

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE.  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique.  
Université Saad DAHLAB, Blida 1.



**Faculté de Technologie.**  
**Département Génie des Procédés.**  
**Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme Master 2 option**  
**Génie Chimique.**

**Thème**

**Influence des fines particules sur le  
comportement et la longévité du four de  
fusion**

Présenté par :

**BOUKHTACHI Samia**

**KHALFI Hounaida**

Soutenu le 11/07/2023.

**Devant le jury :**

**PRESIDENT : M. BOURAS Omar.**

**EXAMINTEUR : M. DJEGHDJEGH Abdelmalek.**

**PROMOTEUR : M. CHANANE Kamal.**

**CO-PROMOTEUR : M. MEZAI Fadel.**

Promotion 2023.

## *Remerciements*

*"قل بفضل الله و برحمته فبذلك فليفرحوا" سورة يونس*

*Après avoir rendu grâce à Dieu Le Tout Puissant.*

*Nous tenons à remercier chaleureusement Monsieur Kamal Chanane, enseignant à l'Université Blida -1- pour avoir accepté de diriger ce travail. Nous sommes chanceuses de travailler avec lui car sa gentillesse et sa confiance ont été notre clé de réussite.*

*Nous remercions aussi le Directeur de MFG qui a eu l'amabilité de nous accueillir comme stagiaires au sein de son entreprise.*

*Nous tenons à témoigner toute notre gratitude à Monsieur Fadel Mezai, pour le temps qu'il nous a consacré, ces précieuses informations, son intérêt et sa compréhension ainsi que tout le staff de la ligne de MFG.*

*Un grand merci pour Dr Salah Aoudj, responsable du master génie chimique et à tous les enseignants du département génie des procédés qui par leurs compétences nous ont soutenues dans la poursuite de nos études.*

*Nous voudrions remercier également nos familles respectives qui nous ont soutenues et supportées tout au long de ces années d'études pour que nous puissions êtres les meilleures.*

*Merci mes amis, pour votre sincérité, amitié, amour, soutien, pour tous les merveilleux souvenirs...*

*Merci encore une fois.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail,*

*A mes chers parents ceux qui ont sacrifié pour ma réussite,*

*A la femme qui m'a donnée la vie, ma source de courage, ma chère  
mère Karima.*

*A qui je porte son nom avec fierté, mon exemple éternel et l'homme de  
ma vie, mon père Nouredine.*

*Que Dieu vous protège, avec une longue vie pleine de joie et de  
bonheur. Que Dieu m'appuie pour que je sois votre fierté et votre rêve  
tant espéré.*

*A mes chères sœurs, ma précieuse Nabila, l'adorable Abla, ma jumelle  
Faiza et ma puce Imen à tous les moments d'enfance partagées avec  
vous, pour votre soutien, vos conseils et tous ce que vous m'avez donné  
jusqu'à ce jour-là.*

*A mes chouchous Nada, Ilyes et mon coup de cœur Anes.*

*A mon fiancé Youcef, qui m'a supporté dans les moments difficiles et  
qui m'a comblé d'amour et qui parie à ma réussite.*

*A ma chère binôme Hounaida, pour les moments de joie et de fatigue  
et stress qu'on a partagée ensemble, merci pour cette amitié.*

*A mes chers beaux-frères : Rabah, Ahmed et Samir.*

*À toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de loin pour la  
réussite de ce travail qu'ils trouvent ici mes sincères sentiments.*

*À toute la promotion 2023 chacun par son nom. À moi-même.*

*Samia.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail,*

*A mes cher parents Ahmed et Razika, pour l'amour qu'ils m'ont toujours donné, aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération pour votre soutien et mon amour éternel.*

*Je remercie mes chères sœurs : ma grande sœur Ahlem pour sa gentillesse, sa patience, sa joie de vivre, ma adorable Imene, ma petite princesse Lilya, et mon grand frère mon bras droit Ali qui m'avaient toujours soutenue et encouragée durant toute ma vie.*

*A ma binôme Samia, la personne la plus adorable que j'ai connue, pour tous nos souvenirs inoubliables, pour sa volonté et son enthousiasme. J'avais durant ces années, la chance que nous sommes les meilleures amies.*

*A toutes ma famille et mes amies.*

*A toute la promotion GPC2023 chacun par nom,*

*Puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite.*

*A moi-même.*

*Hounaida.*

## Résumé

Nous sommes intéressés dans ce travail aux comportements des fines particules dont le diamètre est inférieur à 160  $\mu\text{m}$  dans le four de fusion du verre plat au niveau de l'établissement MFG (Medeteranean Float Glass). Des résultats intéressants ont été obtenus quant à la composition de la charge et sa granulométrie. On a pu montrer leurs influences sur l'alimentation du four ainsi que son régime thermique. Nous avons déterminé que la charge du four comporte 12% de fines particules provenant principalement du sable à 34% et de la dolomie à 29%. Pour remédier à ce problème, nous nous sommes proposés des solutions réalisables afin de réduire les fines particules dans la charge et éviter leur colmatage au niveau du four.

**Mot clés :** Fines particules, Four de fusion, Verre flotté, Régime thermique.

## Abstract

We are interested in this work in the behavior of fine particles whose diameter is less than 160  $\mu\text{m}$  in the flat glass melting furnace at the MFG (Medeteranean Float Glass) establishment. Interesting results have been obtained regarding the composition of the filler and its particle size. We were able to show their influence on the supply of the furnace as well as its thermal regime. We have determined that the furnace charge has 12% fine particles coming mainly from sand at 34% and dolomite at 29%. To remedy this problem, we have proposed feasible solutions to reduce the fine particles in the charge and avoid their clogging at the level of the furnace.

**Keywords:** Fine particles, Melting furnace, Float glass, Thermal regime.

## ملخص

نحن مهتمون بهذا العمل في سلوك الجسيمات الدقيقة التي يقل قطرها عن 160 ميكرومتر في فرن صهر الزجاج المسطح في مؤسسة MFG. م الحصول على نتائج مثيرة للاهتمام فيما يتعلق بتكوين الحشو وجم الجسيمات. يمكننا إظهار تأثيرها على إمداد الفرن بالإضافة إلى نظامه الحراري. لقد قررنا أن حنة الفرن تحتوي على 12% جسيمات دقيقة. أي أسا لسن الرمل بنسبة 34% والدولوميت بنسبة 29%. لمعالجة هذه المشكلة، اقترنا لولا مجدية لتقليل الجسيمات الدقيقة في الشحنة وجنب انسدادها على مستوى الفرن.

**كلمات مفتاحية:** الجسيمات الدقيقة، فرن الصهر، الزجاج العائم، النظم الحراري.

## Liste des figures

### Chapitre I : Technologie des verres.

Figure I.1 : Vue sur l'usine MFG.....	3
Figure I.2 : Réseaux de distribution de MFG vers l'étranger .....	5
Figure I.3 : Le verre plat de différentes dimensions.....	7
Figure I.4 : Le verre plat feuilleté.....	7
Figure I.5 : Le verre plat à couches .....	8
Figure I.6 : Schéma de principe de fabrication du verre plat .....	13
Figure I.7 : Schéma de traitement des matières premières .....	14
Figure I.8 : Le mélange transport vers le four de fusion .....	14
Figure I.9 : (a) Structure cristalline et (b) Structure vitreuse de la silice.....	15
Figure I.10 : Rupture d'une liaison SiO par introduction d'une molécule NaO dans le réseau de silice .....	16
Figure I.11 : Substitution de deux molécules SiO <sub>2</sub> par une molécule Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> dans la structure d'un verre silicate de sodium .....	17
Figure I.12 : Four de refroidissement en rouleau, étenderie.....	22
Figure I.13 : Schéma descriptif de la coupe .....	23
Figure I.14 : Schéma descriptif du système de retour du calcin issu de la coupe .....	24
Figure I.15 : Stockage des feuilles de verre avant expédition.....	24

### Chapitre II : Technologie des fours.

Figure II.1: Four à pot .....	25
Figure II.2 : Principe de fonctionnement d'un four continu.....	26
Figure II.3 : Four électrique pour verre .....	27
Figure II.4 : Four à flamme .....	29
Figure II.5 : Four à Régénérateurs et principe de fonctionnement.....	30
Figure II.6 : Chambre de combustion.....	31
Figure II.7 : Tailles des fines particules dans l'air .....	33

### Chapitre III : Matériels et méthodes.

Figure III.1 : Diviseur rotatif de type Retsch PT 100 et tamiseur type Retsch AS200 .....	35
---	----

Figure III.2 : Photo d'un spectro-analyseur de type BRUKER S8 TIGER.....	37
Figure III. 3 : Vibro-broyeur à disque RS200 et Four Minifuse.....	37

### **Chapitre IV : Résultats et discussions.**

Figure IV.1: Tamis utilisés pour l'analyse granulométrique.....	41
Figure IV.2 : Histogramme de la distribution granulométrique du sable.....	42
Figure IV.3 : Histogramme de la distribution granulométrie de la dolomie .....	44
Figure IV.4: Histogramme de la distribution granulométrie du carbonate de soude .....	45
Figure IV.5: Histogramme de la distribution granulométrie du charbon .....	46
Figure IV.6 : Histogramme de la distribution granulométrie du carbonate de calcium .....	48
Figure IV.7 : Histogramme de la distribution granulométrie du sulfate de sodium.....	49
Figure IV.8 : Histogramme de la distribution granulométrie du feldspath .....	50
Figure IV.9 : Phénomène d'obstruction dans le silo de sable .....	52
Figure IV.10 : Formation des entonnoirs dans les silos .....	53
Figure IV.11 : Formation des ponts dans les silos .....	53
Figure IV.12 : Formation des blocs dans le silo.....	54
Figure IV.13 : Dégradation des parois d'un silo par les fines particules.....	55
Figure IV.14 : Brique d'empilage dans les régénérateurs .....	56
Figure IV.15 : Représentation du four de fusion et système de régénération .....	56
Figure IV.16 : Bouchage des conduites de four par les fine particules en fusion .....	57
Figure IV.17 : Conduites de gaz bouchées par les fines paricules .....	57
Figure IV.18 : Zone d'échauffement dans les parois du four avec accumulation de fines particules .....	58
Figure IV.19 : Représentation du bouchage de système de régénération par les fines particules .....	59
Figure IV.20 : Brique réfractaire bouchée par les fines particules.....	59
Figure IV.21 : Filtre à manche .....	60
Figure IV.22 : Bruleur FOSBEL pour décolmater les fines particules .....	61
Figure IV.23 : Bruleur FOSBEL en action dans le four.....	61

## Liste de Tableaux

### Chapitre I : Technologie des verres.

Tableau I.1 : Principales matières premières qui composent le verre plat .....	15
--	----

### Chapitre IV : Résultats et discussions.

Tableau IV.1 : Analyse chimique par fluorescence X de sable.....	39
Tableau IV.2 : Analyse chimique par fluorescence X de feldspath .....	39
Tableau IV.3 : Analyse chimique par fluorescence X de calcaire.....	40
Tableau IV.4 : Analyse chimique par fluorescence X de dolomie.....	40
Tableau IV.5 : Exigences des compositions exprimées par MFG.....	40
Tableau IV.6 : Analyse granulométrie du sable MFG .....	42
Tableau IV.7 : Analyse granulométrie de la dolomie MFG.....	43
Tableau IV.8 : Analyse granulométrie du carbonate de soude MFG .....	45
Tableau IV.9 : Analyse granulométrie du charbon MFG.....	46
Tableau IV.10 : Analyse granulométrie du carbonate de calcium MFG.....	47
Tableau IV.11 : Analyse granulométrie du sulfate de sodium MFG .....	48
Tableau IV.12 : Analyse granulométrie du feldspath MFG.....	50
Tableau IV.13 : Fractions des particules fines dans la charge .....	51

## **Liste des abréviations**

**ALGERAC** : Organisation Algérienne d'Accréditation

**ASTM** : American Society For Testing And Materials

**AZS** : Alumine, Zirconium , Silice

**CE** : Conformité européenne

**CEI** : Communauté des Etats indépendants

**DLF** : Dimension largeur de fabrication

**FP** : fines particules

**ISO** : Organisation internationale de normalisation

**MFG** : Mediterranean Float Glass

**PLF** : Plateau largeur de fabrication

**PM** : Particulate Matter

**PVB** : Butyral Poly Vinyle

**PVD** : Physical Vapor Deposition

**PF** : Perte au Feu

**QHSE** : Qualité Hygiène Sécurité et Environnement

## Table des matières

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

### Partie bibliographique

#### Chapitre I : Technologie des verre

<b>I.1. Présentation du l'entreprise MFG .....</b>	<b>3</b>
I.1.1. Histoire et évolution de MFG .....	3
I.1.2. Développement .....	4
I.1.3. Distribution .....	4
I.1.4. Objectifs de MFG.....	5
I.1.5. Qualité et Gamme .....	5
<b>I.2. Historique du verre.....</b>	<b>6</b>
I.2.1. Définition du verre .....	6
I.2.2. Les types de verre .....	7
I.2.3. Composition du verre.....	8
I.2.4. Les propriétés du verre.....	9
<b>I.3. Les différentes étapes de fabrication du verre plat .....</b>	<b>12</b>
I.3.1. Préparation du mélange vitrifiable.....	13
I.3.2. Mélange des matières premières .....	13
I.3.3. Le four de fusion.....	18
I.3.3.1. Conception du four.....	18
I.3.4. Bain d'étain.....	21
I.3.5. Etenderie .....	21
I.3.6. La découpe .....	22
I.3.7. Système de retour de calcin .....	23
I.3.8. Stockage.....	24

## Chapitre II : Technologie des fours

### Table des matières

<b>II.1.</b>	<b>Les fours industriels</b> .....	<b>25</b>
<b>II.2.</b>	<b>Classification des fours</b> .....	<b>25</b>
II.2.1.	Fours discontinus .....	25
II.2.2.	Fours continus.....	26
<b>II.3.</b>	<b>Modes de chauffage dans les fours</b> .....	<b>27</b>
II.3.1.	Fours électriques .....	27
II.3.2.	Fours à flamme .....	28
II.3.3.	Fours à air froid .....	29
II.3.4.	Fours à régénération ou récupération.....	29
II.3.5.	Fours Oxy-Fuel.....	30
<b>II.4.</b>	<b>La combustion dans les fours</b> .....	<b>31</b>
<b>II.5.</b>	<b>Les fines particules</b> .....	<b>32</b>
II.5.1.	Définition.....	32
II.5.2.	Composition des fines particules .....	32
II.5.3.	Sources des particules fines .....	32
II.5.4.	Classification des particules d'après la granulométrie.....	32
II.5.5.	Les effets des fines particules sur le verre .....	33

## Partie expérimentale

### Chapitre III : Matériels et méthodes

<b>III.1.</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>34</b>
<b>III.2.</b>	<b>L'analyse granulométrique</b> .....	<b>34</b>
III.2.1.	Matériels et produits utilisés.....	35
III.2.2.	Mode opératoire .....	35
<b>III.3.</b>	<b>Fluorescence des rayons X</b> .....	<b>36</b>
III.3.1.	Matériels et produits utilisés.....	37

III.3.2.	Mode opératoire .....	<b>Table des matières</b> .....	38
----------	-----------------------	---------------------------------	----

## **Chapitre IV : Résultats et discussions**

<b>IV.1.</b>	<b>Analyse de la matière première .....</b>	<b>39</b>
IV.1.1.	Analyse chimique par fluorescence.....	39
IV.1.2.	Analyse granulométrique .....	41
<b>IV.2.</b>	<b>Influence des fines particules .....</b>	<b>52</b>
IV.2.1.	Action des fines particules sur l'alimentation du four de fusion.....	52
IV.2.2.	Action des fines particules sur le régime thermique du four.....	55
<b>IV.3.</b>	<b>Solutions proposées pour éliminer les fines particules .....</b>	<b>59</b>
IV.3.1.	Filtre à manche.....	60
IV.3.2.	Débouchage thermique.....	60
IV.3.3.	Changement des briques réfractaires .....	61
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>63</b>

## **Références bibliographiques**

# Introduction générale

### Introduction générale

Le verre est l'une des inventions qui ont accompagné l'exploration humaine pendant au moins 100 000 ans. Il existe dans une grande variété d'applications et de domaines. Les produits verriers ont connu une évolution étonnante au cours des dernières décennies, avec des gains de performances étroitement liés à la volonté de répondre parfois à des exigences spécifiques, qui se sont traduites par une multitude de matériaux, de propriétés et de technologies.

Le verre est un matériau qui, théoriquement, a des possibilités de combinaison infinies. C'est pourquoi ses propriétés sont également très diverses, ce qui lui ouvre de nombreux champs d'utilisation et lui offre chaque jour de nouveaux champs. Il existe également de nombreuses publications sur le verre [1].

Le procédé de flottage du verre ou en anglais Float Glass, est la dernière technologie de fabrication de verre plat qui a contribué à la croissance de l'industrie et à la disponibilité des matériaux de fabrication. L'élaboration du verre se base sur un mélange bien définie de matières premières et principalement de la silice. Ce mélange se caractérise par les propriétés différentes de chaque substance en termes de composition chimique et de distribution granulométrique. Cette différence de distribution mène à avoir une fraction de fines particules qui auront certainement un effet sur la qualité du matériau fabriqué.

Notre stage de fin d'étude s'est déroulé durant les deux mois, février et mars au niveau de la 2<sup>ème</sup> ligne de production du verre Float à l'entreprise Mediterranean Float Glass (MFG), sur la problématique des fines particules et leurs impacts sur le four de fusion, son alimentation ainsi que son régime thermique.

Dans ce contexte l'objectif principal que nous avons fixé est d'étudier l'influence des fines particules sur le fonctionnement du four et sa longévité. Pour cela nous avons effectué des analyses physiques et chimiques sur les matières premières utilisée et la qualité du produit fini. Enfin nous avons proposé des solutions pour les éliminer au niveau de la ligne de production.

De façon générale le plan de ce mémoire s'articulera de manière suivante :

Une partie théorique devisée en deux chapitres :

Le premier chapitre décrit la présentation de l'entreprise MFG de Blida lieu de notre stage de fin d'étude ; son histoire, son évolution et ses objectifs. Ensuite une synthèse bibliographique a été présentée commençons par des généralités sur le verre, comprenant un historique du verre, leurs propriétés et les différentes étapes de son élaboration.

Le deuxième chapitre est consacré aux fours de l'industrie verrier, leurs classifications, les différents modes de chauffage ainsi que les fines particules ; ses classifications et leurs effets.

Une partie expérimentale divisée en deux chapitres :

Dans le troisième chapitre, on entame le travail expérimental en présentant les différents matériels et méthodes utilisées au niveau du laboratoire d'analyse du verre Float pour le contrôle et le suivi des matières premières et des produits finis (analyses physico-chimiques et granulométrie).

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation et discussion des différents résultats obtenus sur le verre en général et sur les particules fines en particulier.

Enfin nous terminerons par une conclusion générale montrant les résultats essentiels obtenus dans ce travail et des recommandations spécifiques aux effets des particules fines sur le fonctionnement du four.

# **Partie bibliographique**

# **Chapitre I**

## **Technologie des verre**

## I.1. Présentation de l'entreprise MFG

### I.1.1. Histoire et évolution de MFG

Mediterranean Float Gloss (MFG), entreprise algérienne, est l'un des principaux producteurs de verre plat en Afrique et la seule entreprise de la région du Maghreb, spécialisée dans la production, la transformation du verre plat. Son siège industriel est situé à l'Arbaâ dans la wilaya de Blida à 34 km du port d'Alger et occupe une superficie de 30 hectares [2].

MFG, est une filiale du groupe Cevital, créée en 2007 par l'industriel Issad Rebrab. Le 28 mai 2007, l'usine MFG de Larbaâ est inaugurée par le Président de la république Abdelaziz Bouteflika [3]. Le 14 novembre 2016, une deuxième ligne de production est inaugurée [4].

MFG a nécessité un investissement de 100 Million d'Euros et fait partie d'un grand projet constitué de 3 lignes de verre plat d'une capacité totale de 642 400 Tonnes par an et de 5 usines de transformation de verre [5]. 70% de la capacité installée sont destinés à l'exportation [6].

Avec cet investissement, Cevital est le plus grand producteur de verre plat en Afrique, classé devant l'Afrique du sud avec une production de 500 Tonnes par jour et l'Egypte avec une production de 400 Tonnes par jour [5]. La production journalière moyenne de MGF est de 1800 Tonnes.

MFG dispose d'une unité, dénommée MFG Europe, de deux grandes bases, l'une en Italie et l'autre pour la commercialisation à Valence en Espagne [7].



Figure I.1 : Vue sur l'usine MFG.

### I.1.2. Développement

Dans le cadre de l'extension de ces capacités, MFG s'est développée comme suite :

- 2009 lignes de verre feuilleté 235 T/j.
- 2010 lignes de verre transformé, affiliée à ALSEV.
- 2011 lignes de verre à couches 6 millions m<sup>2</sup>.
- 2016 lignes de verre électroménager avec 9 millions de pièces/an, affiliée à ALSEV aussi.
- Le 28 mars 2016 MFG a inauguré de deuxième ligne Float 800 T/J [2].

### I.1.3. Distribution

Au-delà d'une véritable proximité, le réseau de distribution de MFG assure la synergie des équipes pour garantir la qualité des demandes, le suivi des approvisionnements et la régularité des fabrications.

Le circuit de distribution de MFG Algérie se définit comme suit :

- Vente directe : pour les transformateurs (miroiterie, façadiers, double vitrage et aluminium, entreprise du bâtiment)
- Vente indirecte : pour les grossistes qui s'organisent en deux groupes (le premier groupe pour les régions centre et sud et le deuxième groupe pour les régions est et ouest) [8].

La carte ci-dessous représente les réseaux de distribution de MFG vers l'étranger (Europe, Afrique) :

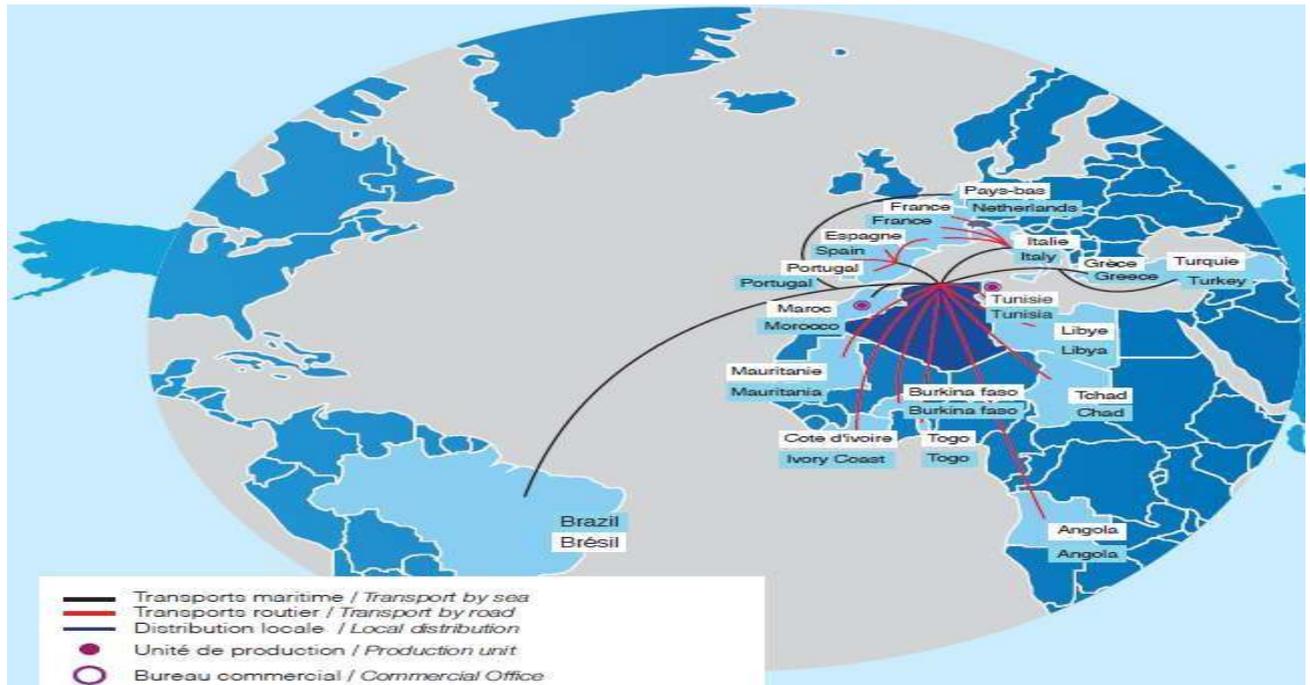


Figure I.2: Réseaux de distribution de MFG vers l'étranger.

### I.1.4. Objectifs de MFG

Dès ses débuts, cette entreprise s'est fixée des objectifs à atteindre. Parmi ses objectifs, nous pouvons citer ce qui suit :

- Satisfaire les clients ;
- Optimiser sa part du marché international
- Satisfaire les demandes du marché national ;
- Respecter l'environnement, l'hygiène et sécurité de ses employés ;
- Un développement qualitatif et quantitatif de la production,

Pour cela, la société MFG envisage de réaliser une deuxième ligne d'une capacité de 800 T/j. La réalisation de ce projet constitue l'une des étapes pour faire de MFG un opérateur incontournable dans le monde du verre plat [5].

### I.1.5. Qualité et Gamme

MFG dispose d'une large gamme de produits de qualité qui répond aux attentes des clients pour les applications les plus exigeantes en matière de design, de confort, d'isolation, de sécurité et de maîtrise d'énergie.

MFG a obtenu un système de gestion QHSE (Qualité Hygiène Sécurité et Environnement) conformément aux exigences des normes suivantes :

- ISO 9001 pour la gestion de qualité
- ISO 14001 pour la gestion de l'environnement
- ISO 45001 pour la santé et sécurité de ses employés
- ISO 17025 versions 2017 pour la gestion de qualité du laboratoire.

En termes de qualité de vie et la satisfaction client, le laboratoire central MFG a été évalué par ALGERAC (Organisation Algérienne d'Accréditation) selon la norme ISO/CEI 17025. 2005 et a reçu une décision favorable pour obtenir la certification d'accès physico-chimique du verre [2].

### **I.2. Historique du verre**

Le verre est une découverte liée à des opérations de métallurgie ou de céramique. La localisation de la première production de cette création est indéterminée entre la Mésopotamie, l'Égypte et la Syrie. Il a été inventé à l'âge de Bronze, bien qu'il existe naturellement depuis fort longtemps avec les verres issus des roches volcaniques. L'ancien verre trouvé est de composition similaire à celle que l'on trouve aujourd'hui. Ces verres étaient opaques plutôt que transparents et colorés avec des métaux tels que le cuivre, le cobalt, le fer, l'antimoine ou l'étain [1].

#### **I.2.1. Définition du verre**

Il existe plusieurs définitions différentes de verre. En 1982, Jerzy Zarzycki, directeur du laboratoire des verres de l'université de Montpellier propose la définition la plus appropriée et qui est la suivante : « Le verre est un solide non cristallin présentant le phénomène de transition vitreuse ». L'état physique correspondant est l'état vitreux.

Le mot verre peut prendre des significations variées. Si dans le langage courant ce terme sert à désigner un matériau fragile et transparent, bien connu depuis l'antiquité, dans le langage scientifique sa portée est plus vaste mais aussi plus difficile à définir avec précision [9]. Selon la norme A.S.T.M (American Society For Testing And Materials) le verre est un produit inorganique fondu à partir d'un état liquide vers un état solide sans cristallisation [10].

## I.2.2. Les types de verre

### a) Le verre plat

Le verre plat est un verre Float de silicate sodo-calcique de base, avec différentes épaisseurs de 3 à 12 mm, en dimensions PLF, DLF et 1/2 DLF destiné au secteur du bâtiment, avec des surfaces parfaitement planes et parallèles. Le verre transparent MFG porte le marquage CE (conformité européenne) [2].



**Figure I.3 : Le verre plat de différentes dimensions.**

### b) Le verre feuilleté

Le verre feuilleté Medilam est un verre sécurité composé d'un assemblage de feuilles de verre d'intercalaire PVB (Butyral Poly Vinyl). Il permet d'adapter la résistance du vitrage en fonction des exigences souhaitées. Medilam est un produit fini fabriqué à partir de verre transparent MFG de qualité CE [2].



**Figure I.4 : Le verre plat feuilleté.**

### c) Le verre à couches

Le verre à couches est un produit verrier industriel sur lequel est projetée une couche mince d'oxyde métallique ( $0,01 \mu\text{m}$  à  $0,8 \mu\text{m}$ ). Cette technologie tire son nom de l'acronyme PVD (Physical Vapor Deposition) en déposant une couche à basse température après la production de verre et on peut obtenir une couche appelée « Couches tendres » [2].



Figure I.5 : Le verre plat à couches.

### I.2.3. Composition du verre

Trois grands constituants de base peuvent intervenir dans la composition d'un verre.

#### a) Oxydes formateurs

C'est un formateur de réseau vitreux qui est la silice ( $\text{SiO}_2$ ) ou le sable. C'est le meilleur oxyde formateur dans l'industrie verrière. L'oxyde de bore  $\text{B}_2\text{O}_3$ , l'oxyde de phosphore  $\text{P}_2\text{O}_5$ , l'oxyde de germanium  $\text{GeO}_2$  sont également utilisés qui ont des composés ayant des caractéristiques covalentes [11].

#### b) Fondants

Il abaisse la température de fusion, mais aussi la viscosité. C'est souvent un oxyde alcalin sodium  $\text{Na}_2\text{O}$  ou potassium  $\text{K}_2\text{O}$ , capable de rompre les ponts oxygène reliant les tétraèdres  $\text{SiO}_4$  du réseau vitreux provoquant une dépolymérisation de ce dernier [11].

c) **Oxydes modificateurs**

Ils sont de type métallique comme : MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, PbO ou B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, voir des éléments de transition ou des lanthanides. Ils offrent au verre des propriétés mécaniques, chimiques ou physiques selon un besoin d'utilisation [11].

**I.2.4. Les propriétés du verre**

a) **Les Propriétés physiques**

➤ **Densité**

La densité du verre est de 2,5, soit une masse de 2,5 kg par m<sup>2</sup> et par mm d'épaisseur pour les vitrages plans. La masse volumique, exprimée dans le système d'unités légales est de 2500 kg/m<sup>3</sup>. Un m<sup>2</sup> de verre d'une épaisseur de 4 mm a donc une masse de 10 kg [12].

➤ **Indice de réfraction**

L'indice de réfraction est une grandeur sans dimension caractéristique d'un milieu, décrivant le comportement de la lumière dans celui-ci ; il dépend de la longueur d'onde de mesure mais aussi des caractéristiques de l'environnement. Il est égal au rapport de la vitesse de la lumière dans le vide sur la vitesse de la lumière dans le milieu transparent.

$$n = \frac{c}{v_{\varphi}} \quad (\text{I.1.})$$

Avec :

- $n$  : indice de réfraction sans dimension.
- $c$  : la célérité de la lumière 299 792 458 m/s.
- $v_{\varphi}$  : la vitesse de la lumière dans le milieu transparent (verre).

L'indice de réfraction est toujours supérieur à 1. L'indice de réfraction du verre utilisé pour la fabrication du verre plat ou la vitrerie varie entre 1,525 à 1,900.

**b) Les propriétés thermiques**

➤ **La chaleur spécifique**

La chaleur spécifique représente la quantité de chaleur absorbée par une unité de masse du verre quand il s'échauffe d'un degré. Pour le verre à vitre elle est égale à 0,8 J/g. K [13].

➤ **Conductibilité thermique**

C'est la capacité d'un matériau de transmettre à travers son épaisseur un flux thermique résultant d'une différence de température entre les surfaces d'une épaisseur d'un échantillon de verre [13]. La conductivité thermique du verre est égale à 1 W/m. K. Il ne s'agit donc pas d'un matériau isolant puisque sont considérés comme tels des matériaux dont la conductivité thermique est inférieure à 0,065 W/m. K [14].

➤ **Dilatation thermique**

Le verre présente une faible dilatation thermique, il se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas au même temps [14]. Le coefficient de dilatation linéaire du verre est de  $9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Ainsi un vitrage de 2 m de longueur s'échauffant de 30°C, s'allongera de 0,54 mm.

**c) Les Propriétés mécaniques**

➤ **Dureté**

La dureté en général défini comme étant la résistance de la surface d'un solide à la déformation ou à la pénétration d'une pointe, d'une bille d'un outil.

Le classement des verres, au point de vue de la dureté dépend la méthode d'essai. Ces différentes méthodes : rayure, abrasion, empreinte reposent sur des principes différents, elles conduisent donc à des résultats qui ne sont pas comparables. Le classement de la dureté du verre se base soit sur la valeur de la force nécessaire pour créer une rayure de dimension donnée, soit sur les dimensions d'une rayure créée sous l'effet d'une donnée [15].

Sur une échelle de 1 à 10 inventée par Mohs en 1812 dont le plus dure est le Diamant, le verre plat se place à 5,5.

### ➤ **Elasticité**

Un corps subit une déformation sous l'action d'une force de sollicitation, si cette déformation engendre une déformation réversible, celle-ci disparaît par suppression de cette force, le corps est appelé élastique. La loi de Hook exprime que la déformation  $s$  est proportionnelle à la contrainte  $\sigma$  appliquée :

$$\sigma = M \times s \quad (I.2)$$

Avec :

$M$  : coefficient de proportionnalité, généralement appelé module.

Le comportement d'un solide est le plus souvent caractérisé par le module d'élasticité  $E$  appelé aussi module de Young et par le coefficient de Poisson. Le module d'élasticité pour le verre varie de 70 à 73 GPa [16].

Le verre de silice à la température ambiante a un comportement linéaire élastique jusqu'à la rupture. En effet, on remarque une diminution du module d'élasticité quand la teneur en  $\text{Na}_2\text{O}$  augmente et il en est de même quand la température augmente aussi [17].

### ➤ **Résistance à la compression**

La résistance du verre à la compression est très élevée : 1000 N/mm<sup>2</sup> ou 1 000MPa. Ceci signifie que, pour briser un cube de verre de 1cm de côté, la charge nécessaire est de l'ordre de 10 tonnes [17].

## d) **Les Propriétés chimiques**

### ➤ **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 [13].

### ➤ **Action de l'air**

Les silicates alcalins se combinent avec le gaz carbonique contenu dans l'air ce que donne un dépôt blanchâtre à la surface du verre [13].

### ➤ **Action de la lumière**

Exposés aux ultraviolets, certains verres se colorent ou se décolorent [13].

### ➤ **Action des acides**

Les acides 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 et former le silane [18].

## **I.3. Les différentes étapes de fabrication du verre plat**

Le procédé « Float » est une technologie inventée par Sir Alastair Pilkington en 1952. Elle est devenue la méthode de référence pour la fabrication du verre plat. Ce procédé prévoit la production d'un ruban de verre en fusion qui flotte sur un bain d'étain liquide.

Dans un premier temps, les matières premières appelées mélanges vitrifiables, sont dosées et introduites dans le four de fusion. La fusion se produit à une température d'environ 1550°C. Ensuite, la température est baissée à environ 1100°C à 1300°C. Le mélange arrive alors sur un bain de métal en fusion sur lequel se forme la feuille de verre plane d'une épaisseur constante. A la sortie du bain de métal, à 600°C, le verre entre ensuite dans un four de recuit ou étenderie où il subit un refroidissement progressif et contrôlé jusqu'à 50°C pour éliminer les tensions internes et permettre la découpe ultérieure du verre. C'est pour cette raison que ce type de verre est appelé verre recuit. A la sortie de l'étenderie, le verre est toujours contrôlé par détection automatique des défauts avant la découpe [5].

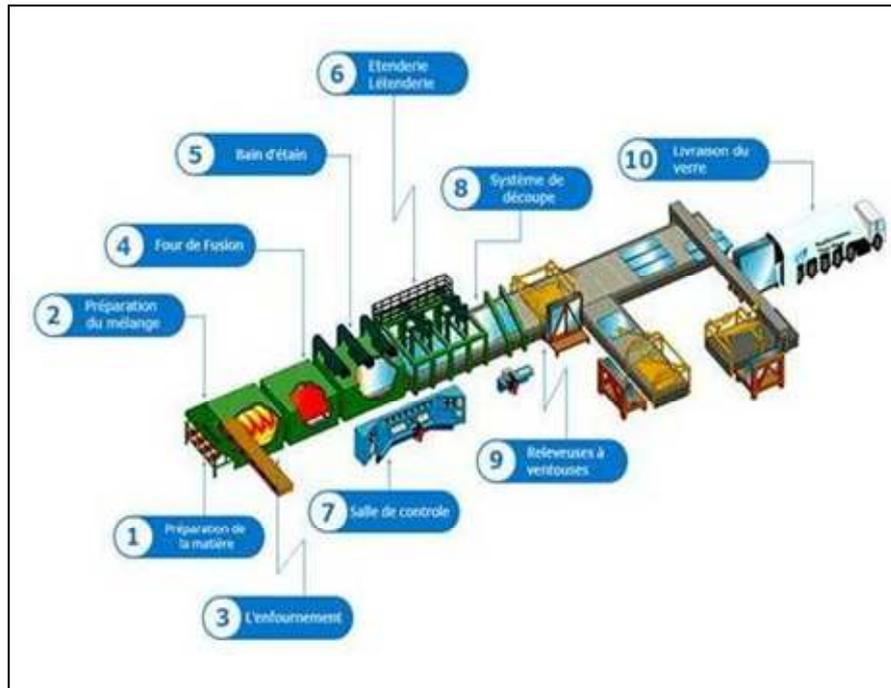


Figure I.6 : Schéma de principe de fabrication du verre plat.

### I.3.1. Préparation du mélange vitrifiable

Le Traitement peut être nécessaire en fonction des caractéristiques réelles des matières premières disponibles dans l'usine. Il comprendrait différentes fonctions comme le broyage, le traitement, le séchage, la séparation magnétique et l'homogénéisation du sable, l'élimination des gros grains ( $> 5$  mm) par tamisage et les petits grains ( $< 0,5$  mm) par hydrocyclone.

Dans tous les cas, l'installation de traitement de sable doit être définie après analyse du sable et des matières premières disponibles pour la fabrication du verre [1].

### I.3.2. Mélange des matières premières

On utilise plusieurs compositions chimiques de matières premières du verre : le sable, le carbonate de soude, le calcaire et la dolomie et d'autres matières sont ajoutées en petite quantité.

Ces matières premières sont stockées dans des silos, contrôlées, pesées et mélangées pour obtenir une substance homogène constituant le mélange vitrifiable. Le but de l'homogénéisation est de faciliter les réactions chimiques qui se produisent au cours du

processus et accélérant ainsi le processus de fusion et permettant d'obtenir le même produit final homogène. Au niveau de la trémie de chargement on ajoute le calcin pour accélère le processus de fusion. Le mélange est ensuite versé dans le four de fusion [13].

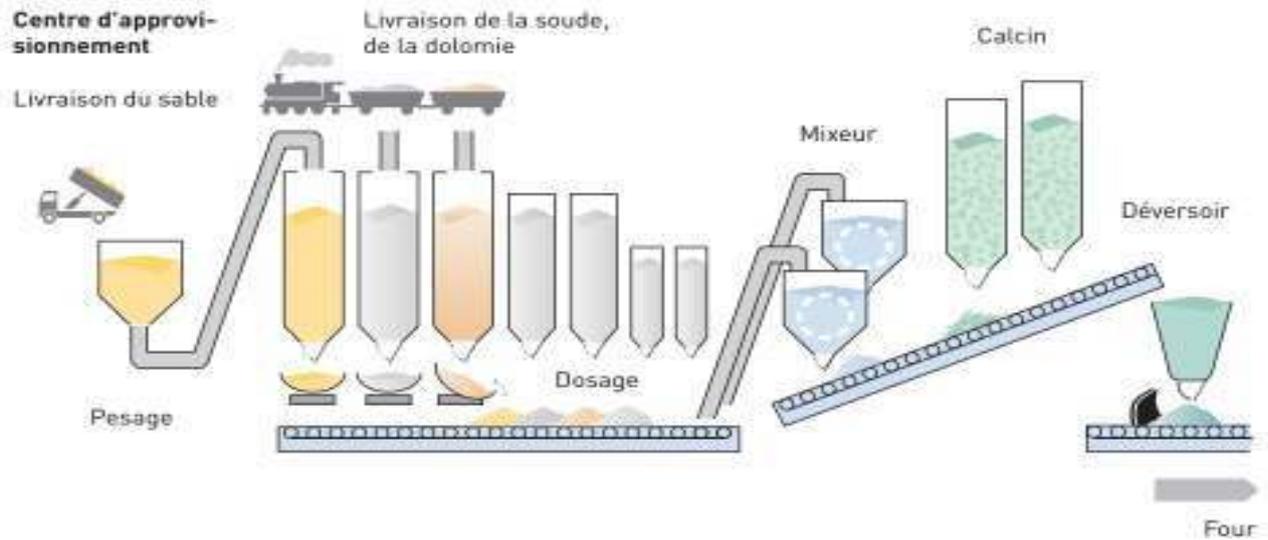


Figure I.7 : Schéma de traitement des matières premières [13].



Figure I.8 : Le mélange transporté vers le four de fusion.

**Tableau I.1 : Principales matières premières qui composent le verre plat.**

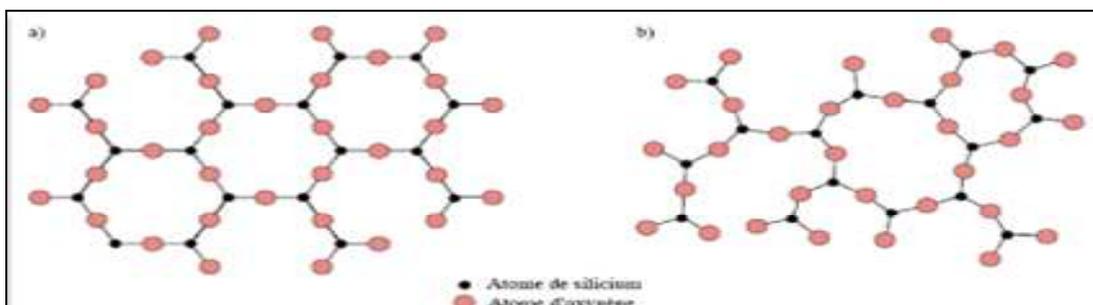
Matières	Teneur moyenne %
Sable	58,61
Carbonate de sodium	18,60
Dolomie	17,08
Calcaire	3,29
Feldspath	1,59
Sulfate de sodium	0,77
Charbon	0,038
Oxyde de fer	0,020
Total	99,998

**Remarque :**

Après avoir introduit la charge dans le four de fusion, on ajoute 25 de calcin à cette charge. Ce produit est issu du recyclage du verre non conforme à la commercialisation. Il est introduit pour augmenter aussi la production.

**a) Le sable siliceux (SiO<sub>2</sub>)**

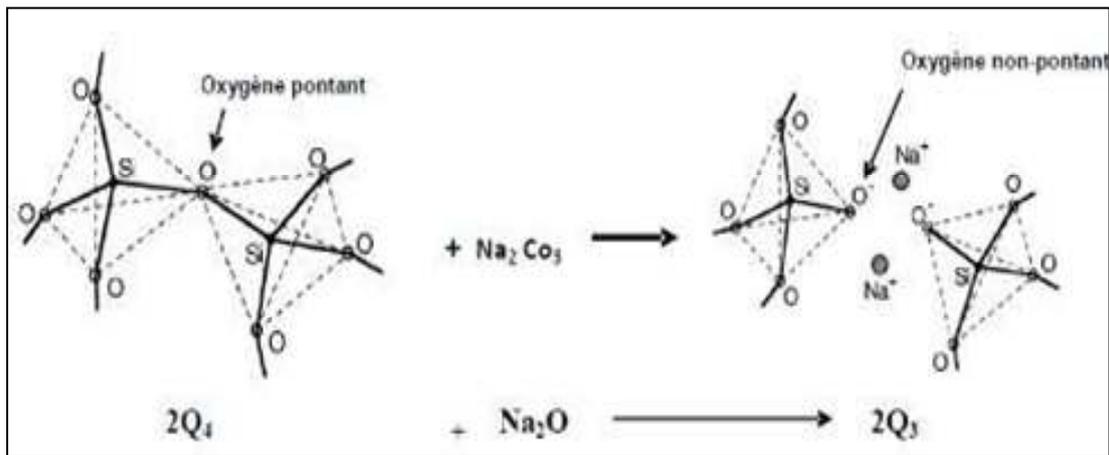
Le sable est la principale matière première qui intervenant dans la fabrication du verre. Il constitue la plus importante source de SiO<sub>2</sub>. Il s'agit d'une substance naturelle et courante qui représente 70% de la masse totale du verre. Son point de fusion est très élevé environ 1730°C. Pour que la fusion soit économique, il faut ajouter un fondant, tel que l'oxyde de sodium, pour réduire la température de fusion [19].



**Figure I.9 : (a) Structure cristalline et (b) structure vitreuse de la silice [19].**

**b) Carbonate de sodium**

De formule chimique  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , c'est la source principale d'oxyde de sodium  $\text{Na}_2\text{O}$  qui est l'alcalin le plus employé comme un oxyde modificateur qui dépolymérise le réseau des oxydes formateurs, abaisse la température de fusion, augmente le coefficient de dilatation et la conductivité électrique. Chaque molécule de  $\text{Na}_2\text{O}$ , provoque la coupure d'une chaîne :  $-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$ , et la transformation en deux groupements  $\text{O}-\text{Si}-\text{O}$  [19].



**Figure I.10 : Rupture d'une liaison SiO par introduction d'une molécule NaO dans le réseau de silice [19].**

**c) Dolomie**

De formule chimique  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , l'oxyde de magnésium ( $\text{MgO}$ ) est mis essentiellement afin de favoriser la vitrification. On peut aussi améliorer la résistance chimique du verre en remplaçant une partie de  $\text{CaO}$  par une quantité équivalente de  $\text{MgO}$ . C'est pourquoi le  $\text{MgO}$  est le meilleur stabilisant pour le verre que  $\text{CaO}$  [20].

**d) Le calcaire**

De formule chimique  $\text{CaCO}_3$  le calcaire est riche à plus de 58% en oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ). L'introduction de  $\text{CaO}$  dans le verre entraîne l'amélioration de la résistance à l'attaque chimique et l'augmentation de la densité, du coefficient de dilatation thermique et de l'indice de réfraction. Cependant, il décroît la résistance mécanique [21].

Comme celle d'un oxyde alcalin, la présence de CaO provoque la création de deux oxygènes non-pontant, qui conduit à un abaissement de la viscosité [17].

**e) Les feldspaths**

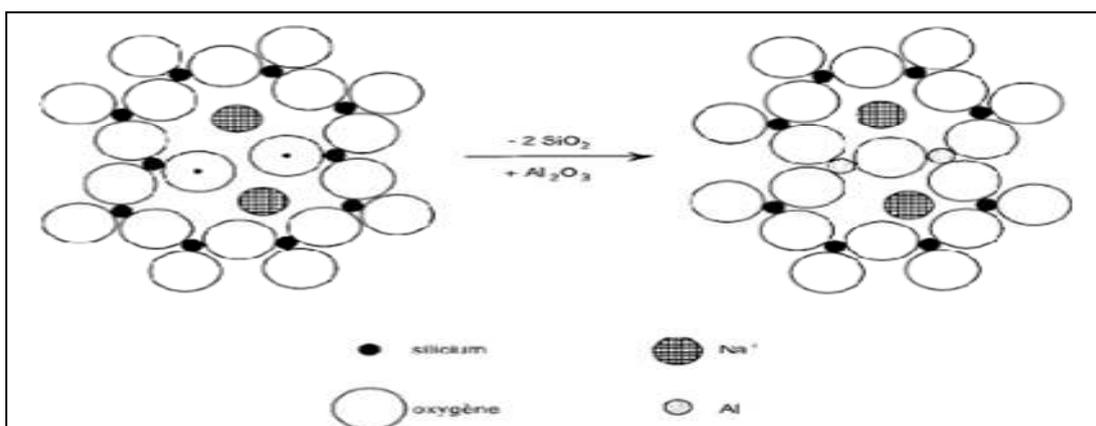
De formule chimique (K, Na)  $[AlSi_3O_8]$ , le feldspath est une matière première difficilement fusible. L'alumine ( $Al_2O_3$ ) est appelée intermédiaire, car quand il est seul il ne vitrifie pas, par ailleurs il agit comme formateur de verre une fois combiné avec d'autres oxydes comme la silice et forment les aluminosilicates.

Lorsque  $Al_2O_3$  est introduit dans un verre contenant des alcalins, il devient  $Al^{3+}$  de se substituer à  $Si^{4+}$  dans le réseau si à son voisinage se trouve un  $Na^+$  qui compose la charge négative excédentaire. Chaque  $Al_2O_3$  introduit fait disparaître la paire d'oxygènes non-pontant [22].

**f) Sulfate de sodium**

De formule chimique  $Na_2SO_4$ , le sulfate de sodium est un courant de composé chimique formé d'un ion sulfate et de deux ions sodium. L'ajout de sulfate de sodium permet d'affiner le verre, à partir de  $1300^\circ C$  ; le sulfate de sodium se décompose en libérant un mélange de gaz  $SO_2$  et  $O_2$  dans les bulles encore piégées dans le liquide.

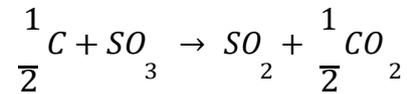
Son rôle est de faire grossir les bulles et brasser le liquide, ce qui permet ainsi son homogénéisation. Il s'agit de l'étape d'affinage [23].



**Figure I.11 : Substitution de deux molécules  $SiO_2$  par une molécule  $Al_2O_3$  dans la structure d'un verre silicate de sodium.**

**g) Le charbon**

Le charbon est une roche sédimentaire combustible composée essentiellement de carbone, d'hydrogène et d'oxygène [24]. Il est utilisé comme réducteur (affinant) intervenant par la réaction de sulfate de sodium.



**h) Oxyde de fer**

L'oxyde de fer est utilisé comme un agent colorant, il donne au verre sa couleur verdâtre qui favorise le transfert thermique. Il est ajouté avec des faibles quantités, et considéré comme régulateur de la transmission du verre [22].

**i) Calcin**

Le calcin est une matière première de plus en plus importante, dans la fabrication du verre. Sa fusion consomme moins d'énergie que des matières premières [22].

**I.3.3. Le four de fusion**

Il existe plusieurs types de fours verrier (électrique, régénérateur, récupérateur...etc.). Le four de fusion est maintenu comme étant le cœur des lignes de production du verre. Afin de préserver et maintenir sa durée de vie qui est en moyenne 10 années, toute une équipe composée de plusieurs membres est mobilisée.

Le four utilisé au sein de MFG est de type régénérateur à flamme transversale dont sa structure assure le maintien de température entre 1500 et 1600°C afin d'éviter toute détérioration du verre ou du four [5].

**I.3.3.1. Conception du four**

Le four de fusion de MFG est un four à régénérateurs à flamme transversale avec une capacité de fusion de 800 tonnes/jour. Il est équipé de 07 brûleurs transversaux en utilisant le gaz naturel comme combustible principal. Il est formé essentiellement des briques réfractaires

qui résistent à la chaleur, avec une couche externe des briques d'alumine qui minimisent les pertes de chaleur.

Cette conception répond aux différentes étapes d'élaboration du verre, qui se décompose en différentes phases (fusion, affinage, et conditionnement) auxquelles correspondent différentes zones : une zone d'enfournement, une zone de fusion, une zone d'affinage, la gorge (le barrage, le malaxeur) et enfin une zone de conditionnement (bassin de repos).

Le système de régénération permet de recycler efficacement l'énergie de combustion amené par les gaz brûlés d'où son nom régénérateur [5].

### **a) Zone de fusion**

La zone de fusion permet la transformation de la matière première en verre fondu. Elle est essentiellement constituée d'un bassin en réfractaire, de bouillonneurs et parfois d'électrodes de fusion afin de contribuer au bon mélange des matières premières par l'intensification des courants de convection du verre. Cette partie du four est notamment caractérisée par des dégagements gazeux et par la formation de bulles dans le verre, provoquées par les impuretés contenues dans les silicates d'alcalins et les silicates de calcium [5].

### **b) Corps de fusion**

C'est un bassin où se trouve le volume du verre généralement appelée paroi de cuve. Elle est constituée en briques AZS (Alumine, Zirconium 41%, Silice), sur-plantée par une voûte en briques de silice. Il y a sept chambres de régénération appelées aussi ports de chaque côté, reliées avec 03 injecteurs à flamme horizontale et à haute pression. Ces injecteurs permettent l'introduction du gaz naturel pour l'allumage des flammes [5].

### **c) Chambres régénératrices**

Les chambres de régénération sont reliées au four par les colliers de brûleurs, et conçus d'une couche interne de brique en silice et d'une couche externe de brique en aluminium. La flamme est inversée de part et d'autre par un système mécanique toutes les 20 minutes. Les colliers permettent à l'air de circuler et aux fumées de s'échapper.

Les chambres de régénération sont conçues en briques d'empilage à l'intérieur qui supportent des températures atteignant les 1500°C. Elles fonctionnent suivant l'allumage de la flamme, elle permet l'alimentation de la flamme en oxygène d'un côté, et permet d'évacuer la fumée et maintenir la brique chaude par la chaleur de l'autre côté d'où le terme de générateur.

Les fumées sont évacuées dans un long couloir appelé carneau principal vers une cheminée d'une hauteur de 82,5 mètres [5].

### **d) Zone d'affinage**

Les bulles de gaz doivent être expulsées, dans les mélanges de verre fondu. Elles résultent non seulement de diverses réactions chimiques mais aussi de l'air situé entre les matières premières et de l'eau. Cette étape nécessite la présence d'agents affinant tel que le sulfate de sodium dans le mélange de départ [5].

L'intérêt d'utiliser le sulfate de sodium est d'abord un composant essentiel du verre et aussi miscible dans le liquide formé. En effet, il se décompose à partir de 1300°C, voir moins si on travaille dans des conditions réductrices grâce à l'ajout de coke pour former du SO<sub>2</sub> et de l'O<sub>2</sub> gazeux selon la réaction [1] :



Une élévation de la température entre 1450°C et 1530 °C est nécessaire pour diminuer la viscosité du verre fondu. Même une agitation mécanique ou l'insufflation d'air est parfois nécessaire [5].

### **e) La gorge**

C'est une réduction intermédiaire entre la zone d'affinage et la zone de conditionnement qui permet le réglage du débit du verre. Les impuretés qui flottent sur la surface du verre sont stoppées par un barrage et un malaxeur horizontal qui assure l'homogénéisation du liquide. Les briques de parois sont en AZS (33% de Zr) [5].

### f) Conditionnement

Il permet le refroidissement du mélange pour que sa viscosité soit adaptée à sa mise en forme entre une température de 1300 à 1000°C. Cette partie est composée de canaux de distribution ou « feeders » qui servent à l’approvisionnement en verre des machines et assurent son homogénéité thermique [5].

#### I.3.4. Bain d’étain

Le bain contient près de 200 tonnes d’étain pur, fondu à une température moyenne de 800°C. Des résistances électriques regroupées en zone de chauffage, permettent une régulation fine de la température du verre qui est progressivement réduite. Il s'agit d'un système étanche à atmosphère contrôlée constitué d'azote et d’hydrogène.

Le bain d’étain se compose d'une structure en acier, d'une coque métallique supérieure, une enveloppe métallique inférieure qui protège étain et un ruban de verre avec un système de contrôle de la température de formage. Le bain mesure 60 mètres de long et 8 mètres de large, avec une vitesse de défilement pouvant atteindre jusqu'à 25 m/min [25].

#### I.3.5. Etenderie

Après le bain d’étain, le ruban de verre doit passer dans le couloir de refroidissement, il est soumis au traitement thermique dans un long four appelé étenderie de longueur qui dépasse 100 mètres. Il y est refroidi de 600 à 60° C. La température du ruban traverse l'intervalle de la transition vitreuse, de telle sorte que les contraintes thermiques soient réduites pour rendre possible la découpe du ruban. Ce refroidissement lent est contrôlé pour éviter toute formation de tensions internes [1].

L’étenderie est divisée en deux zones, chaque zone est constituée de plusieurs sections :

- La zone isolante est constituée de quatre zones A, B1, B2 et C.
- La zone de refroidissement est composée de six zones D1, D2, F1, F2, F3.

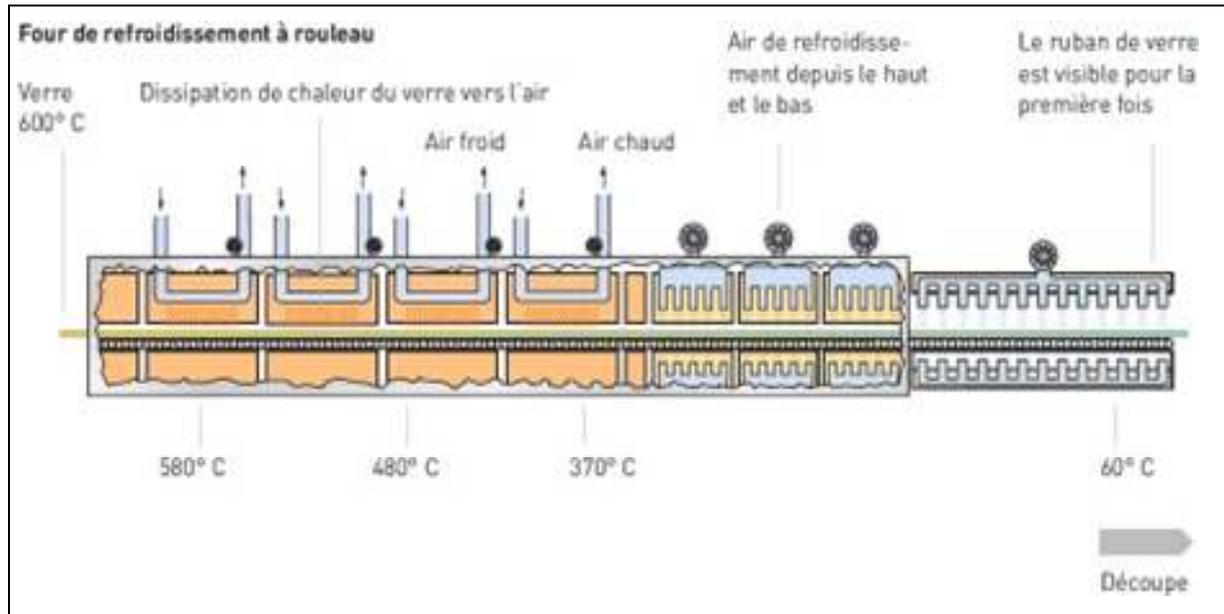


Figure I.12 : Four de refroidissement à rouleau, étenderie [1].

L'étenderie sert à recuire et à refroidir le verre. Elle refroidit le verre par rayonnement et le recuit selon les exigences de la spécification de production. Après re-cuisson, le verre est refroidi rapidement de manière contrôlée par un refroidissement adapté et un système de chauffage. Le verre sera transporté dans l'étenderie sur un convoyeur à rouleaux dont l'écartement permet le maintien du ruban en toute sécurité. La commande est transmise mécaniquement aux rouleaux par le système d'entraînement [7].

### I.3.6. La découpe

Après le travail dans le bout chaud, on procède au travail au bout froid au niveau de l'atelier de la découpe. le ruban de verre est découpé en plateaux. Les bords résidus de coupe sont enlevés automatiquement et sont recyclés comme calcin.

Le ruban se déplace avec une vitesse maximale de 90 m/min, il subit une inspection automatique à l'aide des dispositifs spéciaux pour la détection des défauts ou des contraintes dans le produit fini [5].

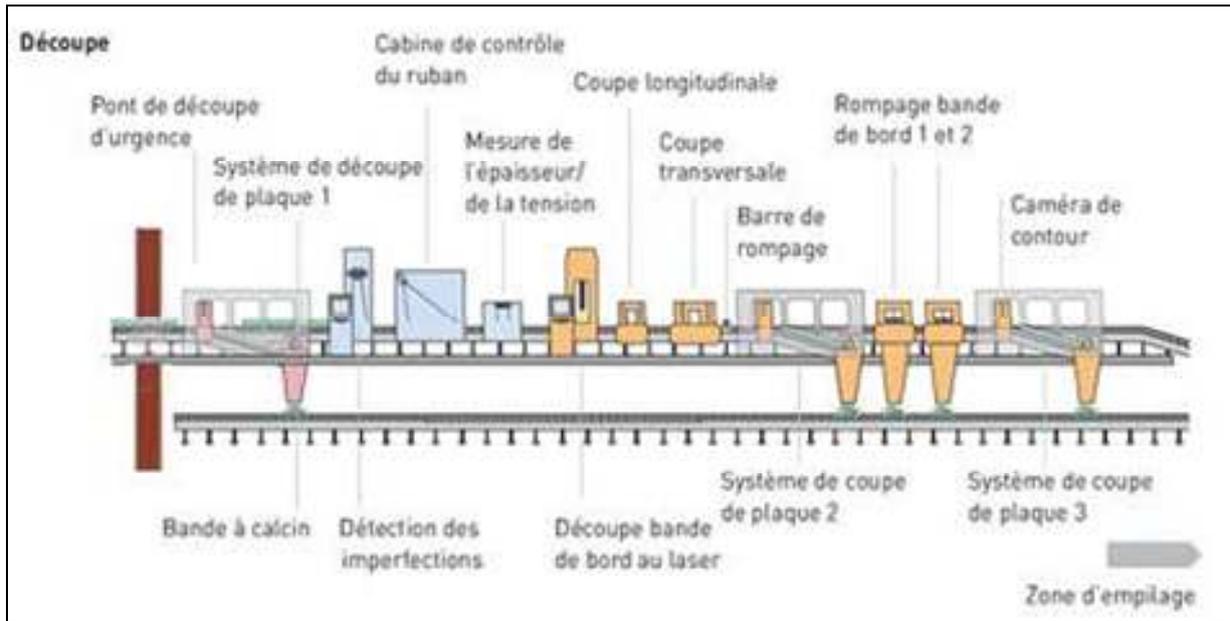


Figure I.13 : Schéma descriptif de la découpe [1].

Avant sa découpe, le ruban de verre subit un contrôle permanent (épaisseur, qualité optique, défauts, etc... Parmi ces contrôles, on cite :

- Test Zébra : pour déterminer l'angle de déformation optique (la norme internationale est de 45°).
- Tests lumineux : Pour évaluer les défauts linéaires et étirés comme les taches ou rayures occupant une surface ou une longueur importante. Pour cela, le vitrage est observé devant une surface noire mate dans des conditions lumineuses correspondant à une lumière diffuse du jour [5].

### I.3.7. Système de retour de calcin

Le calcin sera automatiquement collecté sur la ligne de découpe, broyé et envoyé au stockage. Il est réintroduit dans le circuit du verre dans le four principal.

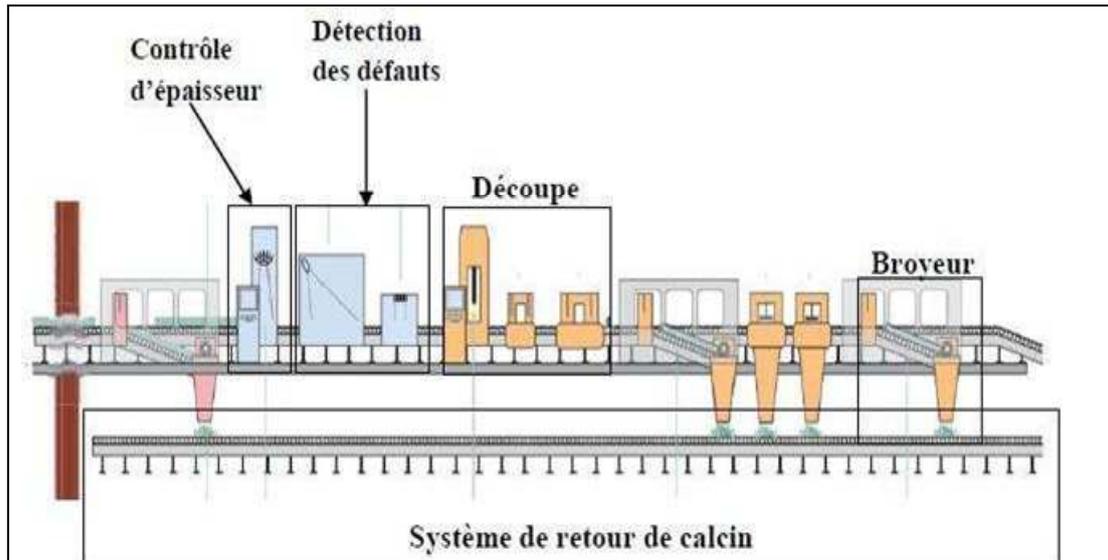


Figure I.14 : Schéma descriptif du système de retour du calcin issu de la découpe [10].

### I.3.8. Stockage

Après avoir assuré la qualité de la feuille de verre, les plateaux du verre seront placés sur des chevalets à l'aide des releveuses à ventouses. Les chevalets seront classés et stockés par épaisseur, type, format et d'autres critères avant leurs expéditions.



Figure I.15 : Stockage des feuilles de verre avant expédition.

# **Chapitre II**

## **Technologie des fours**

## II.1. Les fours industriels

Un four est une enceinte maçonnée ou une pièce d'équipement doté d'un système de chauffage puissant [26] dans laquelle la chaleur dégagée par la combustion de fuel oil ou gaz combustible par l'intermédiaire de brûleurs, est transféré à un fluide l'huile chaude par exemple passant dans des tubes.

Le carburant est brûlé dans une chambre appelée chambre de combustion sous des conditions contrôlées. Les produits de combustion s'échappent de la chambre de combustion vers une cheminée [27].

## II.2. Classification des fours

Les fours industriels sont classés en fonction de mode de fonctionnement :

- Manipulation du produit : fours continus ou discontinus.
- Procédé de chauffage : direct ou indirect [27].

### II.2.1. Fours discontinus

Appelés fours à pot, ou four à creuset destinés au cueillage manuel et ne sont plus actuellement utilisées que dans les verreries artisanales avec un faible volume de production journalière.

Dans un four à pot, le verre fondu est maintenu dans des pots de même contenance que le four professionnel. Ces fours fonctionnent donc sur un cycle de 24 heures où le verre fondu dans le pot est utilisé durant sa journée de travail (8 heures) après laquelle on le recharge en matières premières le soir afin qu'il soit prêt pour le lendemain.



Figure II.1 : Four à pot.

Les procédés de chauffage actuels de ce genre de fours sont par brûleur au fuel ou au gaz ou par résistance électrique [28].

### II.2.2. Fours continus

Utilisés dans la fabrication du verre plat, du verre d'emballage ou de la fibre de verre. Le flux de matière dans ces fours se fait de façon continue. Cette technique permet d'avoir une flexibilité suffisante pour des productions à grande échelles. La géométrie de ces fours se diffère selon leurs applications mais dans tous les cas, on trouve simultanément dans un four continu des matières premières non fondues, du verre en formation et du verre prêt à être soutiré pour le formage. Tout ce verre est contenu dans une cuve réfractaire aux dimensions parfois importantes constituée de plusieurs zones :

- La zone de chargement où les matières premières sont introduites et flottent à la surface du bain de verre en fusion.
- Le bassin de fusion dans laquelle le mélange vitrifié est porté à la fusion, pour être ensuite purifié et homogénéisé. C'est dans cette zone que le plus d'énergie est apportée. On distingue le chauffage électrique ou par combustion.
- L'avant-bassin (bassin de travail ou la zone tampon) est relié au bassin de fusion par un conduit ou gorge. Au niveau de cette section, la fonte du verre est homogénéisée et surtout abaissée en température pour que la viscosité soit suffisamment élevée pour le moulage [28].

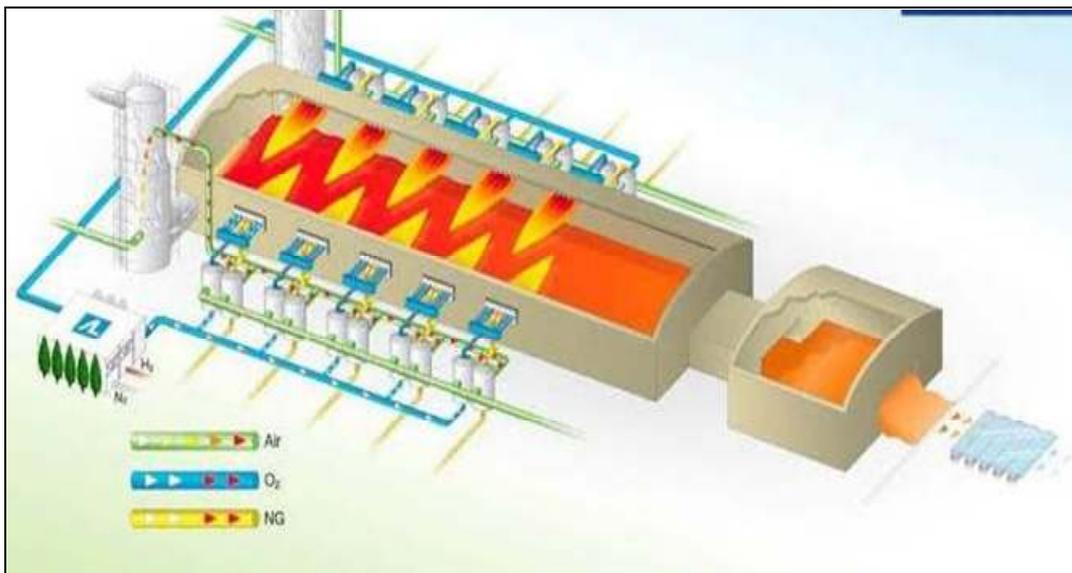


Figure II.2 : Principe de fonctionnement d'un four continu.

## II.3. Modes de chauffage dans les fours

### II.3.1. Fours électriques

Les fours électriques utilisent la propriété de conduction du verre fondu pour fournir de la chaleur au bain par effet joule au moyen des électrodes en molybdène ou en oxyde d'étain. Ces électrodes sont immergées dans le verre liquide par le fond ou les côtés du bassin de fusion, et les courants électriques qu'elles créent induisent de la chaleur. Ils sont principalement utilisés pour les productions des petits volumes comme la fibre de verre [28].

Le chauffage électrique peut être utilisés comme réserve pour les fours à flamme suivant la loi de Joule à savoir :

$$Q(t) = R I^2 t$$

Où :

Q : la quantité de chaleur en Joule (J)

R : la résistance électrique en Ohm ( $\Omega$ )

I : l'intensité du courant électrique en Ampère (A)

t : la durée du chauffage en seconde (s).

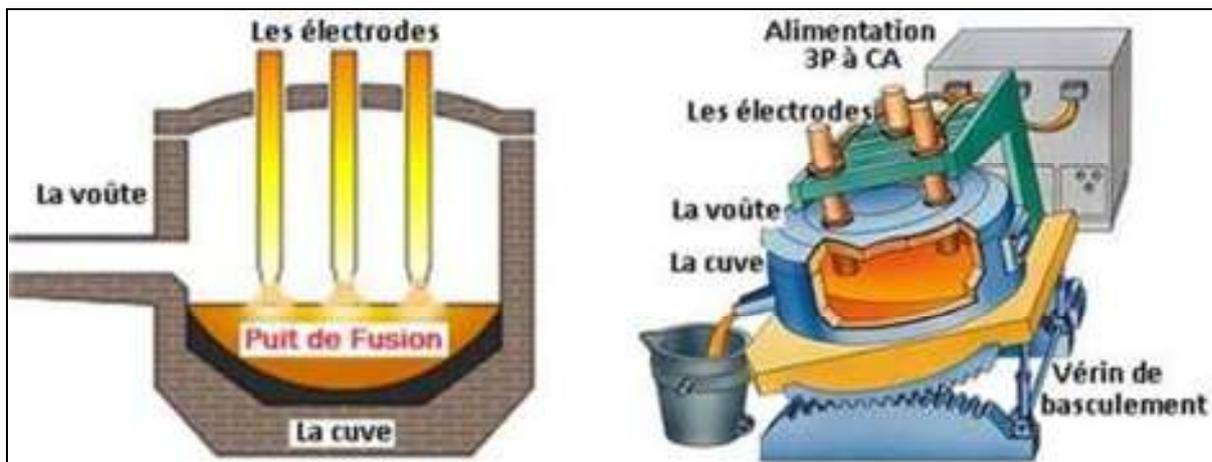


Figure II.3: Four électrique pour verre.

### II.3.2. Fours à flamme

Ces fours qui sont utilisés au niveau de MFG, sont les plus répandus dans l'industrie du verre. Ici, l'énergie est transférée de la surface au verre contenue dans la cuve par la chaleur des flammes au-dessus du bain.

L'écoulement dans le bassin de fusion se fait depuis la zone de chargement de la couche de matières premières jusqu'au conduit de séparation. La couche de matières premières recouvre la partie initiale du bassin de fusion et la partie restante est au contact des flammes où de l'atmosphère de la chambre.

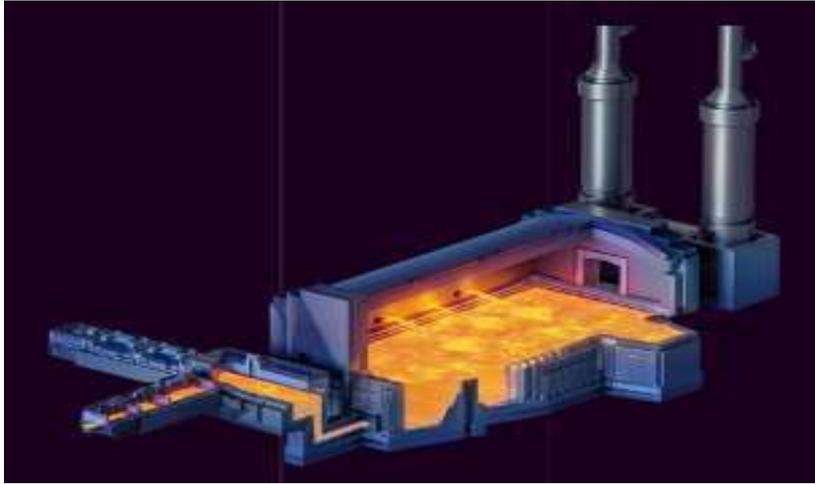
Le nombre de flammes ainsi que leur positionnement au-dessus du bain sont d'abord choisis pour créer un profil de chauffe spécifique favorisant les courants de convection.

Les brûleurs sont installés de manière à créer les bons flux de chaleur, selon la géométrie du four. Par exemple, les bassins de fusion des fours à verre plat sont très longs, jusqu'à 100 m et le mode latéral où les flammes sont perpendiculaires au sens de l'écoulement de chauffage est le plus adaptés à ces dimensions.

Dans le cas du verre d'emballage, le bassin de fusion est beaucoup plus petit et on peut utiliser des flammes dans le même sens que l'écoulement exemple des fours à boucle, parce que l'écoulement dans la chambre de combustion a une forme de boucle.

On peut classer les fours à flamme selon la configuration des brûleurs, latérales ou en boucle et le mode de la combustion.

Les trois modes de combustion sont avec air ambiant froid, air ambiant chauffé ou oxygène [28].



**Figure II.4 : Four à flamme.**

### II.3.3. Fours à air froid

Les fours à air froid utilisent directement l'air ambiant, la combustion est contrôlée par un flux d'air de l'extérieur en agissant sur le rapport Combustible / Air. Pour augmenter le rendement de la combustion, on agit sur l'excès d'air au niveau du brûleur pour atteindre jusqu'à 100% de rendement.

Les fours à air froid ont des brûleurs transversaux croisés afin qu'ils offrent une grande flexibilité d'utilisation dans divers domaines [28].

### II.3.4. Fours à régénération ou récupération

Le principe de ces fours est d'utiliser la chaleur des gaz de combustion pour chauffer l'air de combustion, ce qui a pour effet d'augmenter les transferts de chaleur vers le bain et l'efficacité de la combustion dans four.

Lorsque les gaz chauds qui le traverse, le régénérateur stocke de l'énergie puis il fournit cette dernière au moment où l'air froid circule pour le chauffer avant d'entrer dans la chambre de combustion.

Cela signifie qu'il y'a toujours de l'air chaud pour la combustion, mais cela devrait être inversé la direction des courants à chaque cycle. De ce fait, les flammes sont situées soit du côté du premier régénérateur ou du côté du second, et il en résulte un flux de chaleur non constant à la surface du bain. Les températures de l'air de 1400 °C sont atteintes à l'entrée dans la chambre

de combustion par ce procédé.

Dans les fours à récupération, un échangeur de chaleur métallique est utilisé à travers lequel les courants froids et chauds se croisent entraînant un échange de chaleur. Les températures atteintes par ce procédé sont plus importantes et la combustion est complète.

Pour avoir un flux homogène sur la surface du bain, on utilise un plus grand nombre de flammes que dans les fours à régénération, avec des configurations en boucle ou latérales [28].

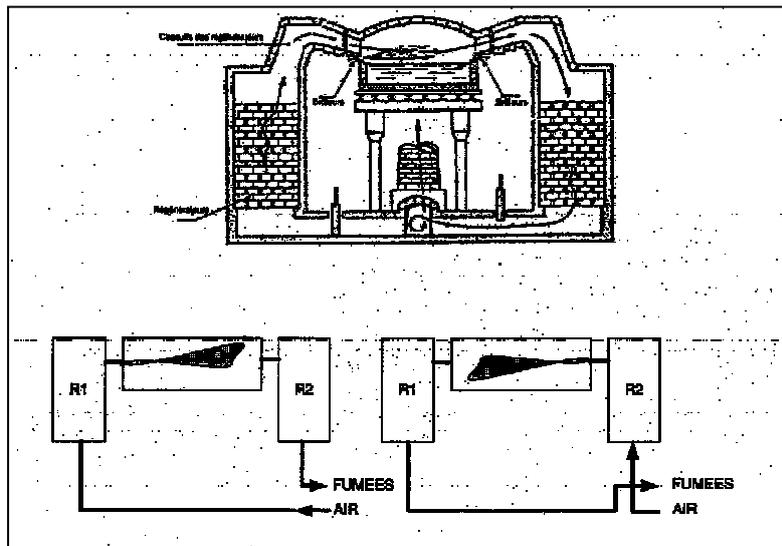


Figure II.5 : Four à Régénérateurs et principe de fonctionnement [28].

### II.3.5 : Fours Oxy-Fuel

Etant donnée que le four à oxygène utilise un oxydant à forte concentration en oxygène, en raison du manque d'azote, une combustion avec l'air ambiant se produit. L'avantage de cette combustion et le gain en rendement d'abord parce que la chaleur des gaz de combustion est transmise à la charge en plus forte proportion que dans les fours à air et un gain pour l'environnement aussi parce que les émissions de NOx thermique sont nulles. Une tendance chez les fabricants à moderniser les fours conventionnels vers l'oxy-combustion pour répondre aux normes d'émissions des Nox [28].

## II.4. La combustion dans les fours

Suivant le type de four, la chambre de combustion comporte une ou plusieurs flammes. Qu'il s'agisse du gaz ou du fuel, le carburant est amené grâce à des brûleurs pouvant atteindre plusieurs mégawatts.

L'air de combustion préchauffé dans les récupérateurs ou régénérateur est introduit par la porte à proximité des brûleurs. Les flux d'air et de fuel sont orientés l'un vers l'autre afin d'améliorer l'efficacité de la combustion évacués les gaz de combustion vers la cheminée au travers d'autres portes. En règle générale, plusieurs brûleurs sont disposés en rangée à chaque porte, ce qui a pour effet de diminuer leur régime de fonctionnement, d'élargir la surface de la flamme et par la suite, du flux rayonnant vers la surface du bain.

L'écoulement dans la chambre de combustion est principalement à 90% généré par les ventilateurs de combustion, qui pulsent plusieurs milliers de mètres cubes par heure et par brûleur. Diverses portes situées sur les parois latérales de la chambre engendrent un écoulement turbulent au sein de la chambre. Les brûleurs pulvérisent le carburant dans cet écoulement, sous forme de gouttelettes s'il est liquide ou sous forme de jet de gaz s'il est gazeux. Le mélange réactif engendre la combustion et la flamme dépend du choix des carburants et le mode d'arrivée de l'air (froid, chaud ou oxygène). L'atmosphère de la chambre est ainsi portée à hautes températures et peut dégager de la chaleur vers le bain et les parois.

Pour les gaz, l'échange de chaleur se fait principalement par rayonnement. Bien entendu, les gaz sortant de la chambre sont encore chauds et cette énergie est récupérée partiellement par les régénérateurs [28].



Figure II.6 : Chambre de combustion [32].

## **II.5. Les fines particules**

### **II.5.1. Définition**

Les particules fines est un terme de particules en suspension dans l'air ambiant en suspension. Il s'agit d'un mélange complexe de constituants de taille, de forme, de densité, de surface et de composition chimique, très différentes [29].

Les particules fines peuvent être des polluants, on distingue :

- Les particules fines primaires, elles sont des sources naturelles ou anthropiques.
- Les particules fines secondaires, elles sont des formations de sulfates, formation de nitrates, nucléation de molécules de gaz, réactions gazeuses dans des gouttelettes d'eau [30].

### **II.5.2. Composition des fines particules**

Les principaux composés chimiques des particules peuvent être très différents selon leur origine. On retrouve surtout ;

- Des composés carbonés organiques : oxydes ou hydrocarbures aromatiques polycycliques
- Des sels (nitrates, sulfates, carbonates...)
- Des éléments de traces tels que des métaux lourds
- Des carbones suies, liées à une combustion incomplète de combustibles fossiles et de la biomasse [31].

### **II.5.3. Sources des particules fines**

Les sources de particules fines peuvent être d'origine naturelle notamment les éruptions volcaniques et de l'érosion du vent, ou anthropique qui représentent la source d'importantes émissions de particules fines. Le chauffage (bois), la combustion de combustibles fossiles (carburants) [31] sont également à l'origine de ses fines particules.

### **II.5.4. Classification des particules d'après la granulométrie**

On considère quatre différentes tailles de particules qui sont déterminées en fonction du diamètre :

- Les particules totales (PM) : l'ensemble des particules dans l'air.
- Les particules fines (PM<sub>10</sub>) : les particules de diamètre inférieur à 10 µm.
- Les particules très fines (PM<sub>2,5</sub>) : les particules de diamètre inférieur à 2,5 µm.
- Les particules ultrafines (PM<sub>1</sub>) : les particules de diamètre inférieur à 1 µm.
- Les nanoparticules (PM<sub>0,1</sub>) : les particules de diamètre inférieur à 0,1 µm [30].

La figure suivante montre leur classification selon la taille avec des exemples.

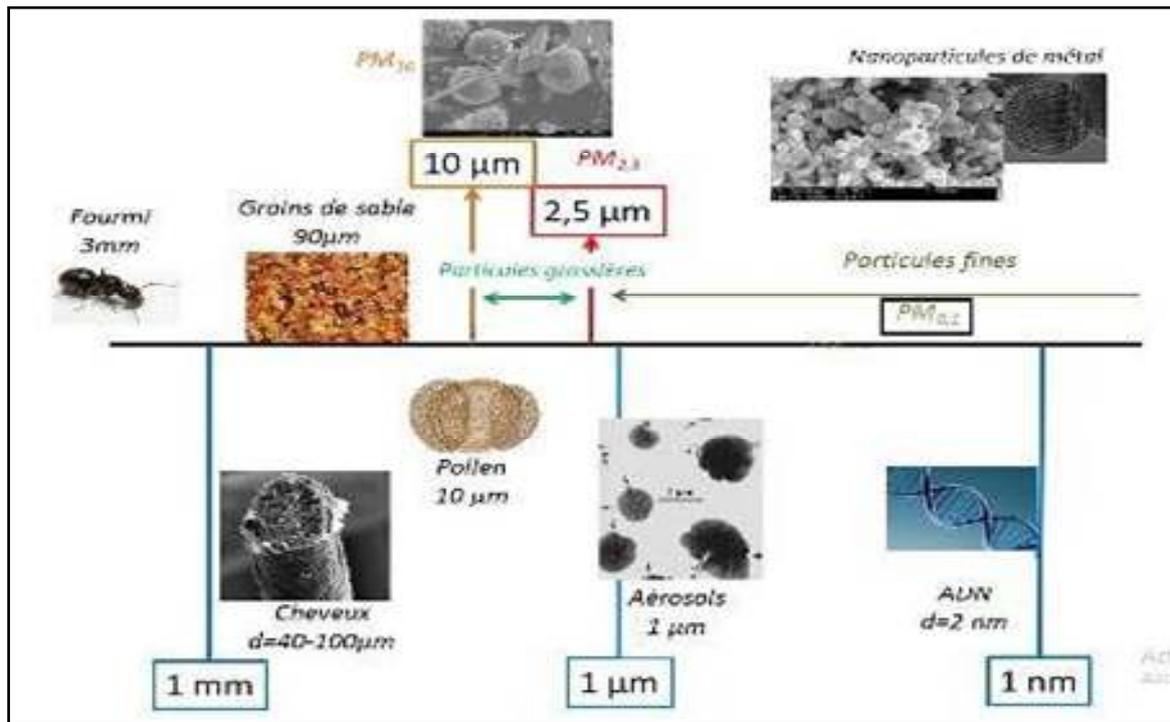


Figure II.7 : Tailles des fines particules dans l'air.

### II.5.5. Les effets des fines particules sur le verre

Les fines particules peuvent faire des problèmes tels que la réduction de la qualité du verre et la diminution de la durée de vie de four peuvent aussi affecter la santé et l'environnement.

# **Partie expérimentale**

# **Chapitre III**

## **Matériels et méthodes**

### III.1. Introduction

Les analyses que nous avons effectuées ont été réalisées au niveau du laboratoire de contrôle qualité de MFG. Ce laboratoire est équipé pour répondre à toutes les analyses qui sont liées à la production, au contrôle des matières premières et des produits finis. Les appareils du laboratoire sont d'une qualité très élevée, ils sont étalonnés, vérifiés par des experts et soumis aux dispositifs de qualité et normes nationales et internationales.

Pour la réalisation de ce mémoire, nous avons utilisé principalement deux appareils, le premier pour l'analyse granulométrique afin de déterminer l'origine des fines particules qui sont l'objet de notre mémoire, et le deuxième La spectrométrie de fluorescence des rayons X pour la détermination de la composition des produits utilisés dans la fabrication du verre.

Nous avons utilisé d'autres matériels comme les thermocouples pour la lecture des températures au niveau du four, des caméras pour photographier l'intérieur du four et le dépôt des particules fines. Ces équipements sont installés sur les fours pour contrôler plusieurs paramètres comme la combustion, les brûleurs et les parois de réfractaires.

### III.2. L'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est une opération qui consiste à étudier les différentes distributions des particules d'un échantillon, selon deux caractéristiques le poids et la taille. L'analyse granulométrique détecte la taille et les pourcentages pondéraux des différentes familles de grains d'un échantillon, applicable à tous les granulats de tailles inférieures ou égales à 63  $\mu\text{m}$ .

Il faut éviter de confondre entre la taille des particules d'intérêt à la détermination de la dimension des grains et la granularité en relation avec la distribution dimensionnelle. Le test se base sur le classement des différents grains composant l'échantillon en utilisant une gamme de tamis dont les ouvertures de ces derniers sont décroissantes du haut vers le bas. Le résultat de distribution s'obtient par les vibrations de la colonne de tamis où [7] :

- REFUS sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.
- TAMISAT (ou passant) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis [33].

### **III.2.1. Matériels et produits utilisés**

- 400 g d'un échantillon de matières premières (sable, dolomie, feldspath, carbonate de soude, carbonate de calcium, sulfate de sodium et le charbon).
- Tamiseur.
- Des tamis de 0,063 à 125 mm.
- Une balance.
- Diviseur rotatif.
- Un pinceau pour le nettoyage des tamis.



**Figure III.1: Tamiseur de type Retsch AS200 et diviseur rotatif de type Retsch PT100.**

### **III.2.2. Mode opératoire**

Nous avons effectué une série d'analyse granulométrique avec le même principe pour les sept matières premières au niveau du laboratoire de contrôle qualité de MFG.

Premièrement nous avons commencé par peser un échantillon à l'aide d'une balance puis on le met dans un diviseur rotatif pour l'homogénéiser et avoir un échantillon homogène de 400 g. Une série de tamis de 0,063 à 125 mm, est pesée vide puis enchainée du diamètre le plus grands allons vers le plus petit jusqu'au fond du tamiseur. Le tout est placé sur un vibreur, la distribution des tamis suit la norme de MFG et se diffère d'une matière à autre.

La dernière étape est de mettre la charge en haut et fermer le couvercle de la colonne du tamiseur puis on lance la vibration avec une durée de 10 min. Une fois l'opération est terminée on pèse les tamis et on détermine le pourcentage de particule correspondante à chaque diamètre.

### III.3. Fluorescence des rayons X

La spectrométrie de fluorescence des rayons X (FRX) est une technique analytique chimique basée sur une propriété physique de la matière sous l'effet d'un bombardement avec des rayons X, la matière réémet de l'énergie sous cette même forme.

Le spectre des rayons X émis par la matière est caractéristique de la composition chimique de l'échantillon. A partir de l'analyse de ce spectre, il devient possible d'en déduire la composition élémentaire ainsi que les concentrations massiques des éléments qui le composent. L'échantillon est introduit dans l'appareil sous forme de grains, les résultats sont automatiquement affichés sur un tableau [34].

Pour identifier les différents rayons X émis par l'échantillon, le dispositif utilise la propriété des solides cristallins de pouvoir diffracter des rayons X dans certaines conditions. Un solide cristallin peut être vu comme la répétition périodique tridimensionnelle d'éléments (atomes ou molécules) et être caractérisé par des plans réticulaires espacés d'une distance  $d$  passant par les centres de ces éléments. Ces plans ont la propriété de diffracter un rayonnement X de longueur d'onde  $\lambda$  entre ce rayonnement X et les plans du solide  $\theta$  lorsque l'angle incident  $\lambda$  longueur d'onde cristallin est tel que l'équation dite de Bragg est satisfaite [35].

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

Avec

$\lambda$  = longueur d'onde du rayonnement X incident en (m),

$n$  = ordre de la réflexion (entier positif),

$d$  = distance interréticulaire du cristal analyseur en (m),

$\theta$  = angle d'incidence du rayonnement X en (degré).



Figure III.2 : Photo d'un spectro-analyseur de type BRUKER S8 TIGER.

### III.3.1. Matériels et produits utilisés

- Un échantillon composé de 0,8 g et un fondant de 3,2 g en moyenne.
- Vibro-broyeur.
- Un petit four appelé Minifuse.
- Un fondant.
- Appareil d'analyse Fluorescence X.



Figure III. 3 : Vibro-broyeur à disque RS 200 et four Minifuse.

### **III.3.2. Mode opératoire**

L'échantillon est broyé dans un vibro-broyeur et mis dans un petit four appelé Minifuse à l'aide des fondants spéciaux utilisés pour diminuer la température de fusion et éliminer l'eau présente dans l'échantillon. La température de fusion est de 950°C pour obtenir 2 g environ d'un échantillon près à l'analyse. La masse de l'échantillon est notée avant et après la fusion pour déterminer la perte au feu (PF). L'échantillon prend une forme de perle, il est introduit dans le porte échantillon de l'appareil. L'analyse de l'échantillon se fait automatique et affiche les résultats de la composition chimique sur l'ordinateur qui commande l'appareil.

# **Chapitre IV**

## **Résultats et discussions**

## **IV.1. Analyse de la matière première**

### **IV.1.1. Analyse chimique par fluorescence**

Les tableaux ci-dessous représente les résultats d'analyse élémentaire par fluorescence X de la matière première (sable, feldspath, dolomie, calcaire) au niveau de laboratoire de l'entreprise MFG.

#### ➤ **Sable**

**Tableau IV.1 : Analyse chimique par fluorescence X du sable.**

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PF
%	99,23	0,21	0,017	0,009	0,0013	0,0274	0,04	0,04	0,064	0,002	0,002	0,15

Le sable est très riche en silice, il est en plus dans les normes, doit être au minimum à 99,2%. L'alumine est elle aussi dans les normes exigées par l'entreprise, elle est de 0,2% et doit être inférieur à 0,3% pour le verre sodo-calciq. Le sable contient une quantité considérable d'oxyde de fer qui doit être prise en compte car il donne la coloration au verre et le reste des constituants du sable sont en conformité avec les exigences fixées par le MFG. Donc on peut dire que notre sable répond aux normes préconisées en industrie verrière.

#### ➤ **Feldspath**

**Tableau IV.2 : Analyse chimique par fluorescence X du feldspath.**

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	PF
%	69,54	16,57	0,33	0,12	0,118	2,03	10,76	0,033	0,50

Le feldspath est riche en silice mais doit être inférieur à 70%°, la quantité de l'alumine est de 16,57%, elle doit être supérieur à 16%. Le feldspath apporte aussi une bonne quantité d'alcalins sodium et potassium.

➤ **Calcaire**

**Tableau IV.3 : Analyse chimique par fluorescence X du calcaire.**

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PF
%	0,23	0,09	56,02	0,14	0,010	43,51

Le composant principal du calcaire doit être la chaux, avec une exigence égale à 56,02%, l'alumine est à 0,09%, elle est dans la norme puisqu'elle est inférieure à 0,15%.

➤ **Dolomie**

**Tableau IV.4 : Analyse chimique par fluorescence X de la dolomie.**

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PF
%	0,44	0,10	30,48	20,86	0,062	48,06

La dolomie présente plusieurs valeurs non conformes à la norme exigences par le MFG, tel que la présence de silice à 0,44% alors qu'elle doit être à moins de 0,1%, et l'oxyde de fer à 0,062% qui doit être à moins de 0,05%. Les éléments principaux de la dolomie sont le CaO et MgO et doit être au moins 30 et 21% respectivement.

**Tableau IV.5 : Exigences des compositions exprimées par MFG.**

Composé	Exigence	Valeurs	Conclusion
Sable	Silice > 99,2%	99,23 %	Conforme
	Alumine < 0,3%	0,2 %	Conforme
Feldspath	Silice < 70%	69,54 %	Conforme
	Alumine > à 16%	16,57 %	Conforme
Calcaire	La chaux > 56%	56,02 %	Conforme
	Alumine < 0,15%	0,09 %	Conforme
Dolomie	Silice < 0,1%	0,44 %	Non conforme
	Oxyde de fer < 0,05 %	0,062 %	Non conforme
	La chaux < 30%	30,48 %	Conforme
	Oxyde de magnésium > 21%	20,86 %	Conforme

En conclusion de l'analyse physico-chimique, sur les 10 paramètres à contrôler, 2 sont non conformes aux exigences de qualité de l'entreprise. Ces deux paramètres influent faiblement sur la qualité du produit final.

### IV.1.2. Analyse granulométrique

Nous allons présenter les mesures de granulométrie des matières premières MFG. Les histogrammes sont obtenus à partir des fractions massiques (%) en fonction de la taille des tamis en ( $\mu\text{m}$ ). Nous avons utilisé un tamiseur pour 10 tamis répartis comme suit.



Figure IV.1 : Tamis utilisés pour l'analyse granulométrique.

Le principal objectif de travail est de déterminer pour chaque composant du verre, la fraction des particules fines de diamètre inférieur à  $160 \mu\text{m}$ . Cela va nous aider à déterminer qui est le composant qui comporte le plus de ces particules et comment pouvoir y remédier.

#### ➤ Granulométrie du sable

La distribution des tamis utilisé est la suivante :

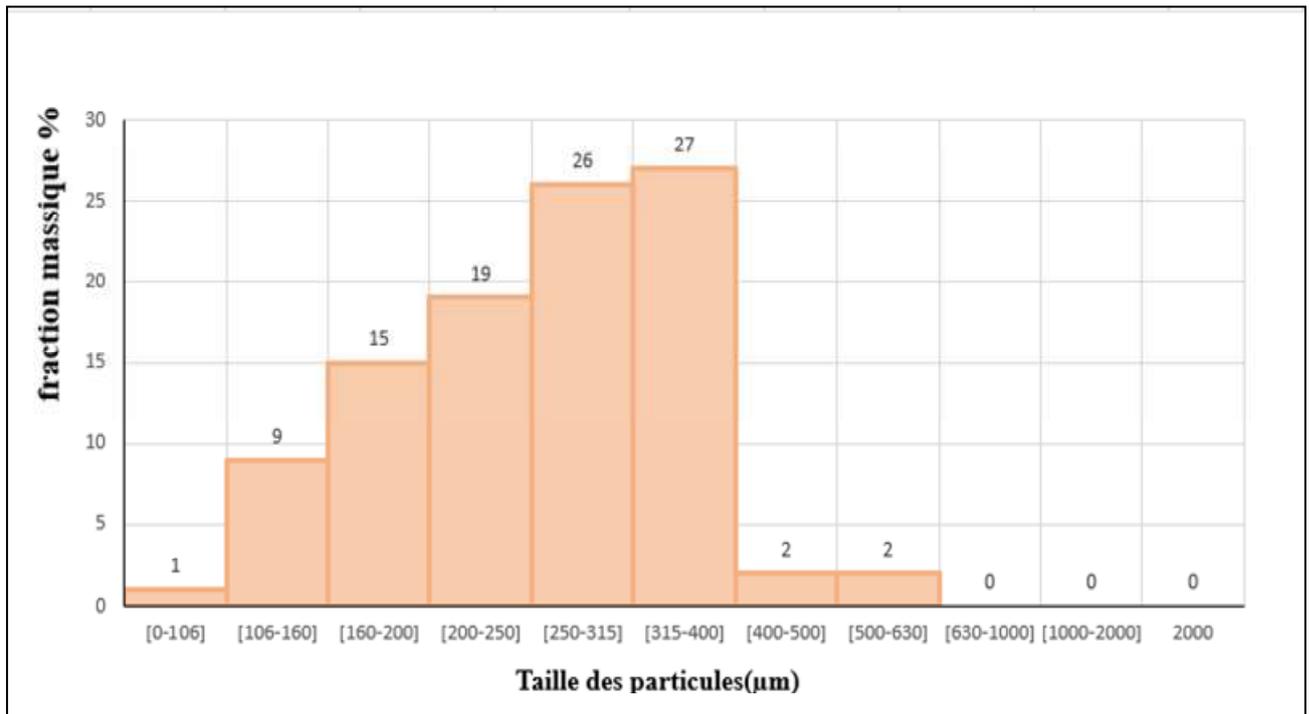
2000 1000 630 500 400 315 250 200 160 106 0 ( $\mu\text{m}$ )

On met  $m_i = 511 \text{ g}$ .

Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.6 : Analyse granulométrique du sable MFG.**

Tamis (µm)	Exigences Techniques	Fraction massique (%)
2000	0	0
1000	0	0
630	0	0
500	≤ 2	2
400	-	2
315	-	27
250	-	26
200	-	19
160	-	15
106	≤ 10	9
0	≤ 2	1



**Figure IV.2 : Histogramme de la distribution granulométrique du sable.**

On observe que les particules de taille entre 250 µm et 400 µm sont les prédominantes dans l'échantillon. Sable MFG est pauvre en grosse et fines particules avec un pourcentage de 0% pour les grosses particules (≥ 0,630 mm) et 10 % pour les fines

particules  $\leq 0,106$  mm. Ceci est un avantage qu'on a son utilisation dans l'industrie du verre.

➤ **Granulométrie de la dolomie**

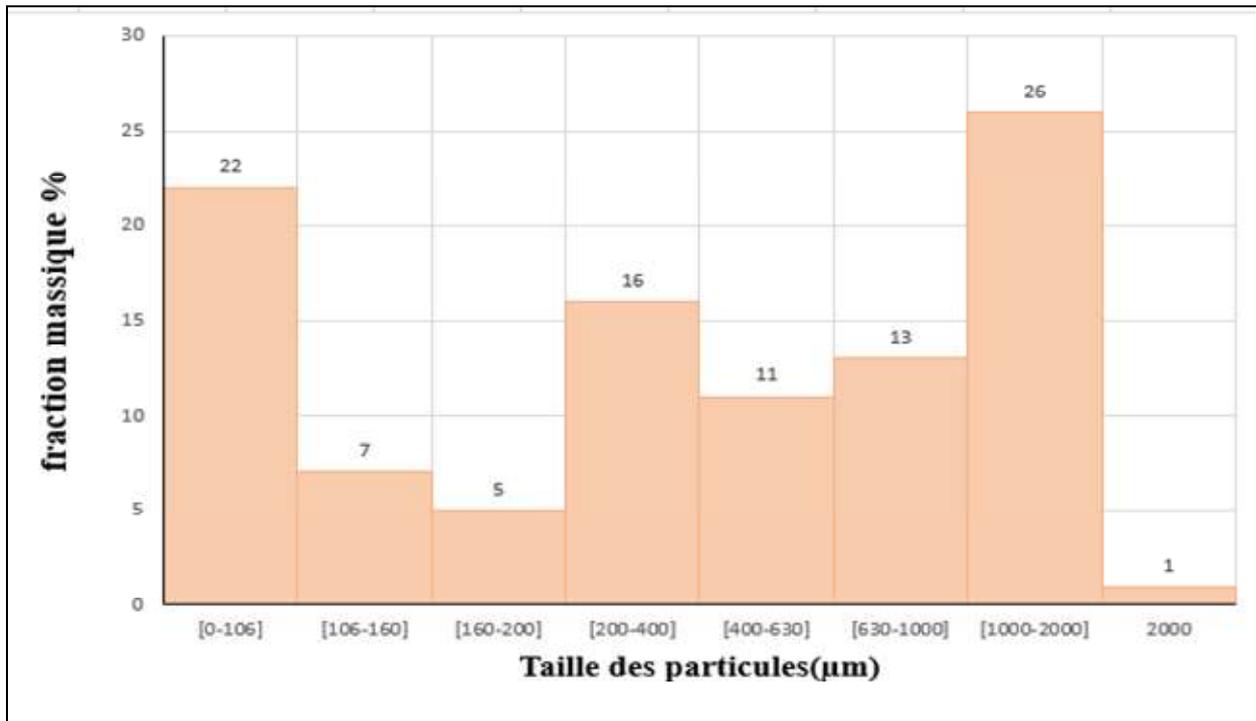
La distribution des tamis utilisé est : 2000 1000 630 400 200 160 106 0 ( $\mu\text{m}$ )

On met  $m_i = 462$  g.

Les résultats trouvés sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.7 : Analyse granulométrie de la dolomie MFG.**

Tamis ( $\mu\text{m}$ )	Exigences Techniques	Fraction massique (%)
2000	0	1
1000	$\leq 30$	26
630	-	13
400	-	11
200	-	16
160	-	5
106	$\leq 10$	7
0	$\leq 6$	22



**Figure IV.3 : Histogramme de la distribution granulométrique de la dolomie.**

D'après l'histogramme on remarque que la distribution des populations de grains représente deux pics importants au tour de 1000 μm jusqu'à 2000 μm avec un pourcentage de 26%, et au fonds dont le diamètre est inférieur à 106 μm avec un pourcentage de 22% qui est hors la norme. On peut dire donc que la dolomie est très riche en fine particule. Elle représente une source importante en fines particules sujet de notre étude.

➤ **Granulométrie du carbonate de soude**

La distribution des tamis utilisé est : 2000 1000 630 315 160 106 0 (μm)

On met mi = 430 g.

Les résultats sont élaborés sur le tableau suivant :

Tableau IV.8: Analyse granulométrique du carbonate de soude.

Tamis ( $\mu\text{m}$ )	Exigences Techniques	Fraction massique (%)
2000	0	0
1000	0	1
630	0	6
315	-	24
160	-	43
106	$\leq 10$	6
0	$\leq 2$	2

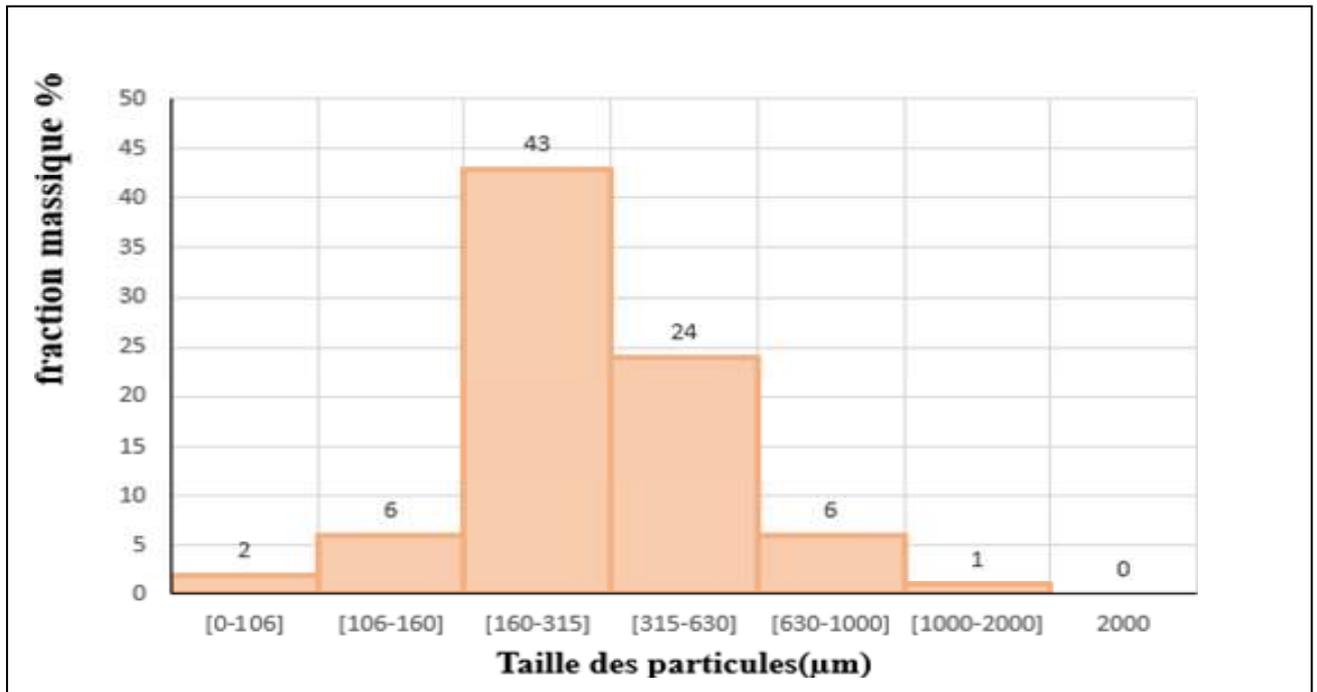


Figure IV.4 : Histogramme de la distribution granulométrique du carbonate de soude.

On peut dire que la distribution n'est pas homogène et que les particules de diamètre entre 315  $\mu\text{m}$  et 160  $\mu\text{m}$  est la population majoritaire avec un pourcentage de 43%. Le pourcentage des fines particules représente que 2% dans le carbonate de soude.

➤ **Analyse du charbon**

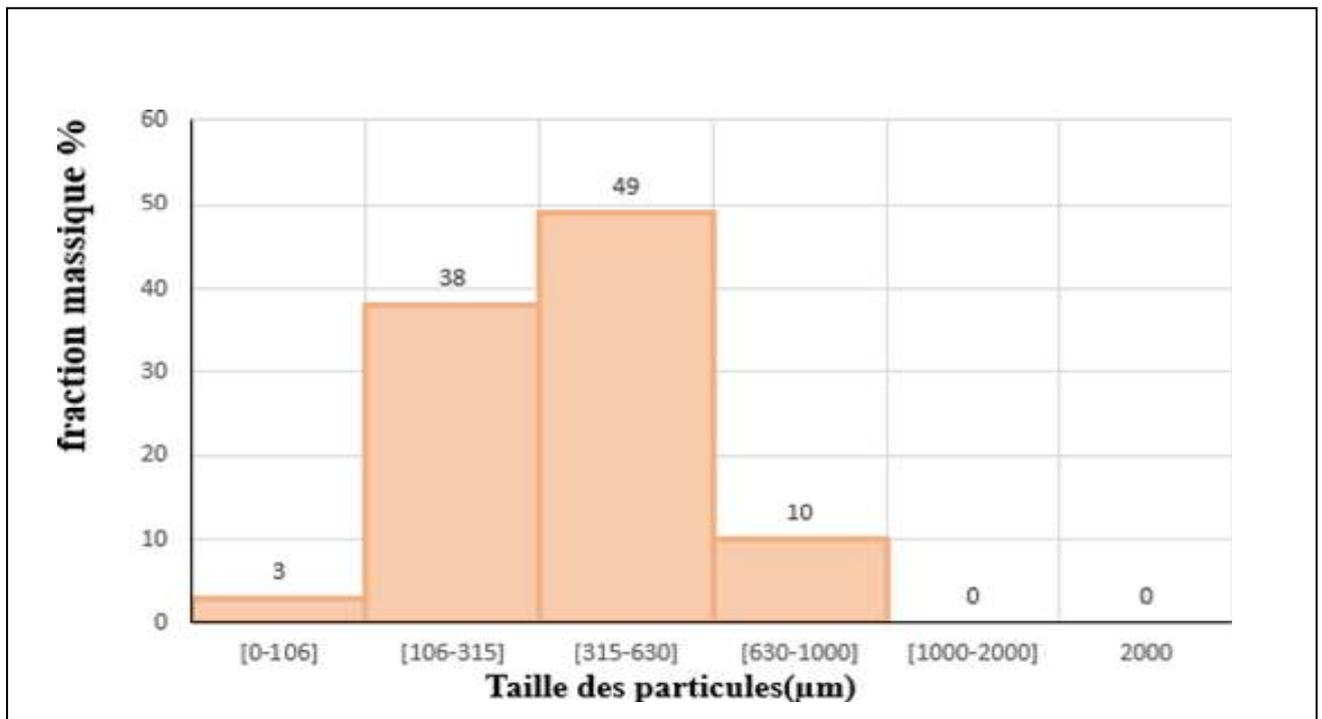
La distribution des tamis utilisé est : 2000 1000 630 315 106 0 (µm)

On met mi = 380.2 g.

Les résultats sont groupés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.9: Analyse granulométrie du charbon.**

Tamis (µm)	Exigences Techniques	Fraction massique (%)
2000	0	0
1000	0	0
630	-	10
315	-	49
106	≤ 40	38
0	≤ 5	3



**Figure IV.5 : Histogramme de la distribution granulométrique du charbon.**

On remarque la aussi que la distribution n'est pas homogène et que le charbon ne comporte pas de particules grosses. De plus les particules de diamètre entre 315 $\mu\text{m}$  et 106  $\mu\text{m}$  représentent le grand pourcentage de la population des grains de ce diamètre. Le pourcentage en fine particule est de l'ordre de 3%, particules dont le diamètre est inférieur à 106  $\mu\text{m}$ .

➤ **Analyse du carbonate de calcium**

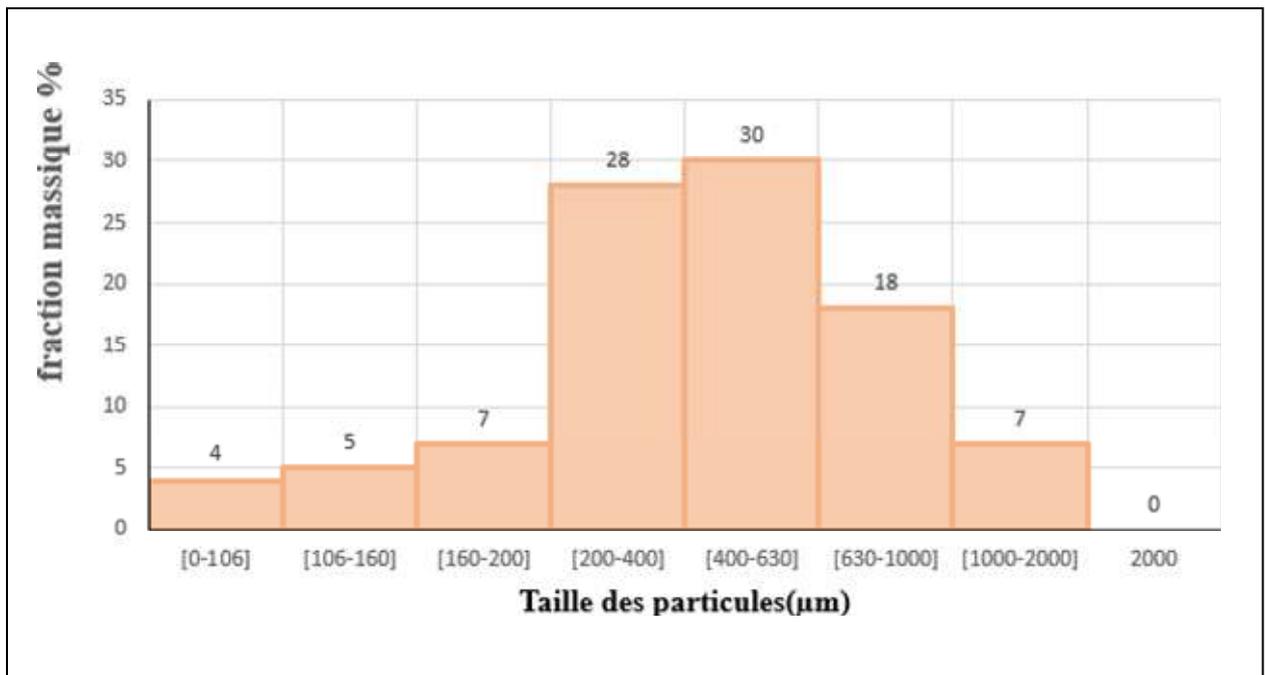
La distribution des tamis utilisé est : 2000 1000 630 400 200 160 106 0 ( $\mu\text{m}$ )

On met  $m_i = 478$  g.

Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.10 : Analyse granulométrie du carbonate de calcium.**

Tamis ( $\mu\text{m}$ )	Exigences Techniques	Fraction massique (%)
2000	0	0
1000	$\leq 30$	7
630	-	18
400	-	30
200	-	28
160	-	7
106	$\leq 10$	5
0	$\leq 6$	4



**Figure IV.6 : Histogramme de la distribution granulométrique du carbonate de calcium.**

On remarque que les particules de diamètre entre 400μm et 630μm représentent le grand pourcentage de la population des grains. Le carbonate de calcium présente une distribution régulière.

➤ **Sulfate de sodium**

La distribution des tamis utilisé : 2000 1000 630 315 160 106 0 (μm)

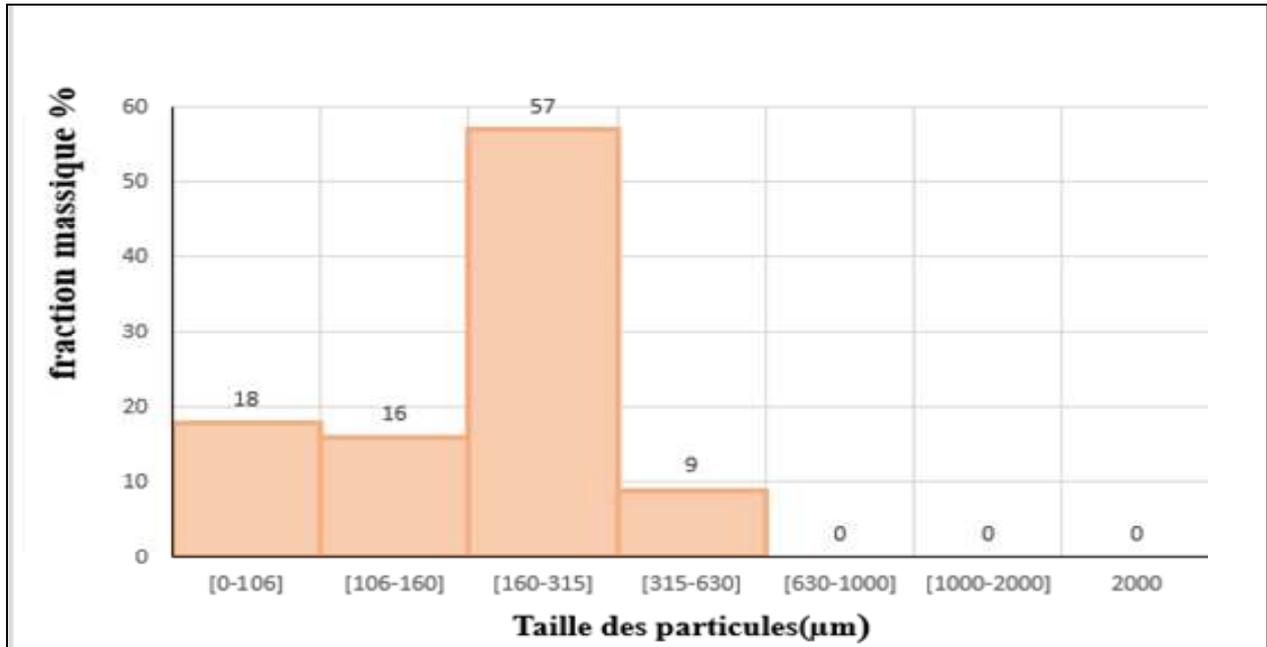
On met mi = 450,2 g.

Les résultats sont organisés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.11 : Analyse granulométrique du sulfate de sodium.**

Tamis (μm)	Exigences Techniques	Fraction massique (%)
2000	0	0
1000	0	0
630	≤ 2	0

315	-	9
160		57
106	$\leq 25$	16
0	$\leq 20$	18



**Figure IV.7 : Histogramme de la distribution granulométrique du sulfate de sodium.**

On peut remarquer que la distribution est asymétrique dont les particules de diamètre entre 315 μm et 160 μm représentent la population dominante. Aussi que les fines particules de taille  $\leq 160\mu\text{m}$  sont présentes avec un pourcentage quand même important de 34%.

➤ **Feldspath**

La distribution des tamis utilisé : 2000 1000 710 630 500 315 106 0 (μm)

On met mi = 441.3 g.

Les résultats sont organisés dans le tableau suivant :

Tableau IV.12 : Analyse granulométrie du feldspath.

Tamis ( $\mu\text{m}$ )	Exigences Techniques	Fraction massique (%)
2000	0	0
1000	0	0
710	0	0
630	$\leq 1$	1
500	$\leq 4$	5
315	-	32
106	-	57
0	$\leq 10$	4

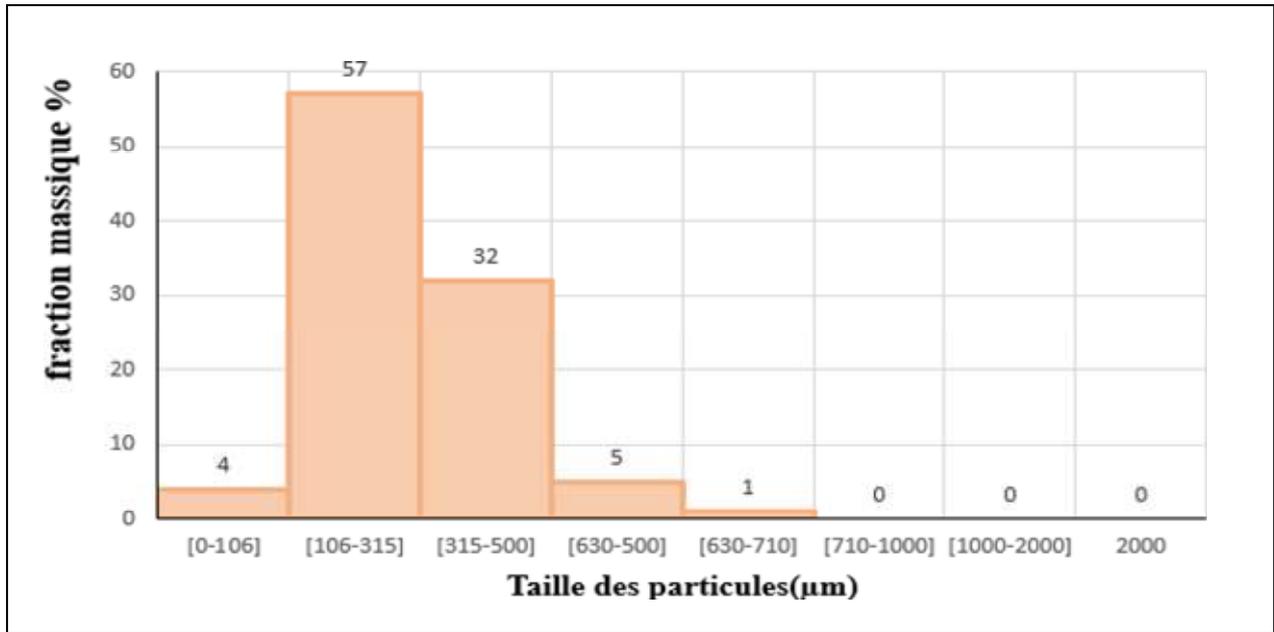


Figure IV.8 : Histogramme de la distribution granulométrique du feldspath.

La distribution granulométrique de feldspath montre qu'il est riche en particules de diamètre entre 315 $\mu\text{m}$  et 106 $\mu\text{m}$  avec un pourcentage de 57%.

**Récapitulation :**

D'après les résultats de l'analyse granulométrie des matières premières on peut dire que :

- ✓ La distribution des populations de grains est normale d'une taille moyenne.
- ✓ Les fines particules sont de diamètre  $\leq 160\mu\text{m}$ . Le charbon, feldspath et principalement la dolomie sont très riche en fines particules. Cette quantité est dû de traitement par phénomène de broyage des matières premières.

**Compilation des particules fines dans la charge de la fabrication verre :**

Pour déterminer l'origine des particules fines dans la charge du four, nous avons, sur la base de la distribution granulométrique, calculé le pourcentage de ces particules par composé dans la charge. Les résultats de ce calcul sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.13 : Fractions des particules fines dans la charge.**

<b>Matières premières</b>	<b>Composition de la charge (%)</b>	<b>% FP</b>	<b>% FP dans la composition</b>	<b>% FP dans la charge finale</b>
<b>Sable</b>	58,61	10	5,86	<b>45,53</b>
<b>Carbonate de soude</b>	18,60	8	1,48	11,51
<b>Dolomie</b>	17,08	29	4,95	<b>38,32</b>
<b>Calcaire</b>	3,29	9	0,29	2,29
<b>Feldspath</b>	1,59	4	0,06	0,49
<b>Sulfate de sodium</b>	0,77	34	0,26	2,03
<b>Charbon</b>	0,038	3	0,001	0,01
<b>Oxyde de fer</b>	0,02	0	0	0,00
<b>Total</b>	99,998	/	12,92	100,00

**Commentaire**

Nous remarquons que les particules fines proviennent principalement du sable et de la dolomie avec des pourcentages respectifs de **45,53%** et **38,32%**. Le sable est produit naturel, il ne subit pas un broyage avant son utilisation. Pour la dolomie, elle provient d'un fournisseur étranger dans des big bacs de 4 tonnes. La dolomie avant son utilisation est broyée et fournie

sou forme de poudre. L'étude de sa granulométrie montre une asymétrie dans sa distribution. Elle présente deux pics importants au tour de 1000  $\mu\text{m}$  jusqu'à 2000  $\mu\text{m}$  avec un pourcentage de 26%, et autre pic autour de 106  $\mu\text{m}$  avec un pourcentage de 22%.

On peut que dire la dolomie est une source très importante de particules fines qui sont responsable du dysfonctionnement du four. La fraction dans la dolomie est déjà importante, elle est de 29%. La fraction totale des fines particules dépasse les 12% ce qui représente selon les responsables de la production une forte proportion.

## **IV.2. Influence des fines particules**

### **IV.2.1. Action des fines particules sur l'alimentation du four de fusion**

Les fines particules peuvent avoir une influence importante sur l'alimentation du four en matières premières ainsi que les silos de stockage en raison de leurs capacités à modifier les propriétés du matériau stocké. Voici quelques effets courants :

#### **➤ Obstruction**

Les particules fines peuvent obstruer les conduits et les événements, réduisant la capacité de ventilation et de circulation d'air dans le silo, entraînant une accumulation de chaleur et un taux d'humidité élevée. La vidange par gravité est interrompue par la formation d'une voûte au-dessus de la sortie du silo ce qu'il résulte le bouchage de la canalisation.



**Figure IV.9 : Phénomène d'obstruction dans le silo de sable.**

➤ **Formation de ponts et d'entonnoirs**

Les silos peuvent rencontrer des problèmes d'écoulement en raison de la formation de ponts et d'entonnoirs causés par les particules fines.

Le flux de cheminée facilite la séparation des particules fines et grossières (les plus mobiles). Au cours du temps et à cause du phénomène de ségrégation, les particules fines se stagnent sur les parois des silos et commencent à former une couche conique dont l'épaisseur de cette dernière continue à se développer. Cette accumulation peut entraîner des modifications de la densité du matériau et une perte de capacité de stockage. Cependant, cette séparation peut avoir un produit non uniforme lorsqu'il est vidé.



**Figure IV.10 : Formation des entonnoirs dans les silos.**



**Figure IV.11 : Formation des ponts dans les silos.**

➤ **Compaction**

Les fines particules réduisent la capacité de stockage dans les silos par le phénomène de compaction ou elles se tassent en formant des blocs. Les blocs une fois dans le four présentent un gradient de température ce qui rend la fusion plus lente. Ces blocs exercent aussi une force de pression sur les parois du silo. Ils réduisent la perméabilité du matériau en augmentant la résistance à l'écoulement. Les fines particules peuvent éroder les parois du silo, réduisant ainsi leur capacité et leur durée de vie.



**Figure IV.12 : Formation des blocs dans le silo.**

➤ **Erosion et dégradation des parois**

La sédimentation des particules fines crée une humidité élevée, ce qui entraîne une érosion de la paroi du silo.

L'érosion des parois du silo peut entraîner une modification de la composition de son matériau constitutif, ainsi que des réactions avec le matériau conservé à l'intérieur, et donc une modification de sa composition.



**Figure IV.13 : Dégradation des parois d'un silo par les fines particules.**

Tous les phénomènes susmentionnés affectent la quantité de flux de matière première entrant à la zone de fusion dans le four. Par conséquent la diminution de la quantité de flux de matières premières entraîne une diminution du rendement du four par une perte importante de l'énergie fournie à cause du déséquilibre entre la quantité de matières en fusion et la quantité d'énergie thermique fournie.

#### **IV.2.2. Action des fines particules sur le régime thermique du four**

Les fines particules, également appelées poussières, peuvent avoir une influence significative sur le four de fusion dans l'industrie. Elles proviennent de la condensation d'espèces chimiques résultant de la volatilisation et recombinaison de composés présents dans le bain de verre lors de son élaboration. Elles sont aussi causées par la présence d'impuretés dans les carburants ou de l'envolement des matières premières sous forme solide.

Pour mieux comprendre leur impact sur le four on commence par clarifier la structure de four et leur principe de fonctionnement.

##### **➤ Principe de fonctionnement du système de régénération**

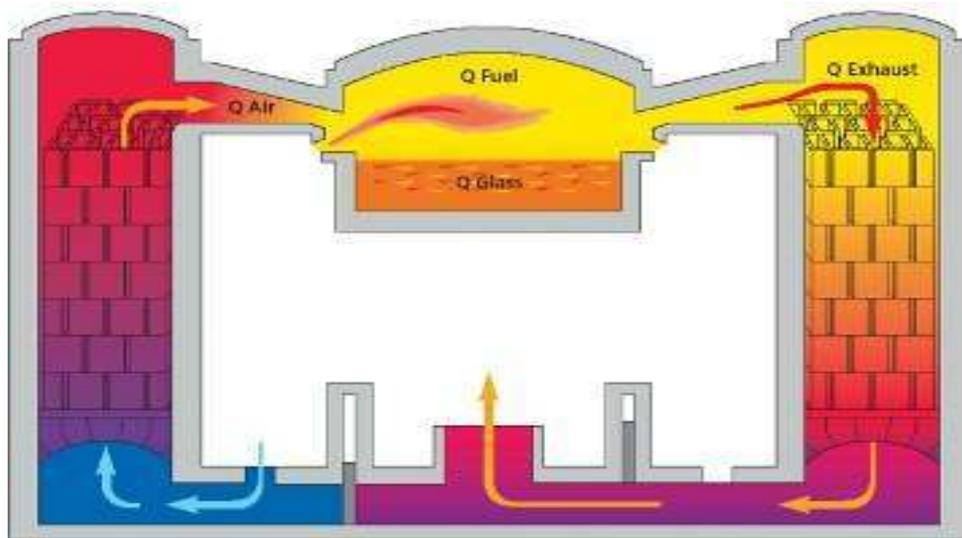
Le four à flamme régénératif possède deux sections principales : une chambre de combustion et un système de régénération qui sont répartis des deux côtés du four. Il fonctionne dans un cycle de 20 min.

Les régénérateurs sont une série de chambres garnies par des éléments céramiques, formant un empilement qui récupère la chaleur selon un cycle. Chaque régénérateur contient

environ de 5000 briques d'empilage. Le principe de ce système est que les gaz chauds ou fumées évacués du four en fonctionnement pénètrent dans la cheminée par la partie supérieure du régénérateur, et libèrent leur énergie calorifique dans la cheminée. L'énergie calorifique libérée va être absorbée par les briques d'empilage. Pendant ce temps, l'air froid est acheminé à la base d'une autre cheminée, qui a été chauffée lors d'un cycle précédent pour récupérer l'énergie thermique. La rencontre du combustible et de l'air conduit à une combustion qui peut atteindre des températures de 1500 °C.



**Figure IV.14 : Brique d'empilage dans les régénérateurs.**

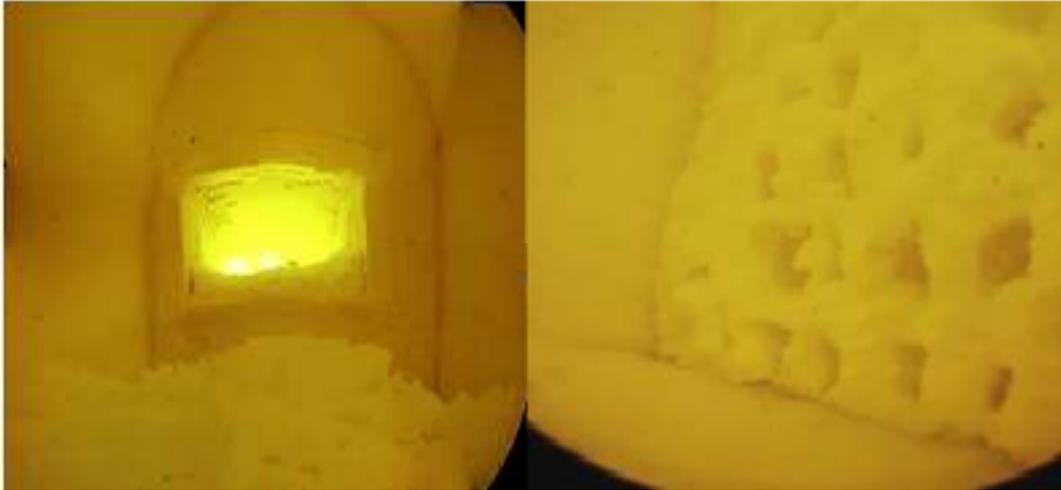


**Figure IV.15 : Représentation du four de fusion et système de régénération.**

➤ **Blocage des conduits d'air de combustion et des fumées**

Le problème des fours de fusion du verre est la présence de déchets et particules fines du fait des caractéristiques des matières premières utilisées. Ces particules fondent et

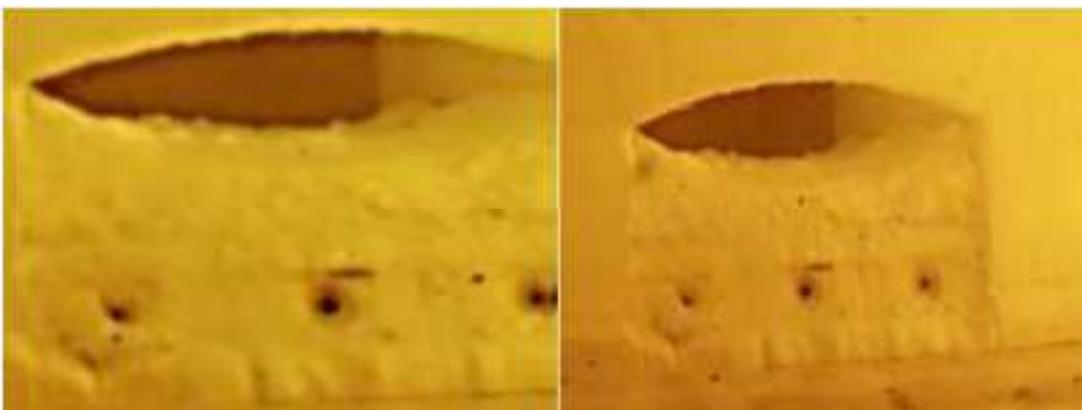
s'accumulent, formant couches après couches. L'accumulation de ces particules à l'intérieur des canaux conduit à leur blocage, et il y a donc un déficit dans la quantité d'air dont le gaz a besoin pour démarrer le processus de combustion et la fusion de la matière première.



**Figure IV.16 : Bouchage des conduites de four par les particules fines en fusion.**

➤ **Blocage des conduites de gaz**

Les fines particules peuvent obstruer les conduits de gaz, réduisant ainsi le débit de gaz de combustion nécessaire pour alimenter les brûleurs du four. Cela peut entraîner une diminution de la température dans le four, ce qui peut affecter la fusion totale de la matière première et par la suite la qualité du produit final.



**Figure IV.17 : Conduites de gaz bouchées par les particules fines.**

➤ **Constitution des zones d'échauffement**

Le voute du four de fusion du verre contient des trous qui le refroidissent et réduisent la chaleur. La présence d'amas de particules fines chaudes au-dessus de la voute aurait constitué des zones d'échauffement qui peuvent boucher ces pores et stopper le refroidissement du four. Elle peut aussi mener à une dégradation rapide des briques réfractaires (plus la brique chauffe, plus la résistance diminue) cela peut entraîner l'effondrement de la voute, c'est ce qui s'est passé dans une verrerie en France. Elles peuvent également adhérer aux parois du four, ce qui peut réduire l'efficacité énergétique du four en réduisant le transfert de chaleur de la flamme au verre en fusion. Cela peut entraîner une consommation d'énergie accrue et des coûts de production plus élevés.



**Figure IV.18 : Zone d'échauffement dans les parois du four avec accumulation de particules fines.**

➤ **Influence sur le système de régénération**

Le mouvement des particules fines et leurs dégâts affectent le système de régénération et plus particulièrement les briques réfractaires. La surface de ces briques s'use avec le temps en raison du frottement des particules du matériau fabriqué et de la chaleur. Lorsque leur épaisseur devient trop fine, les briques perdent leur force isolante, réduisant l'efficacité énergétique du procédé. Ces particules s'accumulent et provoquent également leurs colmatages dans les briques, empêchant ainsi le passage de l'air à la chambre de combustion, tout en retenant les fumées de combustion à l'intérieur du four et en les empêchant de s'échapper.

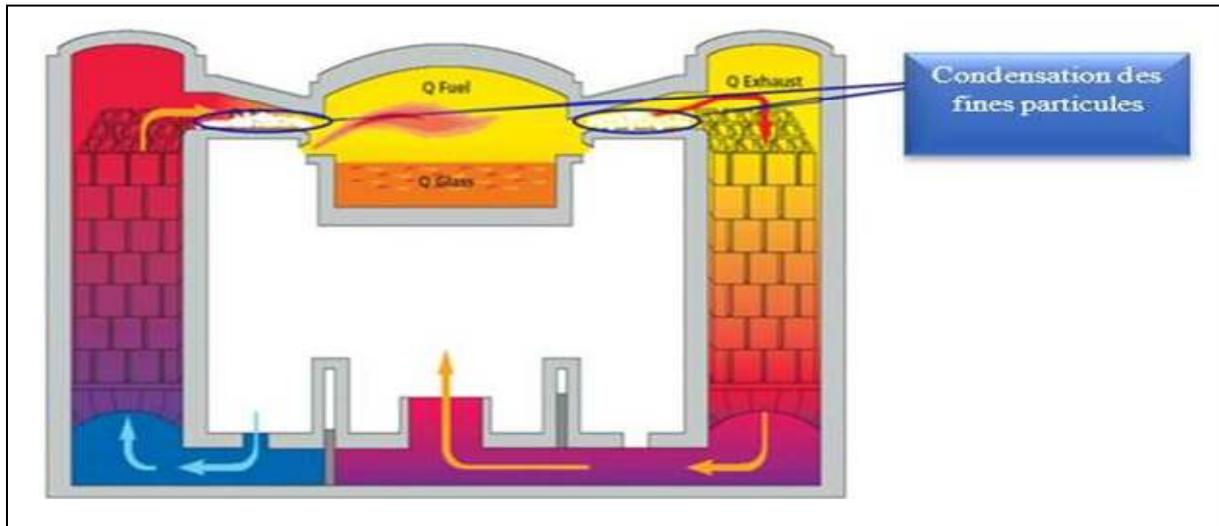


Figure IV.19 : Représentation du bouchage de système de régénération par les fines particules.

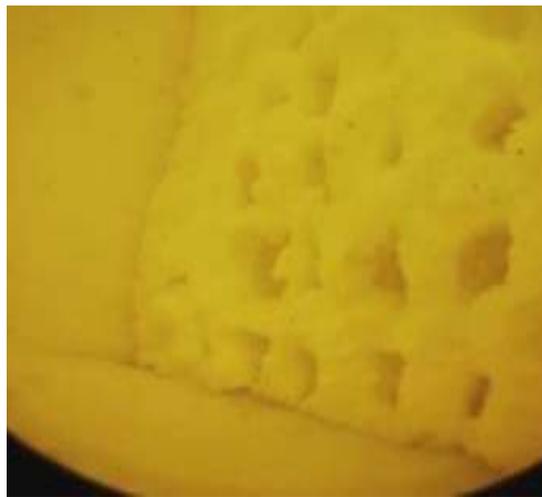


Figure IV.20 : Brique réfractaire bouchée par les fines particules.

### IV.3. Solutions proposées pour éliminer les fines particules

Les fines particules présentent un défi pour l'industrie des verres en termes des pertes de matière première et surtout leurs impacts sur les silos et sur le four de fusion.

Pour minimiser l'impact des particules fines sur le four de fusion, il est important de mettre en place les mesures de contrôle suivantes :

### **IV.3.1. Filtre à manche**

Ce type de filtre capte les poussières et les fines particules contenus dans le sable ou la dolomie à l'aide des manches. On place le filtre à la sortie des silos du calcin pour minimiser le pourcentage des fines particules entrantes dans le four.



**Figure IV.21 : Filtre à manche.**

### **IV.3.2. Débouchage thermique**

Cette opération se fait à l'aide de gros brûleurs pour faire fondre des couches de fines particules colmatées.

MFG utilise un brûleur de type FOSBEL. Une électrode allumée à la flamme sera injectée verticalement dans l'ouverture bouchée de la chambre de régénération à une température de 1000 °C durant 24 heures. Les couches des fines particules commencent à fondre et se décolmater de la surface de brique d'empilage et des parois du four. L'inconvénient de procédé est de mettre à dure épreuve les briques d'empilages et les rendent plus fragiles.



Figure IV.22 : Bruleur FOSBEL pour décolmater les fines particules.



Figure IV.23 : Bruleur FOSBEL en action dans le four.

### IV.3.3. Changement des briques d'empilages

Le remplacement des briques d'empilages se fait lorsque l'opération de débouchage thermique ne donne pas des résultats satisfaisants cela veut dire que l'épaisseur de la couche colmatée nécessite une quantité plus de chaleur. Le changement implique l'achat d'un nouvel

empilage en fonction des dimensions exacte des chambres de régénération. L'opération est très couteuse et se fait par un groupe des techniciens professionnel. Il s'agit la d'une solution ultime lorsque le colmatage des fines particules est à l'extrême.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Ce projet de fin d'étude réalisé au niveau de l'entreprise MFG à Meftah, wilaya de Blida, nous a permis en premier lieu de confronter nos connaissances théoriques avec une expérience pratique, un rapprochement avec le monde du travail et les difficultés quotidiennes que peut avoir l'industrie verrière. L'objectif était avant tout d'exploiter les différentes étapes d'élaboration du verre plat avec une nouvelle technologie appelée Float Glass.

Dans un deuxième lieu nous avons fait un diagnostic global de l'influence des fines particules sur l'alimentation du four de fusion et son régime thermique. Les résultats issus de notre étude conduisent aux conclusions suivantes :

Les résultats d'analyse fluorescence X de la matière première, sable ( $\text{SiO}_2$ ), feldspath et calcaire, sont conformes dans leurs compositions avec ceux exigés par l'entreprise et les normes internationales.

Les résultats d'analyse fluorescence X de la dolomie se sont révélés non conformes aux exigences requises. Ils présentent des valeurs élevées de silice, de l'ordre de 0,44% alors qu'elle doit être à moins de 0,1%. L'oxyde de fer lui aussi est élevé (0,062%) alors qu'il doit être à moins de 0,05%.

L'analyse granulométrie a démontré que la dolomie est la source principale des fines particules qui sont la cause du dysfonctionnement du four. Leur fraction dépasse les 29%, ce qui représente 4,95% dans la charge du verre. Ce taux est assez élevé dans la charge en cumulant par tous les autres composants du verre ; ce qui dépasse les 12%. Pour réduire cette fraction, nous avons proposé la mise en place d'un autre filtre à manche au niveau des silos de la dolomie. Ce filtre doit réduire les particules fines dans cette fraction et par conséquent dans la charge.

Les fines particules ont un grand impact sur le four de fusion et sa stabilité. L'accumulation de ces particules réduit son efficacité dans le transfert de chaleur et augmentent la consommation de l'énergie. Le colmatage des fines particules au niveau des chambre de régénération est responsable de l'accumulation des gaz brûlés dans le four et la réduction du rendement des brûleurs. Le procédé de débouchage thermique est la meilleure solution actuellement, pour l'élimination des couches colmatées. Son utilisation est ultime lorsque le colmatage atteint un niveau très élevé.



# **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] T. BEKAKRIA, T. BELABED, « Elaboration et étude des propriétés physico-chimiques du verre sodocalcique de l'industrie du verre MFG Algérie », Mémoire master, Université 8 Mai 1945, Guelma, Juin 2022.
- [2] <http://www.mfg.dz>, Site officiel de MFG CEVITAL.
- [3] CEVITAL, « Inauguration de la deuxième ligne de production de verre plat », Le Quotidien d'Oran du 10 septembre 2019.
- [4] MFG, « La 2ème ligne de production de verre Float inaugurée », *DZ Entreprise* du 10 septembre 2019.
- [5] S. MEFTAHA, Y. HAFSI, « Optimisation des paramètres de bain d'étain et l'étenderie pour améliorer le rendement lors de la production du verre mince 3mm », Mémoire Master en Science des matériaux, Ecole nationale supérieure des mines et de la métallurgie, Amar Laskri Annaba, 2021.
- [6] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Mediterranean\\_Float\\_Glass](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mediterranean_Float_Glass) « Cevital conforte ses investissements en Algérie », sur *ecodafrik.com* (consulté le 15 novembre 2016).
- [7] A. BOUTALEB.J. GUENDOZ. « Etude d'élaboration d'un verre aluminosilicate », Mémoire Master, Ecole nationale supérieure des mines et de la métallurgie, Amar Laskri Annaba, 2021.
- [8] La distribution de l'entreprise MFG CEVITAL <http://www.CEVITAL.com/Fr/mfg.htm>
- [9] J. Zarzycki, « Les Verres et l'État Vitreux », Edition Masson, New-York, 1982.
- [10] H. Masuda, Y. Ohta, and K. Morinaga, *J. Jpn. I. Met.* 59(1), 31 (1995).
- [11] « La chimie et l'art », vol. 228page, 2010.
- [12] C. MAZIERES, « Les solides non cristallins », Presses universitaires de France, 1978.
- [13] N. BERKANE, « propriétés des matières premières et leurs rôles sur la qualité du verre plat », Mémoire de master, Université de Blida -1-, 2014/2015.

- [14] Glas Trosch Holding AG, Conseil, Bützberg « Le verre et ses applications », 4ème édition, 2013
- [15] M. HADJ AMAR, A. HAMMOUDA, « caractérisation d'un verre plat float glass érode par sablage », Mémoire master, université M'hamed Bougara - Boumerdes, 2017
- [16] A. KERMICHE, « étude de l'effet de HF sur l'état de surface d'un verre érode par sablage », Mémoire de magister, Université de Ferhat Abbas-Sétif, 2010, p16.
- [17] J. BARTON, C. GUILLEMET « LE VERRE, Science et technologie », 2005.
- [18] M. P. GLEMOT, Thèse de doctorat de l'université de Rennes, 1999.
- [19] Pr. A. IRATNI, « cours verre -MCQ », 2012-2013.
- [20] Documents techniques MFG.
- [21] J.O. ISARD, « Electrical conduction in the aluminosilicate glasses », Article, 1989.
- [22] Pr. A. AYADI « technologie de verre », INMC-Boumerdes.
- [23] W. C. BAUER, A. R. CONROY, W. H. MANRING, «The Role of Sulfate in the Melting and Fining of Glass Batch», Glass industry, 47, 1966.
- [24] World Coal Institute (WCI), « Le charbon comme ressource », mai 2005.
- [25] A. AMIROUCHE « Étude du verre Float de l'industrie verrière Mediteranean Float Glass "MFG" Algérie », Mémoire master, Université 8 Mai 1945, Guelma, 2021.
- [26] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/four.html>
- [27] A.BENALI , A.BOULAL, Memoire master « Realisation et caractérisation de mini-four pour céramique », .Université Dr. Yahia FARES, Médéa, 2021.
- [28] O. AUCHET , « Contribution à la modélisation simplifiée des fours verriers », Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, 2005.

- [29] <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/document-conseils-particules-fines-pm2-5-air-interieur-residentiel.html> document conseils sur les particules fines dans l'air intérieur résidentiel
- [30] [https://document.environnement.brussels/opac\\_ccs/elecfile/Air%2023](https://document.environnement.brussels/opac_ccs/elecfile/Air%2023) AIR2023 « Les particules fines (PM10.5) »
- [31] <https://www.asef-asso.fr/production/les-particules-fines-la-synthese-de-lasef/> Association santé environnement France « les particules fines- la-synthèse de l'ASEF »
- [32] V. Ramage, "Une représentation simplifiée d'une flamme de four industriel verrier," 2018.
- [33] M. GHOMARI F, A. BENDI-OUIS, "Analyse granulométrique", cours, Université de ABOUBEKR BELKAID, 2008.
- [34] <https://www.usherbrooke.ca/pram/les-techniques/rayons-x/fluorescence-x> université de sherbrooke
- [35] V. Thirion-Merle, « Spectrométrie de Fluorescence », collection science et archéologie, CNRS, 2014.