean, d'Outremeuse.** Gemmes, verre coloré, fausses pierres précieuses au Moyen Âge, Édition Droz Genève, 2006.
- [37]- **Georges Gallet**, Le verre et la céramique dans la technique du vide, P127 Édition Eyrolles, 1962.
- [38]- **Christian Schittich**, Construire en verre Édition Presses polytechniques et universitaires romandes Lausanne:, P63, 2001,.
- [39]-Le-recyclage-ET-le-réchauffement-climatique.2009 sur le site:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Glass\\_recycling](http://en.wikipedia.org/wiki/Glass_recycling)
- [40]- Source de l'image : <http://www.greenzer.fr>
- [41]- **Brahim DJEMACI**, La gestion des déchets en Algérie: analyse prospective et éléments d'efficacité, thèse de doctorat., Université de Rouen,2011
- [42]- Source : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement **MATE** 2005.
- [43]- **Fédération Européenne de verre et emballages.** Statistiques mondiales écologiques,  
 [44]- **xinhua**, agence de presse chinoise, 30. juillet.2006.

[45]- **Luc Godbout, Marcelin Joanis et Nathalie de Marcellis-Warin**, Le Québec économique, Presses de l'Université Laval (PUL) 2011.

[46]- site web de **RECOVERING** société d'expertise et de conseil dans le montage et le développement de filières de valorisation des matériaux consulté le 12/05/2011

[47]- **John Frederick Nye**, Propriétés physiques des cristaux [« Physical Properties of Crystals »], Dunod, Paris, 1961.

[48]- **Bernache, B. Assollant**. «Chimie physique du frittage», Ed., Hermès, Paris 65, 53 p. 1993